

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 910.3:551.324

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(158-166)

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

*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, kitov@irigs.irk.ru, egoryo@bk.ru, plusnin@irigs.irk.ru
**Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
gladkov@crust.irk.ru, lounina@crust.irk.ru, serebryakov.e.v@mail.ru, andrei.afonkin@mail.ru

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДНИКА ПЕРЕТОЛЧИНА (ЮЖНАЯ СИБИРЬ)

Приведены результаты радиолокационного профилирования ледника Перетолчина в массиве Мунку-Сардык на юге Сибири в июне 2014 и мае 2016 гг., при котором использовался георадар «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» с частотой излучения 50 и 100 МГц. Определены толщина льда по профилям и объемы льда по площади сечений и расстояний между профилями. Вычислен объем льда в теле ледника Перетолчина, равный $0,007 \pm 0,0019$ км³. Аналитическим методом определен также объем льда по зависимости от типа ледника и его площади. Установлено, что корреляционная связь между объемом и площадью ледников выражена степенной функцией $V = kS^p$. Рассчитанный с учетом разных коэффициентов средний объем льда составил $0,0061$ км³. Зафиксирован объем льда по модели GlabTop, учитывающей форму поперечного сечения тела ледника: средний объем по двум сечениям (параболическому и эллипсов) — $0,0073$ км³. Установлено, что за 110 лет с начала исследования морфологии ледника Перетолчина он уменьшился в длину и по площади в два раза, а его объем сократился в 3,7 раза, нижняя граница открытой части ледника поднялась за это время на 184 м.

Ключевые слова: георадар, толщина льда, объем льда, изменения площади ледника, юг Сибири.

A. D. KITOV*, E. N. IVANOV*, V. M. PLYUSNIN*, A. S. GLADKOV**,
O. V. LUNINA**, E. V. SEREBRYAKOV**, A. M. AFON'KIN**

*V. B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Ulan-Batorskaya, 1, Irkutsk, 664033, Russia, kitov@irigs.irk.ru, egoryo@bk.ru, plusnin@irigs.irk.ru
**Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Lermontova, 128, Irkutsk, 664033, Russia, gladkov@crust.irk.ru, lounina@crust.irk.ru,
serebryakov.e.v@mail.ru, andrei.afonkin@mail.ru

GEORADAR INVESTIGATIONS OF THE PERETOLCHIN GLACIER (SOUTHERN SIBERIA)

Presented are the results obtained from the radar profiling of the Peretolchin glacier in the Munku-Sardyk mountain range in the south of Siberia (June 2014 and May 2016) using georadar "Oko-2" with the ABDL "Triton" antenna unit operating at the radiation frequency of 50 and 100 MHz. The ice thickness was determined from the profiles and the ice volumes from the cross-sectional areas and distances between profiles. The ice volume was calculated for the body of the Peretolchin glacier to be 0.007 ± 0.0019 km³. An analytical method was also used to determine the ice volume according to the type and area of glacier. It is established that the correlation between the volume and the area of the glaciers is expressed by a power function $V = kS^p$. The mean ice volume, calculated with due regard for different coefficients, was 0.0061 km³. The GlabTop model that takes into account the cross-sectional form of the glacier was used to infer the ice volume: the mean volume for two cross-sections (parabolic and ellipses) was 0.0073 km³. It is established that for 110 years since the start of the investigation into the morphology of

© 2018 Китов А. Д., Иванов Е. Н., Плюснин В. М., Гладков А. С., Лунина О. В.,
Серебряков Е. В., Афонькин А. М.

the Peretolchin glacier, it has increased twice in its length and in area, its volume has decreased by a factor of 3.7, and the lower boundary of the open part of the glacier has risen 184 meters for that time.

Keywords: georadar, ice thickness, ice volume, changes in the area of the glacier, south of Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Важными индикаторами климатических изменений в горах Южной Сибири служат современные ледники. С середины 1970-х гг. отмечается существенное сокращение ледников Алтая [1], Саяна [2], Кодара [3], что связывается с глобальным потеплением климата. В массиве Мунку-Сардык — восточной ветви Восточного Саяна — находятся пять каровых ледников: три на территории Монголии и два — Перетолчина и Радде — в России. Сокращение оледенения заключается в уменьшении количества ледников, их площади и объема. Целью настоящего исследования стало измерение толщины льда ледника Перетолчина и оценка его объема.

Задача определения размеров ледников сводится чаще всего к регистрации видимых параметров объекта, его границ с использованием воздушных, космических снимков или наземным способом с помощью регистрации границ ледника приемником GPS или другим геодезическим прибором. Однако для установления мощности ледника требуется измерение его толщины. Обычно ложе ледника рассчитывается по формулам, учитывающим тип ледника и размер кара и цирка. В этом случае можно получить грубую оценку мощности ледника. Поэтому отдельный интерес представляют прямое измерение толщины льда и построение формы днища кара по полученным реперам и профилям.

Один из перспективных дистанционных методов такого изучения — георадарное профилирование. Радиолокация подповерхностных объектов получила большое распространение в геофизических исследованиях, геологии, археологии, строительстве и др. [4]. Интересно, что первое зафиксированное радиоотражение от подповерхностных структур было получено случайно на ледовом аэродроме в Антарктиде А. Уэйтом в 1957 г. Он обратил внимание на то, что радиовысотомер, который представлял собой импульсный радиолокатор, показывал высоту 900 футов еще до момента отрыва самолета от взлетной полосы. Оказалось, что он фиксировал отражение от нижней границы ледника [5].

Глубина зондирования зависит от диэлектрической проницаемости среды и частоты излучения. Диэлектрическая проницаемость льда и грунтов, подстилающих ледник, разная, и поэтому скорость распространения электромагнитных волн в этих средах тоже различается. Расстояние до границы изменения сред (толщину льда) можно определить по времени прохождения отраженной волны от ложа ледника $H = TV/2$. $V = c/\sqrt{\epsilon}$, где c — скорость света в вакууме, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды. Длина волны электромагнитного излучения (λ) и частота волны (f) связаны следующим образом: $c = \lambda f$, $f = 1/T$. Тогда $H = (\lambda/2\sqrt{\epsilon})$. Чем длиннее волна электромагнитного излучения и меньше диэлектрическая проницаемость среды, тем больше глубина проникновения волн в эту среду.

В последнее время ледники Восточного Саяна, как и большинство ледников Северного полушария, быстро сокращаются. Так, например, за 110 лет площадь ледника Перетолчина уменьшилась в два раза с 0,68 (1906 г.) до 0,34 км² (2012 г.). Вся группа ледников массива Мунку-Сардык с начала 1960-х по 2006 г. сократилась с 2,62 до 1,06 км² [6]. Характерно существенное сокращение малых каровых ледников не только по площади, но и в толщину. По оценкам С. П. Перетолчина, толщина ледника в 1906 г. составляла 85 м [7].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕДНИКА ПЕРЕТОЛЧИНА

Ледник Перетолчина расположен в горном массиве Мунку-Сардык восточной части Восточного Саяна. Это каровый ледник (в прошлом переметный) на границе России и Монголии, северной экспозиции на территории России. В Каталоге ледников СССР [8] обозначен под номером 31. Из всех ледников Восточного Саяна он наиболее изучен, картировать его начал С. П. Перетолчин более ста лет тому назад, впоследствии ледник получил имя этого ученого [9].

Ледник имеет большую крутизну в верхней части и труднодоступен для наземных исследований. Апрель—май — наиболее удобное время для подхода (особенно с аппаратурой) к леднику по наледям рек. В летне-осеннее время здесь наблюдаются снежные лавины и частые камнепады.

Сотрудниками Института географии СО РАН и Иркутского государственного университета ледник Перетолчина начал изучаться с 2005 г. [10]. В результате была создана база данных, позволяющая

отслеживать динамику как этого ледника, так и всей группы ледников массива Мунку-Сардык [11]. Однако мониторинг ледника ведется преимущественно с регистрацией его геометрических границ. Мощность льда практически не оценивалась. По результатам исследования моренных комплексов и сопоставления фотографий, сделанных С. П. Перетолчиным в 1906 г., с современными снимками, его толщина уменьшилась примерно на 30–50 м в разных частях кара. Определение более точной толщины современной массы льда геофизическими методами позволило бы выполнить реконструкцию оледенения и установить объем льда этого ледника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые работы. Для измерения толщины ледника Перетолчина в июне 2014 г. было проведено радиолокационное обследование георадаром «Око-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (частотой 50 МГц) с системой цифровой регистрации радарных данных. Дополнительно осуществлялась привязка профилей на местности с помощью GPS-приемников. Работы по радиолокационному профилированию ледника Перетолчина проводились в пеших маршрутах группой из четырех человек. Измерения были выполнены по поперечным профилям и одному продольному, охватывая доступную нижнюю часть ледника (рис. 1).

В мае 2016 г. георадиолокационные исследования на леднике велись на значительно большем по размеру участке. Также использовался георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБДЛ «Тритон». Неэкранированная антенна АБДЛ «Тритон» с дипольным излучателем 100 МГц характеризуется, согласно спецификации, максимальной глубиной исследования 20 м и разрешающей способностью 0,5 м. Работа георадарного оборудования основана на излучении электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [4, 12]. Описание и главные принципы метода подповерхностного радиолокационного зондирования представлены в [13, 14].

Вкрест и вдоль простирания языка ледника были пройдены восемь поперечных георадарных профилей длиной от 100 до 340 м (см. рис. 1) и один продольный (730 м). Общая длина профилей — 2800 м.

Полученные значения заносились в базу данных одновременно с навигационной информацией в табличном виде. Для этого использовался портативный GPS-приемник «Garmin GPSmap76CSx». Запись приемником велась в формате WGS-84 с точностью до десятичных долей градуса. Обработка георадиолокационных разрезов осуществлялась 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 элект-

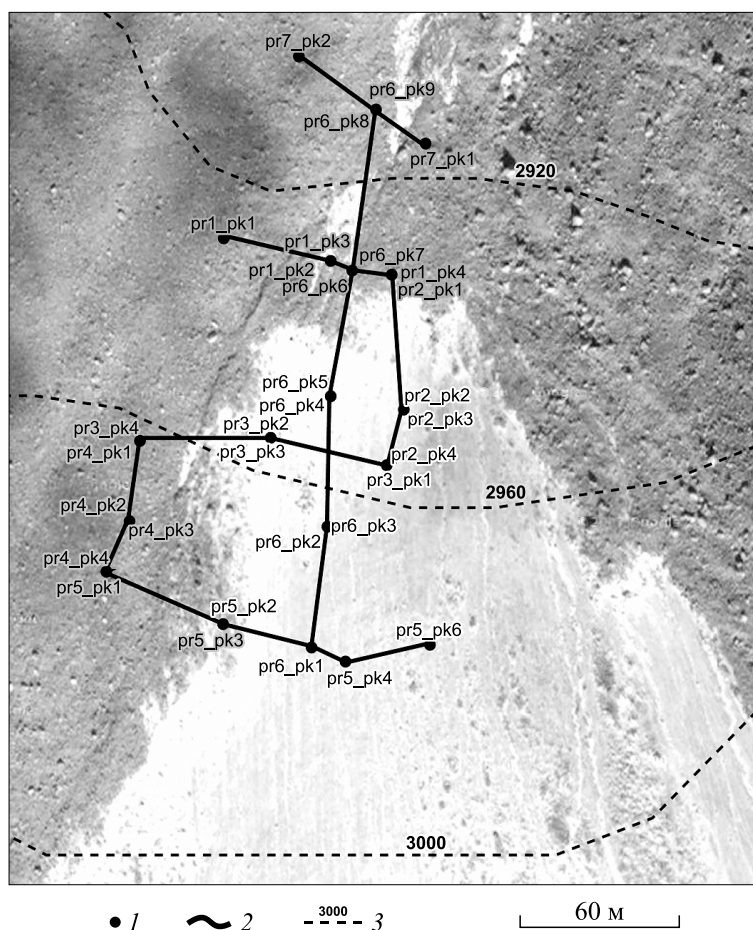


Рис. 1. Георадарное профилирование нижней части ледника Перетолчина в 2014 г.

1 — отметки пикетов (pk); 2 — треки профилей (pr); 3 — изолинии рельефа с отметками высот (м).

рические характеристики горных пород. На втором этапе использовались стандартные режимы обработки. Для удаления или понижения различного рода шумов и помех применялись полосовая и режекторная фильтрации, для увеличения разрешающей способности разреза по глубине — обратная фильтрация. Для оценки запасов льда в леднике кроме толщины льда требуется определить его площадь.

Изменения площади ледника Перетолчина. Площадь ледника анализировалась путем сопоставления разновременных космических снимков Landsat-7, -8 с разрешением 15 м за 2010–2015 гг. Границы ледника, определенные на местности в 2006 г., уточнялись по снимкам QuickBird с разрешением 0,6 м (рис. 2). Снимки были взаимно привязаны, приведены в единую проекцию WGS-84, наложены на топографическую карту 1987 г. м-ба 1:100 000. Все измерения проводились в программе ArcViewGIS версии 3.2a. Динамика размеров ледника Перетолчина представлена в табл. 1 [11].

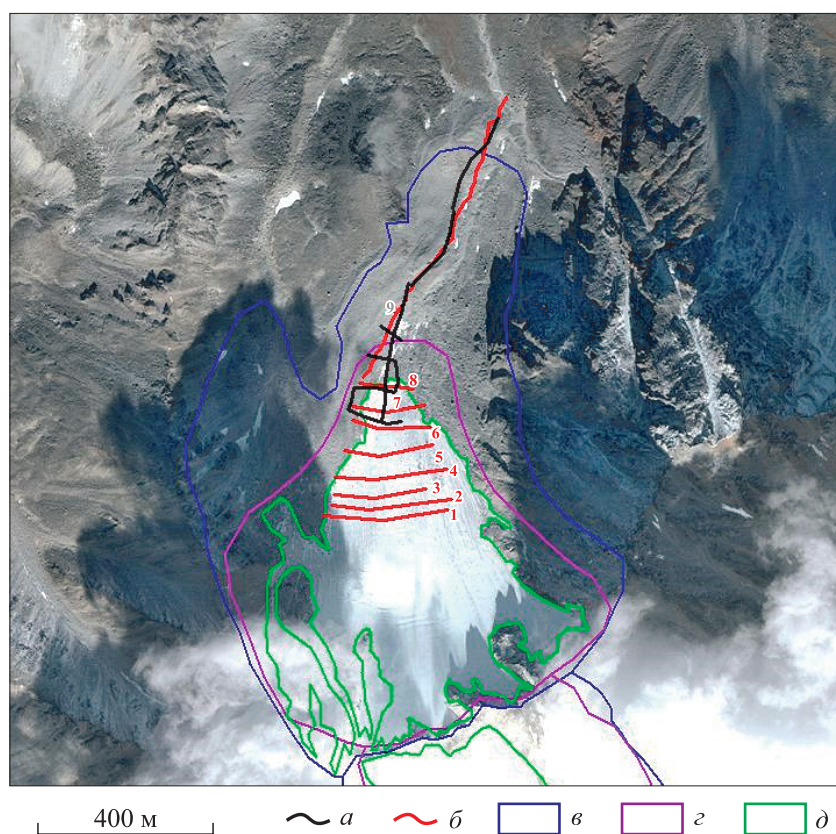


Рис. 2. Схема профилей экспедиций 2014 (а) и 2016 гг. (б).

Стадии изменения границ ледника: в — 1906 г., г — 1965, д — 2010 г.
1–9 — номера профилей 2016 г. Фон — космоснимок QuickBird.

Таблица 1

Основные характеристики ледника Перетолчина

Год и источник исследования	Общая площадь, км ²	Максимальная длина, км	Верхняя граница, м	Нижняя граница, м
1908, по [7]	0,68	1,503	3491	2776
1965, по [15]	0,7	1	—	2908
1973, по Каталогу ледников СССР [8]	0,7	1	—	2910
1982, по [16]	0,53	1,1	—	2860
2010, по космоснимкам Landsat-7	0,34	0,8	3485	2960

Примечание. Прочерк — нет данных.

Оценка толщины и объема льда ледника Перетолчина аналитическими методами. Для оценки объема льда предложено несколько способов. В основу одного из них положена корреляционная связь между объемом (V) и площадью (S) ледников в виде степенной функции [17]

$$V = kS^p, \quad (1)$$

где коэффициенты k и p зависят от типа ледника и расположения горно-ледниковой системы и могут изменяться в широких пределах.

Н. В. Ерасов [18] предложил следующие коэффициенты для горных ледников: $V = 0,027S^{1,5}$. В таком случае для ледника Перетолчина объем льда будет равен $0,005353 \text{ км}^3$, средняя толщина льда составит $15,7 \text{ м}$.

С. С. Кутузов [19] использовал другие данные: $V = 0,0356S^{1,53}$. Тогда объем льда оценивается в $0,006833 \text{ км}^3$, а средняя толщина льда — $20,1 \text{ м}$.

Ю. К. Нарожный и С. А. Никитин [1] для каровых и карово-висячих ледников Алтая применили следующую формулу: $V = 0,0487S^{1,244}$. Согласно этим данным, объем ледника Перетолчина равен $0,006088 \text{ км}^3$, средняя толщина льда — $17,9 \text{ м}$ [1]. Средние значения по этому методу оценки составят: объем — $0,006091 \text{ км}^3$, толщина льда — $17,9 \text{ м}$, или округленно $0,0061 \text{ км}^3$ и 18 м соответственно.

Другой способ установления объема льда заключается в расчете толщины льда вдоль осевой линии ледника с учетом рельефа. В этом случае используется формула модели GlabTop (Glacier bed Topography) [20]:

$$h = \tau / (fg\rho \sin \alpha), \quad \tau = 0,005 + 1,598\Delta H - 0,435\Delta H^2, \quad (2)$$

где h — толщина льда, м; τ — напряжение сдвига на ложе, кПа; f — коэффициент формы поперечного сечения ледника; ρ — плотность льда (900 кг/м^3); g — ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$); α — угол наклона поверхности вдоль центральной линии ледника, град.; ΔH — высота ледника (разница высот между высшей и низшей точками).

Коэффициент формы f связан с сопротивлением, возникающим на краях ледника в результате трения о борта долины, он может изменяться от $0,5$ до $0,9$ [21]. Для карово-висячего ледника Перетолчина коэффициент формы равен $0,9$.

Построение карты уклонов по цифровой модели рельефа ASTER GDEM V2 (пространственное разрешение 1 угловая секунда и 12 м по высоте) оказалось менее точным по сравнению с данными топографической карты м-ба $1:50\,000$, поэтому использовали данные последней.

Угол наклона поверхности вдоль центральной линии определялся для отрезков с горизонтальной проекцией 20 м . До 13 -й точки вдоль линии тока открытой части языка ледника углы не превышали 30° , выше — достигали 40° . Значения толщины льда (h) рассчитывались для 30 точек по формуле (2).

При параболическом сечении ледника площадь поперечного сечения определяется соотношением

$$s_i = (2/3)h_iw_i, \quad (3)$$

где h_i — толщина ледника в точках пересечения продольного профиля и поперечных сечений; w_i — ширина ледника в этих точках.

Объем льда вычисляется по формуле

$$V = \sum s_i d_i, \quad (4)$$

где d_i — расстояние между сечениями.

Объем $V = 0,0067 \text{ км}^3$, средняя мощность льда составляет $19,7 \text{ м}$.

При определении площади методом эллипсов

$$s_i = 0,25\pi h_i w_i \quad (5)$$

объем льда будет равен $0,0079 \text{ км}^3$, а средняя толщина льда — $23,2 \text{ м}$.

Сто десять лет назад С. П. Перетолчин оценивал толщину льда в леднике в 85 м , площадь — $0,68 \text{ км}^2$, а длину — $1,5 \text{ км}$ [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в результате радиолокационного профилирования ледника данные схематично представлены на рис. 3 и 4. Они использовались для расчета объема льда по формуле (4).

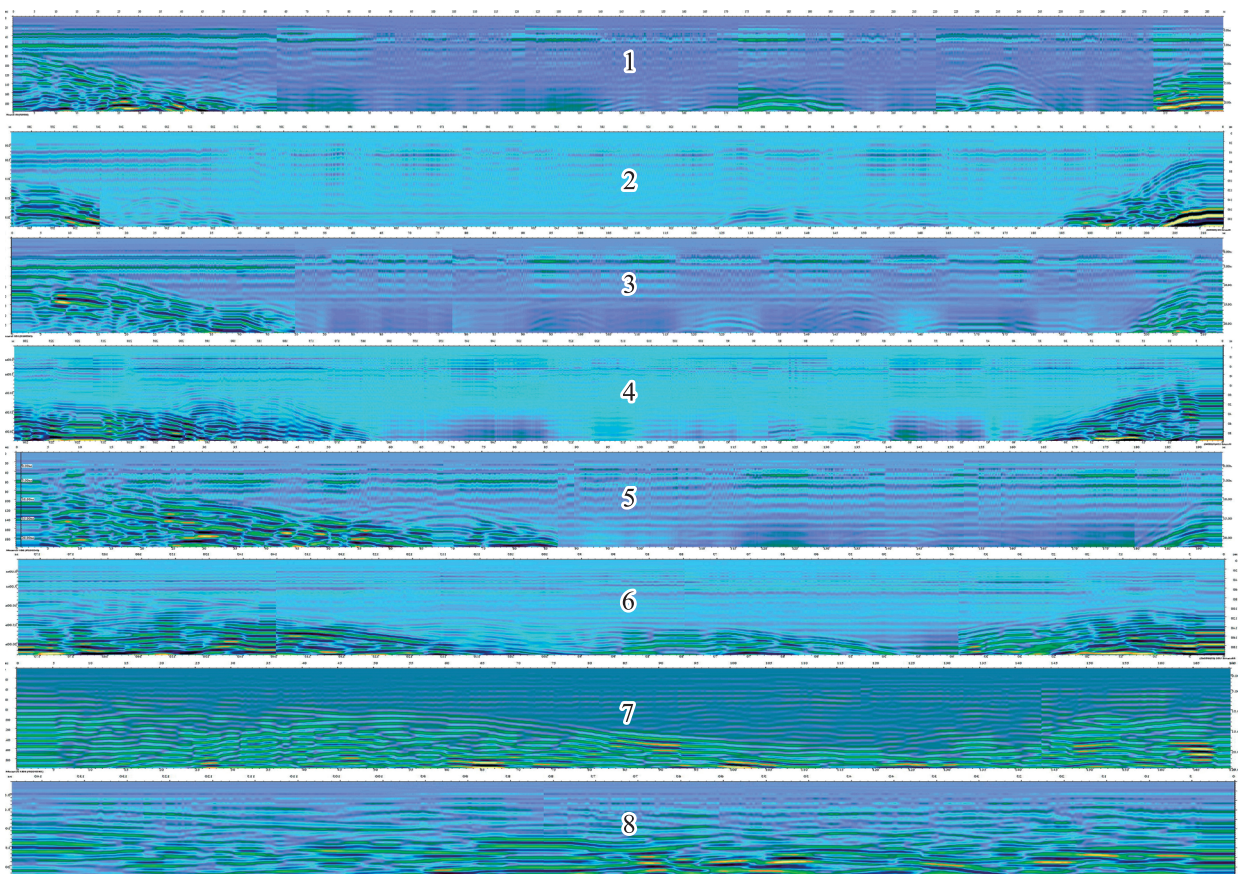


Рис. 3. Поперечные профили ледника.

Здесь и на рис. 5: 1–8 — номера профилей.

На поверхности ледника фиксируется сезонный снег, далее фирн, основная толща ледника (чистый лед), придонный лед с вкраплениями обломков горных пород, донные морены, коренное ложе ледника. На частоте 100 МГц ложе ледника, а также придонные отложения начинают просматриваться с профиля 6 (раздел различных сред) на глубине около 23 м (см. рис. 4).

Радарограммы профилей 1–8 (рис. 5) применялись при оценке мощности ледника с применением метода сечений по формуле (4). Для этого радарограммы привязывались в метровых координатах в ArcView-3.2a согласно их параметрам по длине профиля и глубине и калибровались относительно профиля 1 с учетом схемы профилей (см. рис. 2). Максимальная толщина льда фиксируется по осевой линии ледника, убывая к бортам кара. Здесь же увеличивается количество обломов горных пород в теле ледника и фиксируются трещины в скальном основании, приводящие к раздроблению коренных пород, выносу обломков вниз по течению льда и в результате углублению ложа ледника.

В ArcView-3.2a рассчитывались площади сечений S_i ($i = 1, \dots, 8$). Эти данные (табл. 2) с учетом расстояния d_i между профилями подставлялись в формулу (4).

В полосе профилей от открытой части ледника до его верхней точки объем льда равен $0,0059 \text{ км}^3$. При этом примерно 20 % объема не было учтено из-за того, что ледник выше первого профиля несколько расширяется, а с восточной стороны профили не доходили до края ледника на 25–50 м. С учетом этих 20 % поправка к объему льда составит около $0,0011 \text{ км}^3$, и в сумме объем льда ледника Перетолчина методом радиолокационного зондирования оценивается в $0,007 \text{ км}^3$. Точность определения здесь зависит от погрешностей измерения площади ледника по космоснимкам QuickBird (примерно 5 %), погрешностей построения цифровой модели рельефа и координатной привязки профилей (около 10 %), а также неточностей при интерпретации результатов радиозондирования (10–15 %). Таким образом, с учетом ошибок измерения, объем льда в леднике Перетолчина будет равен $0,007 \pm 0,0019 \text{ км}^3$.

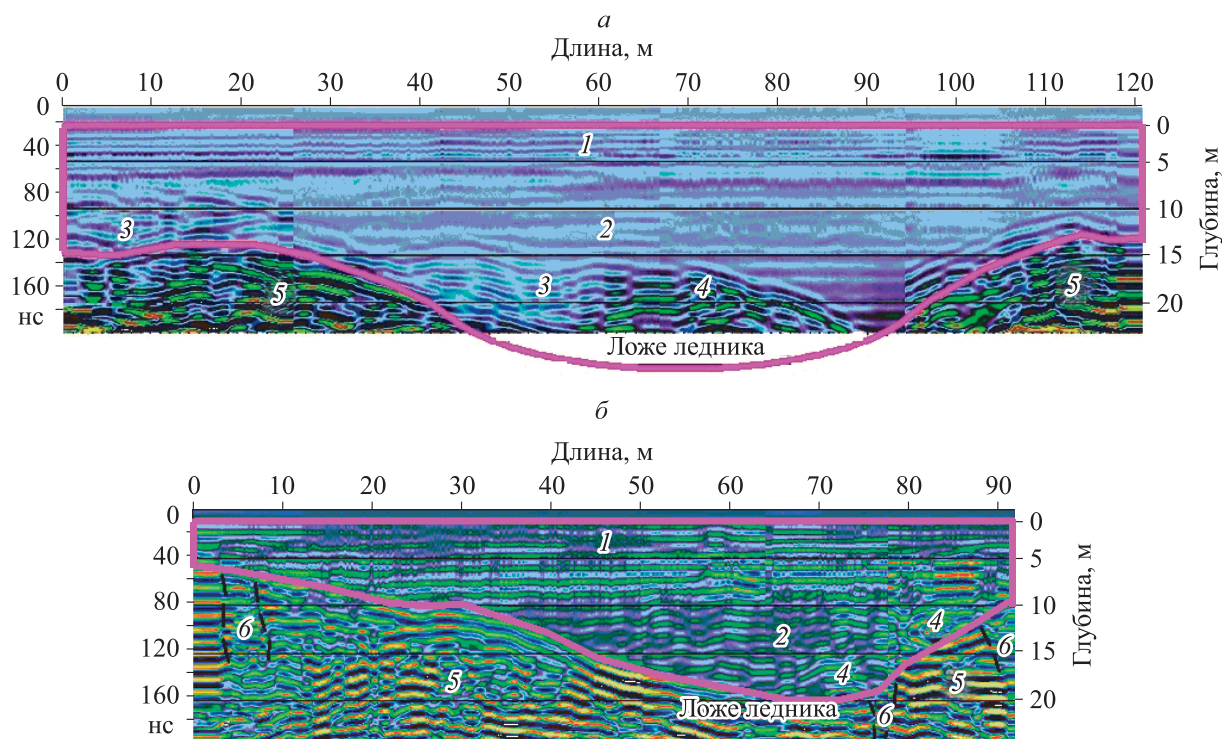


Рис. 4. Пример обработанных профилей 2016 г.

а — профиль 6; б — профиль 7 (после привязки и векторизации в ГИС ArcView). 1 — фирн; 2 — чистый лед; 3 — лед с обломками горных пород; 4 — донные морены; 5 — коренное ложе ледника; 6 — трещины в коренных породах, заполненные льдом.

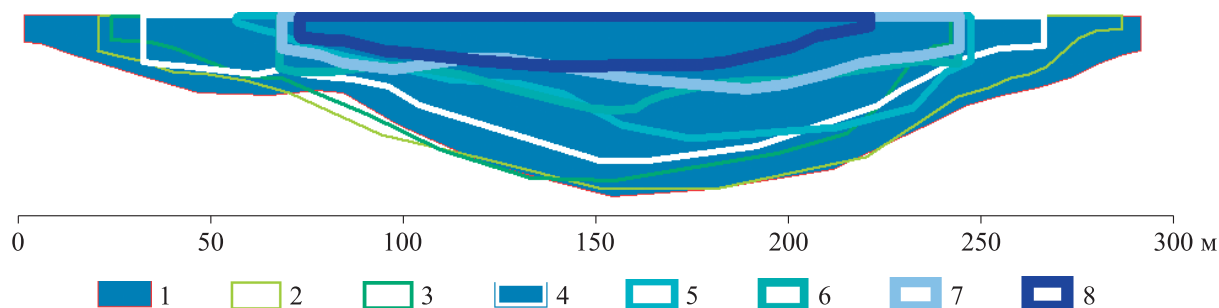


Рис. 5. Сечения ледника Перетолчина по профилям.

Линейка внизу — масштабная шкала взаимного расположения профилей относительно профиля 1.

Таблица 2

Результаты расчетов по данным георадарных профилей

Параметры	Профиль							
	Пр1	Пр1-2	Пр2-3	Пр3-4	Пр4-5	Пр5-6	Пр6-7	Пр7-8
i	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i , км ²	0,0081	0,0074	0,0059	0,0054	0,0038	0,0029	0,0024	0,0015
d_i , км	0,505	0,025	0,025	0,044	0,046	0,062	0,33	0,064
V_i , км ³	0,00409	0,00019	0,00015	0,00024	0,00017	0,00018	0,00078	0,00009

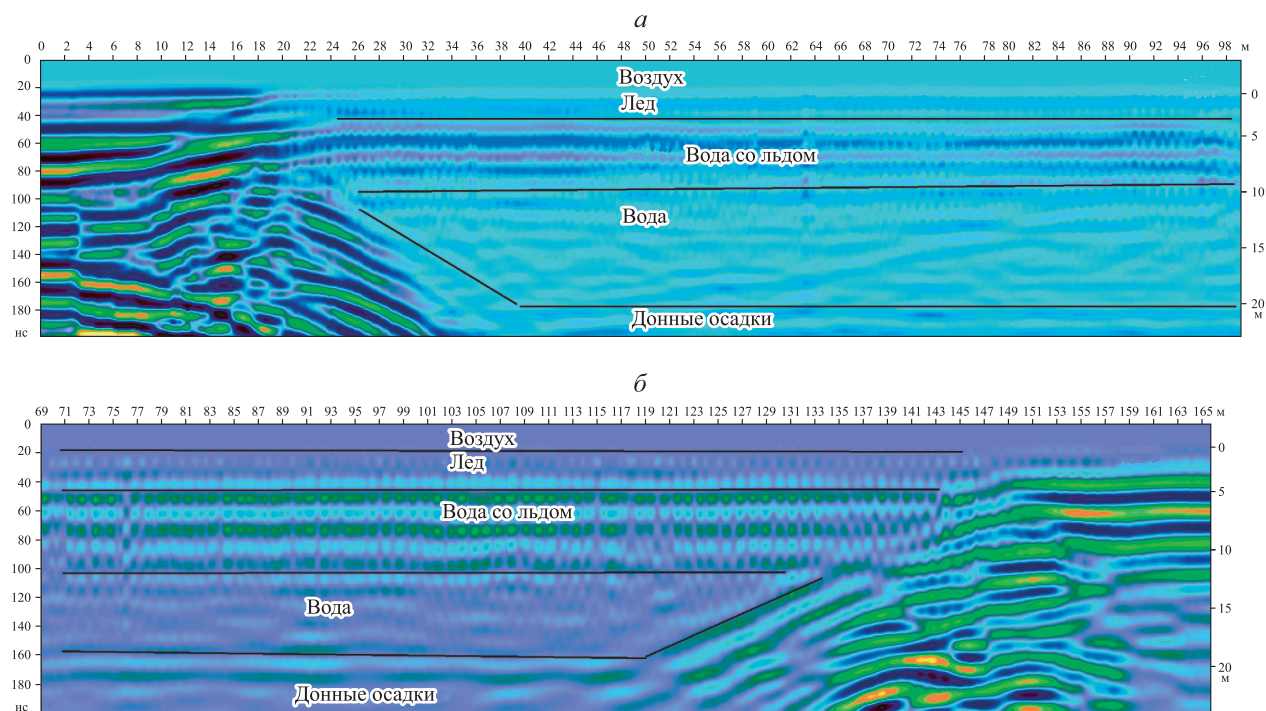


Рис. 6. Радарограммы оз. Эхой (май 2016 г.).

Профили от: *а* — берега со стороны ледника к центру, *б* — центра направо к берегу под углом 90°.

Для контроля проведено георадарное исследование оз. Эхой, расположенного в 500 м ниже ледника Перетолчина (рис. 6). Озеро имеет округлую форму, в диаметре около 200 м. Профилирование выполнено от берега со стороны морен ледника до центра и от центра под углом 90° направо к берегу. Установлено, что донные отложения начинаются на глубине 15–17 м, водоем полностью не промерзает, толщина чистого льда на поверхности около 3 м, ниже смесь воды и льда толщиной около 7 м, ниже слой воды около 5–7 м и донные осадки с преобладанием илов и песчано-щебеночных отложений. Берега сложены крупноглыбовыми отложениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения толщины льда на леднике Перетолчина (массив Мунку-Сардык, Восточный Саян) проводились в июне 2014 и в мае 2016 гг. Впервые охарактеризован объем льда ледника Перетолчина с использованием различных моделей и по результатам георадарного профилирования.

Формулы оценки объема льда ледника дают результаты в широком диапазоне, модели степенного вида (1) — близкие результаты, но для них требуется определение параметров с учетом типов ледников конкретной местности. Однако при использовании коэффициентов, применяемых для каровых и карово-висячих ледников, получился объем льда, близкий к объему при радарном исследовании.

Наиболее точные данные дает метод сечений на основе формул (2)–(4) с учетом рельефа ложа ледника. При параболической форме сечения ледника получился несколько заниженный, а эллиптической — завышенный показатель.

Более чем за 110 лет ледник Перетолчина (северный) сократился по площади и длине в два раза (см. табл. 1), а в объеме — с 0,026 до 0,007 км³, в 3,7 раза. Нижняя граница открытой части ледника поднялась на 184 м.

Работа выполнена в рамках комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН № 11.2 (0347–2015–0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нарожный Ю. К., Никитин С. А. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века // МГИ. — 2003. — Вып. 95. — С. 93–101.
2. Plyusnin V. M., Kitov A. D., Ivanov E. N., Sheinkman V. S. Distinctive characteristics of formation and dynamics of nival-glacial geosystems in the South of East Siberia and on Mongolian Altai // Geography and Natural Resources. — 2013. — Vol. 34, N 1. — P. 1–13.
3. Плюснин В. М., Китов А. Д. Динамика нивально-гляциальных систем юга Восточной Сибири // Лед и снег. — 2010. — № 2. — С. 5–11.
4. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 153 с.
5. 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.
6. 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. — Vol. 74, Iss. 3. — P. 1931–1946.
7. Перетолчин С. П. Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Том. техн. ин-та. — 1908. — Т. 9. — С. 1–47.
8. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1: Енисей, ч. 3–5; вып. 2: Ангара, ч. 1. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 64 с.
9. Kitov A. D., Kovalenko S. N., Plyusnin V. M. Results of the 100-year follow-glacial mountain geosystems array Munku-Sardyk // Geography and Natural Resources. — 2009. — N 3. — P. 101–108.
10. Плюснин В. М., Дроздова О. В., Китов А. Д., Коваленко С. Н. Динамика горных геосистем юга Сибири // География и природ. ресурсы. — 2008. — № 2. — С. 5–13.
11. Китов А. Д., Плюснин В. М. Базы данных ледников Прибайкалья. // Материалы Междунар. конф. «Интер-Карто-ИнтерГИС-21». — Краснодар: Изд-во Кубан. ун-та, 2015. — С. 318–332.
12. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. — М.: Сов. радио, 1977. — 176 с.
13. Davis J. L., Annap A. P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy // Geophysical Prospecting. — 1989. — N 37. — P. 531–551.
14. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. 2-nd Edition. — London: The Institute of Electrical Engineers, 2004. — 320 p.
15. Максимов Е. В. О ледниках массива Мунку-Сардык в Восточном Саяне // Изв. ВГО. — 1965. — Т. 97, вып. 2. — С. 176–180.
16. Арефьев В. Е., Мухаметов Р. М. На ледниках Алтая и Саян. — Барнаул: Полиграфист, 1996. — 176 с.
17. 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.
18. Ерасов Н. В. Метод определения объема горных ледников // МГИ. — 1968. — Вып. 14. — С. 307–308.
19. Кутузов С. С. Изменение площади и объема ледников хребта Терской Ала-Тоо во второй половине XX в. // Лед и снег. — 2012. — № 1 (117). — С. 5–14.
20. 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.
21. Бадд У. Ф. Динамика масс льда. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 232 с.

Поступила в редакцию 19 октября 2017 г.