

УДК 551.324.3

ДИСТАНЦИОННОЕ И РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДНИКА ЛЕВЫЙ ИРБИСТУ (ЮЖНО-ЧУЙСКИЙ ХРЕБЕТ, РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ)

© 2023 г. О. В. Останин^{1,*}, С. А. Кобылин¹, Г. С. Дьякова¹, Р. Д. Бурым¹,
А. Д. Патрушева¹, Н. Е. Рамазанова²

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

*e-mail: ostanin_oleg@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2022 г.

После доработки 06.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

На основе данных ДЗЗ за 2000–2022 гг. выявлено изменение малого ледника № 31 (SU5A15106031), расположенного на Южно-Чуйском хребте Центрального Алтая. За это время ледник сократился на 144 м (на 6.8%) и потерял 0.089 км² (9.7%) своей площади. Приведены результаты аэрофотосъёмки и радиолокационного зондирования нижней части языка ледника, выполненных в 2022 г.

Ключевые слова: ледники Алтая, изменения ледника, мониторинг, радиолокационное зондирование, аэрофотосъёмка

DOI: 10.31857/S2076673423030109, **EDN:** VHIJQM

ВВЕДЕНИЕ

Алтай имеет достаточно обширное оледенение. По данным Каталога ледников России (<https://www.glasgu.ru/>) на территории Алтая насчитывается 988 ледников, общей площадью 523.14 км². Самыми посещаемыми и изучаемыми являются преимущественно крупные (Бол. Тал-дуринский, Аккемский, Маашейский и др.), легкодоступные ледники (Актру, Софийский, Джелло и др.) и ледники с многолетней историей исследования (Актру, Томич, Купол, ледники массива Монгун-Тайга и др.). При этом достаточно много ледников остаются без внимания со стороны исследователей и почти не изучены. Одним из таких мест является верховье р. Турой на Южно-Чуйском хребте в Центральном Алтае (рис. 1).

В 1897 г. В.В. Сапожников (1949) впервые открыл и описал ледники в верховье р. Турой, однако он их видел только издали, с водораздела между реками Елангаш и Тура-Оюк. При описании ледников он опирался на то, что увидел по ходу маршрута и на устную информацию от местных проводников. В 1925 г. Б.В. Тронов (1925) в первом каталоге ледников Русского Алтая по долине р. Турой приводит сведения только о леднике Ирбисту (долинный, высота конца ледника 2800 м, длина 4 км, площадь 4 км²), а также указывает его в таблице “Главнейшие ледники Алтая” под номером 31 из приведённых 43 ледников. Од-

нако в описании Б.В. Тронов опирается на опубликованные данные В.В. Сапожникова (1949) и составленную им схему оледенения Южно-Чуйского хребта, дополняя данную информацию своими полевыми визуальными наблюдениями в районе горы Ирбисту (1925), которые он также производил удалённо. В 1948 г. М.В. Тронов сообщает, что “картина оледенения Южно-Чуйского хребта до сих пор не везде ясна, особенно на крайнем западе и востоке хребта”, некоторые ледники не исследованы, а лишь только осмотрены. В течение МГГ в составе геоморфологического отряда алтайской ледниковой экспедиции, организованной Томским государственным университетом, Л.Н. Ивановский (1964) обследует Южно-Чуйский хребет, уточняя некоторые детали оледенения хребта. В частности, он приводит “Схему оледенения в верховьях реки Ирбисту и смежных долинах”, где даётся первое подробное описание ледников долины р. Турой (5 ледников и ещё один ледник “не наблюдался, но о нём общал М.В. Тронов, который его видел”).

Следом В.С. Ревякин (1966, 1967) даёт информацию об этих ледниках на основе анализа аэрофотосъёмки, с указанием длины, площади, экспозиции, морфологических типов ледников и прочих их характеристик, и приводит подробную схему оледенения всего Южно-Чуйского хребта. В верховье реки Ирбисту им отмечено пять лед-

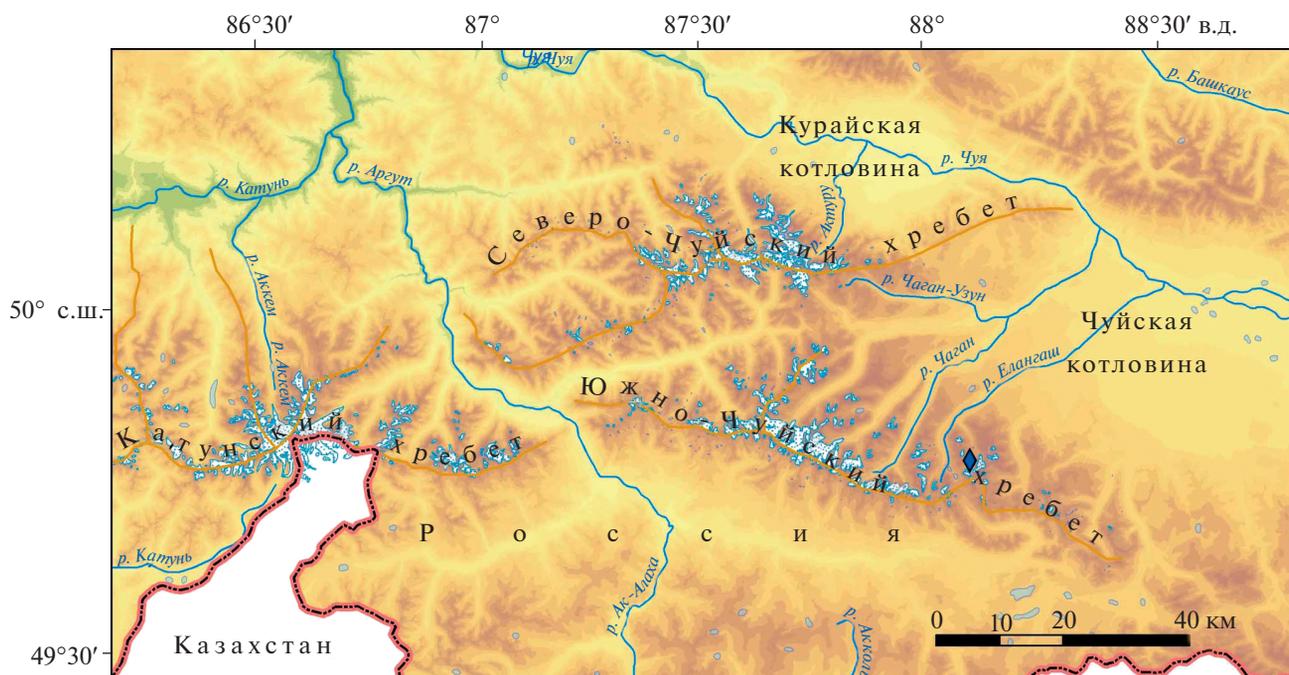


Рис. 1. Местоположение ледника № 31 (Левый Ирбисту) в Центральном Алтае.

Fig. 1. Location of glacier No. 31 (Left Irbistu) in Central Altai.

ников общей площадью 6,8 км². Эти и последующие исследования ледников в 1963–1969 гг., выполняемые сотрудниками Томского государственного университета, ложатся в основу составления Каталога ледников СССР в бассейне р. Чуя (1974). В конце 1990-х годов С.А. Никитин (2000) проводил радиозондирование ледников Центрального Алтая. В долине р. Турой им были обследованы два ледника: № 30 и № 31 (номера указаны по данным Каталога ледников СССР, 1978). Была определена их средняя и максимальная толщина.

В конце 1990-х – начале 2000-х годов для исследования ледников стали активно использоваться данные дистанционного зондирования Земли, позволяющие анализировать их состояние на больших пространствах, в удалённых и труднодоступных районах. Начиная с 2000 г. в рамках международного проекта “Global Land Ice Measurements from Space” – GLIMS (www.glims.org) проводились работы по дешифрированию ледников на космических снимках (Хромова, 2021). А в начале 2020-х годов был подготовлен новый электронный Каталог ледников России (www.glas-gi.ru) по спутниковым данным, полученным в основном в 2016–2019 гг. (Хромова, 2021). По итогам выполнения этих работ информация о ледниках в верховье р. Турой была внесена в различные электронные базы данных, доступ к которым организован через веб-сайты (Каталог ледников России; GLIMS).

Оценки современного стояния ледников и выявление их изменений требуют объединения доступных методов исследования: дистанционных наблюдений с использованием космических и аэроснимков, а также прямых наблюдений с помощью полевых измерений. Настоящая работа посвящена результатам исследований ледника № 31 как одного из доступных для изучения в бассейне р. Елангаш, вносящих свой вклад в представление о современном состоянии оледенения Алтая. Наша задача заключалась в оценке современного состояния ледника № 31 и выявлении его изменения в начале XXI в. (2000–2022 гг.) путём дешифрирования границ ледника на разновременных космических снимках и использования радиолокационного зондирования и аэрофотосъёмки с БПЛА в полевых условиях. В рассматриваемый период времени пространственное разрешение данных ДЗЗ и частота их получения постоянно возрастают, что даёт возможность с большей детальностью и оперативностью выявлять морфометрические изменения ледников.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ледники в верховье р. Турой долгое время были в стороне от полевых исследований. Несмотря на небольшой размер, потенциально они могут представлять ещё один полигон для гляциологического мониторинга. Они отличаются своим положением: с одной стороны, в непосредственной

Таблица 1. Сведения о леднике № 31 из разных источников

Источник	Дата исходных материалов	Название ледника	Длина, км	Площадь ледника, км ²	Высота нижней точки, м	Высота фирновой линии, м
Каталог ледников СССР (1974)	1964; 1966	№ 31	1.5	1.6	2910	3150
Никитин С.А. (2000)	—	15.1.6.31 (10)	—	1.35	2910	—
GLIMS, 2015	2011	SU5A15106031 (G088079E49776N)	1.95	0.77	0.84	3025
	2011	SU5A15106031 (G088072E49773N)*	—	0.07*		3219*
Новый каталог ледников России	2017	SU5A15106031	1.99	0.9	3020	3200

*Боковой поток, выделен как самостоятельный.

близости от самой крупной на Алтае высокогорной котловины — Чуйской степи, а с другой стороны недалеко от одного из самых крупных ледниковых центров Алтая, в составе которого такие ледники как Софийский и Большой Талдуринский (см. рис. 1). Сотрудники кафедры физической географии и геоинформационных систем Института географии Алтайского государственного университета регулярно бывают в долине р. Елангаш и в верховье р. Турой, в рамках проведения летних учебных практик. Это и определило выбор ледника № 31 в качестве объекта исследования.

Долина р. Турой располагается в восточной части Южно-Чуйского хребта Центрального Алтая. Она протягивается на 15 км, высота устья долины 2450 м. Это один из притоков р. Елангаш, впадающей в р. Чуя. В верховье долины р. Турой располагается высшая точка Южно-Чуйского хребта — гора Ирбисту (Ирбис-ту, Ирбис-Туу или Барс-гора, 3967 м). Эта вершина — самый восточный очаг современного оледенения Центрального Алтая. В долине насчитывается пять ледников общей площадью 4.21 км²: три из них — в верховье долины на склонах северо-восточной, северной и северо-западной экспозиции — № 29 (площадью 0.15 км²), № 30 (Ирбисту; 2.48 км²) и № 31 (0.9 км²) и два — в нижней части долины, в карах на склоне северо-восточной экспозиции — № 32 (0.27 км²), № 33 (0.41 км²) (Каталог ледников России).

Ледник № 31 (по данным Каталога ледников СССР, 1978), № SU5A15106031 (по данным GLIMS и Каталога ледников России) или Левый Ирбисту (название было дано в ходе наших работ в 2022 г.) относится к карово-долинному типу ледников. По данным Каталога ледников России

(www.glasgu.ru), в 2017 г. ледник имел длину 1.99 км, площадь 0.9 км², его нижняя отметка располагалась на уровне 3020 м, верхняя — 3850 м; фирновая граница — 320 м (табл. 1). Инструментальные съёмки, установку реперов, измерения положения языка ледника предшествующие исследователи не проводили; указанные в каталоге значения получены дистанционными методами.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Основными данными для выявления плановых изменений ледника Левый Ирбисту в начале XXI в. были разновременные космические снимки Landsat-7, 8, 9, Sentinel-2 (табл. 2) в период максимальной абляции (с середины июля до начала сентября), за период с 2000 по 2022 г. — базовая карта World Imagery компании Махаг, доступная в ПО ESRI. Для анализа отбирались космические снимки с геометрической и радиометрической коррекцией и свободные от облачности. Все космические снимки были зарегистрированы в проекции UTM зоне 45 N, на эллипсоиде WGS 84. У снимков Landsat-7, 8, 9 использовался 8-й канал с пространственным разрешением 14 м/пкс; Sentinel-2 — 2, 3, 4, 8 каналы с пространственным разрешением 10 м/пкс. Базовая карта World Imagery (по состоянию на 2017 г.) компании Махаг, используемая в ПО ESRI, представлена мозаикой снимков с пространственным разрешением 1.0–0.3 м/пкс, полученной с аппаратов Digital-Globe. В качестве дополнительных данных, формирующих представление о современном состоянии ледника, использовались данные полевых исследований 2022 г.

Границы ледника дешифрировались по снимкам визуально в ручном экспертном режиме. Ра-

Таблица 2. Ледник № 31 Левый Ирбисту* и его изменения за 2000–2022 гг. по данным дешифрирования космических снимков

Год	Длина, км	Площадь ледника, км ²	Период	Изменение длины		Изменение площади за период, км ²	Источник данных
				за период, м	среднее, м/год		
2000	2.099 ± 0.007	0.912 ± 0.004					Landsat-7
2002	2.081 ± 0.007	0.898 ± 0.004	2000–2002	18	9	0.014	
2005	2.058 ± 0.007	0.881 ± 0.004	2002–2005	23	7.7	0.017	
2006	2.044 ± 0.007	0.873 ± 0.004	2005–2006	14	14	0.008	
2011	2.026 ± 0.007	0.848 ± 0.004	2006–2011	18	3.6	0.026	
2016	2.004 ± 0.007	0.837 ± 0.004	2011–2016	22	4.4	0.011	Landsat-7, 8
2018	1.993 ± 0.005	0.834 ± 0.003	2016–2018	11	5.5	0.003	Landsat-8, Santinel-2
2019	1.983 ± 0.005	0.830 ± 0.004	2018–2019	10	10	0.004	Santinel-2
2020	1.972 ± 0.005	0.828 ± 0.004	2019–2020	11	11	0.002	Santinel-2
2021	1.962 ± 0.005	0.827 ± 0.004	2020–2021	10	10	0.002	
2022	1.955 ± 0.005	0.823 ± 0.004	2021–2022	7	7	0.003	Landsat-9, Santinel-2
			2000–2022	144	6.5	0.089	Landsat-7, 8, 9, Santinel-2

*Длина ледника указывается как длина основного (правого) потока, а площадь ледника – как сумма площадей потоков: основного (правого) и отделившегося от него левого.

бота выполнялась в ПО ESRI – ArcGIS. Отобрано 56 космических снимков, охватывающих 23 года. Такое количество снимков, включая несколько снимков за один период абляции (с близкими датами, но с разной степенью освещённости, с разными углами наклона и пространственным разрешением), позволило с большей вероятностью определить границы ледника на тот или иной год, учитывая в их площади, либо исключая из их площадей заморенные поверхности и многолетние снежники. При определении морфометрических и морфологических характеристик ледника руководствовались работами “Руководство по составлению каталога ледников СССР” (1966), “Каталог ледников России” (www.glasgu.ru), Хромова Т.Е. и др. (2021). Точность дешифрирования границы ледника была принята равной пространственному разрешению используемых снимков. В результате по снимкам фиксировалось изменение положения фронта ледника равное или превышающее пространственное разрешение снимков. Это нашло отражение в количестве и продолжительности временных периодов, по которым удалось выявить изменение фронта ледника. Краевое положение границы ледника в разные годы фиксировалось путём последовательного построения вдоль границ ледников линий (рис. 2). После оконтуривания периметра ледника величина площади ледника определялась в автоматическом режиме в

среде ArcGIS. Итоговая погрешность оценки площадей ледников составила 2–3%. Высотные значения определялись по базовой карте World Imagery, 3D-визуализации в ПО ArcGIS Earth, дополнительно уточнялись по данным ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30) и нашим данным полевых исследований.

В ходе полевых работ на леднике в июле 2022 г. выполнена аэрофотосъёмка с БПЛА квадрокоптером DJI Phantom 4. Дрон выполнял полёт на высоте 55 м от точки взлёта (абс. высота полёта 3115 м, в системе WGS 84), в пределах полигона размером 300 × 450 м. Полигон съёмки располагался ниже по склону от точки взлёта. Съёмкой была охвачена территория размером 380 × 660 м и общей площадью 0.25 км², включавшая нижнюю часть языка ледника и прилегающие к нему участки. Выполнить съёмку всего ледника по метеорологическим условиям было невозможно. Используемый тип съёмки – Double Grid (наклон камеры 70°, с продольным и поперечным перекрытием 36–40%) в дальнейшем позволил построить 3D-модель, цифровую модель рельефа (ЦМР), а также ортофотоплан. На поверхности снимаемой территории установлены опознавательные маркерные точки, на которых геодезическим GNSS приёмником (Leica GS08) определены их координаты и высоты. Камеральная обработка

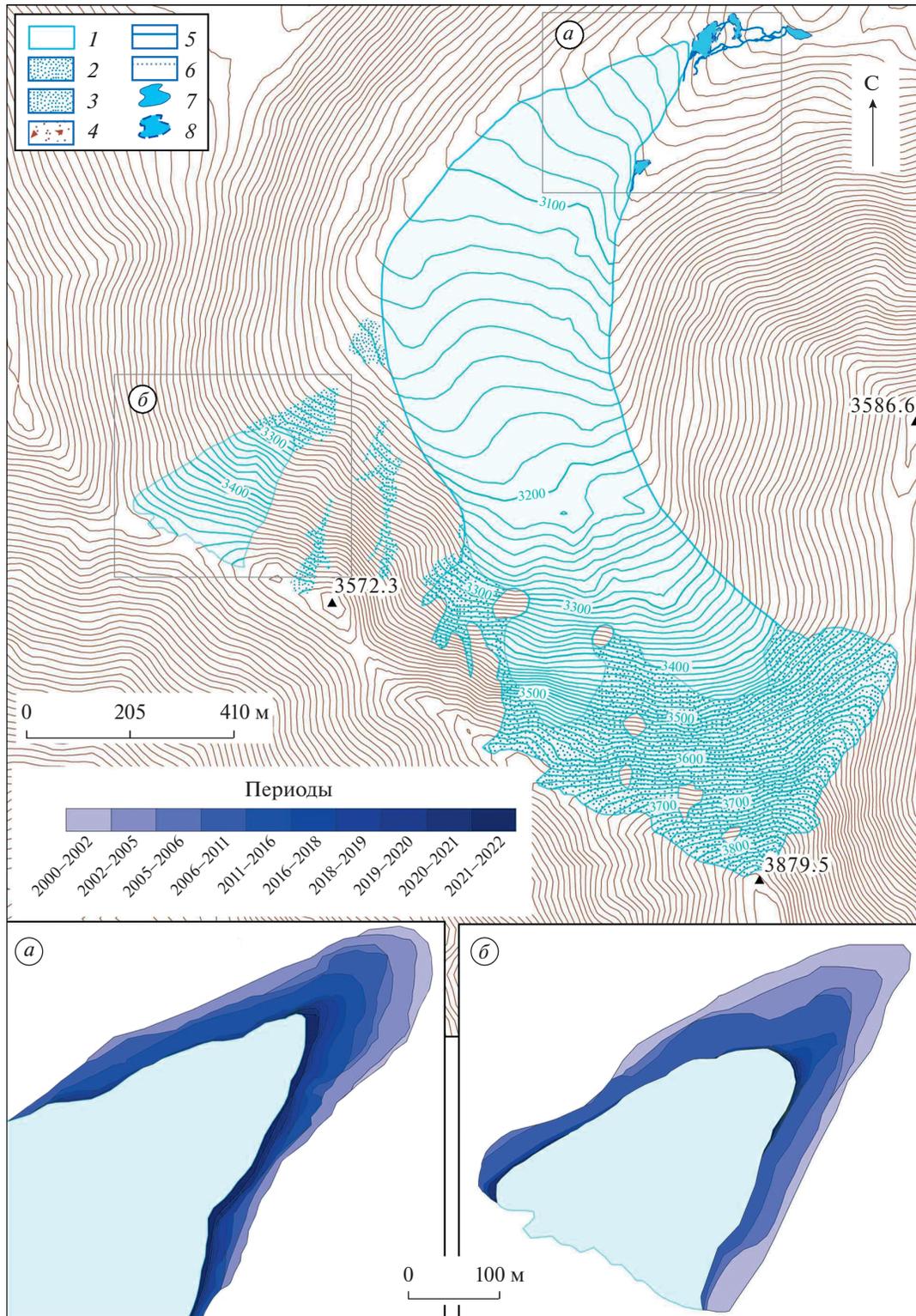


Рис. 2. Ледник № 31 (Левый Ирбисту) по стоянию на 2022 г. Границы ледника (а) и его притока (б) в разные периоды. Изолинии проведены по данным ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30): 1 – ледник; 2 – оледенелые склоны; 3 – снежники; 4 – моренный материал на поверхности ледника; 5 – постоянные водотоки; 6 – временные водотоки; 7 – постоянные озёра; 8 – пересыхающие озёра.

Fig. 2. Glacier No. 31 (Left Irbistu) as of 2022. Borders of glacier (а) and its tributary (б) in different periods. The contour lines are drawn according to the ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30): 1 – glacier; 2 – glaciated slopes; 3 – snowfields; 4 – moraine material on the glacier surface; 5 – permanent streams; 6 – temporary streams; 7 – permanent lakes; 8 – drying lakes.

Таблица 3. Характеристики профилей радиолокационного зондирования

№ профиля	Средняя высота, м (UTM/WGS 84)	Длина, м	Толщины на профиле, м		Частота зондирующего сигнала, МГц
			средние	максимальные	
1	3055	218	30	51	100
2	3069	250	53	66	50/100

данных аэрофотосъёмки выполнялась с помощью ПО Agisoft Photoscan. Был построен ортофотоплан языка ледника, с разрешением 3.92 см/пкс; ЦМР с разрешением 15.7 см/пкс и объёмная модель. Полученные в результате данные могут быть использованы для анализа морфометрических характеристик исследуемой территории на дату съёмки.

Для выявления толщины ледника в ходе полевых работ выполнено радиолокационное зондирование (РЛЗ) языковой части ледника Левый Ирбисту, георадаром Python-3. На расстоянии 265 м от языка ледника заложено два поперечных профиля РЛЗ, параллельных друг другу, в интервале высот от 3048 до 3073 м (в системе WGS 84), длиной 218 и 250 м. Расстояние между профилями в среднем составляет 60–70 м (табл. 3). Профиль № 1 заложен на высотах 3048–3061 м и пересекает ледник полностью, от правого до левого края. Профиль № 2 находится на высотах 3064–3073 м и заложен от бровки крутого уступа у правого борта ледника и до левого края ледника (рис. 3).

На всех профилях проводилась съёмка антенным блоком на частоте 100 МГц и дополнительно на втором профиле – на частоте 50 МГц. Использовались следующие настройки измерений: среда зондирования – лёд; диэлектрическая проницаемость среды – 3.2 (см. табл. 3). Привязку профилей РЛЗ на местности выполняли переносным GNSS приёмником (Leica GS08). Георадар – конструкция принимающей-передающей антенны в виде лыжной доски. Его перемещали по линиям профиля волоком. Для обеспечения наилучшего качества съёмки и лучшей устойчивости георадара на поверхности использовали два режима съёмки: непрерывный и пошаговый. Первый применяли на относительно ровных участках, а второй – на участках со сложной поверхностью (бугристой, со значительным уклоном, с промоинами водотоков, заморенной и пр.). Программирование радара под конкретные условия работы, контроль съёмки и запись данных радара выполняли на ноутбуке, с помощью ПО “Prizm2”. Ноутбук соединялся с радаром посредством WI-FI связи и переносился оператором в непосредственной близости от него. Последующую обработку данных вели в камеральных условиях с использованием ПО “Prizm2”. При обработке про-

филь РЛЗ корректировали по длине (на основе данных GNSS-съёмки) и изменяли его с учётом топографии местности. После камеральной обработки материалов РЛЗ, в программе Surfer выполнена площадная экстраполяция данных методом Сплайн и построена карта толщины ледника вокруг профилей (см. рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 2022 г. ледник № 31 (Левый Ирбисту) имел длину 1.955 км, площадь 0.823 км², состоял из двух отделившихся друг от друга потоков (см. рис. 2). Длина ледника указывается как длина основного потока, а площадь – как сумма площадей этих двух потоков. Морфологический тип ледника карово-долинный. Правый, основной поток ледника составляет 94% от площади всего ледника, берёт начало на крутых высоких стенках кара, спускаясь занимает всю его чашу и далее стекает вниз по небольшой долине. В плане сама долина довольно узкая, имеет С-образный изгиб в северо-восточном направлении. Левый поток ледника – небольшой, составляет лишь 6% от его площади и располагается на крутом склоне долины. В некоторые годы его фронт и пространство до основного потока может долгое время оставаться закрытым снежником. На предыдущих схемах оледенения Алтая (Каталог ледников СССР, 1978; Каталог ледников России) ледник № 31 изображается как один, а по данным GLIMS, в 2015 г. ледник обозначен состоящим из двух потоков (см. табл. 1). По данным космической съёмки мы установили, что в 2000 г. ледник уже состоял из двух самостоятельных потоков.

В 2000 г. ледник № 31 (Левый Ирбисту) имел длину 2.099 км и занимал площадь 0.912 км². С 2000 по 2022 г. основной правый поток ледника сократился в длину на 144 м (потеряв 6.8%), а по площади весь ледник потерял 0.089 км², или 9.7%. Скорость отступления фронта основного правого потока ледника варьировала от 3.6 до 14 м/год, в среднем – 6.5 м/год, а по площади весь ледник в среднем сокращался на 0.004 км²/год (см. табл. 2). Основные изменения левого и правого потоков ледника происходили в краевых частях их языков – они оттаивали с боковых частей фронтов и

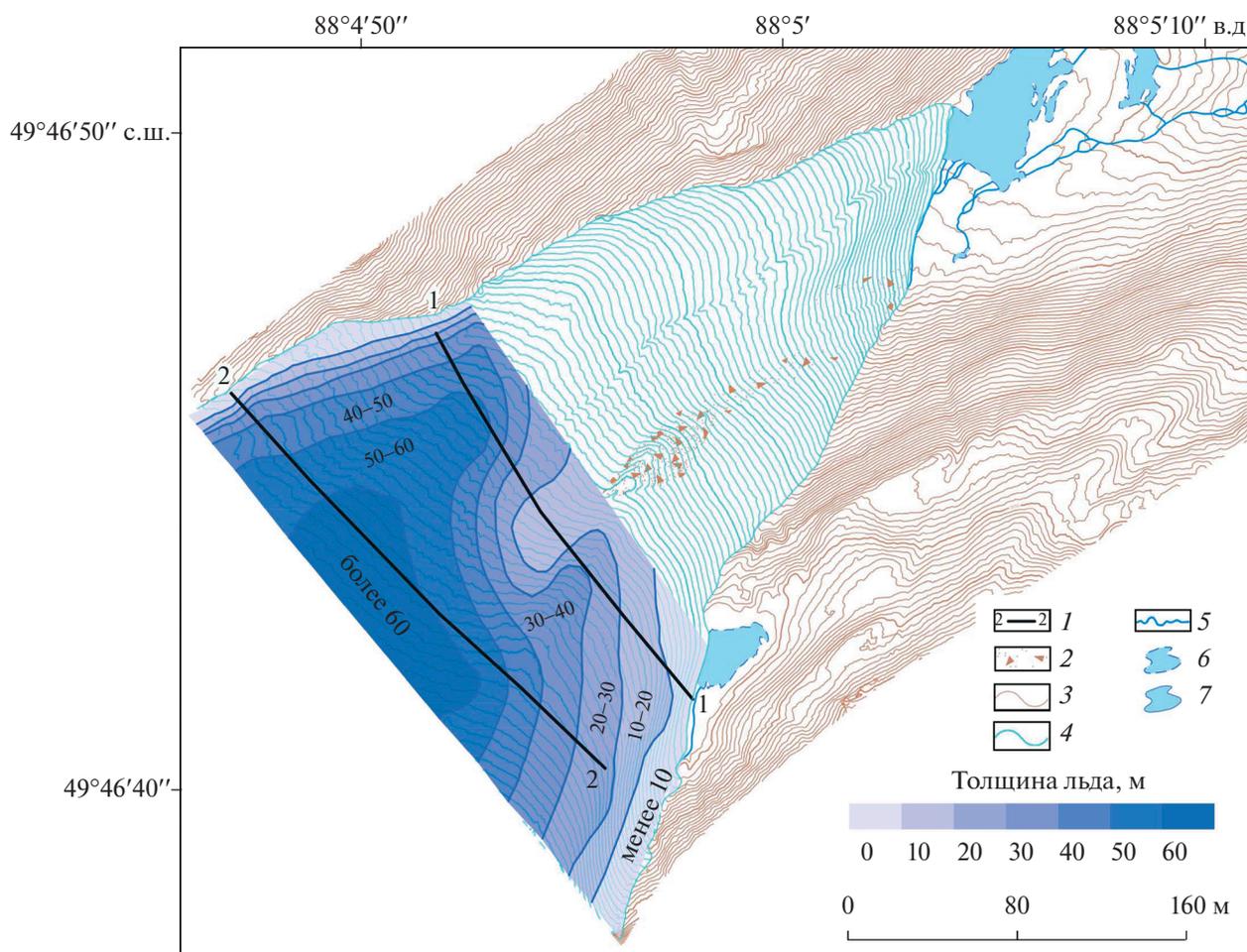


Рис. 3. Язык ледника № 31 (Левый Ирбисту) с указанием расположения профилей радиолокационного зондирования и полученные толщины льда. Изолинии проведены по результатам аэрофотосъёмки в июле 2022 г.: 1 – профили радиозондирования; 2 – моренный материал на поверхности ледника; 3 – изолинии рельефа; 4 – изолинии на поверхности ледника; 5 – водотоки; 6 – пересыхающие озёра; 7 – постоянные озёра.

Fig. 3. Tongue of glacier No. 31 (Left Irbistu), indicating the location of radar sounding profiles and the obtained ice thicknesses. The contour lines are drawn based on the results of aerial photography in July 2022: 1 – radio sounding profiles; 2 – moraine material on the surface of the glacier; 3 – isolines of the relief; 4 – isolines on the surface of the glacier; 5 – watercourses; 6 – drying lakes; 7 – permanent lakes.

приобретали в плане клиновидную, заострённую форму. Принимая во внимание погрешности при дешифрировании, выявленные нами изменения ледника за период с 2000 по 2022 г. в целом соответствуют значениям, указанным в разных источниках (GLIMS; Новый каталог ледников России). Исключение составляет работа С.А. Никитина (2000), скорее всего автор использовал в публикации площадь ледника, полученную в начале 1990-х годов.

Аэрофотосъёмка позволила зафиксировать положение языковой части основного потока ледника, получить ортофотоплан высокого разрешения, ЦМР и объёмную модель поверхности языка ледника и прилегающей территории. Полученные данные были использованы для построения крупномасштабной топографической

карты (см. рис. 3). Поверхность языка ледника имеет небольшой равномерный уклон в сторону краевой части ледникового фронта, в среднем 10–12°, в некоторых местах на небольших участках до 20–25°. По данным ЦМР, нижняя отметка фронта ледника располагается на высоте 2993 м (в системе WGS 84), а самая высокая на снимаемом участке – на 3081 м.

Поверхность ледника слабо, но относительно равномерно покрыта моренным материалом, который представляет собой отдельные глыбы небольшого размера, погружённые в лёд. В нижней правой части языка на поверхности выделяется скопление моренного материала в виде гряды протяжённостью 65 м, шириной 6–25 м, высотой 3.0–3.5 м, за которой вниз к краю ледника тянется шлейф поверхностной морены. В некоторых

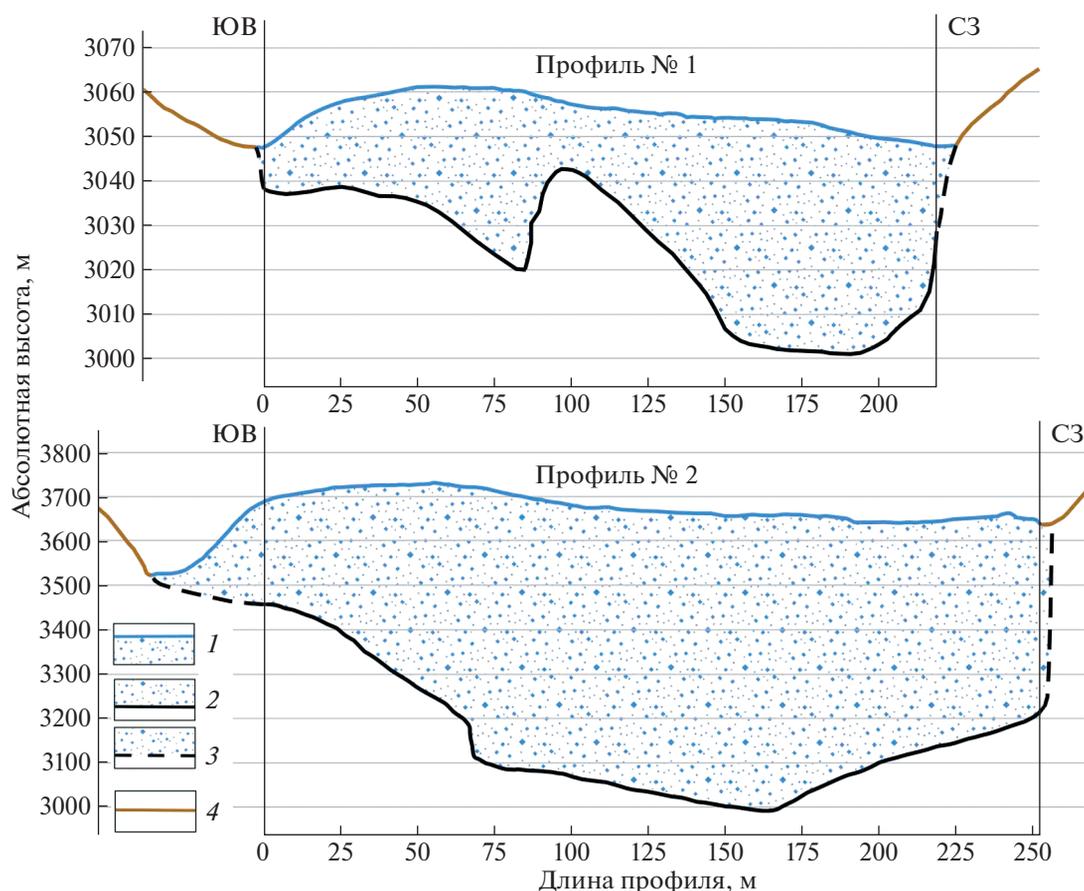


Рис. 4. Интерпретация радиолокационных профилей № 1 (а) и № 2 (б) на леднике № 31 (Левый Ирбисту): 1 – ледник; 2 – ложе ледника; 3 – предполагаемое расположение ложа ледника; 4 – моренный материал и выходы коренных пород.

Fig. 4. Interpretation of radar profiles along lines No. 1 (a) and No. 2 (b) on glacier No. 31 (Left Irbistu): 1 – glacier; 2 – glacier bed; 3 – the proposed location of the glacier bed; 4 – moraine material and bedrock outcrops.

местах фронта отмечается локальное скопление моренного материала небольшими полосами. Рельеф поверхности ледника неравномерный, с чередованием выпуклых и вогнутых участков, обусловленный как формой ледникового ложа, так и изгибом самой долины. На поверхности ледника имеются многочисленные русла водотоков. Некоторые из них в нижней части языка (в 200 м от края) собираются в одно более крупное русло глубиной около метра, которое выходит к фронту ледника. Микрорельеф поверхности языка ледника представлен абляционными формами. Особо выделяются остроконечные ледяные образования, размером до 20–30 см, наклонённые навстречу лучам полуденного солнца (“кающиеся”). По своей структуре они довольно рыхлые, пронизанные многочисленными порами, при наступании на них они легко разрушаются. Во время непогоды, когда температура воздуха понизилась до 0–(–5)°С, усилился ветер и продолжительное время шёл снег, а также на следующие сутки, их прочность изменилась – они стали очень жёсткими, что создавало

трудности при ходьбе по леднику. В местах скопления на поверхности ледника моренного материала эти остроконечные ледяные образования имеют чуть больший размер – до 0.5 м. Перед передним и боковым фронтом ледника в тёплую солнечную погоду образуется несколько озёр небольшого размера (в длину от 20 до 65 м), они разделяются грядами моренных валов. Во время непогоды, с уменьшением количества водотоков на леднике, эти озера исчезали.

Использование георадара с разными антенными блоками (работающими на частоте 50 и 100 МГц) позволило зафиксировать глубину залегания ложа ледника под его языком (рис. 4). Анализ данных РЛЗ на профиле № 1 (снятом на частоте 100 МГц) показал, что юго-восточный (правый) борт ледника располагается на приподнятом участке ложа и к краю ледника толщина льда сходит на нет; северо-западный (левый) борт ледника в 10 м от края имеет толщину 34 м, а к центру долины толщина достигает 52 м (см. рис. 4, а). В пределах этого профиля между центром доли-

ны и юго-восточным приподнятым участком его борта было выявлено повышение ложа ледника, интерпретируемое как выход коренных пород, над которым толщина ледника уменьшается до 11 м. На профиле № 2 (снятом на частоте 50 МГц) толщина ледника у юго-восточного (правого) борта долины, на бровке крутого уступа, составляет 23 м, а у северо-западного (левого) борта, на расстоянии 3 м от края ледника, — 43 м; в центре долины, на протяжении более 100 м, толщина ледника на исследуемых высотах (3064–3067 м) превышает 60 м (максимальная зафиксированная толщина составляет 66 м) (см. рис. 4, б). Предыдущее РЛЗ, проведённое на леднике № 31 С.А. Никитиным (2000) в 1990-х годах, показало, что по осевой линии от конца ледника до верхней части области питания толщина льда достигает 130 м, а в среднем равна 51.9 м. Сопоставить эти данные с данными С.А. Никитина невозможно из-за разного подхода к съёмке ледника и неодинакового пространственного охвата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По космическим снимкам (Landsat-7, 8, 9, Sentinel-2 и др.), имеющимся в свободном доступе, можно фиксировать ежегодные изменения ледников Алтая, но для малых ледников (площадью 1–2 км² и менее) такие снимки не очень пригодны из-за невысокого пространственного разрешения самих снимков и небольших величин изменения самого ледника. В таком случае целесообразно использовать данные ДЗЗ с временными интервалами между съёмками в 2–5 лет.

Ледник № 31 (Левый Ирбисту) в 2022 г. состоял из двух самостоятельных потоков общей площадью 0.823 км² и максимальной длиной 1.955 км. За 2000–2022 гг. общая площадь всего ледника сократилась на 0.089 км² (9.7%), а длина основного потока уменьшилась на 144 м (на 6.8%).

Аэрофотосъёмкой с БПЛА была охвачена территория площадью 0.25 км², включающая нижнюю часть языка ледника и прилегающие к нему участки. Результаты этой съёмки при последующих исследованиях могут служить основой для отслеживания изменений поверхности ледника, его площади, величины отступления фронта, а также его объёмов.

Анализ радарограммы показал, что бо́льшая толщина ледника на исследуемом участке прослеживается вдоль левой стороны языка ледника, максимальная зафиксированная — 66 м. Между центром и правой стороной нижнего профиля было выявлено повышение ложа ледника, интерпретируемое как выход коренных пород, над ним толщина ледника уменьшилась до 11 м, а ниже по течению льда над выходом коренных пород отмечается скопление моренного материала в виде

гряды протяжённостью 65 м. В дальнейшем планируются работы на всём леднике.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках реализации Программы поддержки научно-педагогических работников Алтайского государственного университета, проект “Исследование современных изменений малых ледников Центрального Алтая”.

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of the Program of support for scientific and pedagogical workers of the Altai State University, the project “Study of Modern Changes in Small Glaciers of the Central Altai”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ивановский Л.Н.* Ледники на восточной окраине Южно-Чуйского хребта на Алтае // Гляциология Алтая. 1964. Вып. 3. С. 52–64.
- Каталог ледников России // Электронный ресурс. <https://www.glacru.ru/> (Дата обращения: 01.02.2023).
- Каталог ледников СССР. Т. 15. Вып. 1. Ч. 6. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 93 с.
- Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В., Игловская Н.В.* Результаты радиозондирования ледников Центрального Алтая // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 145–149.
- Ревякин В.С.* Некоторые замечания о современном оледенении Южно-Чуйского хребта // Гляциология Алтая. 1967. Вып. 5. С. 149–162.
- Ревякин В.С.* Оледенение Южно-Чуйского хребта на Алтае // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 194–199.
- Руководство по составлению каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 154 с.
- Сапожников В.В.* По русскому и монгольскому Алтаю. М.: Госуд. изд-во географич. литературы, 1949. 580 с.
- Тронов М.В.* Современное оледенение Алтая // Тр. Томского гос. ун-та Сер. геогр. 1948. № 105. 525 с.
- Тронов Б.В.* Каталог ледников Алтая // Изв. РГО. 1925. Т. 57. Вып. 2. С. 107–159.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.А., Никитин С.А., Лаврентьев И.И.* Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space // Электронный ресурс. <https://www.glims.org/> (Дата обращения 10.11.2022).

Citation: Ostanin O.V., Kobylin S.A., Dyakova G.S., Buryim R.D., Patrusheva A.D., Ramazanova N.E. Remote and radar sensing of the Left Irbistu Glacier (South Chuisky mountain Range, Altai Republic). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 347–356 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030109

Remote and Radar Investigation of the Left Irbistu Glacier (South Chuisky Mountain Range, Altai Republic)

O. V. Ostanin^{a,#}, S. A. Kobylin^a, G. S. Dyakova^a, R. D. Buryim^a,
A. D. Patrusheva^a, and N. E. Ramazanova^b

^aAltai State University, Barnaul, Russia

^bL.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

#e-mail: ostanin_oleg@mail.ru

Received December 26, 2022; revised June 6, 2023; accepted June 27, 2023

To determine changes of glacier No. 31 (SU5A15106031), happened in the beginning of the XXI century, satellite images, obtained from the Landsat-7, 8, 9 and Sentinel-2 satellites in different years, were analyzed. As a result, data on the glacier changes were obtained for the period from 2000 to 2022. During this time, the length of the main stream of the glacier decreased by 144 m (6.8%), and the total area of the entire glacier – by 0.089 km² (9.7%). The rate of retreat of the glacier front varied from 2 to 15 m/year, on average – 6.5 m/year, and the glacier area decreased by on average of 0.004 km²/year. In 2022, the glacier consisted of two separate ice streams, with a total area of 0.823 km² and a maximum length of 1.955 km. Aerial photography was carried out using a DJI Phantom 4 quadcopter. A high-resolution orthophotoplan (± 5 cm), a digital terrain model, a three-dimensional model of the surface of the glacier tongue and adjacent territories, with a total area of 0.25 km², were made. Radar sounding was performed by the Python-3 georadar in two configurations: at frequencies 50 and 100 MHz. Two cross-sections of the glacier were constructed from the radar data: one was taken at a frequency of 100 MHz, and the second at both – 50 MHz and 100 MHz. The analysis of the radiogram of these profiles made possible to reveal that the larger thickness of the glacier in the study area was measured along the left side of the glacier tongue, the maximum recorded thickness was equal to 66 m.

Keywords: glaciers of Altai, glacier change, monitoring, GPR-sounding, aerial photography

REFERENCES

- Ivanovsky L.N. Glaciers on the eastern outskirts of the South Chuya Range in Altai. *Glyatsiologiya Altaya*. Glaciology of Altai. 1964, 3: 52–64. [In Russian]. Catalog of Glaciers in Russia. Retrieved from: <https://www.gla-cru.ru>. (Last access: 01 February 2023) [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. Glacier Inventory of the USSR. V. 15. Is. 1. Pt. 6. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974: 93 p. [In Russian].
- Nikitin S.A., Vesnin A.V., Osipov A.V., Iglovskaya N.V. Results of radio sounding of glaciers in the Central Altai. *Materialy glyaciologicheskikh issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 2000, 88: 145–149 [In Russian].
- Revyakin V.S. Some notes on modern glaciation of the South Chuya Range. *Glyatsiologiya Altaya*. Glaciology of Altai. 1967, 5: 149–162 [In Russian].
- Revyakin V.S. Glaciation of the South Chuya Range in Altai. *Materialy glyaciologicheskikh issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 194–199 [In Russian].
- Rukovodstvo po sostavleniyu kataloga lednikov SSSR. Guide to compiling a Glacier Inventory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].
- Sapozhnikov V.V. *Po Russkomu i Mongol'skomu Altayu*. Along the Russian and Mongolian Altai. Moscow: State publishing house of geographical literature, 1949: 580 p. [In Russian].
- Tronov M.V. Modern glaciation of Altai. *Izvestiya Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. Proc. of the Tomsk State University. Ser. geogr. 1948, 105: 525 p. [In Russian].
- Tronov B.V. Catalog of Altai glaciers. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Proc. of the Russian Geographical Society. 1925, 2 (57): 107–159 [In Russian].
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muravyov A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Catalog of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016–2019). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 3 (61): 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093> [In Russian].
- GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space. Retrieved from: <https://www.glims.org>. (Last access: 10 November 2022).