

# REMOTE MONITORING METHODS FOR NIVAL-GLACIAL FORMATIONS

*Alexander D. Kitov*

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia

## **Abstract**

Technologies for using remote methods for studying and monitoring nival-glacial formations (glaciers, snowfields, ice sheets, stone glaciers) are presented using the example of the Munku-Sardyk mountain massif (Eastern Sayan). Usually, the dynamics of glaciers is estimated by area characteristics, but the thickness of the glacier is determined by the volume. Therefore, ground-penetrating radar (GPR) profiling to determine the thickness of the ice and the shape of the glacier bed, together with remote sensing data from the Earth, giving the geometric dimensions of the object, make it possible to measure the volume of the ice body more accurately than by special models. Such measurements were made for the Peretolchyna glacier. Over the past hundred years, the glacier has decreased in length and area by a factor of two from 0.68 to 0.34 km<sup>2</sup>, and in the volume from 0.026 to 0.007 km<sup>3</sup>, by 3.7 times. It is established that the rate of reduction of the Peretolchin glacier was the most intensive in 2009-2012. In addition, the ice volumes of the ice sheets from the Munku-Sardyk glaciers and the stone glaciers of this mountain range were estimated.

*Keywords: geoinformation technologies, georadar research, remote sensing data of the Earth, nival-glacial formations, Peretolchina glacier, East Sayan*

# ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА НИВАЛЬНО-ГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Китов А.Д.

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Представляются технологии использования дистанционных методов для исследования и мониторинга нивально-гляциальных образований (ледников, снежников, наледей, каменных глетчеров) на примере горного массива Мунку-Сардык (Восточный Саян). Обычно динамику ледников оценивают по площадным характеристикам, однако мощность ледника определяется объемом. Поэтому профильное георадарное зондирование для определения толщины льда и формы ложа ледника совместно с данными дистанционного зондирования Земли, дающие геометрические размеры объекта, позволяют измерить более точно, чем по специальным моделям, объем ледяного тела. Такие измерения были произведены для ледника Перетолчина. За последние сто лет ледник сократился по длине и площади в два раза с 0,68 до 0,34 км<sup>2</sup>, а в объеме с 0,026 до 0,007 км<sup>3</sup>, в 3,7 раза. Установлено, что темпы сокращения ледника Перетолчина были наиболее интенсивными в 2009–2012 гг. Кроме этого были оценены объемы льда наледей рек, берущих начало с ледников Мунку-Сардык, и каменных глетчеров этого горного массива.

*Ключевые слова:* геоинформационные технологии, георадарное исследование, данные дистанционного зондирования Земли, нивально-гляциальные образования, ледник Перетолчина, Восточный Саян.

**Введение.** Исследуемые нивально-гляциальные объекты сосредоточены в горах южной Сибири в четырех горных системах: хребет Кодар, Байкальский и Баргузинский хребты и Восточный Саян (горный массив Мунку-Сардык и массив Пика Топографов) (рис. 1).

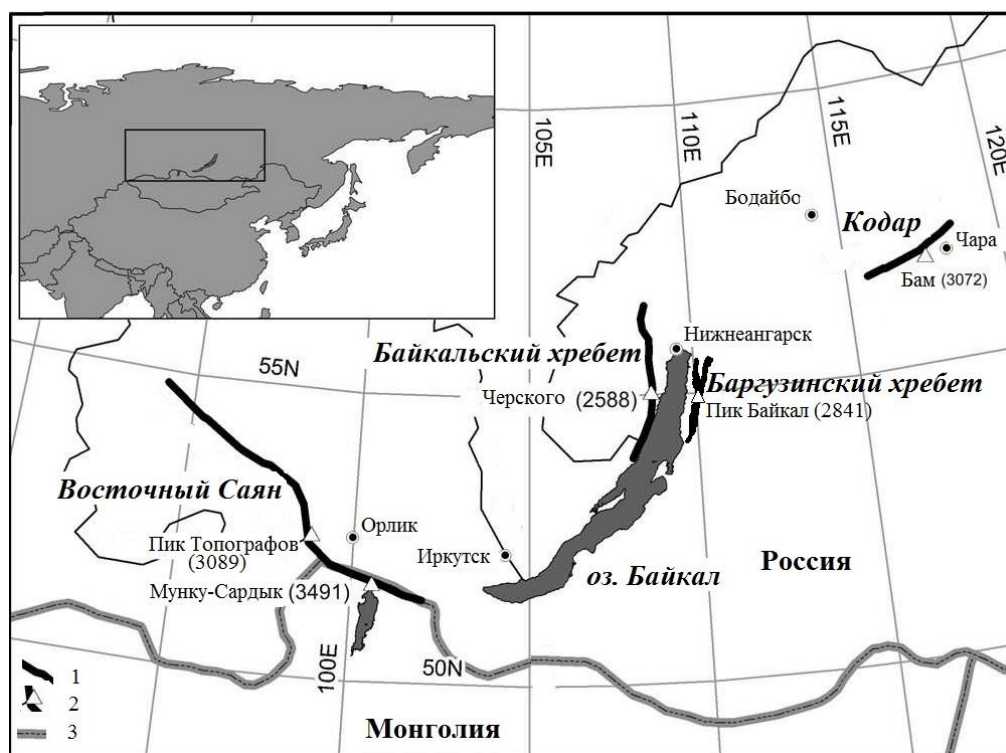


Рис. 1. Ключевые участки мониторинга нивально-гляциальных образований горных территорий Южной Сибири: 1 – линии хребтов; 2 – вершины с названиями и указанием высоты; 3 – госграница.

Для экспедиционных исследований этих объектов оптимален узкий временной промежуток с середины июля по первую декаду августа. Поэтому на столь обширной территории возможно детальное изучение за один полевой сезон, как правило, одного ключевого участка.

В связи с этим, для мониторинга состояния объектов всего трансекта Кодар-Саяны [4] и сопоставления динамики происходящих гляциальных процессов во всех горных массивах, незамечеными становятся данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эти данные позволяют оценивать обширность изучаемых объектов на поверхности Земли. Однако, такие образования, например как ледники, представляют объемные тела со сложной внутренней структурой и подстилающей поверхностью. Для того что бы «заглянуть» внутрь ледника и определить конфигурацию его ложа используются данные георадарного зондирования. Если мониторинг площадного состояния нивально-гляциальных образований названных гор ведется нами и другими исследователями более 10 лет по данным ДЗЗ [1, 2, 6, 7, 11], а ледник Перетолчина изучается более 100 лет [10], то инструментальное исследование по оценке мощности оледенения впервые начато с 2014 г. [3] на примере названного ледника под Мунку-Сардык, хотя в других регионах георадарное зондирование успешно используется значительно дольше [9]. Если для дистанционного исследования Земли используется электромагнитное излучение обычно в видимом и инфракрасном диапазоне, то для подповерхностного зондирования, как и при радарном сканировании с летательных аппаратов, применяется более длинноволновое излучение на частоте порядка 20-100 МГц (для ледников).

**Технология исследований.** С использованием ГИС-технологий (созданы ГИС-проекты) по картографическим материалам и ДЗЗ были составлены базы данных (БД) нивально-гляциальных образований и на всех ключевых участках была выполнена заверка полученных результатов картографирования (рис. 2).

Из архивов данных ДЗЗ сформирован временной ряд материалов, который продолжает формироваться (заказ новой космосъемки), для оценки динамики происходящих гляциологических процессов. Данные радарной съемки (SRTM) использовались для построения цифровой модели рельефа (ЦМР), а для ледника его поверхности. Георадарное профилирование применялось для построения поверхности ложа ледника (построение ЦМР под ледяной массой). Оценка мощности (объема) ледника производилась по специальным математическим моделям [8], а так же по данным ЦМР и данным геолокации. По этим показателям определялась скорость деградации ледника, а по результатам дендрохронологических и метеорологических исследований прогнозировались варианты климатических изменений.

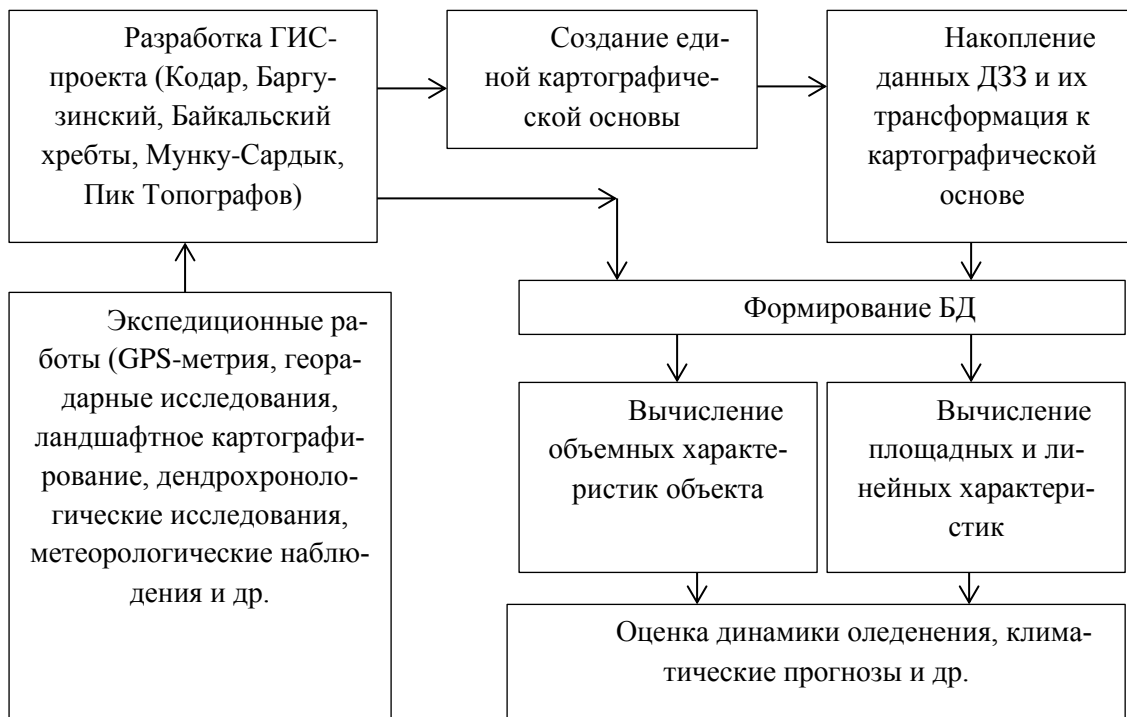


Рис. 2. Блок-схема исследования нивально-гляциальных образований

**Базы данных нивально-гляциальных образований.** По картографическим материалам и данным ДЗЗ по всему трансекту была проведена работа по составлению БД, которые зарегистрированы в Реестре баз данных [5]. БД в основном составлялись по трем временным срезам: середина прошлого века по топокартам; по данным каталогов ледников СССР (1970-е годы); современное состояние по данным ДЗЗ. Технологически при разработке ГИС-проекта определяются три типа картографических объектов (тем): точечные, линейные и полигональные. На соответствующем первичном материале выделяются контуры нивально-гляциальных образований, как полигональные объекты, по ним рассчитывается площадь, периметр и центральные координаты объекта, формируется точечная тема. По точечной теме рассчитываются и заносятся в БД, кроме координат в десятичных градусах, как атрибуты координаты в градусах-минутах-секундах и прямоугольных координатах проекции в метрах. В эту точечную тему по исходной картографической основе наносятся точки верхней и нижней границы открытой части ледника. Через центральную точку от верхней границы до нижней по осевой линии ледника проводится линия (линейная тема) для определения длины ледника. Из характеристик, полученных по этим трем типам графических тем, рассчитываются остальные атрибуты и заносятся в БД. Это – средняя граница ледника (среднее между верхней и нижней границами), высота ледника (разность верхней и нижней границ), крутизна (тангенс, и угол наклона, по данным высоты и длины) и т.д. (рис. 3).

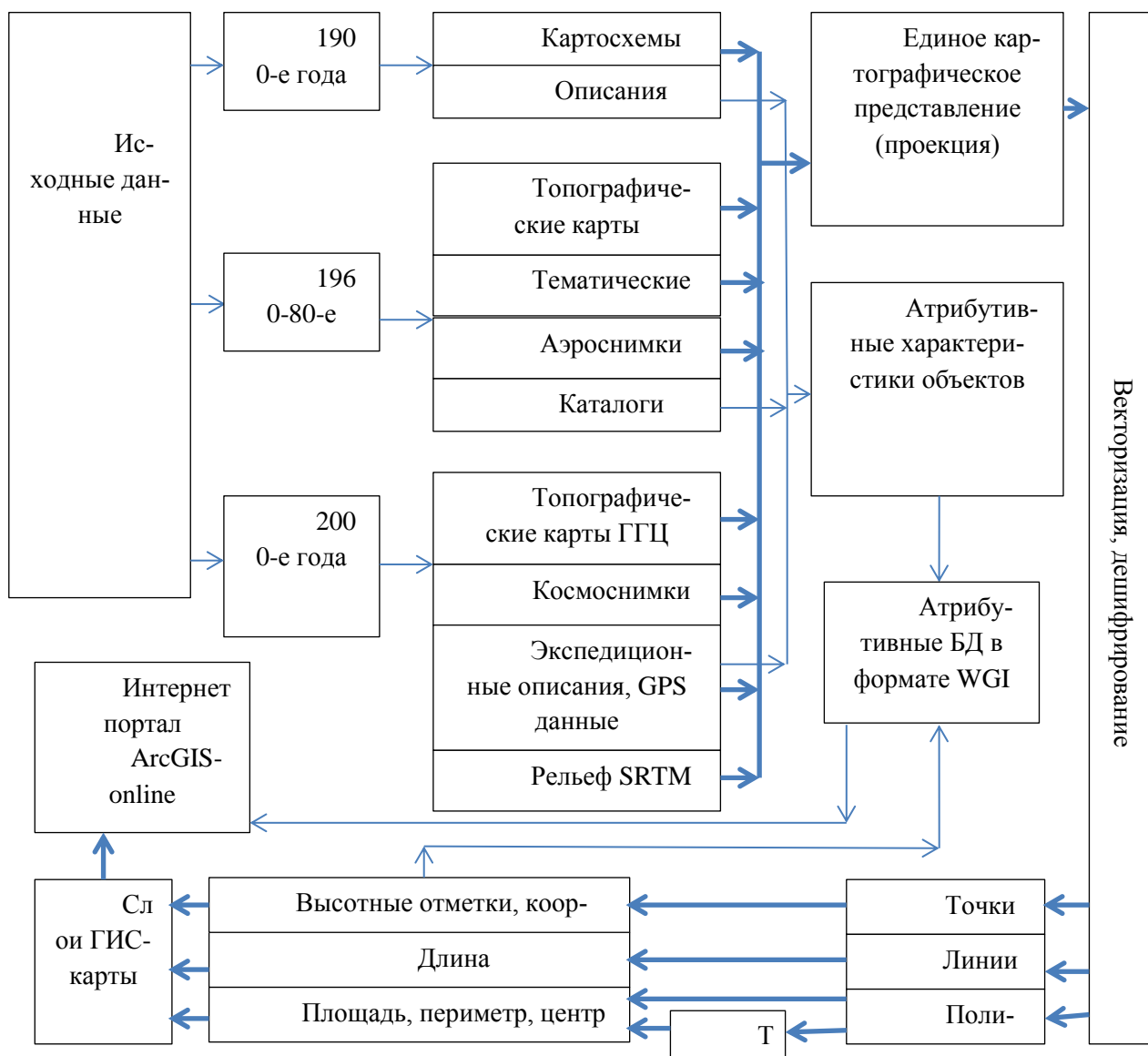


Рис. 3. Технологическая схема ГИС-инвентаризации нивально-гляциальных образований.

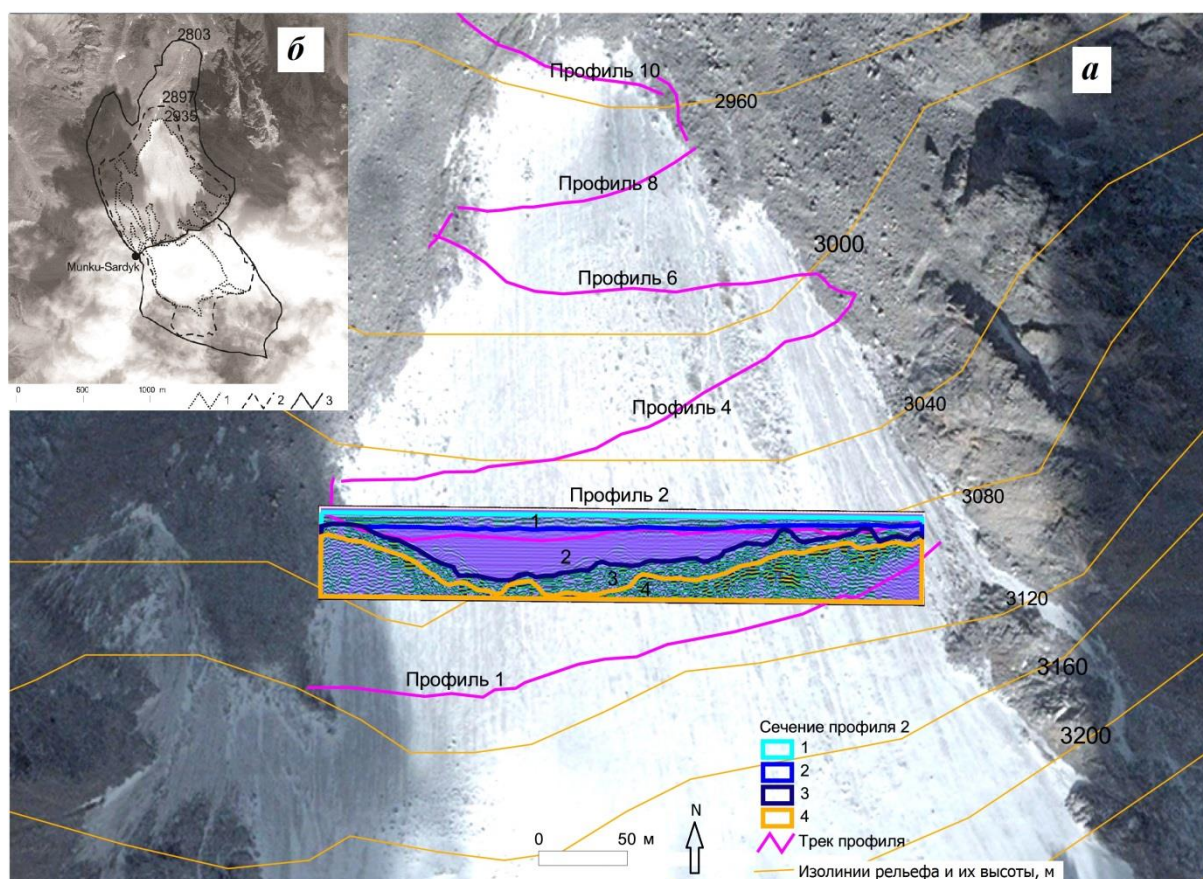


Рис. 4. Дистанционные исследования ледника Перетолчина с использованием данных ДЗЗ Quick Bird (разрешение 0,6 м): а – георадарное профилирование северного ледника Перетолчина георадаром Око-2 с антенным блоком «Тритон» на частоте 100 МГц; треки профилей (подписаны горизонтальные профили); дешифрованная радарограмма профиля 2 (1 – фирн, 2 – лёд, 3 – донные морены с холодным льдом, 4 – ложе ледника, коренные мерзлые породы); б – динамика северного и южного ледников Перетолчина (1 – современное состояние по космоснимкам, 2 – 1960-е по топокартам, 3 – 1900 г. реконструкция по космоснимкам и картосхеме С.П.Перетолчина [10]).

Существующие базы данных в международном формате World Glacier Inventory (WGI) [12] представляют временной срез 1960-х - 1970-х годов прошлого столетия на основе топографического картографирования и составления каталогов ледников СССР соответствующих выпусков [1, 2]. Эти БД ледников Восточной Сибири сохранили неточности бумажного описания (не достаточно точно указаны географические координаты, приближенно даны площади и другие характеристики, а также не представлена графическая составляющая этих объектов, контуры ледников). Предлагаемые БД на основе ГИС-технологий, в стандарте WGI, дают уточненные атрибуты ледников и дополнены некоторыми параметрами.

Кроме этого в районе Мунку-Сардык с использованием данных ДЗЗ и георадарного зондирования ведется мониторинг наледей, каменных глетчеров и ледниковых озер. Результаты дистанционного зондирования ледника Перетолчина представлены на рис.4.

**Заключение.** Результаты исследований и обработки данных по представленной методике отображены на странице сайта ИГ СО РАН <http://www.irigs.irk.ru>. ГИС-проекты ключевых участков оледенения юга Восточной Сибири представлены на ГИС-портале ArcGIS Online: <https://www.arcgis.com>. ГИС-карта ледников Мунку-Сардык: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=47e7cb4347d7478cbe6fa492369b6cae>.

База данных содержит информацию о состоянии нивально-гляциальных образований горного массива Мунку-Сардык, которую можно использовать с целью сравнительного ана-



лиза геосистем гор Южной Сибири и оценки влияния изменения климата. База данных включает в себя информацию по 14 объектам массива Мунку-Сардык (универсальный международный код ледника, название ледника и др.). БД состоит из картографических данных и таблиц, в которой содержатся стандартные параметры ледника на момент первичного описания, уточненное современное состояние и описание дополнительных характеристик, а также данные предыдущих исследователей по трем основным ледникам массива. Это позволяет проследить динамику ледников за полвека, а для ледника Перетолчина и Радде за 100 лет. База данных является пополняемой и структурно расширяемой. Возможно составление запросов для поиска графических и атрибутивных данных.

За период более 110 лет размеры и мощность ледника существенно сократились – площадь и длина в два раза (с 0,68 до 0,34 км<sup>2</sup>), а объем в 3,7 раза (с 0,026 до 0,007 км<sup>3</sup>). Поднялась нижняя граница открытой части ледника на 184 м. Темпы сокращения ледника Перетолчина (см. рис 4. б) были наиболее интенсивными в 2009–2012 гг. В настоящее время они несколько замедлились.

*Работа выполнена по проектам «Геоинформационное картографирование и математическое моделирование географической среды в условиях глобализации и воздействия на природные и социально-экономические процессы в Сибири и на сопредельных территориях», «Экзогенное рельефообразование на юге Сибири в позднем плейстоцене и голоцене» и при поддержке гранта РФФИ 16-05-00902А «Механизмы самоорганизации геосистем Прибайкалья».*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Каталог ледников СССР Т. 17, Вып. 2, Ч. 1. Л.: Гидрометиздат, 1972. 44 с.
- [2] Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3-5; Вып. 2, Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 64 с.
- [3] 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.
- [4] Китов А.Д., Плюснин В.М. Особенности локальных гляциологических явлений в горных ландшафтах (на примере Байкало-Урумчинского трансекта) // Материалы международной конференции InterCarto-InterGIS–14. Том 1. Саратов: Международная картографическая ассоциация, 2008. С. 130-137.
- [5] Китов А.Д., Плюснин В.М. Базы данных ледников Прибайкалья // Материалы международной конференции InterCarto-InterGIS–21. Краснодар: Изд-во Куб. ГУ, 2015. С. 318-332.
- [6] Коваленко Н.В. Режим и эволюция малых форм оледенения. М.: Изд-во МГУ, 2008. 207 с.
- [7] 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.
- [8] Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лаврентьев И.И. Об оценке объема льда горных ледников // Лёд и Снег. 2013. № 53(1). С. 5-15. DOI:10.15356/2076-6734-2013-1-5-15.
- [9] 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. XVIII, № 3. С. 91–100.
- [10] Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Томск. техн. ин-та. Т. 9. Томск: Типография Сиб. т-ва печатного дела, 1908. 60 с.
- [11] Osipov E.Y., Osipova O.P. Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age. Ann Glaciol. 2014, № 55(66). P. 167–176. doi:10.3189/2014AoG66A135
- [12] WEBGEO. <http://www.webgeo.ru/index.php?r=47&id=38>. (дата обращения 01.06.2017).