

А.Д. Китов¹, А.С. Гладков², О.В. Лунина³, В.М. Плюснин⁴, Е.Н. Иванов⁵,
Е.В. Серебряков⁶, А.М. Афонькин⁷

ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ЛЕДНИКА ПЕРЕТОЛЧИНА (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

АННОТАЦИЯ

Впервые проведена оценка объёма льда ледника Перетолчина в горном массиве Мунку-Сардык (Восточный Саян) с использованием различных моделей и по результатам георадарного профилирования. Целесообразно использовать усреднённые значения при расчётах по степенным формулам с учётом различной формы ложа ледника. Приведены результаты площадной радиолокационной съёмки и моделирования толщины льда ледника Перетолчина. Недостаточное количество инструментальных данных о толщине и объёме ледников Восточного Саяна ограничивает возможности корректной оценки региональных ледовых ресурсов. Измерения толщины льда на северном леднике Перетолчина выполнены в середине июня 2014 г. и начале мая 2016 г. радиолокатором Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Трифон» на частоте 100 МГц. За время полевых работ пройдено на участках работ вдоль и поперёк ледника профилей длиной от 100 до 340 м. Всего на леднике было выполнено 8 поперечных (1510 м) и один, в продолжение 8-го, продольный (760 м) георадарных профилей общей длиной 2270 м. Максимальная измеренная толщина льда достигает 23 м при интерполяции по математическим моделям 37 м. Составлены предварительные карты толщины льда и профилей ложа северного ледника Перетолчина и определён его объём по различным моделям с корректировкой по полевым исследованиям, который равен $0,007 \pm 0,001 \text{ км}^3$. Наиболее точные результаты даёт метод сечений с учётом рельефа ледника. При параболической форме ледника получился несколько заниженный, а эллиптической – завышенный результат. Более чем за 100 лет ледник Перетолчина (северный) сократился по площади и длине в два раза, с 0,68 до 0,34 км², а в объёме – в 3,7 раза, с 0,026 до 0,007 км³. Установлено, что темпы сокращения ледника Перетолчина были наиболее интенсивными в 2009–2012 гг.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Восточная Сибирь, массив Мунку-Сардык, ледник Перетолчина, радиолокационные исследования, изменения ледника

ВВЕДЕНИЕ

Горные ледники являются ключевым индикатором климатических изменений и хранилищем пресных вод [IPCC, 2007]. В Южной Сибири находится несколько горных систем, имеющих оледенение и представляющих такие индикационные системы изменения климата. В последние десятилетия отмечается существенное сокращение ледников, часто происходящее в уменьшении толщины льда. Одним из таких горных массивов с достаточно доступными ледниками Перетолчина и Радде является хребет Мунку-Сардык [Каталог, 1973]. Целью

¹ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1; e-mail: kitov@irigs.irk.ru

² Институт земной коры СО РАН; 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128; e-mail: gladkov@crust.irk.ru

³ Институт земной коры СО РАН; 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128; e-mail: lounina@crust.irk.ru

⁴ Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН; 664033, Иркутск, ул.Улан-Баторская, 1; e-mail: egoryo@bk.ru

⁵ Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН; 664033, Иркутск, ул.Улан-Баторская, 1; e-mail: plusnin@irigs.irk.ru

⁶ Институт земной коры СО РАН; 664033, Иркутск, ул.Лермонтова, 128; e-mail: serebryakov.e.v@mail.ru

⁷ Институт земной коры СО РАН; 664033, Иркутск, ул.Лермонтова, 128

настоящего исследования стало измерение толщины льда ледника Перетолчина и оценка его объёма.

Задача измерения размеров ледников сводится чаще всего к регистрации видимых размеров объекта, его границ с использованием воздушных, космических снимков или наземным способом с помощью регистрации границ приемником GPS или другим геодезическим прибором. Однако для определения мощности ледника требуется определение его толщины. Обычно ложе ледника рассчитывается по специальным формулам, учитывающим тип и размер кара. В этом случае можно получить грубую оценку мощности ледника. Поэтому отдельный интерес представляет прямое измерение толщины льда и построение формы днища кара по полученным реперам и профилям. Это можно сделать бурением скважин (структура керна даст дополнительную информацию о строении толщ ледника). Однако бурение в столь экстремальных условиях, как горные ледники, на практике не представляется возможным, а для построения детальной поверхности потребуется огромное количество скважин. Одним из перспективных дистанционных методов такого исследования льда представляется георадарное профилирование. 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 показывал высоту 900 футов ещё до момента отрыва самолета от взлётной полосы. Оказалось, что радиовысотомер, который представлял собой импульсный радиолокатор, фиксировал отражение от нижней границы ледника [Резников и др., 2000].

В горных породах радиоволна быстро затухает (можно исследовать подповерхностные структуры до глубин первых десятков метров), поэтому этот метод имеет ограниченное применение. Глубина зондирования зависит от диэлектрической проницаемости среды и частоты излучения. Поскольку диэлектрическая проницаемость льда меньше, чем у грунтов, то возможности прибора для изучения льда повышаются.

В последнее время, как и большинство ледников северного полушария, ледники Восточного Саяна быстро сокращаются. Так, например, за 100 лет ледник Перетолчина (северный) сократился с 0,68 км² (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 1,057 км² [Kitov *et al.*, 2015]. Характерным является существенное сокращение малых ледников не только по площади, но и в толщину. По оценкам С.П. Перетолчина, толщина ледника составляла в 1906 г. 85 м [Перетолчин, 1908]. При этом потеря массы льда сокращается с большей скоростью, чем его площадное уменьшение. Поэтому определение толщины ледника инструментальными методами представляет самостоятельный интерес.

Ледник Перетолчина расположен в горном массиве Мунку-Сардык восточной части Восточного Саяна (рисунок 1). Этот каровый ледник (в прошлом переметный) на границе России и Монголии, имеющий северную экспозицию (российская часть), в Каталоге ледников СССР [Каталог, 1973] обозначен как ледник № 31. Это наиболее изученный и доступный ледник Восточных Саян. Он начал изучаться и картироваться еще С.П. Перетолчиным более ста лет назад и получил его имя [Kitov *et al.*, 2009; Дроздова и др., 2006; Коваленко, Китов, 2014; Китов, Коваленко, 2014].

Наиболее постоянно сотрудниками ИГ СО РАН и ИГУ (ВСГАО) ледник начал изучаться с 2005 года [Китов и др., 2007; Коваленко и др., 2009]. В результате этих исследований была создана база данных (БД), позволяющая отслеживать динамику как этого ледника, так и всей группы ледников массива Мунку-Сардык [Китов, Плюснин, 2015].

Однако мониторинг этого ледника ведётся преимущественно с регистрацией его геометрических границ. Мощность льда практически не оценивалась. По результатам исследования моренных комплексов и сравнения фотографий, сделанных С.П. Перетолчиным и в настоящее время, его толщина уменьшилась на 30–50 м в разных частях кара. Определение толщины современной массы льда позволило бы выполнить реконструкцию и определить действительную мощность ледника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для измерения толщины ледника впервые в 2014 году (середина июня) был использован георадар Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (центральная частота 50 МГц) с системой цифровой регистрации радарных данных (http://www.geotech.ru/market/katalog_oborudovaniya/georadar_oko/) и дополнительно навигационных с помощью GPS [Китов и др., 2014; Kitov *et al.*, 2015]. Работы по радиолокационному профилированию ледника Перетолчина (северный) проводились в пеших маршрутах группой из четырёх человек. Измерения выполнялись по сети поперечных профилей и одного продольного, охватывая доступную нижнюю часть ледника (см. рисунок 1, рисунок 2).

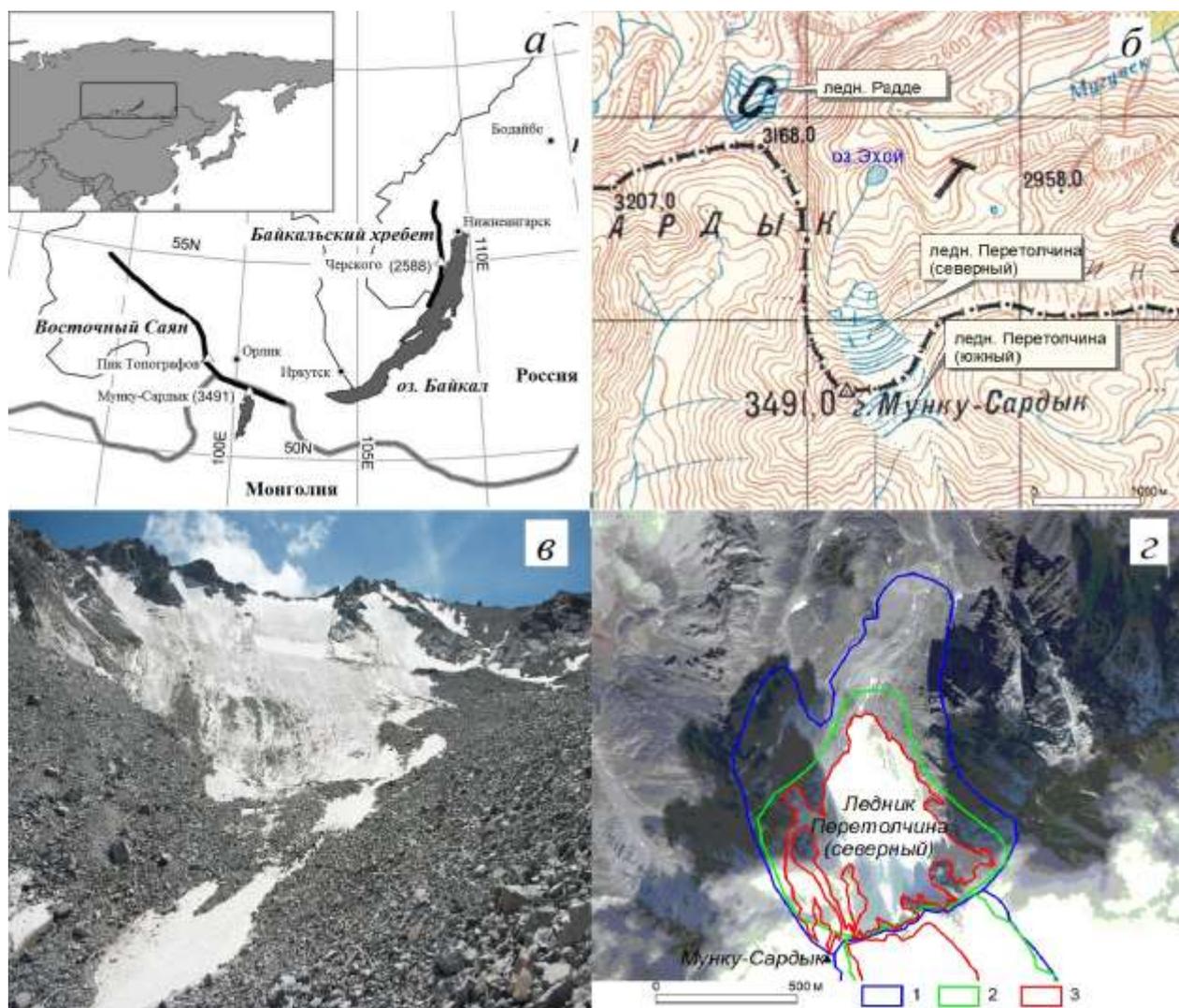


Рисунок 1. Район исследования:

- а – географическое положение района; б – фрагмент топокарты;
- в – общий вид Северного ледника Перетолчина;
- г – ледник Перетолчина на космоснимке QuickBird 29.08.2006 г.,
стадии изменения ледника (соответственно, контур ледника): 1 – 1906, 2 – 1962, 3 – 2006 г.

Figure 1. Study area:

- а – geographical location of the area; б – fragment of the topographic map;
- в – general view of the Northern Peretolchyn Glacier;
- г – glacier Peretolchyna on the space shuttle QuickBird on 29.08.2006,
the stages of the glacier change (respectively, the glacier outline): 1 – 1906, 2 – 1962, 3 – 2006

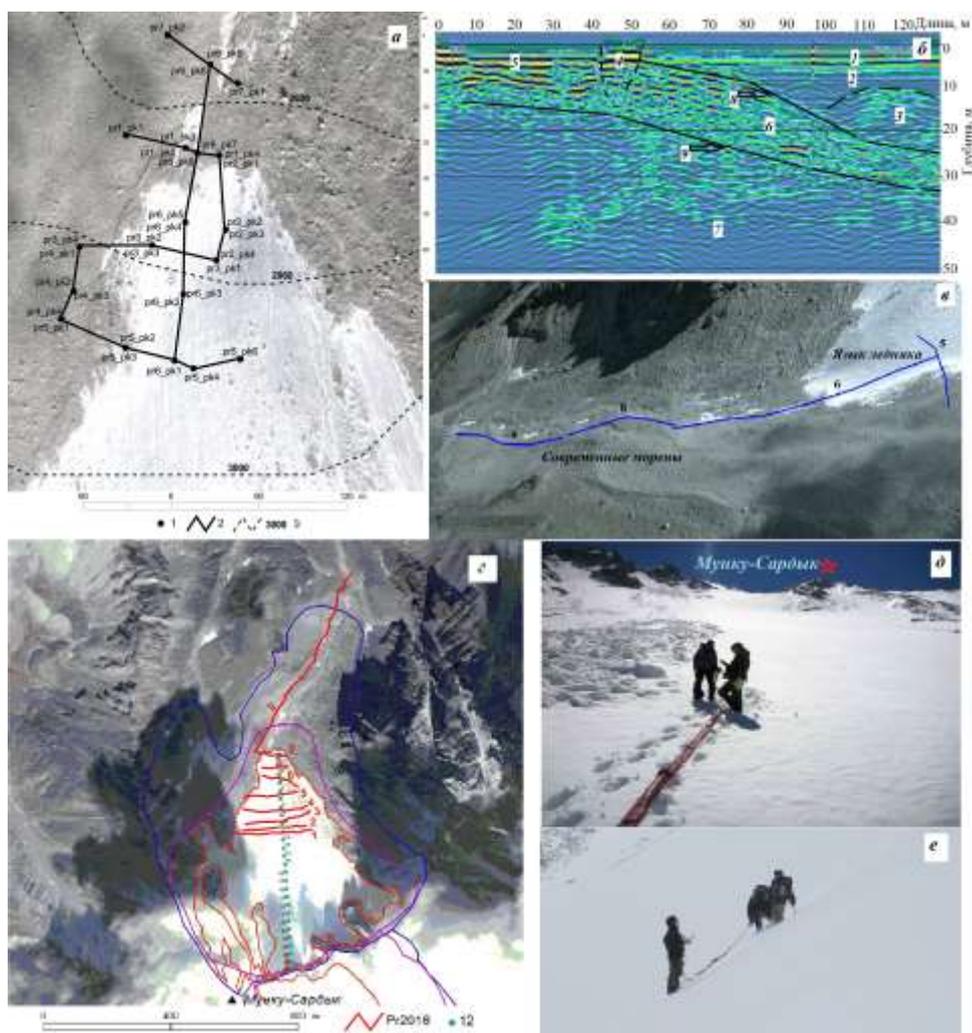


Рисунок 2. Георадарное профилирование ледника Перетолчина:

a – схема профилей и пикетов экспедиции 2014 г.

(1 – отметки пикетов, 2 – треки профилей, 3 – изолинии рельефа с отметками высот);

б – радарограмма поперечного профиля № 5

(1 – снег и фирн; 2 – холодный лед; 3 – теплый лед; 4 – промоины края ледника, см. *a* – pr5_pk3; 5 – боковая морена; 6 – донные морены; 7 – коренные породы; 8 – граница современного ложа ледника; 9 – граница ложа палеоледника);

в – поперечный № 5 (самый высокий) и продольные профили №№6, 8, 9 по осевой линии современных морен ниже открытой части ледника (продольные профили 2014 и 2016 гг. практически совпадают);

г – профили экспедиции 2016 г. на фоне космоснимка QuickBird

(1–9 – номера профилей; стадии ледника см. рисунок 1г), точки с номерами

(1–30 – отметки вдоль осевой линии расчёта толщины ледника по модели);

д, *е* – работа на леднике в 2014 и 2016 гг.

Figure 2. Georadar profiling Peretolchin glacier:

a – scheme of profiles and pickets expedition in 2014

(1 – picket marks, 2 – track profiles, 3 – contour isolines with elevations);

б – radargram of the transverse profile No. 5

(1 – snow and firn, 2 – cold ice, 3 – warm ice, 4 – rills of the glacier edge, see *a* – pr5_pk3, 5 – lateral moraine, 6 – bottom moraines, 7 – bedrock, 8 – the boundary of the modern bed of the glacier, 9 – the boundary of the paleo-glacier bed);

в – transverse No. 5 (highest) and longitudinal profiles Nos. 6, 8, 9 along the axial line of modern moraines below the open part of the glacier (the longitudinal profiles of 2014 and 2016 almost coincide);

г – profiles of the expedition in 2016 against the background of the QuickBird satellite image

(1–9 numbers of profiles, glacier stages, see Figure 1 г), points with numbers

(1–30 – markings along the axial line for calculating the glacier thickness according to the model);

д, *е* – work on the glacier in 2014 and 2016

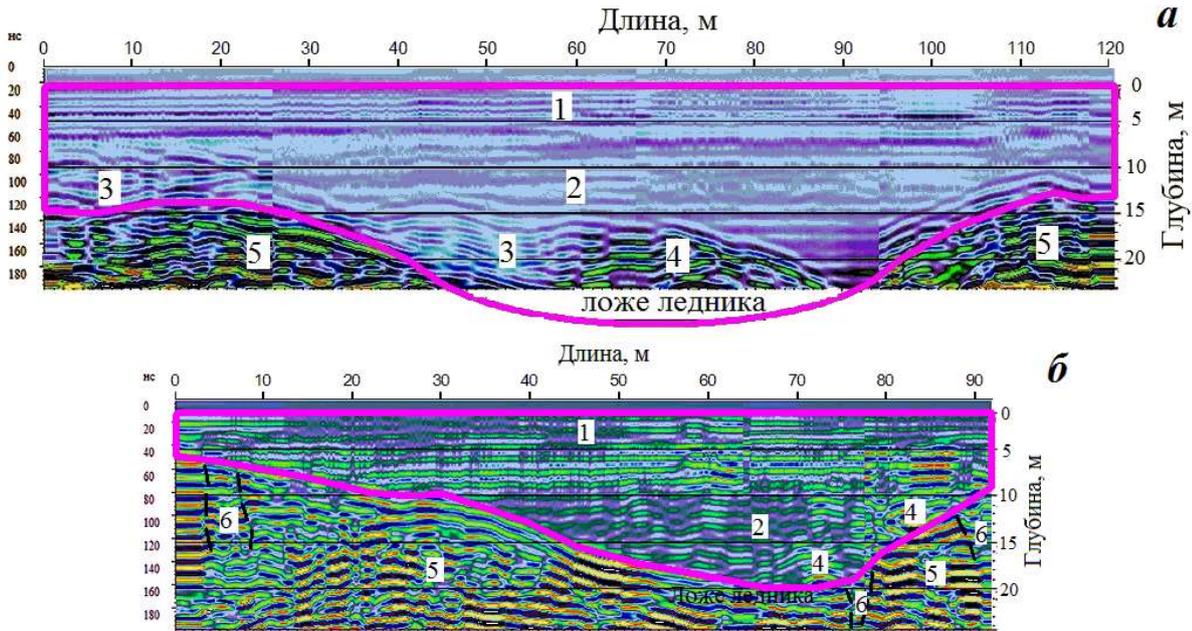


Рисунок 3. Пример обработанных профилей 2016 г:

a – 6-й профиль, *б* – 7-й профиль;

фиолетовая линия – сечение ледника по профилю после привязки и векторизации в ГИС ArcView:

1 – фирн; 2 – лёд; 3 – тёплый лёд, или лёд с камнями; 4 – донные отложения;

5 – коренные породы или отложения палеоледника; 6 – промоины боковых и донных стоков ледника.

На рис. 3*a* ложе ледника экстраполировано полуэллипсом с большой осью, соответствующей ширине части ледника

Figure 3. An example of processed profiles 2016:

a – 6th profile, *b* – 7th profile;

Violet line – the glacier section along the profile after binding and vectorization in GIS ArcView:

1 – firm; 2 – ice; 3 – warm ice, or ice with stones; 4 – bottom sediments;

5 – bedrock or sediments of the paleo-glacier; 6 – gullies of lateral and bottom drains of the glacier.

In Fig. 3*a* the glacier bed is extrapolated by a half-ellipse with a major axis corresponding to the width of the glacier

Таблица 1. Основные характеристики ледника Перетолчина

Table 1. The main characteristics of Peretolchin Glacier

| Год и источник исследования | Общая площадь, км ² | Максимальная длина, км | Верхняя граница, м.н.у.м. | Нижняя граница, м.н.у.м. |
|--|--------------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1906, по Перетолчину [Перетолчин, 1908] | 0,68 | 1,503 | 3491 | 2776 |
| 1963, по Максимову [Максимов, 1965] | 0,7 | 1 | – | 2908 |
| 1973, по Каталогу ледников СССР [Каталог, 1973] | 0,7 | 1 | – | 2910 |
| 1982, по Мухаметову [Арефьев, Мухаметов, 1996] | 0,53 | 1,1 | – | 2860 |
| 2010, по космоснимкам Landsat-7 [Kitov et, 2015] | 0,34 | 0,8 | 3485 | 2960 |

В мае 2016 г. георадиолокационные исследования на леднике проводились на значительно большем по размеру участке. Мы использовали также георадар ОКО-2 российского производства с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (http://www.geotech.ru/market/katalog_oborudovaniya/georadar_oko/). Однако в этом случае незранированная антенна АБДЛ «Тритон» с дипольным излучателем 100 МГц, характеризующаяся, согласно спецификации, максимальной глубиной исследования 20 м и разрешающей способностью 0.5 м. Работа георадарного оборудования основана на излучении электромагнитных волн и приёме сигналов, отражённых от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [Владов, Старовойтов, 2004; Финкельштейн и др., 1977]. Детальное описание и главные принципы метода подповерхностного радиолокационного зондирования можно найти в ряде фундаментальных публикаций [Daniels, 2004; Davis, Annan, 1989].

На участках работ вдоль и поперёк ледника были пройдены профили длиной от 100 до 340 м (см. рисунок 2в). Всего на леднике было выполнено 8 поперечных (1510 м) и один, в продолжение 8-го, продольный (760 м) георадарных профилей общей длиной 2270 м. В полевых условиях при георадарном профилировании нами устанавливалось значение диэлектрической проницаемости $\epsilon=1.5$, что соответствует среднему значению для сухого снега. Впоследствии наличие гиперболы на одной из радарограмм подтвердило удачный выбор эпилон.

Полученные значения заносились в базу данных одновременно с навигационной информацией в табличном виде. В настоящей работе использовался портативный GPS-приёмник Garmin GPS-76Csx. Запись приёмником велась в формате WGS-84 десятичных градусов.

Обработка георадиолокационных разрезов проводилась в программе «GeoScan-32» в несколько приёмов. 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.

При работе на частоте 100 МГц в центральной части ледника на радарограммах 1–5 профилей не просматривается его ложе. Донные отложения и коренные породы появляются с 6-го профиля на глубине около 23 м (рисунок 3).

Изменения площади ледника анализировались путём сопоставления разновременных космических снимков Landsat-7, -8 с разрешением 15 м/пиксел 2010–2015 гг. Границы ледника в 2006 г. уточнялись по снимку QuickBird с разрешением 0,6 м/пикселов. Снимки были взаимно привязаны, приведены в единую проекцию Пулково-1942 WGS-84, зона 47, дешифрирование границ ледника проводилось в ручном режиме. Кроме того, на снимки была наложена топографическая карта 1987 г. масштаба 1:100 000. Все измерения проводились в программе ArcViewGIS, версия 3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пикселов, систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км², или 5 % от измеряемой величины. Динамика размеров ледника Перетолчина представлена в таблице 1 [Китов, Плюсин, 2015].

Данные по оценке объёма ледников весьма ограничены. Обычно ведётся мониторинг по изменению верхней и нижней границы открытой части ледника и его площади. Поэтому для оценки объёма льда в горно-ледниковых системах предложено несколько способов [Мацерет и др., 2013].

Объём льда можно рассчитать по формуле Мазо-Глазырина:

$$V = 1,63Sho/(1+\Delta h/ho)^{0,774}, \quad ho = 0,073L^{0,5}, \quad (1)$$

где S – площадь ледника, км²; L – длина ледника, км; Δh – разность высот между высшей и низшей точками открытой части ледника, км.

По этому способу лучшие результаты получаются для долинных ледников площадью более 5 км^2 [Мачерет и др., 2013]. Для ледника Перетолчина объём льда составил $0,0000326 \text{ км}^3$.

Другой способ предложен для группы ледников (формула САРНИГМИ) [Мачерет и др., 2013]:

$$V_g = 0,04(S_g^2/N), \quad (2)$$

где S_g – суммарная площадь группы ледников, км^2 ; N – число ледников в группе.

Для одного ледника Перетолчина ($N=1$) объём льда получился значительно больше, чем по формуле (1) – $0,004356 \text{ км}^3$.

В основу этих формул положена корреляционная связь между объёмом и площадью ледников в виде степенной функции [Мачерет и др., 2013]:

$$V = kS^p, \quad (3)$$

где коэффициенты k и p зависят от типа ледника и горно-ледовой системы и могут изменяться в широких пределах. Так, для каровых ледников Алтая $k=0,048$, $p=1,222$ [Мачерет и др., 2013]. Оценка объёма ледника Перетолчина по этой формуле составила $0,0128 \text{ км}^3$, а средняя толщина льда ($H_{\text{ср}} = kS^{p-1}$) соответственно $37,8 \text{ м}$.

По оценкам различных групп ледников [Мачерет и др., 2013, рисунок 5] для каровых ледников типа Перетолчина при площади $0,34 \text{ км}^2$ объём льда должен составлять порядка $0,01 \text{ км}^3$.

Более точно оценить объём можно, рассчитав толщину льда вдоль осевой линии с учётом рельефа. В этом случае используется формула модели GlabTop (Glacier bed Topography) [Петраков и др., 2014]:

$$h = \tau / (fg\rho \sin\alpha), \quad \tau = 0,005 + 1,598\Delta H - 0,435\Delta H^2 \quad (4)$$

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, и может изменяться от $0,5$ до $0,9$. Для долинных ледников рекомендовано $f = 0,8$ [Петраков и др., 2014]. Его можно определить из соотношения половины ширины ледника к предполагаемой толщине и формы поперечного сечения ледника (прямоугольник, полуэллипс, парабола) [Бадд, 1975]. Для карово-висячего ледника Перетолчина при параболической форме $f = 0,9$.

Построение карты уклонов по цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEM V2 (пространственное разрешение 1 угловая сек. и 12 м по высоте) оказалось менее точной (порядка 35° по всему склону до максимальной высоты 3440 м.н.у.м. вместо 3480) по сравнению с данными топографической карты масштаба 1:50000.

Угол наклона поверхности вдоль центральной линии определялся для отрезков с горизонтальной проекцией 20 м. Значения толщины льда (h) рассчитывались для 30 точек вдоль осевой линии с низа открытой части языка ледника, м: 57,9; 45,7; 39,9; 43,8; 44,4; 40,6; 36,4; 50,0; 50,0; 26,2; 29,1; 24,3; 29,51; 34,0; 25,4; 32,4; 35,0; 31,0; 34,1; 25,0; 29,8; 23,0; 25,5; 31,2; 31,6; 22,0; 27,4; 20,4; 18,8; 18,7.

В простейшем случае при параболическом сечении ледника площадь поперечного сечения определяется соотношением:

$$s_i = (2/3) h_i w_i, \quad (5)$$

где h_i – толщина ледника в точках пересечения продольного профиля и поперечных сечений; w_i – ширина ледника вдоль поперечного сечения.

Тогда объём льда вычисляется по формуле:

$$V = \sum s_i d_i, \quad (6)$$

где d_i – расстояние между сечениями.

Для ледника Перетолчина при 30 сечениях на расстоянии 30 м объём $V = 0,0067 \text{ км}^3$. По методу эллипсов ($s_i = 0,25 \pi h_i w_i$) $V = 0,0079 \text{ км}^3$. Наиболее близкий результат дала формула (3) с коэффициентами $k=0,0356$, $p=1,53$, применённая для ледника Сары-Тор [Петраков и др., 2014], $V = 0,0065 \text{ км}^3$.

Сто лет назад С.П. Перетолчин оценивал толщину льда в 85 м, а площадь – $0,68 \text{ км}^2$, длину – 1,5 км (см. таблицу 1). Тогда при средних показателях в формуле (5) $h_{cp} = 0,085 \text{ км}$, $w_{cp} = 0,75 \text{ км}$ и длине $L = d = 1,5 \text{ км}$, $V_{100} = 0,064 \text{ км}^3$. При использовании степенной функции (3) с коэффициентами $k = 0,0356$, $p = 1,53$, – $V_{100} = 0,02 \text{ км}^3$, а с учётом данных реконструкции по схеме С.П. Перетолчина [Перетолчин, 1908] и результатам дешифрирования моренных отложений по снимку QuickBird 2006 г. $S_{рек} = 0,81 \text{ км}^2$, объём ледника оценивается: $V_{100рек} = 0,026 \text{ км}^3$.

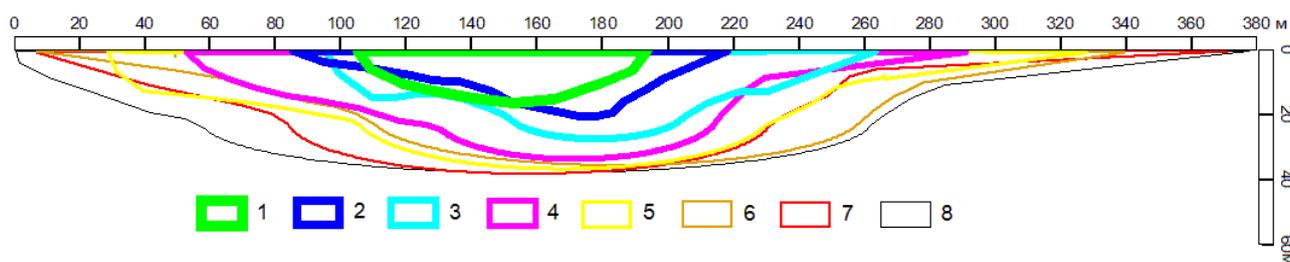


Рисунок 4. Сечения ледника Перетолчина соответственно по профилям: 1–8 – профили №№8–1. Глубина зондирования достигала 23 м, ложе ледника экстраполировалось полуэллипсом средствами ГИС так, чтобы линии продолжения бортов плавно переходили в линию эллипса с соответствующей ширине ледника его большой осью

Figure 4. Cross sections of Peretolchin Glacier according to profiles respectively: 1–8 – profiles Nos. 8–1. The depth of sounding reached 23 m, the glacier bed was extrapolated by a half-ellipse by GIS means, so that the continuation lines would smoothly pass into the ellipse line with the corresponding width of glacier Axis

Таблица 2. Результаты расчётов по данным георадарных профилей (Пр_i)
Table 2. Results of calculations from the data of the GPR profiles (Pr_i)

| Отметки d_i | Хребет- Пр1 | Пр1-2 | Пр2-3 | Пр3-4 | Пр4-5 | Пр5-6 | Пр6-7 | Пр7-8 |
|---------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| I | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $S_i, \text{ км}^2$ | 0,0085 | 0,0065 | 0,0062 | 0,0060 | 0,0041 | 0,0026 | 0,0013 | 0,0010 |
| $d_i, \text{ км}$ | 0,505 | 0,025 | 0,025 | 0,044 | 0,046 | 0,062 | 0,33 | 0,064 |
| $V_i, \text{ км}^3$ | 0,00431 | 0,00016 | 0,00015 | 0,00026 | 0,00019 | 0,00016 | 0,00043 | 0,00006 |

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в результате радиолокационного профилирования сечения ледника схематично представлены (см. рисунки 3, 4, 5) и использовались для расчёта объёма льда по формуле (6).

На частоте 100 МГц ложе ледника, или придонные отложения, начинают просматриваться с шестого профиля (раздел различных сред) на глубине около 23 м (см. рисунок 3). Георадарное исследование в 2014 г. проводилось антенной с частотой 50 МГц примерно с уровня профиля № 7 исследования 2016 г. (см. рис. 3), на котором раздел сред регистрируется на глубине около 20 м. На верхнем профиле (№ 5) 2014 г. (см. рисунок 2б) раздел сред

(предполагаемое ложе ледника) отмечается на глубине около 25 м, что с учётом меньшей точности при 50 МГц соответствует измерениям 2016 г.

При оценке мощности ледника с учётом радарограмм профилей №№1–8 использовался метод сечений по формуле (6). Для этого радарограммы привязывались в метровых координатах в ArcView-3.2a согласно их параметрам по длине профиля и глубине и калибровались относительно первого профиля с учётом схемы профилей (см. рисунок 2г, рисунок 4).

В ArcView-3.2a рассчитывалась площадь сечений S_i ($i = 1, \dots, 8$). Эти данные (таблица 2) с учётом расстояния d_i между профилями ($d_1 = 505$ м – от 1-го профиля до верха хребта) подставлялись в формулу (6).

В полосе профилей от низа открытой части ледника до верха хребта объём льда $V = 0,00574$ км³. Точность оценки порядка 20–25 % (около 5 % оценка площади ледника по космоснимкам QuickBird, 10 % – точность цифровой модели рельефа, 10 % – радиозондирование). С учётом 20 % поправки: $V = 0,007$ км³.

Формулы оценки объёма льда ледника дают результаты в широком диапазоне. По формуле (1) получились слишком заниженные результаты, что можно было ожидать, так как эта модель предназначена для оценки долинных ледников с площадью более 5 км². Модели степенного вида (2), (3) дают близкие к истинной характеристике объёма результаты. Их среднее значение даёт объём порядка 0,008 км³. Также для этих формул требуется определение параметров с учётом типов ледников конкретной местности. Эти статистические исследования нами не проводились, да и ледников в горном массиве Мунку-Сардык всего пять, что не сопоставимо с районами обширного горного оледенения. Однако при использовании коэффициентов, применённых для ледника Сары-Тор [Петраков и др., 2014], получился объём льда, близкий к оценке радарного исследования (соответственно 0,0065 и 0,007 км³).

Наиболее точные результаты даёт метод сечений на основе формул (4)–(6) с учётом рельефа ледника. При параболической форме ледника получился несколько заниженный, а эллиптической – завышенный результат.

Более чем за 100 лет ледник Перетолчина (северный) сократился по площади и длине в два раза (см. таблицу 1), а в объёме – в 3,7 раза, с 0,026 до 0,007 км³.

ВЫВОДЫ

Впервые проведена оценка объёма льда ледника Перетолчина с использованием различных моделей и по результатам георадарного профилирования. Целесообразно использовать усреднённые значения при расчётах по степенным формулам с учётом различной формы ложа ледника.

Площадные измерения толщины льда на леднике Перетолчина проводились в июне 2014 и в мае 2016 годов.

За период более 110 лет размеры и мощность ледника существенно сократились – площадь и длина в два раза, объём в 3,7 раза. Поднялась нижняя граница открытой части ледника на 184 м.

Северный ледник Перетолчина (на территории РФ) имеет большую крутизну в верхней части и трудно доступен для наземных исследований. Он наиболее безопасен в апреле – мае. Также это время наиболее удобно для подхода (особенно с аппаратурой) к леднику по наледям рек. В летне-осеннее время наблюдаются лавины (осовы) и камнепады. Южный ледник Перетолчина более пологий и безопасен (монгольский склон). Предполагаются дальнейшие исследования ледников Мунку-Сардык: Северного Перетолчина по более структурированной схеме профилей, начиная от бергшрунда; Южного Перетолчина и Радде.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась по теме «Нивально-гляциальные процессы во внутриконтинентальных горных системах Евразии» в рамках комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН № 11.2 (0347-2015-0001); в части изучения разрезов методом

георадиолокации работы выполнялись в рамках проекта РФФ № 14-17-00007; при поддержке гранта РФФИ 16-05-00902А «Механизмы самоорганизации геосистем Прибайкалья».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арефьев В.Е., Мухаметов Р.М.* На ледниках Алтая и Саян. – Барнаул, Полиграфист, 1996. – 175 с.
2. *Бадд У.Ф.* Динамика масс льда. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 232 с..
3. *Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. – М.: МГУ, 2004. – 153 с.
4. *Дроздова О.В., Китов А.Д., Плюснин В.М.* Горные геосистемы долины рек Мугувек – Бел. Иркут и их рекреационное значение // Материалы VIII научной конференции по тематической картографии (Иркутск, 21–23 ноября 2006 г.). – Иркутск, ИГСОРАН, 2006. – Т. 2. – С.173–176.
5. Каталог ледников СССР. – Т. 16. – Вып. 1, Ч. 3–5. – Вып. 2, Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 64 с.
6. *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 // Вестник кафедры географии ВСГАО. – 2014. – № 2–3. – С. 78–83.
7. *Китов А.Д., Коваленко С.Н.* Перетолчин Сергей Павлович: иркутский исследователь гор. – Исток, 2014. – № 10 (113). – С. 10–11.
8. *Китов А.Д., Коваленко С.Н., Дроздова О.В.* Особенности применения современных средств анализа ландшафтов Мунку-Сардык // Материалы XIII научного совещания географов Сибири и Дальнего Востока, посвященного 50-летию Института географии СО РАН (Иркутск, 27–29 ноября 2007 г.). – Иркутск, ИГ СО РАН, 2007. – Т. 1. – С. 141–142.
9. *Китов А.Д., Плюснин В.М.* Базы данных ледников Прибайкалья // Материалы международной конференции ИнтерКарто-ИнтерГИС–21. – Краснодар: Изд-во Куб.ГУ, 2015. – С. 318–332.
10. *Коваленко С.Н., Китов А.Д., Дроздова О.В.* Научные экспедиции клуба «Портулан» в район Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Записки кафедры географии ЕГФ ИГПУ, 2009. – Вып. 5. – С. 66–75.
11. *Коваленко С.Н., Китов А.Д.* Исследованиям С.П.Перетолчина ледников горы Мунку-Сардык – достойный ответ потомков // Байкал – Родина – Планета. Материалы Всероссийской научно-педагогической конференции (г. Иркутск, 28–29 марта 2014 г.). – Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2014. – С. 131–134.
12. *Максимов Е.В.* О ледниках массива Мунку-Сардык в Восточном Саяне. – Известия РГО, 1965. – Т. 97. – Вып. 2. – С. 176–180.
13. *Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лаврентьев И.И.* Об оценке объёма льда горных ледников // Лёд и Снег, 2013. – № 53 (1). – С. 5–15; DOI:10.15356/2076-6734-2013-1-5-15.
14. *Перетолчин С.П.* Ледники хребта Мунку-Сардык // Известия Томск.техн. ин-та. – Т. 9. – Томск: Типолитография Сиб. т-ва печатного дела, 1908. – 60 с.
15. *Петраков Д.А., Лаврентьев И.И., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А.* Толщина льда, объём и современные изменения площади ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли, 2014. – Т. XVIII, № 3. – С. 91–100.
16. *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.
17. *Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А.* Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Советское радио, 1977. – 176 с.

18. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. 2-nd Edition. – London, The Institute of Electrical Engineers, United Kingdom, 2004. – 320 p.
19. Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 1989. – Pp. 531–551.
20. IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed. By S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. – Cambridge: N.Y. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. – 996 p.
21. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif // *Geography and natural resources*, 2009. – Vol. 30, No 3. – Pp. 272–278. DOI:10.1016/j.gnr.2009.09.012.
22. 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. – Pp. 1931–1946. DOI 10.1007/s12665-015-4455-y.

Aleksandr D. Kitov¹, Andrey S. Gladkov², Oksana V. Lunina³, Viktor M. Plyusnin⁴, Egor N. Ivanov⁵, Evgeniy V. Serebryakov⁶, Andrey M. Afon'kin⁷

CHANGES IN THICKNESS OF PERETOLCHIN GLACIER (EASTERN SAYAN)

ABSTRACT

For the first time, the ice volume of Peretolchina Glacier in the mountain range of Munku-Sardyk (Eastern Sayan) has been estimated using various models and results of georadar profiling. It is advisable to use the averaged values for calculations in accordance with power formulas taking into account the different shape of the glacier bed. Results of area radar survey and ice thickness modeling of Peretolchina Glacier have been presented. Insufficient number of instrumental data on the thickness and volume of the Eastern Sayan glaciers limits the possibility of a correct assessment of regional ice resources. Measurements of the ice thickness on the northern Peretolchin Glacier were carried out in mid-June 2014 and early May 2016 by the Oke-2 radar with the antenna unit ABDL "Triton" at a frequency of 100 MHz. During the field work, profiles of lengths from 100 to 340 m were traversed along the glacier. In total, 8 transverse (1510 m) and one for the 8th, longitudinal (760 m) georadar profiles with a total length of 2270 m. The maximum measured thickness of ice reaches 23 m when interpolated using mathematical models of 37 m. Preliminary maps of ice thickness and profiles of the bed of the northern Peretolchin Glacier have been made and its volume has been determined by different models with field study corrections of $0.007 \pm 0.001 \text{ km}^3$. The most accurate results have been obtained from the section method taking into account the relief of the glacier. In the parabolic form of the glacier, a somewhat understated result has been obtained, and an elliptic result has been overestimated. For more than 100 years the Peretolchin Glacier (northern) has decreased in area and length by two times from 0.68 to 0.34 km^2 , and in the volume from 0.026 to 0.007 km^3 , by 3.7 times. It has been established that the rate of reduction of Peretolchin Glacier was most intensive in 2009-2012.

¹ V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS; 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st, 1; e-mail: kitov@irigs.irk.ru

² Institute of the Earth's crust SB RAS; 664033, Irkutsk, Lermontov st, 128; e-mail: gladkov@crust.irk.ru

³ Institute of the Earth's crust SB RAS; 664033, Irkutsk, Lermontov st, 128; e-mail: lounina@crust.irk.ru

⁴ V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS; 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st, 1; e-mail: egoryo@bk.ru

⁵ V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS; 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st, 1; e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru

⁶ Institute of the Earth's crust SB RAS; 664033, Irkutsk, Lermontov st, 128; e-mail: serebryakov.e.v@mail.ru

⁷ Institute of the Earth's crust SB RAS; 664033, Irkutsk, Lermontov st, 128

KEYWORDS:

Eastern Siberia, the Munku-Sardyk massif, Peretolchyn Glacier, radar studies, glacier changes

REFERENCES

1. Aref'ev V.E. Muhametov R.M. Na lednikah Altaya i Sayan [On the glaciers of the Altai and Sayan], Barnaul: Poligrafist, 1996, 175 p. (in Russian).
2. Badd U.F. Dinamika mass l'da [Dynamics of the masses of ice], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 232 p. (in Russian).
3. Vladov M.L., Starovoytov A.V. Vvedeniye v georadiolokatsiyu [Introduction to georadiolocation], Moscow: MGU, 2004, 153 p. (in Russian).
4. Drozdova O.V., Kitov A.D., Plyusnin V.M. Gornyye geosistemy doliny rek Muguvek – Bel. Irkut i ikh rekreatsionnoye znacheneye [Mountain geosystems of the valley of the rivers Muguvek – Bel. Irkut and their recreational significance], Materialy VIII nauchnoy konferentsii po tematicheskoy kartografii (Irkutsk, 21–23 noyabrya 2006 g.), Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2006, T. 2, pp.173–176 (in Russian).
5. Katalog lednikov SSSR [Catalogue of glaciers of USSR], T. 16, Iss. 1, part 3–5, Iss. 2, part 1, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 64 p. (in Russian).
6. Kitov A.D., Vishnyakov K.A., Badminov P.S., Kryukova I.G., Orgil'yanov A.I. Vtoraya 2014 goda ekspeditsiya na Munku-Sardyk i sezonnyye osobennosti prokhozhdeniya [Second 2014 expedition to Munku-Sardyk and seasonal features of the passage], Vestnik kafedry geografii VSGAO, 2014, No 2–3, pp. 78–83 (in Russian).
7. Kitov A.D., Kovalenko S.N. Peretolchin Sergey Pavlovich: irkutskiy issledovatel' gor [Peretolchin Sergey Pavlovich: Irkutsk researcher of the mountains], Istok, 2014, No 10 (113), pp. 10–11 (in Russian).
8. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Drozdova O.V. Osobennosti primeneniya sovremennykh sredstv analiza landshaftov Munku-Sardyk [Features of the use of modern means of analysis of landscapes of Munku-Sardyk], Materialy XIII nauchnogo soveshchaniya geografov Sibiri i Dal'nego Vostoka, posvyashchennogo 50-letiyu Instituta geografii SO RAN (Irkutsk, 27–29 noyabrya 2007 g.), Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2007, T. 1, pp. 141–142 (in Russian).
9. Kitov A.D., Plyusnin V.M. Bazy dannykh lednikov Pribaykal'ya [Database of glaciers of the Baikal region], Materialy mezhdunarodnoy konferentsii InterKarto-InterGIS–21, Krasnodar: Izd-vo KubGU, 2015, pp. 318–332 (in Russian).
10. Kovalenko S.N., Kitov A.D., Drozdova O.V. Nauchnyye ekspeditsii kluba “Portulan” v rayon Munku-Sardyk (Vostochnyy Sayan) [Scientific expeditions of the club “Portulan” in the area of Munku-Sardyk (Eastern Sayan)], Zapiski kafedry geografii YEGF IGPU, 2009, Vyp. 5, pp. 66–75 (in Russian).
11. Kovalenko S.N., Kitov A.D. Issledovaniyam S.P. Peretolchina lednikov gory Munku-Sardyk dostoyunnyy otvet potomkov [Peretolchin research of glaciers of Mount Munku-Sardyk worthy response of descendants], Materialy Vserossiyskoy nauchno-pedagogicheskoy konferentsii (g. Irkutsk, 28-29 marta 2014 g.), Irkutsk: Izd-vo IG SO RAN, 2014, pp. 131–134 (in Russian).
12. Maksimov E.V. O lednikah massiva Munku-Sardyk v Vostochnom Sayane [About glaciers array of Munch-Sardyk in East Sayan], Izvestiya RGO, 1965, T. 97, Vyp. 2, pp. 176–180 (in Russian).
13. Macheret Yu.Ya., Kutuzov S.S., Matskovskiy V.V., Lavrent'yev I.I. Ob otsenke ob'yoma l'da gornyykh lednikov [On the assessment of the volume of ice in mountain glaciers], Lyod i Sneg, 2013, No 53 (1), pp. 5–15 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2013-1-5-15.
14. Peretolchin S.P. Ledniki hrebta Munku-Sardyk [Glaciers of the Munku-Sardyk Range], Izv. Tomsk.tekhn. in-ta, T. 9, Tomsk: Tipolitografiya Sib. t-va pechatnogo dela, 1908, 60 p. (in Russian).

15. Petrakov D.A., Lavrent'yev I.I., Kovalenko N.V., Usubaliyev R.A. Tolshchina l'da, ob'yem i sovremennyye izmeneniya ploshchadi lednika Sary-Tor (massiv Ak-Shyirak, vnutrenniy Tyan'-Shan') [Thickness of ice, volume and modern changes in the area of the Sary-Tor glacier (Ak-Shyirak massif, internal Tien Shan)], *Kriosfera Zemli*, 2014, T. XVIII, No 3, pp. 91–100 (in Russian).
 16. Reznikov A.Ye., Kopeykin V.V., Morozov P.A., Shchekotov A.Yu. Razrabotka apparatury, metodov obrabotki dannykh dlya elektromagnitnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya i opyt ikh primeneniya [Development of equipment, data processing methods for electromagnetic subsurface sounding and the experience of their application], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2000, No 5, pp. 565–568 (in Russian).
 17. Finkel'shteyn M.I., Mendel'son V.L., Kutev V.A. Radiolokatsiya sloistyx zemnykh pokrovov [Radiolocation of layered earth cover], Moscow: Sovetskoye radio, 1977, 176 p. (in Russian).
 18. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. 2-nd Edition. London, The Institute of Electrical Engineers, United Kingdom, 2004, 320 p.
 19. Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 1989, pp. 531–551.
 20. IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge; N.Y., Intergovern. Panel on Climate Change, 2007, 996 p..
 21. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. *Geography and natural resources*, 2009, Vol. 30, No 3, pp. 272–278. DOI:10.1016/j.gnr.2009.09.012.
 22. 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, pp. 1931–1946. DOI 10.1007/s12665-015-4455-y.
-