

А.Д. КИТОВ*, **Е.В. СЕРЕБРЯКОВ****, **А.С. ГЛАДКОВ****, **О.В. ЛУНИНА****,
В.М. ПЛЮСНИН*^{*}**, **Е.Н. ИВАНОВ***

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, kitov@irigs.irk.ru, plusnin@irigs.irk.ru, egoryo@bk.ru

**Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия,
serebryakov.e.v@mail.ru, gladkov@crust.irk.ru, lounina@crust.irk.ru

***Иркутский государственный университет,
664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия, plusnin@irigs.irk.ru

ГЕОРАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕДНИКА ПЕРЕТОЛЧИНА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

Впервые проведен мониторинг по оценке объема льда ледника Перетолчина в горном массиве Мунку-Сардык (Восточный Саян) с использованием георадарного профилирования как непосредственно для измерения толщины льда, так и для уточнения параметров математических моделей для определения объема ледника. По результатам площадной радиолокационной съемки произведена оценка объема различных структур ледника (фирна, основного ледяного тела, донных морен). Построены 3D-модели этих компонентов ледника. Выявлено, в сравнении с результатами георадарного профилирования с другими ледниками, что современное ложе ледника Перетолчина составляют отложения предыдущего оледенения, закончившегося 11 тыс. л. н. Измерения толщины льда на северном леднике Перетолчина выполнены в июне 2014 г. и мае 2016, 2017 гг. с постоянным увеличением площади исследования радиолокатором «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» на частоте 100 МГц. Карты толщины льда ледника Перетолчина уточнены и определен его объем, который равен $0,007 \pm 0,0001$ км³. Объем участка ледника непосредственного исследования (нижняя открытая часть) — $0,00297$ км³. Метод сечений с учетом рельефа ледника по дополнительным профилям зарекомендовал себя как наиболее точный. В обследованной части доля фирна — 25 %, льда — 29 %, донных морен — 46 %. При этом доля чистого льда сокращается от средней части ледника к его низу. Более чем за 100 лет ледник Перетолчина (северный) сократился по длине в 1,75 раза, по площади в 2,9, в объеме — в 3,71 раза. Установлено, что темпы сокращения ледника Перетолчина увеличиваются с 2009 г.

Ключевые слова: ледник Мунку-Сардык, георадар, толщина льда, изменения площади и объема льда, дистанционное зондирование Земли.

A.D. KITOV*, **E.V. SEREBRYAKOV****, **A.S. GLADKOV****, **O.V. LUNINA****,
V.M. PLYUSNIN*^{*}**, **E.N. IVANOV***

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, kitov@irigs.irk.ru, plusnin@irigs.irk.ru, egoryo@bk.ru

**Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk,
ul. Lermontova, 134, Russia, serebryakov.e.v@mail.ru, gladkov@crust.irk.ru, lounina@crust.irk.ru

***Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, ul. Karla Marksa, 1, Russia, plusnin@irigs.irk.ru

GEORADAR MONITORING OF THE PERETOLCHIN GLACIER (EASTERN SAYAN)

For the first time, a monitoring was carried out for assessing the volume of the ice of the Peretolchin Glacier in the Munku-Sardyk mountain range (Eastern Sayan) using georadar profiling both directly to measure the thickness of the ice and to refine the parameters of mathematical models for determining the volume of the glacier. Based on results of the area radar survey, the volume of the various structures of the glacier (firn, the main icy body, and bottom moraines) was assessed. 3D models of these components of the glacier have been constructed. It was found that, in comparison with results of georadar profiling for other glaciers, the modern bed of the Peretolchin Glacier consists of deposits of the previous glaciation which ended 11 ka. Measurements of the ice thickness on the northern Peretolchin Glacier were made in June 2014, and in May 2016 and 2017, with a constant increase in the study area using the Oco-2 radar with the ABDL Triton antenna unit at 100 MHz. Maps of the ice thickness of

© 2020 Китов А.Д., Серебряков Е.В., Гладков А.С., Лунина О.В.,
Плюснин В.М., Иванов Е.Н.

the Peretolchin Glacier were updated, and its volume was determined, equal to $0,007 \pm 0,0001 \text{ km}^3$. The section of the glacier of direct study (the lower open part) measures $0,00297 \text{ km}^3$. The method of sections, taking into account the relief of the glacier from additional profiles, proved to be the most accurate. In the surveyed portion, the proportion of firn, the ice and the bottom moraine makes up 25 %, 29 and 46 %, respectively. On the other hand, the proportion of the clean ice reduces from the middle part of the glacier to its bottom. Over more than 100 years, the Peretolchin Glacier (northern) has decreased in length, area and volume by factors of 1,75, 2,9 and 3,71, respectively. It has been established that the rate of reduction of the Peretolchin Glacier has been increasing since 2009.

Keywords: *Munku-Sardyk glacier, georadar, ice thickness, changes in the area and volume of ice, Earth remote sensing.*

ВВЕДЕНИЕ

Оценка изменения мощности (объема) горных ледников осуществляется в основном по величине площади ледника. Существуют модели, позволяющие вычислить объем ледяного тела по типу ледника и его площади. Такой подход оправдан благодаря нескольким факторам, в первую очередь из-за труднодоступности объекта исследования, а также из-за опасности проведения работ непосредственно на леднике (камнепады, лавины, большая крутизна). Оценить площадь возможно с помощью дистанционных методов — теодолитных измерений, по данным космической съемки, а в последнее время с помощью беспилотных летательных аппаратов. Современные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с пространственным разрешением менее 1 м позволяют достаточно точно выделить границу открытой части ледника, оконтурить фирновую область, выявить лед в моренных отложениях, определить морфологию поверхности ледника, рассчитать площадь отдельных его частей. Непосредственное измерение толщины льда позволяет более точно определить объем и детальнее изучить строение ледника, исследовать его глубинную структуру (фирн, чистый лед, аномалии внутри ледяного тела, донные морены, вид ложа ледника). Кроме того, такие измерения на доступной и безопасной части ледника позволяют выбрать и уточнить математические модели оценки его мощности. Принципы и возможности георадарного зондирования рассмотрены в ряде работ, в том числе для исследования ледников [1–5].

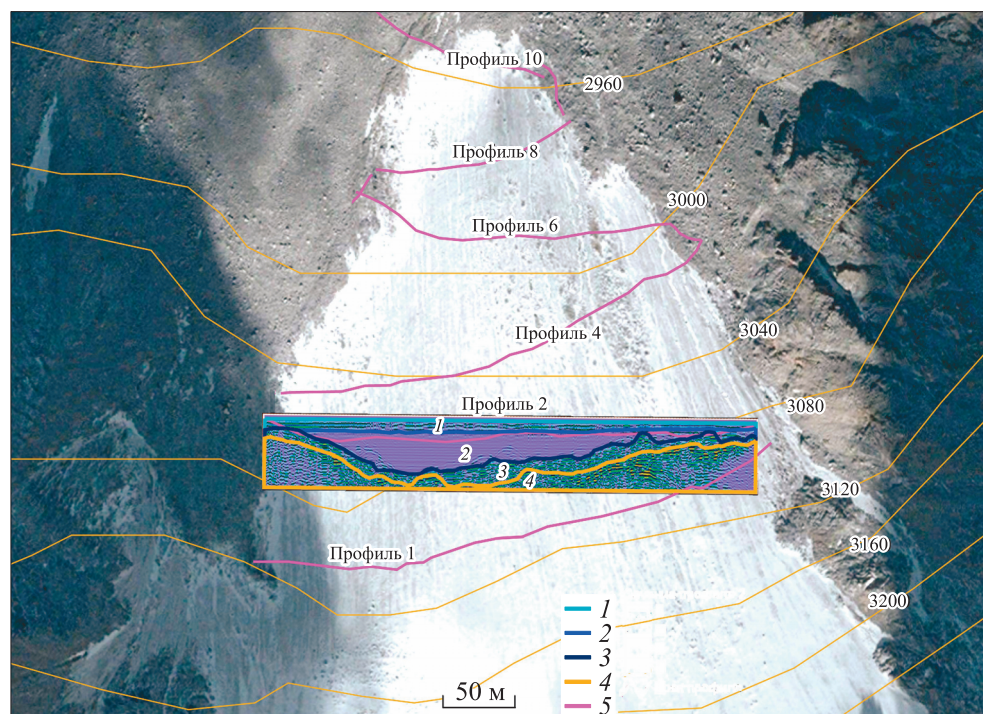


Рис. 1. Схема профилей в исследованиях 2017 г.

Сечение профиля 2: 1 — фирн, 2 — лед, 3 — донные морены, 4 — ложе ледника. 5 — трек профиля. Фон — космический снимок QuickBird (пространственное разрешение 0,6 м).

В районе наивысшей вершины Восточного Саяна Мунку-Сардык (3491 м над ур. моря) работы по георадарному исследованию ледника Перетолчина (северного) [6, 7] были начаты в 2014 г. сотрудниками Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (ИГ СО РАН) и Иркутского национального исследовательского технического университета [8, 9]. С помощью георадара «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» на частоте 50 МГц исследовалась нижняя часть языка ледника. Было пройдено четыре поперечных и один продольный профиль на открытой части ледника площадью 8800 м². Использование такого георадара давало возможность измерять толщину льда, но короткие поперечные профили тогда не позволили с достаточной точностью определить коренное ложе ледника.

В 2016 г. эти работы проводились совместно ИГ СО РАН и Институтом земной коры СО РАН с применением георадара «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» на частоте 100 МГц на более обширном участке и позволили уточнить первоначальную оценку толщины ледника [10, 11]. Было пройдено восемь поперечных и один продольный профиль на открытой части ледника площадью 58 800 м². Кроме того, изменилась технология прохода маршрута. Если в 2014 г. профили проходили, поднимаясь вверх «змейкой», то в 2016 г. спускались с верхней безопасной высоты, проводя измерения, что оказалось физически значительно легче. Было выделено ложе ледника в нижней его части (слой фирна, лед и морены), однако на профилях, где толщина льда больше 17 м, этого сделать не удалось. Несмотря на то что была установлена соответствующая льду диэлектрическая проницаемость [12], ожидаемое время прихода отраженной волны было недостаточным. Тем не менее полученные данные позволили сравнить различные модели оценки объема льда, выбрать оптимальную формулу и рассчитать мощность ледника Перетолчина.

В 2017 г. проведено георадарное профилирование на еще большей площади (93 000 м²) ледника по профилям, полностью перекрывающим ширину ледника (рис. 1). На этом участке пройдено шесть поперечных и шесть продольных профилей. При этом удалось выделить ложе ледника и структуры, дополнительно его характеризующие. Кроме того, была построена 3D-модель ледника, по которой определен его объем. В данной работе рассмотрены результаты этих исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ динамики ледника и измерение его площади производились путем сопоставления разновременных космических снимков Landsat-7 и Landsat-8 с разрешением 15 м/пиксел 2010–2017 гг. Границы ледника уточнялись по снимку QuickBird с разрешением 0,6 м/пиксел. Снимки были привязаны к топографической карте м-ба 1:50 000, дешифрирование границ ледника проводилось в ручном режиме. С учетом того что разрешение снимков составляло 15 м/пиксел, систематическая погрешность определения площади ледника оценивалась в 0,12 км², или 5 % от измеряемой величины. Для снимка QuickBird при разрешении 1 м — 1,5 %. Для регистрации треков профилей использовался GPS-приемник Garmin GPS-64st. Запись приемником велась в формате WGS-84 до десятичных долей градусов, точность регистрации — до 3 м.

Обработка георадиолокационных профилей проводилась в программе GeoScan-32 в несколько приемов. На первом этапе к радарограммам подбирались подходящие значения усиления сигналов, яркости и контрастности. Затем просматривались помехи, позволяющие уточнить основные электрические характеристики горных пород. На втором этапе использовались стандартные режимы обработки. Для удаления или понижения различного рода шумов и помех применялись полосовая и режекторная фильтрация, для увеличения разрешающей способности разреза по глубине — обратная фильтрация. С учетом предыдущего опыта георадарного зондирования была выставлена эквивалентная глубина ожидаемого отраженного сигнала 60 м.

Анализ полученных данных и построение 3D-модели осуществлялись в нескольких ГИС-программах — ArcView-3a, AutoCAD, Micromine. Основная подготовка данных производилась в ArcView. Поскольку результаты обработки в этой программе не удалось экспортировать в AutoCAD, то в ArcView исходные радарограммы привязывались пространственно к леднику по данным GPS и векторизовались. Были выделены слои фирна и льда и построены 3D-модели, а также рассчитан объем ледника.

Дополнительно обработанные данные в ArcView с учетом границ ледника экспортировались также в Micromine для построения более точных 3D-моделей и расчета объема выделенных структур ледника (фирна, льда, донных морен, коренного ложа ледника).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительная обработка профилей. В предыдущих наших исследованиях сравнивались разные модели расчета объема ледника [10, 11]. Для этого на схему ледника были нанесены через 30 м условные профили (ледник был разбит на поперечные доли), а максимальная глубина ледника по осевой линии уточнялась по результатам георадарного профилирования. Там, где не было данных, ложе ледника моделировалось по форме полуэллипсом. Расчет объема производился по формуле $V = \sum s_i d_i$, где d_i — расстояние между сечениями (толщина доли), s_i — площадь сечения доли (при георадарном профилировании площадь выделенной структуры ледника на радарограмме) [10]. По данным 2016 г., объем исследуемой части ледника составил 0,00141 км³. Объем верхней части ледника, где профилирование не проводилось, оценивался по формуле $V = k \times S^p$, где $k = 0,0356$, $p = 1,53$ [13], и составил 0,0043 км³, а общий объем ледника, таким образом, равнялся 0,0057 км³.

В исследовании 2017 г., как и ранее, на схему ледника была наложена сетка 30 × 30 м для дальнейшего сопоставления данных с предыдущими исследованиями.

Поскольку профили по леднику проходят под некоторым углом к сетке, а из-за сглаживания его границ получается грубая трехмерная модель ледника, то исходные профили дополнены несколькими поперечными прямолинейными (рис. 2). Изучение радарограмм показало, что на протяженности 30–60 м вдоль ледника его структура меняется слабо. Поэтому по ближайшим к каждому первичному профилю параллельным линиям сетки (поперечным леднику) проведены модельные подпрофили (см. рис. 2). Они по длине соответствуют реальной ширине ледника. Для профиля 1 (Pr01) (самого верхнего) первый подпрофиль (Pr01-1) проведен по самой верхней точке основного профиля, второй подпрофиль (Pr01-2) — по линии сетки у середины исходного, третий (Pr01-3) — по линии сетки у нижней точки. Для профиля 2 (исходный почти горизонтальный) — первый подпрофиль (Pr02-1) проведен выше исходного по линии сетки, второй подпрофиль (Pr02-2) — ниже по линии сетки. Для профиля 4 второй и третий подпрофили (Pr04-2, Pr04-3) получены смещением первого подпрофиля (Pr04-1) на соответствующие линии сетки. Профили 6, 8 и 10 имеют по два подпрофиля, полученных аналогичным способом. Такое разбиение основных профилей позволяет более точно представить границы ледника и определить объем.

Методика создания 3D-модели ледника Перетолчина. В качестве исходных данных для построения модели в программе AutoCAD использовались результаты интерпретации георадиолокационных разрезов, выполненной в программе GeoScan-32. Поскольку между указанными программами отсутствует прикладная совместимость, конвертация данных осуществлялась посредством преобразования полученных радарограмм в растровые файлы с расширением jpg. После этого растровые данные импортировались в программу AutoCAD, где происходила их последовательная обработка. С использованием данных GPS-профилирования, а именно трехмерных координат точек начала и конца выполненных профилей, загруженные радарограммы привязывались к ним в системе координат WGS-84.

На каждой из радарограмм путем оцифровки 3D-полилинией выделялись георадарные комплексы, отвечающие телу ледника и телу перекрывающего его фирна. На за-

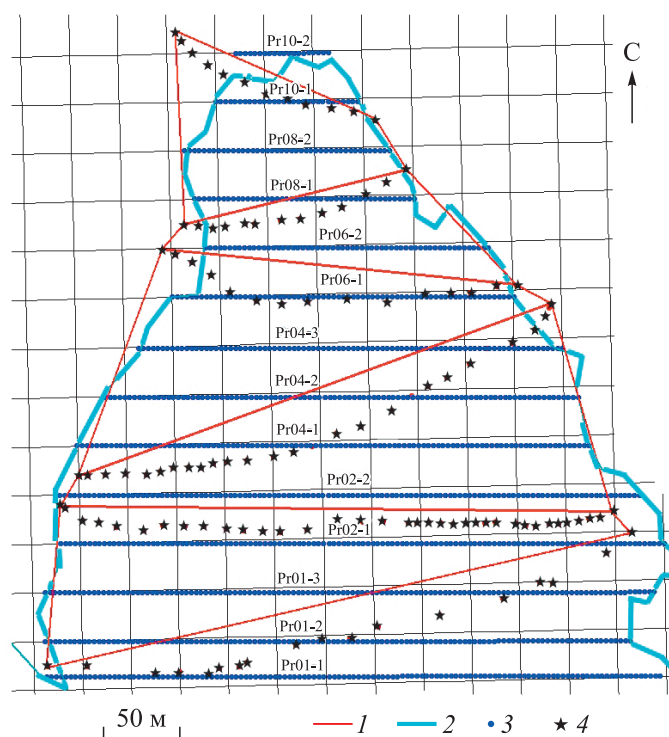


Рис. 2. Представление исходных профилей.

1 — огибающая фигура по концам профилей, линейные профили для расчета объема в AutoCAD; 2 — граница ледника; 3 — пикеты результирующих профилей для построения 3D-модели ледника (подпрофили); 4 — пикеты исходных профилей. Номера подпрофилей — см. текст.

ключительном этапе между смежными контурами льда и фирна в автоматизированном режиме с использованием возможностей трехмерного моделирования, реализованного в программе AutoCAD, производилось построение каркасов и каркасных моделей. Каркасная модель представляет собой любой трехмерный объект в виде цифрового объемного тела, состоящего из стренг — контуров тел на плоскости, на которые накладывается оболочка, описывающая форму и облик моделируемого тела [15].

Данный вид моделей широко используется в горно-геологической отрасли при определении объемов и запасов полезных ископаемых. Каркасная модель наиболее полно и точно описывает форму моделируемого тела, вследствие чего достигается максимальная реалистичность представляемых данных. Готовая каркасная модель может рассматриваться в любой проекции, как в ортогональной, так и в наклонной, и позволяет определять физические параметры тел, что существенно отличает ее от двумерных картографических моделей.

В качестве исходных данных для построения модели в программе Micromine использовались те же результаты интерпретации георадиолокационных разрезов, выполненной в программе GeoScan-32, но претерпевшие ряд дополнительных обработок — уташение профилей, вписывание модели в истинные границы ледника. В результате получены уточненные данные о строении трех основных слоев ледника: донных морен, ледового тела и поверхностного фирна. Эти данные представлены в виде совокупности трехмерных точек, описывающих пространственно-морфологические особенности того или иного выделенного слоя.

Подобные «облака» точек были получены для подошвы донных морен — нижней границы ледника, подошвы ледяного тела, совпадающей с кровлей донных морен, подошвы фирна, являющейся одновременно кровлей тела льда, и, наконец, для кровли фирна, отвечающей верхней границе всего ледника. На основе модуля «Создание поверхности из точек», реализованного в программе Micromine, для каждой из выделенных совокупностей точек были построены трехмерные поверхности. Их построение осуществлялось автоматически методом триангуляции с помощью алгоритма Делоне, когда сопряженные точки, являющиеся топологическими узлами, соединяются прямыми непересекающимися линиями. В результате получается трехмерная поверхность, состоящая из серии разноразмерных треугольников, формирующих единую структуру. На заключительном этапе с применением модуля «Каркас из поверхностей» были сформированы каркасные модели для каждого слоя. На радарограмме выделяются следующие слои: 1 — фирн, 2 — чистый лед и линза теплого льда или лед с редкими обломками горных пород, 3 — донная морена (обломки горных пород с вкраплениями плотного льда), 4 — ложе ледника, образованное коренными породами.

Динамика площади ледника. Изменение площади ледника с 1900-х гг. по настоящее время представлено в таблице по данным Landsat и другим материалам. Объем ледника до 2017 г. определялся по формуле $V = 0,0356S^{1,53}$. Значение объема представлено до четвертого знака после запятой, чтобы показать динамику, хотя истинная точность ниже.

Динамика ледника Перетолчина (северный, № 31, по [7]), хребет Мунку-Сардык, Восточный Саян

Данные (дата съемки)	Год стадии	Длина, км	Площадь, км ²	Объем, км ³
Реконструкция схемы С.П. Перетолчина, по [6]	1900-е	1,47	0,82	0,0264
Каталог [7]	1950-е	1,1	0,7	0,0207
Топокарта (1962 г.)	1960-е	1,01	0,49	0,0120
Landsat-4 (13.07.1994)	1994	1,00	0,47	0,0113
Landsat-5 (25.08.1998)	1998	1,06	0,47	0,0113
Landsat-5 (06.08.2000)	2000	0,94	0,40	0,0088
Landsat-7 (09.08.2001)	2001	0,93	0,41	0,0091
Landsat-7 (12.08.2002)	2002	0,91	0,41	0,0091
Quick Bird (29.08.2006)	2006	0,90	0,31	0,0060
Landsat-7 (11.08.2007)	2007	0,86	0,34	0,0069
Landsat-7 (17.07.2010)	2010	0,90	0,33	0,0066
Landsat-8 (08.08.2015)	2015	0,86	0,33	0,0066
Landsat-8 (25.07.2016)	2016	0,81	0,30	0,0057
Landsat-8 (29.07.2017)	2017	0,81	0,29	0,0054
Георадар, наземные измерения (30.04.2017)	2017	0,80	0,28	0,0070

Почти за 120 лет (с 1900 по 2017 г.) площадь ледника уменьшилась на 66 % (с 0,82 до 0,28 км²), длина — на 46 % (с 1,47 до 0,8 км), а объем — на 73 % (с 0,0264 до 0,007 км³). Сокращение ледника по объему происходит значительно интенсивнее, чем по внешним его геометрическим характеристикам — длине и площади. При этом скорость сокращения длины ледника замедляется, площадь с 2006 г. почти постоянная, а объем льда уменьшается ежегодно. Согласно [16], почти за 130 лет (с 1885 г.) площадь ледника Перетолчина сократилась на 53 %; по нашим данным и данным С.П. Перетолчина [6], за 120 лет — на 66 %.

Кроме того, при построении 3D-объектов выявляются некоторые особенности характеристик ледника. При анализе площади и длины приходится иметь дело с плоскими изображениями (карта, космоснимок, аэроснимок) и, как правило, используется площадь проекции. Однако истинная площадь поверхности ледника иная, поскольку находится на крутом склоне. Например, при расчете в ГИС площадь ледника дневной поверхности в проекции — 100 745 м², реальной поверхности — 120 082 м², что больше на 16 %. В литературе по использованию математических моделей для расчета характеристик ледника эта особенность не рассматривается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ уточнена толщина льда ледника Перетолчина (северного) и более точно определен его объем — 0,007 ± 0,0001 км³. Расчет объема ледника (нижней открытой части) производился несколькими методами: 1) по математическим моделям, в результате построения с помощью программного обеспечения ArcView ($V_{\text{фирн}} = 0,00066 \text{ км}^3$, $V_{\text{лед}} = 0,0012 \text{ км}^3$, $V_{\text{лед + фирн}} = 0,00186 \text{ км}^3$, $V_{\text{морены}} = 0,00074 \text{ км}^3$, $V_{\text{лед + фирн + морены}} = 0,0026 \text{ км}^3$); 2) в программе AutoCAD ($V_{\text{лед + фирн}} = 0,001691 \text{ км}^3$, $V_{\text{фирн}} = 0,000668$, $V_{\text{лед}} = 0,001023$); 3) в программе Micromine ($V_{\text{лед + фирн + морены}} = 0,00273 \text{ км}^3$, $V_{\text{лед + фирн}} = 0,002 \text{ км}^3$, $V_{\text{фирн}} = 0,0007 \text{ км}^3$, $V_{\text{лед}} = 0,0013 \text{ км}^3$, $V_{\text{морены}} = 0,00073 \text{ км}^3$). Метод сечений с учетом рельефа ледника по дополнительным профилям зарекомендовал себя как наиболее точный.

Объем верхней части ледника по модельным расчетам составляет 0,0043 км³, а общий объем — 0,00703 км³. В обследованной части доля фирна — 25 %, льда — 46 %, донных морен — 29 %. При этом доля чистого льда сокращается книзу от средней части ледника. Максимальная мощность ледника достигает 47 м.

В задачи мониторинга входила и отработка методики исследования. Если в 2014 г. в результате полевых работ были определены возможности измерения мощности льда, привязки профилей на местности с помощью GPS-приемников и дешифрирования разновременных космических снимков для выявления границ ледника, то в последующие годы применялись различные аналитические программы для 3D-моделирования и рекомендовались для использования наиболее точные, близкие к реальным величинам, — это ArcView-3a и Micromine. Введены дополнительные профили с шагом 30 м для уточнения ширины ледника между исходными профилями. Уточнены параметры фильтрации георадиолокационных профилей, позволившие выделить свежий снег, фирн, лед, различного рода включения в теле ледника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. — М.: Сов. радио, 1977. — 176 с.
2. Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Щекотов А.Ю. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения // Успехи физических наук. — 2000. — № 5. — С. 565–568.
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 153 с.
4. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. 2nd Edition. — London: The Institute of Electrical Engineers, 2004. — 320 p.
5. Петраков Д.А., Лаврентьев И.И., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А. Толщина льда, объем и современные изменения площади ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли. — 2014. — Т. 18, № 3. — С. 91–100.
6. Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Том. техн. ин-та. — 1908. — Т. 9. — С. 1–47.
7. Каталог ледников СССР. Т. 16, вып. 1: Енисей, ч. 3–5; вып. 2: Ангара, ч. 1. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 64 с.

8. **Китов А.Д., Вишняков К.А., Бадминов П.С., Крюкова И.Г., Оргильянов А.И.** Вторая 2014 года экспедиция на Мунку-Сардык и сезонные особенности прохождения // Вестн. Вост-Сиб. акад. образования. — 2014. — № 2–3. — С. 78–83.
9. **Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M., Suvorov E.G.** Modern changes of high altitude landscapes and glaciation in Southern Siberia (Russia) on the example of the East Sayan Mountains // Environmental Earth Sciences. — 2015. — N 74. — P. 1931–1946.
10. **Китов А.Д., Гладков А.С., Лунина О.В., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Серебряков Е.В., Афонькин А.М.** Изменения мощности ледника Перетолчина (Восточный Саян) // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто / ИнтерГИС». — 2017. — № 1 (23). — С. 405–417.
11. **Kitov A.D., Ivanov E.N., Plyusnin V.M., Gladkov A.S., Lunina O.V., Serebryakov E.V., Afon'kin A.M.** Georadar Investigations of the Peretolchin Glacier (Southern Siberia) // Geogr. Nat. Resour. — 2018. — Vol. 39, N 1. — P. 55–62.
12. **Мачерет Ю.Я.** Радиозондирование ледников. — М.: Научный мир, 2006. — 392 с.
13. **Кутузов С.С.** Изменение площади и объема ледников хребта Терской Ала-Тоо во второй половине XX в. // Лед и снег. — 2012. — № 1. — С. 5–14.
14. **Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лаврентьев И.И.** Об оценке объема льда горных ледников // Лед и снег. — 2013. — № 1. — С. 5–15.
15. **Ермолов В.А.** Геология: Учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 2: Разведка и геолого-промышленная оценка месторождений полезных ископаемых. — М.: Изд-во Моск. горн. ун-та, 2005. — 392 с.
16. **Осипов Э.Ю., Осипова О.П.** Динамика оледенения в горах юга Восточной Сибири за последние 160 лет // Лед и снег. — 2015. — № 2. — С. 33–41.

Поступила в редакцию 25.07.2019

После доработки 16.01.2020

Принята к публикации 24.03.2020