

**Сокращение оледенения хребта Улахан-Чистай (горы Черского) в 1970–2018 гг.**

© 2022 г. А.Я. Муравьев\*, Г.А. Носенко

Институт географии РАН, Москва, Россия

\*anton-yar@rambler.ru

**Reduction of glaciers in the Ulakhan-Chistay Range (Chersky Mountains) from 1970 to 2018**

A.Ya. Muraviev\*, G.A. Nosenko

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

\*anton-yar@rambler.ru

*Received October 26, 2021 / Revised December 26, 2021 / Accepted April 1, 2022***Keywords:** *mountain glaciers, Ulakhan-Chistay Ridge, Chersky mountain system, reduction of glacier area, morphological types, altitude distribution, satellite imagery, digital elevation model.***Summary**

The paper presents new data on the state of glaciers of the Ulakhan-Chistay Ridge (Chersky mountains) in 2018. Estimates of changes in the glaciation obtained in this region over the period 1970–2018 are based on the analysis of different in time satellite surveys and historical data. In 2018, the glaciation of this area was represented by 90 glaciers with a total area of  $54.0 \pm 5.2$  km<sup>2</sup>. Among the morphological types, corrie and valley glaciers predominate. The largest areas are occupied by valley and compound valley glaciers. The main part (67.5%) of the total glaciation area is concentrated within the altitude range 2000–2400 m. The changes in the glaciation area were analyzed over following four periods: 1970–2018, 1970–2001, 2001–2012, and 2012–2018. For 1970–2018, the area local glaciers registered in the USSR Glacier Catalog and identified on the present-day satellite images decreased from 82.2 to  $53.9 \pm 5.2$  km<sup>2</sup>, that is by 28.3 km<sup>2</sup> (34.4%). In this value, 12.4 km<sup>2</sup> were lost in 1970–2001, 8.4 km<sup>2</sup> – in 2001–2012, and 7.5 km<sup>2</sup> – in 2012–2018. By 2018, small glaciers with an area of less than 0.1 km<sup>2</sup> (73%) had shrunk the most, and the least – large glaciers with an area exceeding 2 km<sup>2</sup> (17%). The glaciers of the north-eastern exposure decreased the most significantly (49.3%). The average rate of area reduction increased from 0.49%/year in 1970–2001 to 1.34%/year in 2001–2018 (1.09%/year in 2001–2012, 2.04%/year in 2012–2018). Glaciers shrank against the background of a gradual rising in summer air temperatures (about 1.5 °C over the past 50 years) with a slight change in the winter precipitation. The more intensive shrinking of glaciers over the past two decades was caused by the stable positive anomaly of summer air temperatures, which remained since 2005 to the present.

**Citation:** Muraviev A.Ya., Nosenko G.A. Reduction of glaciers in the Ulakhan-Chistay Range (Chersky Mountains) from 1970 to 2018. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2022, 62 (2): 179–192. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422020124, edn: eofmfi.

*Поступила 26 октября 2021 г. / После доработки 26 декабря 2021 г. / Принята к печати 1 апреля 2022 г.*

**Ключевые слова:** *горные ледники, хребет Улахан-Чистай, горы Черского, сокращение площади ледников, морфологические типы, высотное распределение, спутниковые съёмки, цифровая модель рельефа.*

Представлены данные о размерах, морфологии и высотных характеристиках оледенения хр. Улахан-Чистай (горная система Черского) в 2018 г. Проанализированы изменения площади ледников за четыре периода: 1970–2018, 1970–2001, 2001–2012 и 2012–2018 гг. Рассмотрено высотное распределение оледенения в 2001, 2012 и 2018 гг. Установлено существенное увеличение средней скорости сокращения площади ледников в XXI в. по сравнению с последней третью XX в.: 0,49%/год в 1970–2001 гг.; 1,09%/год в 2001–2012 гг.; 2,04%/год в 2012–2018 гг.

**Введение**

Горная система Черского – один из наиболее труднодоступных и наименее изученных ледниковых районов Евразии – расположена в северо-восточной части России. Она образована множеством горных хребтов, простирающихся примерно на 1000 км с северо-запада на юго-восток и разделённых межгорными

депрессиями [1]. Наибольшие высоты наблюдаются в юго-восточной части района – в центральной части хр. Улахан-Чистай, где расположена самая высокая вершина Северо-Востока континентальной части России (исключая Камчатку) – гора Победа (3003 м). Климат района – резко континентальный. С его подробным описанием можно ознакомиться в работах [1–3]. В горах Черского распространены

долинные, сложные долинные, каровые и висячие ледники [1]. По данным работы [4], базовая высота границы питания в этом районе в 1970-х годах находилась на высотах 2150–2180 м, что примерно на 200 м ниже (2350–2400 м), чем в расположенных южнее горах Сунтар-Хаята. Величина аккумуляции–абляции на высоте границы питания ледников района, как правило, не превышает 1000 мм в.э. (карта 214 [5]). Согласно оценке А.Н. Кренке [6], объём льда, содержащегося в ледниках гор Черского, составлял (на время создания Каталога ледников СССР [1]) около 12 км<sup>3</sup>. Суровые климатические условия способствуют распространению в областях аккумуляции ледников данного района зоны ледяного питания [2]. Наиболее полно специфика режима ледников горной системы Черского описана в работах [2, 3].

До 1930-х годов сведений об оледенении гор Черского в научной литературе не было. В своей работе 1931 г. [7] С.В. Обручев писал о «вечных снегах» этого района. Однако первая достоверная информация о наличии там ледников была получена только в ходе геологических работ 1939–1940 гг. [1]. Первая попытка каталогизации ледников гор Черского была предпринята Л.Л. Берманом в 1940-х годах. В его работе [8] приведены схема расположения и каталог ледников Буордахского массива (высокогорный массив в центральной части хр. Улахан-Чистай в районе горы Победа), содержащие сведения о 69 ледниках общей площадью 205 км<sup>2</sup>. Данные были получены Л.Л. Берманом в результате обработки материалов аэрофотосъёмки, проводившейся в горах Черского с 1944 г. [8]. Исследование Ю.Н. Попова [9] дало результат, существенно отличающийся от результатов Л.Л. Бермана. Площадь 80 ледников и снежников, обнаруженных им в пределах Буордахского массива, составила 94,26 км<sup>2</sup>. При этом, согласно его оценке, 24 долинных ледника имели суммарную площадь 60,96 км<sup>2</sup>, а 22 висячих ледника – 16,95 км<sup>2</sup>.

Количественная оценка всего оледенения гор Черского впервые была сделана А.П. Васьковским и представлена в публикации 1955 г. [10]. Он обнаружил 223 ледника общей площадью 147 км<sup>2</sup>. В работе [11] приводятся описание и схема оледенения Буордахского массива. Автор оценил площадь оледенения данного района

в 95 км<sup>2</sup>. Он отметил также значительную разницу в оценках числа ледников, сделанных Л.Л. Берманом [8], Ю.Н. Поповым и А.П. Васьковским [10]. В 1968 г. К.Н. Рудич в своей работе [11] подверг сомнению количественные оценки, сделанные в работах этих исследователей, отметив, что точное число ледников невозможно определить даже по имеющимся аэрофотоснимкам района.

В 1971–1976 гг. в горах Черского проводили полевые гляциологические исследования. В работе [12] приведены данные о количественных характеристиках оледенения хр. Улахан-Чистай, где было обнаружено 98 ледников общей площадью 83,22 км<sup>2</sup>. Для 78 ледников площадью более 0,1 км<sup>2</sup> был определён морфологический тип.

В 1981 г. вышел том Каталога ледников СССР [1] с данными каталогизации ледников горной системы Черского. Он был составлен по результатам обработки материалов аэрофотосъёмки 1970 г., данным анализа крупномасштабных карт и полевых работ 1971–1976 гг. Некоторые параметры ледников района (например, высота фирновой линии) были уточнены по материалам аэрофотосъёмки 1972 и 1975 гг. Каталог содержит информацию о морфометрических и морфологических характеристиках ледников гор Черского на начало 1970-х годов, а также общую информацию об исследовании его оледенения в предшествующий период. Всего в горах Черского, по данным этого Каталога [1], находилось 210 ледников площадью не менее 0,1 км<sup>2</sup>, занимавших суммарную площадь 141,8 км<sup>2</sup>. Из них 18,7 км<sup>2</sup> было покрыто поверхностной мореной. Кроме того, обнаружено 108 ледников размером менее 0,1 км<sup>2</sup> общей площадью 6,5 км<sup>2</sup>. Подробной информации о ледниках подобного размера в главной таблице Каталога не приведено. Отметим, что данные о площади оледенения района в Каталоге [1] близки к данным в работе А.П. Васьковского [10].

В публикации В.С. Шейнкмана 1987 г. обобщены, проанализированы и дополнены имеющиеся на то время сведения о ледниках гор Черского [2]. По данным автора этой работы, в горах Черского находилось 372 ледника общей площадью 155,3 км<sup>2</sup>. Автор отметил, что ледники гор Черского имеют хорошо выраженные признаки отступания. Кроме того, установлены тенденции к сокращению долинных ледников и

отделению их боковых притоков, а также к отступанию вверх по склону каровых ледников. Особое внимание уделено анализу взаимосвязей ледников и наледей данного района.

В работе М.М. Корейши 1991 г. проанализированы особенности существования горного оледенения в условиях континентального и резко континентального климата, описаны также закономерности развития оледенения Верхоянско-Колымской области в целом и горной системы Черского в частности [3]. Ледники, снежники и наледи рассмотрены автором как составные части единой гляциальной системы. В 1995 г. Р.В. Седов провёл маршрутное обследование ряда ледников Буордахского массива в районе горы Победа (3003 м), охарактеризовал их и оценил занимаемую ими площадь [13]. Основным объектом его исследований – тысячи ледники.

В дальнейшем новые сведения о состоянии ледников гор Черского получали в результате анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В работе [14] оценены площадь части оледенения гор Черского по состоянию на 2001 г. и её изменение со времени каталогизации (материалы Каталога [1]). По данным авторов, площадь части ледников района (84,2 км<sup>2</sup> по Каталогу) сократилась за 1970–2001 гг. на 23,4 км<sup>2</sup>, или 28%.

Относительно современные данные о параметрах оледенения горной системы Черского можно найти в Международном каталоге Randolph Glacier Inventory (далее RGI) версии 6.0 [15]. По данным RGI 6.0, в горах Черского расположено 193 ледника общей площадью 72,1 км<sup>2</sup>. Границы ледников в RGI 6.0 на этот район получены методом автоматизированного дешифрирования спутниковых снимков Landsat и ASTER 1999, 2007, 2009 и 2013 гг. Данные этого каталога на район хр. Улахан-Чистай основаны на результатах обработки спутниковых снимков 2009 и 2013 гг.

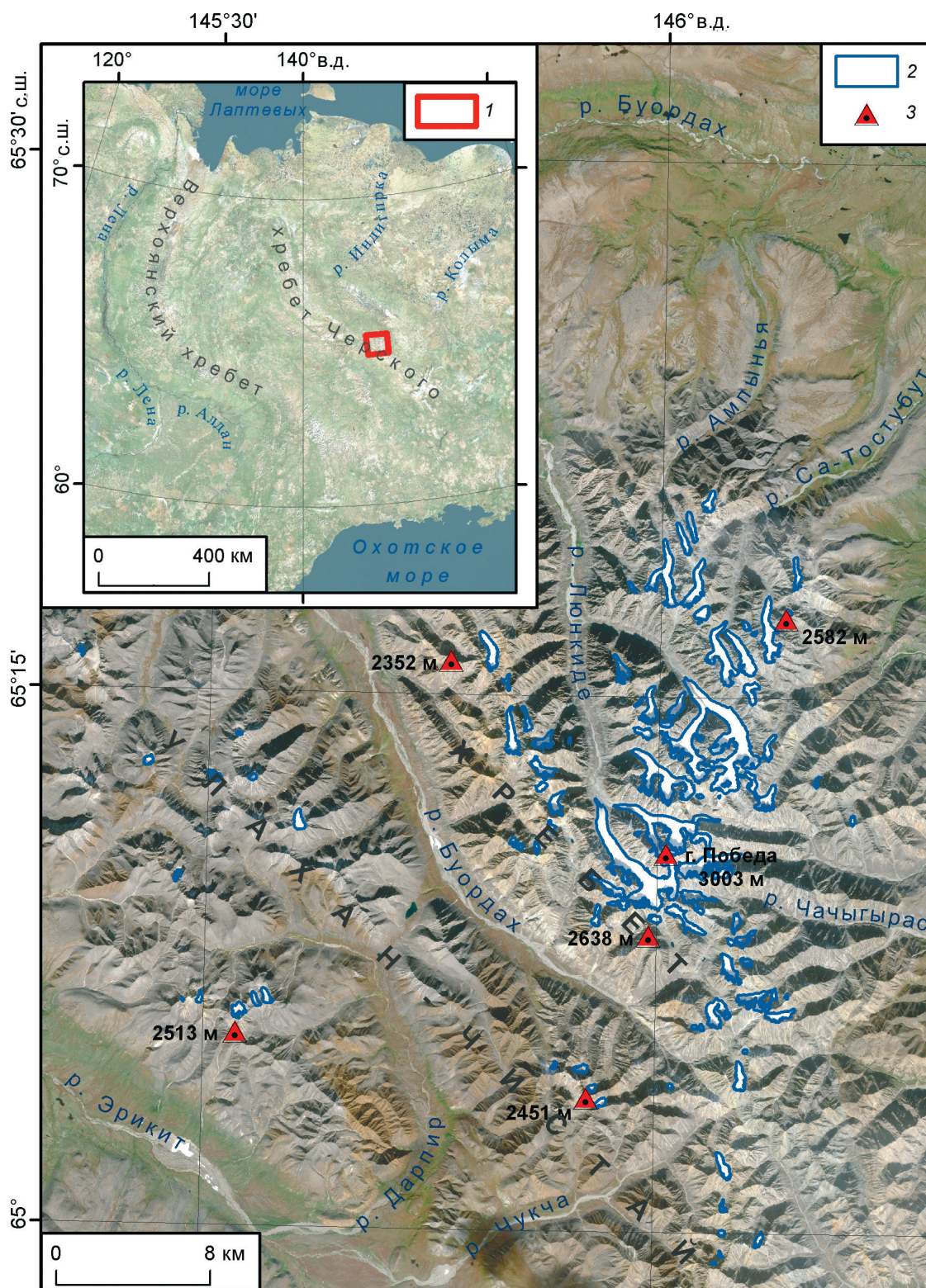
В настоящее время, когда сокращение ледников повсеместно ускоряется, необходимо обновление данных о параметрах оледенения горной системы Черского и о современных тенденциях его изменений. Использование доступных данных ДЗЗ, среди которых спутниковые снимки Sentinel-2 и Landsat-7, позволяет решить эту задачу. В то же время большая протяжён-

ность этой горной системы затрудняет получение единовременных срезов данных на всю её территорию. Поэтому в настоящей работе мы ограничиваемся исследованием крупнейшего и наиболее изученного района оледенения гор Черского – хр. Улахан-Чистай (рис. 1) и изменений ледников, произошедших со времени их каталогизации в начале 1970-х годов. Также была поставлена задача оценить состояние оледенения хр. Улахан-Чистай в начале 2000-х и 2010-х годов, что позволило получить более детализированную картину изменений параметров оледенения за различные периоды в начале XXI в.

### Данные и методы

Работа основывается на анализе и интерпретации современных данных ДЗЗ и исторических данных о ледниках района исследований. В ней использованы: 1) спутниковый снимок Sentinel-2 уровня обработки L1C от 28.08.2018 (табл. 1) с пространственным разрешением 10 м; 2) спутниковые снимки Landsat-7 уровня обработки L1TP от 30.07.2012, 28.07.2011 и 17.08.2001; 3) спутниковый снимок ASTER уровня обработки L1T от 30.08.2005; 4) мозаика цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM v3.0 [16] с пространственным разрешением 2 м; 5) ЦМР ASTER GDEM V3 [17] с пространственным разрешением 30 м; 6) данные Каталога ледников СССР [1]; 7) данные реанализа метеопараметров ECMWF ERA5 с разрешением 0,5° × 0,5° [18, 19]. Спутниковые снимки для обработки подбирались на конец периода абляции (вторая половина августа) до первых снегопадов, что позволило минимизировать влияние остатков сезонного снежного покрова и снежников на результаты дешифрирования границ ледников. Снимки 2011–2012 гг. были сделаны немного раньше (в конце июля), однако из-за малоснежности района исследований описанные здесь факторы обработки данных ДЗЗ не препятствовали получению надёжных результатов. Границы ледников на спутниковых снимках дешифрировали вручную в соответствии с методикой Международного проекта GLIMS [20]. Для снимков Landsat-7 предварительно создавали синтезированные изображения из каналов В3, В4 и В5 с пространственным





**Рис. 1.** Район исследований.

В подложке – спутниковый снимок Sentinel-2 от 28.08.2018. 1 – границы района исследований; 2 – границы ледников в 2018 г.; 3 – горные вершины

**Fig. 1.** Study area.

On the background – satellite image Sentinel-2 28.08.2018. 1 – location of the research area; 2 – glacier boundaries in 2018; 3 – mountain peaks

Таблица 1. Спутниковые снимки, использованные в работе

Спутник	Дата съёмки	Идентификатор снимка (ID)
Sentinel-2	28.08.2018 г.	L1C_T55WDN_A007708_20180828T020644
Landsat-7	30.07.2012 г.	LE07_L1TP_113014_20120730_20161129_01_T1
	28.07.2011 г.	LE07_L1TP_113014_20110728_20161208_01_T1
	17.08.2001 г.	LE07_L1TP_113014_20110728_20161208_01_T1
ASTER	30.08.2005 г.	AST_L1T_00308302005014859_20150510232918_33590

разрешением 30 м, после чего их детализация повышалась (паншарпенинг) данными каналов В8 с пространственным разрешением 15 м.

Спутниковый снимок Landsat-7 от 17.08.2001 охватывает всё оледенение района исследований (см. рис. 1). Однако четыре небольших ледника (общая площадь в 2001 г.  $1,9 \pm 0,2$  км<sup>2</sup>) на юго-востоке района были частично закрыты облачностью на этом снимке. Для дешифрирования границ данных ледников использован снимок ASTER от 30.08.2005. Спутниковый снимок Landsat-7 от 30.07.2012 также охватывает всё оледенение района исследований, но из-за дефекта сенсора спутника, возникшего после 31.05.2003, данный снимок содержит участки без данных (в виде полос переменной ширины). Такие участки были покрыты данными спутникового снимка Landsat-7 от 28.07.2011. Учитывая небольшую площадь покрытия данными от 28.07.2011 и близость дат съёмки (30 и 28 июля) с разницей всего один год, можно считать, что результаты обработки снимков Landsat-7 от 30.07.2012 и 28.07.2011 отражают параметры оледенения района исследований на 2012 г.

Для каждого ледника, идентифицированного на спутниковом снимке Sentinel-2 2018 г., был определён морфологический тип. Для этого использована методика работы [21]. Погрешность определения площади ледников в результате дешифрирования спутниковых снимков Sentinel-2 оценена как произведение протяжённости границ ледников на точность пространственной привязки данных снимков, равной, по данным оператора спутника [22], 11 м с уровнем доверия 95,5%. Для площадей ледников, оценённых в результате обработки данных дешифрирования снимков Landsat-7, эта погрешность определялась как произведение протяжённости границ ледников на разрешающую способность панхроматического канала В8 (15 м). ЦМР использованы для автоматизированно-

го определения высших и низших точек ледников, их средних взвешенных по площади высот, вертикальной протяжённости и распределения площади оледенения по диапазонам высот. Для этого применялась мозаика ArcticDEM v3.0 [16] с пространственным разрешением 2 м, участки отсутствия данных на которой были заполнены данными ASTER GDEM V3 [17]. Все высоты в работе даны над уровнем моря.

На схемах Каталога ледников [1] и в его таблице «Основные сведения о ледниках» к хр. Улахан-Чистай относятся 85 ледников (номера 7–91). Данные об их морфологии, площади, длине и экспозиции относятся главным образом к 1970 г. Они были получены в результате обработки материалов аэрофотосъёмки 1970 г. Для шести ледников некоторые параметры уточнены по данным полевых наблюдений 1972 г. Анализ изменений параметров оледенения хр. Улахан-Чистай проводился по четырём временным срезам: 1970 (данные Каталога ледников), 2001, 2012 и 2018 гг. При анализе изменений ледников в зависимости от их размеров все ледники были разбиты на группы с учётом их площади в 2018 г. В случае распада ледников, зарегистрированных в Каталоге [1], учитывались изменения суммарной площади всех фрагментов. Спутниковые снимки и ЦМР, использованные в работе, зарегистрированы в проекции UTM (зона 55N) на эллипсоиде WGS 1984. Материалы обрабатывались в программных пакетах ESRI ArcGIS и QGIS. Статистическая обработка проводилась в программе LibreOffice Calc.

### Результаты исследований

В результате обработки спутникового снимка Sentinel-2 2018 г. на хр. Улахан-Чистай обнаружено 90 ледников общей площадью  $54,0 \pm 5,2$  км<sup>2</sup>. Из них 65 ледников зарегистри-



Таблица 2. Морфологические типы ледников хр. Улахан-Чистай в 2018 г.

Морфологический тип ледников	Число ледников	Площадь ледников, км <sup>2</sup>	Средний размер ледника, км <sup>2</sup>	Доля ледников данного морфологического типа в общем числе ледников/в общей площади, %
Сложный долинный	4	18,5±1,4	3,70	5,6/34,3
Долинный	34	28,1±2,7	0,83	37,8/52,0
Карово-долинный	3	1,3±0,1	0,43	3,3/2,4
Каровый	35	5,0±0,7	0,14	38,9/9,3
Карово-висячий	2	0,4±0,1	0,20	2,2/0,7
Висячий	12	0,7±0,2	0,06	12,2/1,3
<i>Всего</i>	90	54,0±5,2	0,60	100/100

Таблица 3. Изменение площади ледников хр. Улахан-Чистай, зарегистрированных в Каталоге [1] и идентифицированных на снимке Sentinel-2 2018 г., с 1970 по 2018 г.

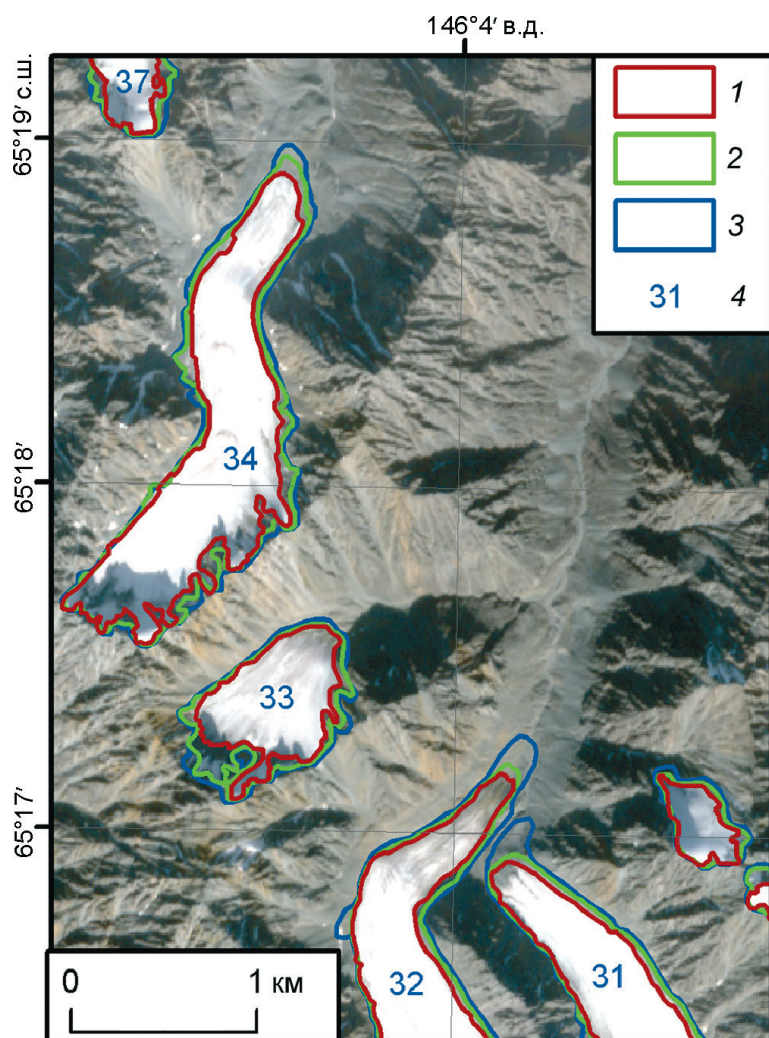
Размер ледников в 2018 г., км <sup>2</sup>	Площадь ледников, км <sup>2</sup>				Изменение площади ледников, км <sup>2</sup> /%			
	1970 г.	2001 г.	2012 г.	2018 г.	1970–2018 гг.	1970–2001 гг.	2001–2012 гг.	2012–2018 гг.
>5	19,6	18,8±1,3	17,4±1,4	16,2±1,1	-3,4/-17,3	-0,9/-4,1	-1,4/-7,4	-1,2/-6,9
2–5	10,7	11,2±1,0	10,1±1,0	9,2±0,8	-1,5/-14,0	0,5/4,7	-1,1/-9,8	-0,9/-8,9
1–2	14,1	12,4±1,1	11,1±1,1	9,6±0,8	-4,5/-31,9	-1,7/-12,1	-1,3/-10,5	-1,5/-13,5
0,5–1	16,1	12,2±1,4	10,6±1,3	9,1±1,0	-7,0/-43,5	-3,9/-24,2	-1,6/-13,1	-1,5/-14,2
0,1–0,5	18,0	13,0±1,7	10,7±1,6	8,8±1,2	-9,2/-51,1	-5,0/-27,8	-2,3/-17,7	-1,9/-17,8
< 0,1	3,7	2,2±0,5	1,5±0,4	1,0±0,3	-2,7/-73,0	-1,5/-40,5	-0,7/-31,8	-0,5/-33,3
<i>Всего</i>	82,2	69,8±7,0	61,4±6,8	53,9±5,2	-28,3/-34,4	-12,4/-15,1	-8,4/-12,0	-7,5/-12,2

рованы в Каталоге [1] и сохранили свою целостность, а 22 ледника представляют собой фрагменты 11 распавшихся ледников, зарегистрированных в Каталоге. Три ледника общей площадью менее 0,1 км<sup>2</sup> не представлены в главной таблице Каталога. Девять ледников, отмеченных на схемах Каталога и имеющих в нём общую площадь 1,3 км<sup>2</sup>, не обнаружены на снимке Sentinel-2 2018 г.

Современные морфологические типы ледников района исследований приведены в табл. 2. В количественном отношении на хр. Улахан-Чистай преобладают каровые и долинны ледники; меньше всего карово-висячих и карово-долинных. Более половины площади оледенения района приходится на долинны ледники, более трети – на относительно крупные сложные долинны ледники. В 2018 г. 87,8% ледников хр. Улахан-Чистай полностью располагались на высотных уровнях выше 1800 м, 70,0% – выше 1900 м, 38,9% – выше 2000 м, 26,0% – выше 2100 м, 13,3% – выше 2200 м. Ниже всего (1510 м) спускался язык долинного ледника Обручева (№ 47 по Каталогу [1]), имеющего площадь 6,3±0,4 км<sup>2</sup>. Средневзвешен-

ные по площади высоты 93,3% ледников данного района находятся в диапазоне 2000–2500 м, 65,6% – в диапазоне 2100–2400 м, 21,1% – в диапазоне 2200–2300 м. Медианное значение средней высоты ледников хр. Улахан-Чистай составило 2170 м.

Вертикальная протяжённость (разница между максимальной и минимальной высотными отметками) 94,4% ледников хр. Улахан-Чистай в 2018 г. была менее 1000 м, 92,2% – менее 800 м, 70,0% – менее 600 м, 45,6% – менее 400 м, 15,6% – менее 200 м. Наибольшая вертикальная протяжённость зафиксирована у долинного ледника Обручева (1370 м) и сложных долинных ледников Цареградского (1270 м) и Сумгина (1250 м). Результаты анализа изменения площади зарегистрированных в Каталоге [1] и идентифицированных на снимке Sentinel-2 2018 г. ледников хр. Улахан-Чистай приведены в табл. 3. С 1970 по 2018 г. площадь ледников района сократилась на 28,3 км<sup>2</sup>, или 34,4%. При этом до 2001 г. было утрачено менее половины этой величины (12,4 км<sup>2</sup>). За 2012–2018 гг. сокращение площади ледников района исследований составило около 7,5 км<sup>2</sup>, т.е. почти 90% сокращения



**Рис. 2.** Отступление границ ледников хр. Улахан-Чистай в 2001–2018 гг.

В подложке – спутниковый снимок Sentinel-2 от 28.08.2018 г. Границы ледников: 1 – в 2018 г.; 2 – в 2012 г.; 3 – в 2001 г.; 4 – номера ледников по Каталогу [1]

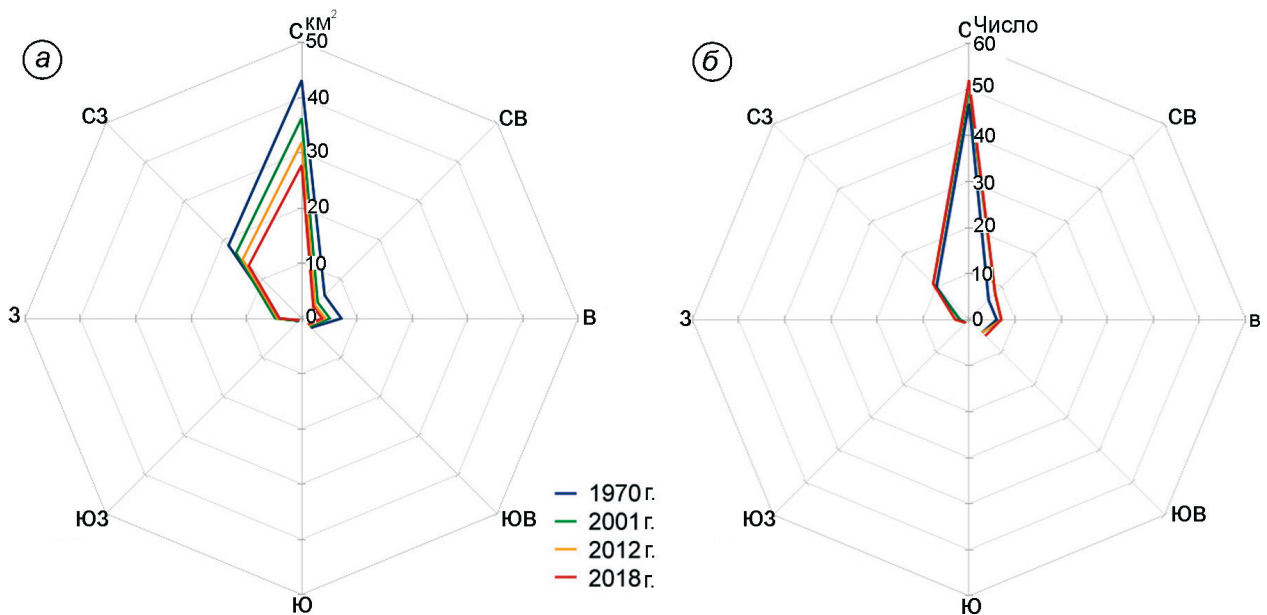
**Fig. 2.** Retreat of the glacier boundaries in the Ulakhan-Chistay Range in 2001–2018.

On the background – satellite image Sentinel-2 28.08.2018. Glacier boundaries: 1 – in 2018; 2 – in 2012; 3 – in 2001; 4 – glacier numbers by the Glacier Inventory [1]

в период 2001–2012 гг. ( $8,4 \text{ км}^2$ ). Средняя скорость сокращения оледенения хр. Улахан-Чистай в 1970–2018 гг. составила  $0,72\%/год$  ( $0,59 \text{ км}^2$ ). В пределах данного периода скорость сокращения площади ледников района существенно менялась:  $0,49\%/год$  ( $0,40 \text{ км}^2$ ) в 1970–2001 гг.;  $1,09\%/год$  ( $0,76 \text{ км}^2$ ) в 2001–2012 гг.;  $2,04\%/год$  ( $1,25 \text{ км}^2$ ) в 2012–2018 гг.;  $1,34\%/год$  ( $0,94 \text{ км}^2$ ) в 2001–2018 гг. Из этого следует, что относительная скорость сокращения площади ледников в 2012–2018 гг. была примерно в 1,9 раза больше по сравнению с 2001–2012 гг. и 4,2 раза больше, чем в 1970–2001 гг.

С 1970 г. наименьшее относительное сокращение площади в районе исследований претерпели самые крупные ледники площадью более  $2 \text{ км}^2$ , наибольшее – малые ледники площадью менее  $0,1 \text{ км}^2$ . Прослеживается закономерность (см. табл. 3) – относительное сокращение пло-

щади ледников (в %) обратно пропорционально их размерам. Сокращение ледников выделенных площадных групп прослеживается во все исследуемые временные периоды. Исключение – период 1970–2001 гг., для которого установлено небольшое (менее 5%) увеличение площади группы ледников размером  $2–5 \text{ км}^2$ . Это может быть результатом следующих факторов: 1) выявленные изменения близки к погрешности измерений; 2) недооценка площадей отдельных ледников в Каталоге [1] из-за поверхностной морены; 3) колебания ледников района исследований в период 1970–2001 гг., не зафиксированные в научной литературе. Изменение границ ледников в 2001–2018 гг. в наибольшей степени проявлялось в их фронтальных частях (рис. 2). При этом ледники в данный период сокращались практически по всему их периметру за счёт понижения высоты поверхности.



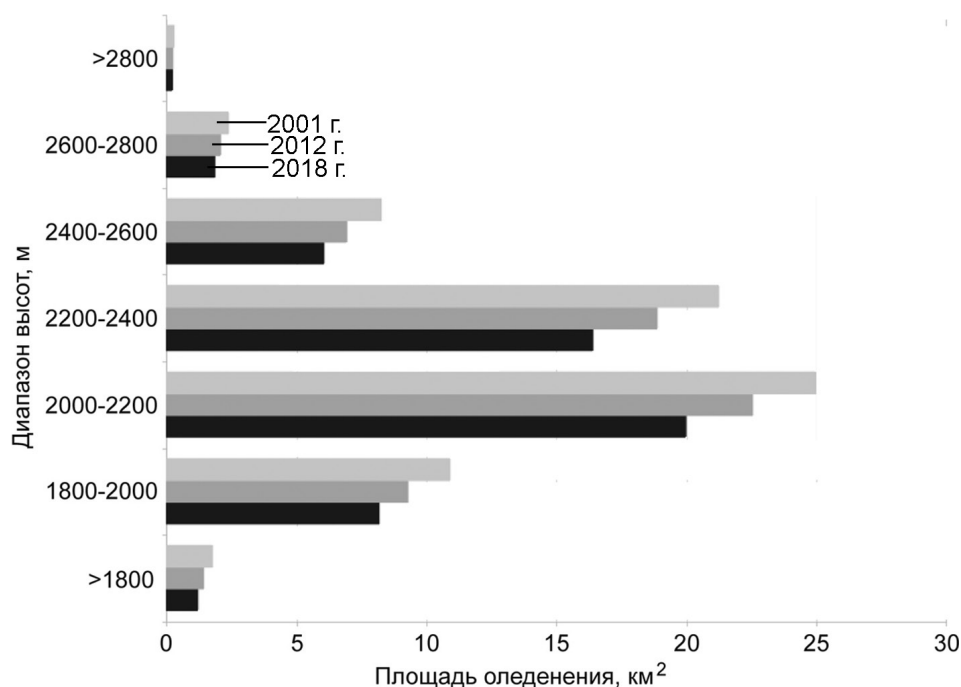
**Рис. 3.** Распределение по экспозиции, изменение площади (а) и числа (б) ледников хр. Улахан-Чистай, зарегистрированных в Каталоге [1] и обнаруженных на снимке Sentinel-2 2018 г., с 1970 по 2018 г.

**Fig. 3.** Exposure allocation, change in area (a) and number (b) of glaciers in the Ulakhan-Chistay Range, by Inventory data [1] and found in the Sentinel-2 2018 image, from 1970 to 2018

Анализ изменения площади ледников хр. Улахан-Чистай, представленных в табл. 3, в зависимости от их экспозиции по Каталогу [1] показал (рис. 3, а), что наибольшее относительное сокращение площади за 1970–2018 гг. претерпели ледники северо-восточной (49,3%, или 2,9 км<sup>2</sup>) и восточной (48,2%, или 3,5 км<sup>2</sup>) экспозиций. В абсолютных величинах наибольшее сокращение площади зафиксировано на ледниках северной (15,4 км<sup>2</sup>, или 35,7%) и северо-западной экспозиций (5,2 км<sup>2</sup>, или 27,6%). Отметим, что подавляющее большинство ледников района исследований ориентировано на север и северо-запад (см. рис. 3, б). Интенсивность процесса распада ледников этих экспозиций в 1970–2018 гг. была примерно одинаковой. Число ледников северной и северо-западной экспозиций увеличилось практически в одинаковых пропорциях. В период исследований одновременно с сокращением площади оледенения хр. Улахан-Чистай происходил распад ледников на фрагменты меньшего размера. Так, 76 ледникам, зарегистрированным в Каталоге и обнаруженным на спутниковом снимке Sentinel-2 2018 г., в 2001 г. соответствовали 83 ледника, в 2012 г. – 85, в 2018 г. – 87. Во всех зафиксированных случаях ледники распались на два фрагмента.

Средний размер ледников района исследований, представленных в табл. 3, сократился следующим образом: с 1,08 км<sup>2</sup> в 1970 г. до 0,92 км<sup>2</sup> в 2001 г., до 0,72 км<sup>2</sup> в 2012 г. и до 0,62 км<sup>2</sup> в 2018 г. Наибольшие средние размеры зафиксированы для ледников, ориентированных на запад (1,32 км<sup>2</sup> в 2018 г.) и северо-запад (1,23 км<sup>2</sup> в 2018 г.). Подобные пропорции зафиксированы не только для 2018 г., но и для 1970, 2001 и 2012 гг. Наименьшие средние размеры наблюдаются на ледниках юго-восточной (0,30 км<sup>2</sup> в 2018 г.) и северо-восточной (0,37 км<sup>2</sup> в 2018 г.) экспозиций. Ледников южной экспозиции на хр. Улахан-Чистай не обнаружено. В 2018 г. 67,5% площади ледников (36,4 км<sup>2</sup>), представленных в табл. 3, было сосредоточено на высотах 2000–2400 м, 93,9% (50,6 км<sup>2</sup>) – на высотах 1800–2600 м (рис. 4). Такое же относительное распределение площади (93,7% и 67,5 км<sup>2</sup>) в данных высотных диапазонах установлено в 2012 г., т.е. сокращение площади оледенения на высотах 1800–2600 м в целом и на высотах 2000–2400 м за 2012–2018 гг. составило 12,2%. Распределение площади оледенения по высотным диапазонам в 2001 г. было близко к его распределению в 2012 и 2018 гг. (см. рис. 4). На высоты 2000–2400 м приходилось 66,2% площади ледников (46,2 км<sup>2</sup>), на





**Рис. 4.** Высотное распределение площади ледников хр. Улахан-Чистай, зарегистрированных в Каталоге [1] и обнаруженных на снимке Sentinel-2 2018 г., в 2001, 2012 и 2018 гг.

**Fig. 4.** Altitude distribution of glaciers area in the Ulakhan-Chistay Range, by Inventory data [1] and found in the Sentinel-2 2018 image, in 2001, 2012 and 2018

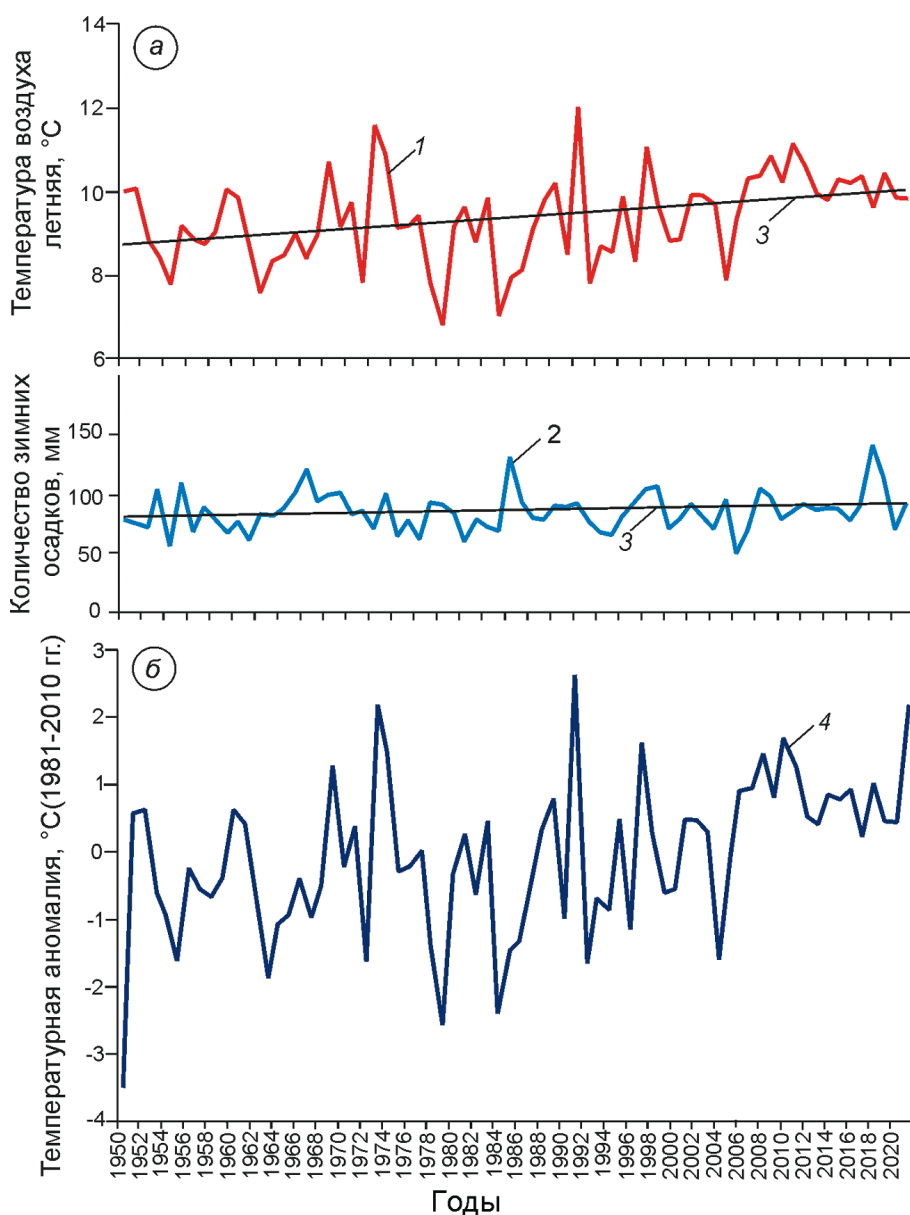
высоты 1800–2600 м – 93,7% (65,4 км<sup>2</sup>). Относительное сокращение площади оледенения на высотах 2000–2400 м в 2001–2018 гг. составило 21,3%, на высотах 1800–2600 м – 22,6%. Ниже 1800 м в 2018 г. располагалось 2,2% площади оледенения (1,2 км<sup>2</sup>), в 2012 г. – 2,3% (1,4 км<sup>2</sup>), в 2001 г. – 2,5% (1,8 км<sup>2</sup>), т.е. доля площади оледенения, расположенного на относительно низких гипсометрических уровнях, в 2001–2018 гг. закономерно сокращается. Относительное сокращение площади оледенения на данных высотах в 2001–2018 гг. оказалось наибольшим – 32,1%. Доля площади оледенения, расположенного выше 2800 м, мала (0,4%) и практически не менялась в 2001–2018 гг. Относительное сокращение площади оледенения на данных высотах в 2001–2018 гг. оказалось наименьшим – 19,1%.

### Обсуждение результатов

Изменения ледников хр. Улахан-Чистай в период с 1970 по 2018 г. происходили на фоне постепенного роста летних температур воздуха (примерно на 1,5 °С за последние 50 лет)

(рис. 5, а) [18]. При этом осадки зимнего периода, величина которых в среднем составляет порядка 90 мм, за этот период изменились незначительно. В то же время на рис. 5, б можно видеть, что постепенный рост летних температур перешёл в устойчивую положительную аномалию, возникшую в 2005 г. и сохраняющуюся до сих пор в этом регионе. В работе [14] отмечалось также, что аномалии летних температур за период потепления в северо-восточной части Сибири максимальны именно в центральной части хр. Черского. Возможно, что более интенсивное сокращение ледников хр. Улахан-Чистай, происходящее в настоящее время, обусловлено сочетанием этих неблагоприятных факторов.

Результаты исследования показывают увеличение средней скорости сокращения площади оледенения хр. Улахан-Чистай в 2,7 раза в период 2001–2018 гг. относительно 1970–2001 гг. При этом скорость сокращения ледников этого района в XXI в. (1,34% исходной площади в год) оказалась на 12% ниже, чем в расположенных примерно в 300–400 км южнее горах Сунтар-Хаята, где площадь оледенения сокращалась в 2003–2018 гг. со средней скоростью



**Рис. 5.** Изменения:

*a* – средних летних температур воздуха (июнь–август) (1) и суммы зимних осадков (октябрь–апрель) (2); линии трендов (3); *б* – аномалии летних температур воздуха (4) (базовый период 1981–2010 гг.) в районе исследований в 1951–2021 гг. по данным реанализа ECMWF ERA5 [18]

**Fig. 5.** Changes:

*a* – of average summer air temperatures (June–August) (1) and total winter precipitation (October–April) (2); trend lines (3); *b* – summer air temperature anomalies (4) (base period 1981–2010), in the study area in 1951–2021 according to ECMWF ERA5 reanalysis [18]

1,52%/год [23]. Скорость сокращения площади ледников в начале XXI в. в этих двух похожих по своим климатическим условиям районах оказалась близка. Разницу в рассчитанной скорости сокращения площади ледников, вероятно, можно объяснить различием в исследуемых временных интервалах (2001–2018 гг.

для хр. Улахан-Чистай и 2003–2018 гг. для гор Сунтар-Хаята). Провести корректное сравнение скорости сокращения ледников хр. Улахан-Чистай и гор Сунтар-Хаята в XX в. нельзя, так как в научной литературе отсутствуют данные за сопоставимые временные интервалы. Каталогизация ледников гор Сунтар-Хаята выполнялась,

прежде всего, по данным обработки материалов аэрофотосъемки 1944–1947 гг. [23], а хр. Улахан-Чистай – по данным обработки материалов аэрофотосъемки 1970 г. [1]. Данных о площади оледенения этих районов на какие-либо промежуточные временные срезы со времени каталогизации по начало XXI в. в литературе нет.

Интересно сравнить скорости сокращения ледников района исследований и иных районов горного оледенения, находящихся в существенно отличающихся климатических условиях. Так, на Полярном Урале средняя скорость относительного сокращения площади оледенения в 2000–2018 гг. (1,54% исходной площади в год) была почти в 3 раза больше, чем в период 1953–2000 гг. (0,52%/год) [24]. В северной части Срединного хребта на Камчатке данный показатель был существенно больше – в период с 2002 по 2016–2017 гг. (1,45%/год) он почти в 4,3 раза был выше по сравнению с 1950–2002 гг. (0,34%/год) [25]. При этом средняя скорость относительного сокращения площади оледенения хр. Улахан-Чистай в начале XXI в. (1,34%/год) оказалась на 13% меньше наблюдаемой на Полярном Урале и всего на 8% меньше, чем в северной части Срединного хребта на Камчатке, несмотря на существенную разницу климатических условий.

Обращает на себя внимание рост в 1,9 раза средней скорости относительного сокращения площади ледников хр. Улахан-Чистай в 2012–2018 гг. (2,04% исходной площади в год) по сравнению с 2001–2012 гг. (1,09%/год). В настоящее время наблюдается дефицит данных о сокращении горных ледников субарктического пояса и умеренных широт Евразии за короткие периоды в 5–7 лет в пределах 2010-х годов. Прямое сравнение результатов возможно лишь с данными немногочисленных публикаций, содержащих сведения об изменениях площади оледенения отдельных районов горного оледенения умеренных широт Евразии. Так, близкая средняя скорость относительного сокращения площади зафиксирована на Кавказе, где в 2014–2020 гг. она составила 1,85%/год – в два раза быстрее, чем в 2000–2014 гг. (0,97%/год) [26]. В работе [27] приведены данные о площади 23 ледников в Эцтальских Альпах на территории Австрии на 2009, 2015 и 2019 гг. Суммарная площадь данной группы ледников сокра-

тилась с 60,56 км<sup>2</sup> в 2009 г. до 58,27 км<sup>2</sup> в 2015 г. и до 54,11 км<sup>2</sup> в 2019 г. Таким образом, средняя скорость относительного сокращения площади этой группы ледников в период 2015–2019 гг. составила 1,78%/год – в 2,8 раза быстрее, чем в период 2009–2015 гг. (0,63%/год). По данным авторов работы [28], площадь оледенения Пиренеев сократилась за 2011–2020 гг. на 23,2% (2,58%/год). Всё это позволяет сделать вывод, что увеличение скорости сокращения ледников хр. Улахан-Чистай в последние два десятилетия не противоречит тенденции роста интенсивности этого процесса, наблюдаемой и в других районах горного оледенения Земли.

### Заключение

Оледенение хр. Улахан-Чистай в горной системе Черского в 2018 г. включало в себя 90 ледников общей площадью 54,0±5,2 км<sup>2</sup>. В этом районе преобладают каровые (38,9%) и долинные (37,8%) ледники, а наибольшие площади заняты долинными (52,0%) и сложными долинными (34,3%) ледниками. Основная часть (67,5%) площади оледенения сосредоточена в высотном диапазоне 2000–2400 м. По сравнению с последней третью XX в. в начале XXI в. сокращение площади оледенения хр. Улахан-Чистай существенно ускорилось. Средняя скорость сокращения площади ледников района увеличилась с 0,49%/год в 1970–2001 гг. до 1,34%/год в 2001–2018 гг. При этом в 2012–2018 гг. она была в 1,8 раза выше, чем в 2001–2012 гг. (2,04 и 1,09% соответственно).

Относительное (в %) сокращение площади ледников в рассматриваемом регионе за 1970–2018 гг. оказалось обратно пропорционально их размерам. Менее всего сократилась площадь относительно крупных ледников с площадью более 2 км<sup>2</sup>, более всего – малых ледников с площадью менее 0,1 км<sup>2</sup>. Наибольшее относительное сокращение площади за 1970–2018 гг. претерпели ледники северо-восточной (49,3%) и восточной (48,2%) экспозиций. Распределение площади оледенения хр. Улахан-Чистай по высотным интервалам в 2001 г. близко к его распределению в 2012 и 2018 гг.

Сокращение ледников во второй половине XX и начале XXI вв. происходило на фоне по-



степенного роста летних температур воздуха (около 1,5 °С за 50 лет). При этом количество осадков зимнего периода за данный период изменилось незначительно. Очевидно, что более интенсивное сокращение ледников на протяжении двух последних десятилетий связано с устойчивой положительной аномалией летних температур воздуха, сохраняющейся с 2005 г. по настоящее время.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках темы Государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

**Acknowledgments:** The paper includes the results obtained withing the framework of the research project АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

## Литература

1. Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 7. Ч. 2, 4. Т. 19. Ч. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 88 с.
2. Шейнкман В.С. Гляциология и палеогляциология горной системы Черского и сопредельных районов Северо-Востока СССР. М.: изд. Междувед. геофизич. комитета при Президиуме АН СССР, 1987. 154 с.
3. Корейша М.М. Оледенение Верхояно-Колымской области. М.: Междувед. геоф. ком., 1991. 143 с.
4. Ананичева М.Д., Кренке А.Н. Горное оледенение (на примере северо-востока Сибири и Камчатки) // Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем. М.: Наука, 2007. С. 277–293.
5. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Т. 1. Ред. В.М. Котляков. М.: Изд. РАН, 1997. 392 с.
6. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.
7. Обручев С.В. Колымо-Индибирский край. Географический и геологический очерк. Л.: Изд-во АН СССР, 1931. 72 с.
8. Берман Л.Л. Современное оледенение верховьев р. Индигирки (предварительное сообщение) // Вопросы географии. 1947. Вып. 4. С. 33–66.
9. Попов Ю.Н. Площадь современного оледенения на Северо-Востоке СССР // Изв. Всес. геогр. об-ва. 1948. Т. 80. Вып. 2. С. 182–183.
10. Васьковский А.П. Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. 1955. Вып. 9. С. 71–91.
11. Рудич К.Н. Ледники Буордахского массива (Северо-Восток Азии) // МГИ. 1968. Вып. 14. С. 303–307.
12. Некрасов И.А., Климовский И.В., Шейнкман В.С. Гляциологические исследования в хребте Улахан-Чистайский (горная система Черского) // МГИ. 1974. Вып. 22. С. 174–180.

## References

1. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 17. Is. 7. Pt. 2, 4. V. 19. Pt. 4. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 88 p. [In Russian].
2. *Scheinkman V.S. Glyatsiologiya i paleoglyatsiologiya gornoi sistemi Cherskogo i sopredel'nykh raionov Severo-Vostoka SSSR*. Glaciology and paleoglaciology of the Chersky mountain system and the adjacent area in the North-East of the USSR. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Soviet Geophysical Committee, 1987: 154 p. [In Russian].
3. *Koreyscha M.M. Oledenenie Verkhoyansko-Kolimskoi oblasti*. Glaciation of the Verkhoyansk-Kolymaregion. Moscow: Soviet Geophysical Committee, 1991: 143 p. [In Russian].
4. *Ananicheva M.D., Krenke A.N. Mountain glaciation (by the example of North-East of Siberia and Kamchatka). Oledenenie Severnoj Evrazii v nedavnem proshlom i blizhajshem budushchem*. Glaciation in North Eurasia in the recent past and immediate future. Moscow: Nauka, 2007: 277–293. [In Russian].
5. *World Atlas of Snow and Ice Resources / Ed. V.M. Kotlyakov. V. 1*. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.
6. *Krenke A.N. Massoobmen v lednikovikh sistemakh na territorii SSSR*. Mass-exchange in Glacier Systems over the Territory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
7. *Obruchev S.V. Kolimo-Indigirskii krai. Geograficheskii i geologicheskii ocherk*. Kolymo-Indigirsky Territory. Geographical and geological outline. Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1931: 72 p. [In Russian].
8. *Berman L.L. Modern glaciation of the upper reaches of the Indigirka River (preliminary message). Voprosi Geografii*. Geography issues. 1947, 4: 33–66. [In Russian].
9. *Popov Yu.N. The area of modern glaciation in the North-East of the USSR. Izvestiya Vsesoyuznogo Geograficheskogo obshchestva*. Proc. of the All-Union Geographical Society. 1948, 80 (2): 182–183. [In Russian].
10. *Vas'kovsky A.P. Modern glaciation of the North-East of the USSR. Materiali po geologii i poleznim iskopaemim Severo-Vostoka SSSR*. Materials of geology and mineral resources of the North-East of the USSR. 1955, 9: 71–91. [In Russian].

13. Седов Р.В. Исследование характерных притоков ледников Буордаха // МГИ. 1998. Вып. 84. С. 179–183.
14. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 163–168.
15. RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. doi: 10.7265/N5-RGI-60
16. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M. Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse, V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH. Архив данных от 23.06.2020.
17. NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team. ASTER Global Digital Elevation Model V003. 2018, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/ASTER/ASTGTM.003
18. [https://climatoreanalyzer.org/reanalysis/monthly\\_tseries/](https://climatoreanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/).
19. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.
20. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010. 15 p. [http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial\\_a4.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf).
21. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 154 с.
22. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2020. Is. 51. 50 p. [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_L1C\\_Data\\_Quality\\_Report](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report)
23. Муравьев А.Я., Носенко Г.А., Никитин С.А. Сокращение оледенения гор Сунтар-Хаята с середины XX века по 2018 год // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 485–499. doi: 10.31857/S2076673421040103.
24. Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Синицкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022.
11. Ruditch K.N. The glaciers of the Buordachsky massif (North-Eastern Asia). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1968, 14: 303–307. [In Russian].
12. Nekrasov I.A., Klimovsky I.V., Scheinkman V.S. Glaciological studies of the Ulakhan-Chistaisky Range. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1974, 22: 174–180. [In Russian].
13. Sedov R.V. Study of typical tributaries of Buordakh glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1998, 84: 179–183. [In Russian].
14. Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Koreysha M.M. Glacier changes in Suntan-Khayata mountains and Chersky Range from the Glacier Inventory of the USSR and satellite images 2001–2003 *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2006, 101: 163–168. [In Russian].
15. RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. doi: 10.7265/N5-RGI-60.
16. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse, V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH. Archive of data from 23.06.2020.
17. NASA/METI/AIST/Japan Space systems, and U.S./Japan ASTER Science Team. ASTER Global Digital Elevation Model V003. 2018, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/ASTER/ASTGTM.003.
18. [https://climatoreanalyzer.org/reanalysis/monthly\\_tseries/](https://climatoreanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/).
19. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.
20. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p. [http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial\\_a4.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf).
21. *Rukovodstvo po sostavleniu Kataloga lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory guide. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].
22. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2020. Is. 51: 50 p. [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_L1C\\_Data\\_Quality\\_Report](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report).
23. Muraviev A.Y., Nosenko G.A., Nikitin S.A. Reduction of glaciation in the Suntar-Khayata Mountains from the mid-20th century to 2018. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 485–499. doi: 10.31857/S2076673421040103. [In Russian].
24. Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Ivanov M.N., Sinitsky A.I., Koblelev V.O., Nikitin S.A. Response of the Polar Urals glaciers to the modern climate changes. *Led i*

25. *Муравьев А.Я.* Сокращение ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в период с 1950 по 2016–2017 гг. // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 4. С. 498–512. doi: 10.31857/S2076673420040055.
26. *Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F.* Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus over past two decades // *The Cryosphere Discuss.* 2021. In review. doi: 10.5194/tc-2021-312
27. *Geissler J., Mayer C., Jubanski J., Münzer U., Siegert F.* Analyzing glacier retreat and mass balances using aerial and UAV photogrammetry in the Ötztal Alps, Austria // *The Cryosphere*. 2021. V. 15. Is. 8. P. 3699–3717. doi: 10.5194/tc-15-3699-2021.
28. *Vidaller I., Revuelto J., Izagirre E., Rojas-Heredia F., Alonso-González E., Gascoin S., René P., Berthier E., Rico I., Moreno A., Serrano E., Serreta A., López-Moreno J.I.* Toward an Ice-Free Mountain Range: Demise of Pyrenean Glaciers During 2011–2020 // *Geophys. Research Letters*. 2021. V. 48. Is. 18. e2021GL094339. doi: 10.1029/2021GL094339.
- Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022. [In Russian].
25. *Muraviev A.Ya.* Degradation of glaciers in the northern part of the Middle Range on Kamchatka Peninsula along the period from 1950 over 2016–2017. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (4): 498–512. doi: 10.31857/S2076673420040055. [In Russian].
26. *Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F.* Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus over past two decades. *The Cryosphere Discuss.* 2021. In review. doi: 10.5194/tc-2021-312.
27. *Geissler J., Mayer C., Jubanski J., Münzer U., Siegert F.* Analyzing glacier retreat and mass balances using aerial and UAV photogrammetry in the Ötztal Alps, Austria. *The Cryosphere*. 2021, 15 (8): 3699–3717. doi: 10.5194/tc-15-3699-2021.
28. *Vidaller I., Revuelto J., Izagirre E., Rojas-Heredia F., Alonso-González E., Gascoin S., René P., Berthier E., Rico I., Moreno A., Serrano E., Serreta A., López-Moreno J.I.* Toward an Ice-Free Mountain Range: Demise of Pyrenean Glaciers During 2011–2020. *Geophys. Research Letters*. 2021, 48 (18): e2021GL094339. doi: 10.1029/2021GL094339.