

УДК 551.324.63:338 (571.5)

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-136-150

А.Д. Китов¹, С.Н. Коваленко²

ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАЛЕОЛЕДНИКОВЫХ И МЕРЗЛОТНО-КАМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ГОРНОГО МАССИВА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

АННОТАЦИЯ

Изучение нивально-гляциальных объектов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) в качестве хороших долговременных индикаторов развития климата ведутся более 100 лет. Кроме наиболее изученных ледников Перетолчина и второго по величине ледника Радде, найдены различные переходные гляциально-мерзлотные образования, мерзлотно-лёд-каменные образования и погребённые ледники, которые в данной местности практически не исследовались. Один из таких объектов представляет вероятно погребённый ледник (активный каменный глетчер). Он представляет каменно-ледовый оползневым массив обломочного материала с ледяным ядром (мощностью до 20 м), длиной 660 м, шириной 150–250 м и общей толщиной около 25 м (по данным георадарного исследования), с перепадом высот 1810–2030 м над уровнем моря, местами поросший «пьяным» редколесьем. Вероятно, он сформировался 5500–4300 лет назад, одновременно с современными ледниками Перетолчина и Радде. По генетической классификации А.А. Галанина он соответствует каровым языковидным каменным глетчерам. По классификации алтайских гляциологов этот объект соответствует каменно-ледовым комплексам. Из-за постоянно движения потока, на выходе к руслу Бел. Иркутка он заканчивается «живой» осыпью, опасной для проходящих туристов. Возможен также катастрофический сход обломочного материала в русло реки с последствиями временного перекрытия основного русла. Изучение таких образований имеет самостоятельный интерес как самоорганизованной геосистемы длительного развития.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный Саян, нивально-гляциальные образования, ледник, каменный глетчер, каменный поток, дистанционные исследования, георадарное исследование.

Aleksandr D. Kitov³, Sergey N. Kovalenko⁴

PALEOCLIMATIC ANALYSIS PALEOGLACIAL AND PERMAFROST-ROCK FORMATIONS OF THE MUNKU-SARDYK MOUNTAIN RANGE (EAST SAYAN)

ABSTRACT

The study of the nival-glacial objects of the Munku-Sardyk Range (East Sayan) as good long-term indicators of climate development has been going on for more than 100 years. In

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

² Иркутский государственный университет, ул. Карла Маркса, д. 1, 664003, Иркутск, Россия; *e-mail:* igpug@mail.ru

³ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st., 1, *e-mail:* kitov@irigs.irk.ru

⁴ Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, Karl Marx st., 1, Russia; *e-mail:* igpug@mail.ru

addition to the most studied glaciers of the Peretolchin glacier and second largest the Radde glacier, found various transitional glacial-permafrost formations permafrost-ice-rock formations and buried glaciers, which in the area were virtually un explored. One such object is a probably buried glacier (active rock glacier). It represents a rock-ice landslide array of fragmentation material with an ice core (up to 20 m), 660 m long, 150–250 m wide and a total thickness of about 25 m (according to geo-radar research), with a height difference of 1810–2030 m above sea level, overgrown with «drunk» woods. It probably formed 5500–4300 years ago, at the same time as the modern glaciers of Peretolchin and Rudde. According to the genetic classification of A.A. Galanin, it corresponds to the kar tongue rock glaciers. According to the classification of Altai glaciologists, this object corresponds to rock-ice complexes. Because of the constant flow movement, at the exit to the Belyi Irkut river, it ends with a «living» scree, dangerous for passing tourists. There may also be a catastrophic descent of the breakage material into the riverbed with the consequences of the temporary overlap of the main channel. The study of such formations has an independent interest as a self-organized geosystem of long-term development.

KEYWORDS: East Sayan, nival-glacial formations, glacier, rock glacier, rock stream, remote research, Ground-penetrating radar research.

ВВЕДЕНИЕ

Восточный Саян представляет молодые горы, которые выдержали смену нескольких эпох оледенения и потепления. Горный массив Мунку-Сардык с одноименной вершиной, 3491 м н.у.м. (наибольшей в Восточном Саяне) находится на границе России и Монголии, самой северной её части (рис. 1).

За последние 11 тысяч лет значительное потепление было в эпоху оптимума голоцена (7,5 тысяч лет назад), похолодание 4500–5500 лет назад, когда зародились существующие ледники, потепление до XVI века нашей эры и похолодание в малый ледниковый период (МЛП), который закончился 160 лет назад. Нами были исследованы карово-троговые ступени горного района Мунку-Сардык (табл. 1).

Современный межледниковый период характеризуют первые 7 СВУК. Кроме того, шестой среднестатистический уровень нашей лестницы каров (7,5 тыс. лет) подтверждён радиоуглеродным анализом древнего дерева, найденного нами в 2008 г. в морене п/л Широкого в долине р. Буговек, на высоте 2300 м н.у.м (это на 200 м выше и дальше по долине на 1,5 км) от современной границы леса. Это подтверждает существование леса оптимального развития на месте современных ледников (1–2 СВУК, см. табл. 1). Однако в результате изменения климата в сторону потепления [РСС, 2007] происходит трансформации геосистем, связанная с изменением высотных поясов и состояния ледников. Происходит переход глетчеров в каменные глетчеры, преобразования каров существовавших ледников и образования каменно-ледовых потоков, сохраняющих свою активность значительно ниже хионосферы.

По характерным морфолого-количественным признакам каров палеоледников этой лестницы каров северного склона хр. Мунку-Сардык можно примерно восстановить климатическую кривую (верхняя часть рис. 2) похолоданий (местных оледенений) и потеплений в течение голоцена. Как видно из сравнения с подобной шкалой Д. Имбри и К. Имбри [Imbrie, Imbrie, 1986] наша шкала позволяет несколько детальнее её рассмотреть (расчленив) для нашего района.

По нашим данным на формирование рельефа в районе оказали своё влияние несколько палеоледников (п/л), явившихся результатом одной или двух прогрессивных и более восьми регрессивных стадий оледенения. Согласно палеоклиматическим данным самым первым оледенением в Сибири было самаровское, которое хорошо сопоставляется с вюрмским в Европе и соответствует второй половине среднего плейстоцена.

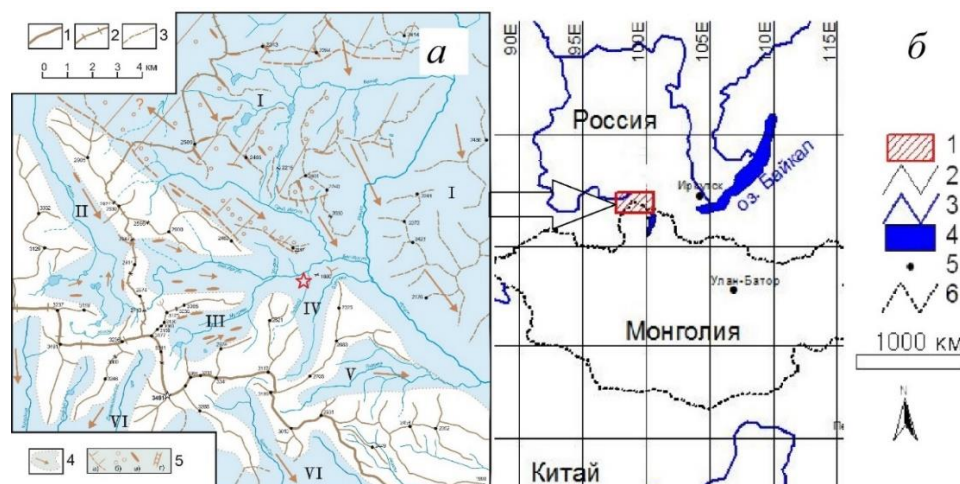


Рис. 1. Район исследования: а – схема структур и направление движения ледников Окинско-го оледенения: 1 – оси водораздельных хребтов; 2 – ось водораздельного хребта бассейнов рек Оки, Иркут и Селенги; 3 – максимальные границы зырянского оледенения и направления движения ледников (I – Окинско-го; II – Жохойско-го, III – Мугувекско-го; IV – Бугувекско-го; V – Буготинско-го; VI – Косогольско-го); 4 – структуры Окинско-го ледника (а – плечи трогов, б – морены, в – курчавые скалы, г – эпигенетические долины); звездочкой помечен рассматриваемый объект; б – общий вид: 1 – район исследования массив Мунку-Сардык; 2 – координатная сетка; 3 – реки; 4 – озёра; 5 – города; 6 – государственные границы

Fig. 1. Area of study: a – the scheme of structures and direction of movement of glaciers of the Okinsky glaciation: 1 – axis of dividing ridges; 2 – the axis of the watershed ridge of the basins of the rivers Oka, Irkut and Selenga; 3 – the maximum boundaries of the glaciation and the direction of the glaciers (I – Okinsky; II – Johoysky, III – Muguveksky; IV – Bugoveksky; V – Bugotinsky; VI – Kosogolskiy); 4 – structures of the Okinsky Glacier (a – the shoulders of trogs, б – moraines, в – curly rocks, г – epigenetic valleys); The object in question is marked with a star; b – general view: 1 – Munko-Sardyk massif research area; 2 – coordinate grid; 3 – rivers; 4 – lakes; 5 – cities; 6 – State Borders

Табл. 1. Возраст и последовательность ГМК долин рек Мугувек и Бел. Иркут

Table 1. Age and consistency of the GMC valleys of the Muguvek and Bel. Irkut rivers

Среднестатистический высотный уровень каров (СВУК)	n+2	n+1	n	8	7	6	5	4	3	2	1
Время экзарационной активности ледников, тыс. лет тому назад	135	110	80	24	11	8	5,5	2,4	0,56	0,31	0,11
Продолжительность последующего абляционного периода тыс. лет	25	30	56	13	3	2,5	3,1	1,84	0,25	0,20	0,15
Название гляциального морфологического комплекса (ГМК)	Окинский и др.		Усть-Иркутный	Портулановский Активный	Лесной, Бело-Иркутный	Луговой, Ровный, Конституции,	Пристенный, Сухой Шатаевой, Уютный Контрастов	Экойский, Озерный, Промежуточный	Древне-Северный, ВСГАО	Перетолчина, Радде, Пограничный	
Тип ледников	Покровно-долинный		Карово-троговой						Каровый		

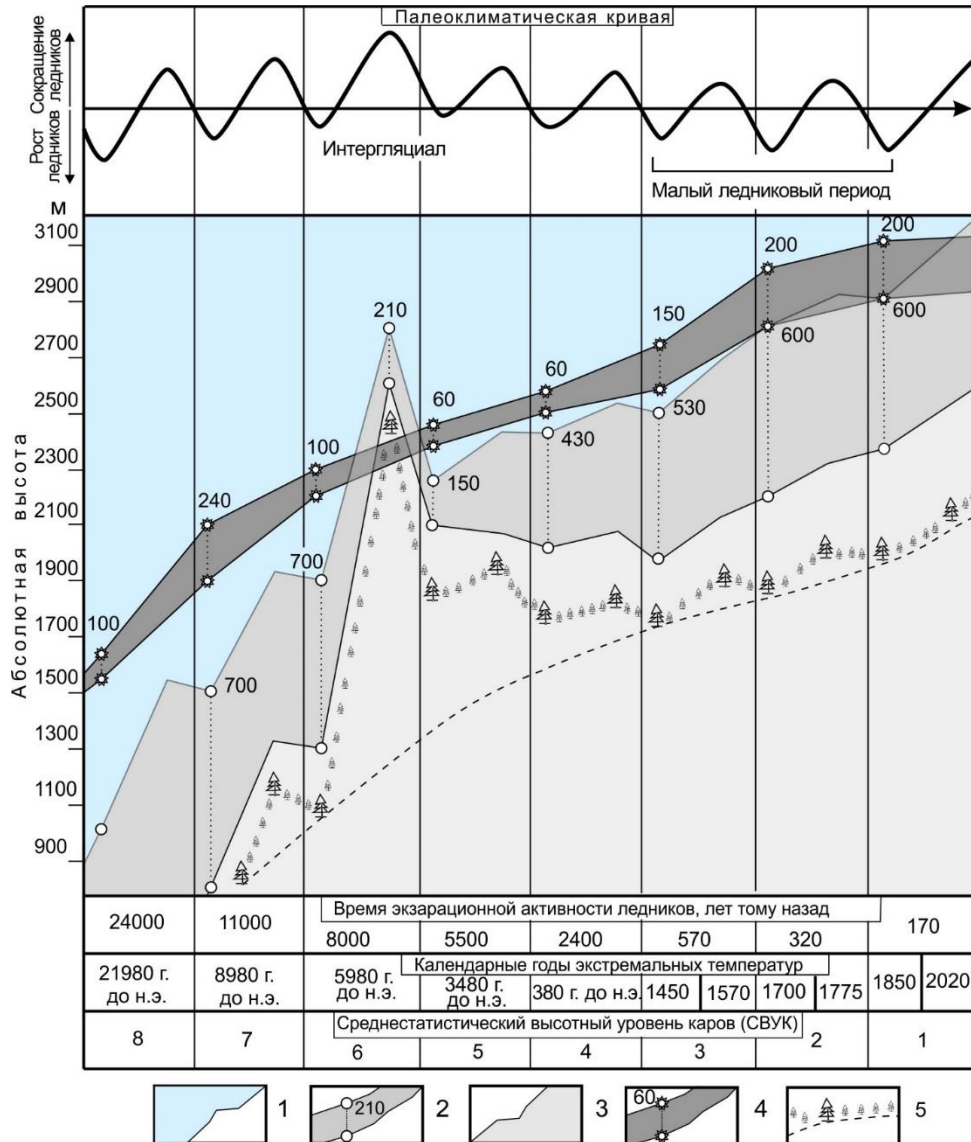


Рис. 2. Восстановление палеоклиматической кривой и положения высотных геокриологических уровней развития рельефа в районе г. Мунку-Сардык: 1–3 ступени развития рельефа: 1 – ледниковая, 2– термальная с указанием максимального значения вертикальной амплитуды, 3 – эрозионная; 4 – вертикальная амплитуда разброса высот палеокаров; 5 – граница леса с указанием её положения без учёта термального максимума (пунктир)

Fig. 2. Restoration of the paleoclimatic curve and the position of high-altitude geocryological levels of relief development in the Munku-Sardyk area: 1–3 stages of relief development: 1–glacial, 2 – thermal with the maximum value of vertical amplitude, 3 – erosive; 4 – vertical amplitude of the scattering of heights of paleokars; 5 – the boundary of the forest with its position without taking into account the thermal maximum (point)

Время начала оледенения около 135 тыс. лет, а окончание – 100–110 тыс. лет. Согласно Д. Кролля [Imbrie, Imbrie, 1986] с конца тазовского оледенения вообще наступила межледниковая эпоха, которая по расчётам учёных продлится ещё две тысячи лет, после чего наступит новое более мощное, чем даже предыдущее вюрмское оледенение, длительностью в 23 тыс. лет.

Согласно палеоклиматическим схемам (рис. 3) во время межледниковой эпохи в голоцене было как минимум пять похолоданий, приведших к возрождению локальных ледников карово-трогового и карового типов в горах с абсолютными высотами, превышающими исторически депрессивную снежную границу в этот период.

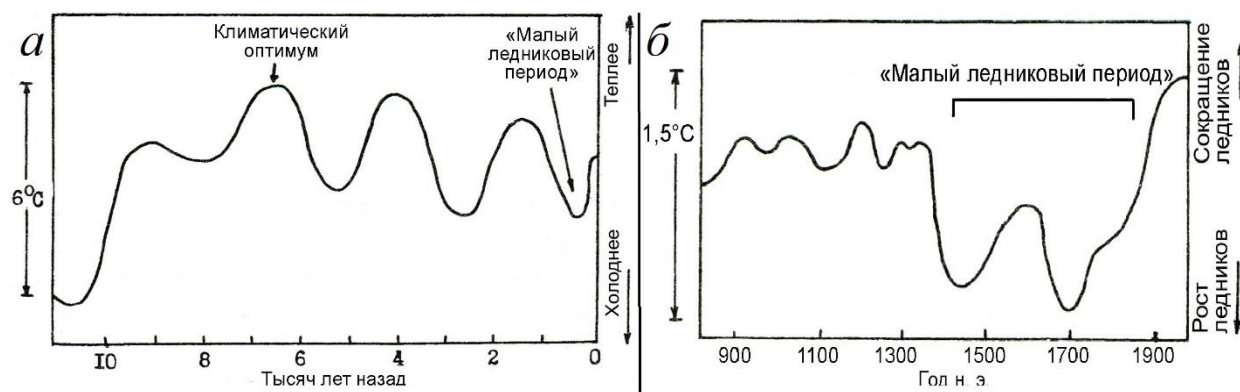


Рис. 3. Палеоклимат: а – изменения глобальной температуры в голоцене; б – климат последнего тысячелетия, установленный по анализу исторических материалов (по Имбри [Imbrie, Imbrie, 1986])

Fig. 3. Paleoclimate: a change in global temperature in the Holocene; b - the climate of the last millennium, established by the analysis of historical materials [Imbrie, Imbrie, 1986]

Основные формы рельефа горного массива Мунку-Сардык (основные водоразделы и отдельные отроги хребтов, верхние части долин рек Оки и Иркуты) были сформированы в результате деятельности самых древних ледников первого оледенения второй половины среднего плейстоцена — самаровского и частично зырянского. Эти основные структуры рельефа горного массива значительно подработал и создал новые палеоледник Окинский. Область питания этого ледника находилась на водораздельной части рек Оки и Иркуты.

Этот ледник имел прогрессивный покровно-долинный тип и максимальных размеров достиг, вероятно, во время зырянского оледенения. Его языки могли достигать Мондинской впадины. Им были заложены основные направления речных долин района вдоль основных направлений движения его языков III и IV (см. рис. 1 а).

Для восстановления палеоклимата, а также реконструкции происходящих процессов, большое значение имеет обнаружение артефактов. Такой меткой датирования стал найденный нами в древней морене значительно выше современной границы леса пень (а затем ещё несколько пней чуть ниже в заболоченной низине) лиственницы возрастом около 400 лет и более метра в диаметре. Это показало, что в оптимуме голоцена ледники полностью стаяли. Всего вероятнее они образовались вновь после последующего похолодания 4000–5000 лет назад (см. рис. 2, 3).

Погребённые ледники и каменные глетчеры помогают понять некоторые процессы деградации и самоорганизации нивально-гляциальных геосистем при изучении палеоклимата. Результаты изучения внутреннего строения каменных глетчеров в составе позднеголоценовых (неогляциальных) комплексов указывает на унаследованное их развитие на фоне климатических изменений путем перерождения из нормальных ледников в результате изменения питания, морфологии и внутреннего строения [Галанин, 2010, рис. 2]

В мае 2013 году нами был обнаружен уникальный каменный глетчер [Коваленко и др., 2013], образовавшийся ниже кара бывшего ледника на уровне 7-й ступени СВУК (см. табл. 1). Это мерзлотно-лёд-каменное образование (МЛКО), названное нами

первоначально каменный поток Активный, заканчивается «живой» осыпью в русло Бел. Иркут, которая представляет опасность для проходящих мимо туристов в любое время года. В 2014 году МЛКО был детальнее исследован в летнее время [Китов и др., 2014], а в 2017 частично проведено георадарное профилирование.

Дополнительно необходимо остановиться на терминологии и классификации каменных глетчеров, которая ещё не устоялась, тем более что терминология отечественной школы и зарубежных геоморфологов, и гляциологов не совпадает. Так, например, Д. Барш [Barsch, 1996] все что является продолжением действующих ледников, или их бронированной и погребённой части, считает каменными глетчерами (rock glacier), все остальное мерзлотными, присклоновыми и иными каменными потоками. Поэтому активные и неактивные каменные глетчеры относятся также к ледникам (хотя они могут быть погребены грунтом, покрыты лесом и не иметь явной зоны снежно-ледового питания. А.П. Горбунов выделяет ледники, активные, не активные и древние каменные глетчеры [Горбунов, 2006, 2013]. Алтайские учёные [Останин, Дьякова, 2013; Дьякова и др., 2020] каменные глетчеры и каменные потоки мерзлотного происхождения определяют, как гляциально-мерзлотные каменные образования (ГМКО). Наиболее развёрнутую классификацию с учётом генезиса каменных глетчеров дал А.А. Галанин [2008, 2010]. Кроме того, мерзлотно-ледовые каменные образования могут быть техногенного происхождения. Часто они образуются на основе хвостовых отвалов месторождений. При определении типа образования необходимо учитывать его происхождение. Также необходимо учитывать долю камней и льда, их соотношение. Например, типичный каменный поток – курум, как правило не содержит в своём составе лёд. Логично считать образование занимающее древний кар или оконечность современного ледника с соотношением лёд: камни около 50:50 % – каменным глетчером (это отмечает А. Горбунов [2006]). При большой доле льда (более 60%) – погребённым ледником или языком ледника под каменным чехлом, при большей доли камней и почвы, чем льда и не имеющем древней или современной связи с ледником – каменным потоком.

Мы тоже долго обсуждали это странное образование. Первоначально после наблюдения из русла Бел. Иркут сформировалась первая оползневая гипотеза. Это громадный оползень. Моренный материал, оставшийся после последнего оледенения, постепенно сползает по склону в долину.

В 2013 году мы впервые поднялись на склон и в кар этого образования и убедились, что это не оползень. Возникла вторая гипотеза – каменный поток на месте полностью стаявшего древнего ледника. Каменный поток, получая обломочный материалом с крутых склонов, транспортирует его с достаточно высокой скоростью и создаёт формы рельефа «псевдоморены» очень похожие на краевые морены настоящих ледников. Например, правая боковая осыпная «морена» высотой 12–15 м и шириной 25–30 м, подпитываясь коллювиально-деляпсивным материалом со склона, имеет длину более 150 м. Она, как и центральная движущаяся часть каменного потока, разбивается поперечными трещинами отрыва [Коваленко и др., 2013].

В 2017 году было проведено георадарное исследование центральной пологой части образования. Это исследование показало, что основную долю составляет метаморфический лёд, который не может образоваться подпиткой грунтовыми и поверхностными водами, унаследован от древнего ледника. Правильнее сказать, что это не каменный глетчер, а погребённый ледник. Его поверхностный грунтовый чехол составляет не более 5–10 % общей мощности. Однако в литературе отдельно не рассматриваются погребённые ледники, их классифицируют как абляционные каменные глетчеры, или каменные глетчеры с ледяным ядром [Barsch, 1996; Галанин, 2010].

По классификации Галанина [Галанин, 2008, 2010] – это образование следует отнести к активному языковидному каменному глетчеру. Если даже сравнить древесную растительность на нижней части глетчера и окружающих территорий, имеющих хотя и угнетённую, но близкую к оптимальному развитию состояние, то в русле же потока это в основном кустарниковая и сильно редуцированное листовенничное редколесье в виде «пьяного леса». Это свидетельствует о смещении и сильном охлаждении почвы. Кроме того, его генезис очевиден, он находится в русле бывшего ледника и повторяет его формы и поведение, но потерял ледово-фирновую область питания. Проводились исследования, как сильно каменный чехол замедляет таяние льда ледника. Слой всего 60 см в 4 раза замедляет таяние льда по сравнению с открытым льдом [Lambrecht et al., 2011]. Поэтому погребённый лёд может сохраняться тысячелетиями. Галанин также отмечает, что «формирование абляционных глетчеров является неким синергетическим процессом «самоорганизации ледников» – обратной реакции на неблагоприятные климатические условия» [Галанин, 2010].

В массиве Мунку-Сардык в 1950-е годы был обнаружен погребённый ледник, который внесён в каталог ледников под №29 [Каталог, 1973]. Этот ледник был исследован нами, но провалов кровли и выходящего на поверхность линз льда найдено не было. Он требует дополнительно георадарного изучения для определения глубинной структуры.

Данная работа представляет продолжение исследований геосистем горного массива Мунку-Сардык и их особенностей в связи с изменением климата [Kitov et al., 2009].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения динамики и инвентаризации современного состояния ледников Мунку-Сардык использованы разномасштабные (с разным пространственным разрешением) космоснимки, полученные со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat-4, -5, -7, -8. Георадарное профилирование МЛКО проведено в 2017 году с помощью георадара Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (центральная частота 100 МГц) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$ (в отличие от льда, когда $\epsilon = 3$ [Мачерет, 2006]) и дистанцией ожидания отражённой волны 100 м. Обработка георадиолокационных разрезов проводилась в программе «GeoScan-32». Учитывался опыт георадарного исследования каменных глетчеров по работам отечественных [Останин, Дьякова, 2013] и зарубежных авторов [Maurer, Hauck, 2007].

Навигационная информация собиралась с помощью портативных GPS-приёмников Garmin GPSmap-64st. Запись приёмником велась в формате WGS-84 десятичных градусов.

Ландшафтная оценка территории производилась на основе разновременных космических снимков Landsat с разрешением 15–30 м/пиксел. Снимки были привязаны к топографической карте масштаба 1:100 000 и приведены в единую проекцию Пулково-1942 WGS-84, зона 17. Дешифрирование и векторизация границ бъекта проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков каналы 2-4-7 для Landsat-7 и 3-5-7 для Landsat-8. Все измерения выполнялись в программе ArcViewGIS-3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пиксель систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км² или 5 % от измеряемой величины. Также использовались наземные снимки для детального морфологического изучения компонентов объекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемый МЛКО «Активный» расположен в самом интенсивно посещаемом туристами и учёными месте – в правом борту реки Белый Иркут в трёх километрах от устья (рис. 4). На схеме выделена наиболее активная часть МЛКО. Каменные глетчеры Восточного Саяна ранее упоминались в работе М.Г. Гросвальдом

[1959]. Нами они описывались в Вестнике кафедры географии ВСГАО [Коваленко, 2011] в районе Мунку-Сардык, причём, как современные, так и древние, находящиеся на различных стадиях формирования, выделяемых Л.Н. Ивановским [1981].

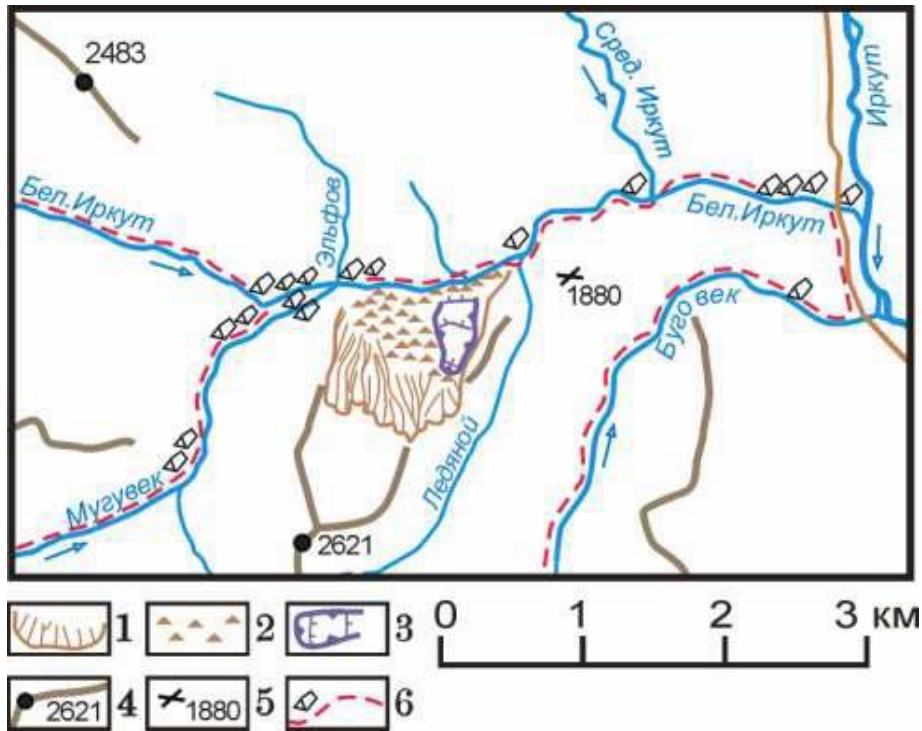


Рис. 4. Положение каменного глетчера на карте района и в структуре живой Бело-Иркутной осыпи: 1 – денудационная часть осыпи, 2 – денудационно-аккумулятивная часть осыпи, 3 – каменный глетчер, 4 – основные хребты с отметками высот, 5 – активно посещаемые туристами перевалы с отметками высот, 6 – места постоянных стоянок и наиболее популярные маршруты туристов

Fig. 4. The position of the rock glacier on the map of the area and in the structure of the living Belo-Irkut scree: 1 – denudation part of the scree, 2 – denudation-accumulating part of the scree, 3 – rock glacier, 4 – main ridges with elevations, 5 – actively visited by tourists passes with elevation marks, 6 – places of permanent parking and the most popular routes of tourists

При беглом знакомстве с обнаруженным объектом создаётся впечатление, что это будто бы стабилизировавшийся длительно существующий каменный глетчер на третьем этапе развития (по Л.Н. Ивановскому), когда «на его поверхности выделяются чёткие и глубокие продольные и поперечные ложбины-рвы-провалы над трещинами в ледяном теле подземной части ледника. Наблюдаются дифференцированные криогенные подвижки поверхностных слоёв рыхлых отложений и пластические перемещения сцементированной вторичным и первичным льдом массы каменного глетчера. В результате этих подвижек образуются многочисленные поперечные гряды, ложбины, уступы и пр. Наиболее древняя приконцевая часть обычно выглядит в виде фронтального уступа, моренный материал, которого часто перемешан со склоновыми отложениями или навален на морены предыдущих стадий. Эта часть глетчера цементируется лишь инфильтрационным льдом» [Коваленко, 2011]. На фронтальном уступе хорошо видна линия днища МЛКО, из-под которого зимой образуется наледь.

Однако МЛКО «Активный» представляет единичный объект такого типа горного массива Мунку-Сардык. По классификации Голанина его можно отнести к комбинированным каменным глетчерам. Термин complex rock glacier ввёл Д. Барш [Barsch, 1996],

учитывая сложность процессов и генезис каменных глетчеров. А. Горбунов [2006] также отмечает, что в образованиях подобного типа наблюдается комплекс мерзлотных и гляциальных процессов.

По данным ДЗЗ были выделены и картографированы с помощью ГИС характерные элементы структуры МЛКО (рис. 5).

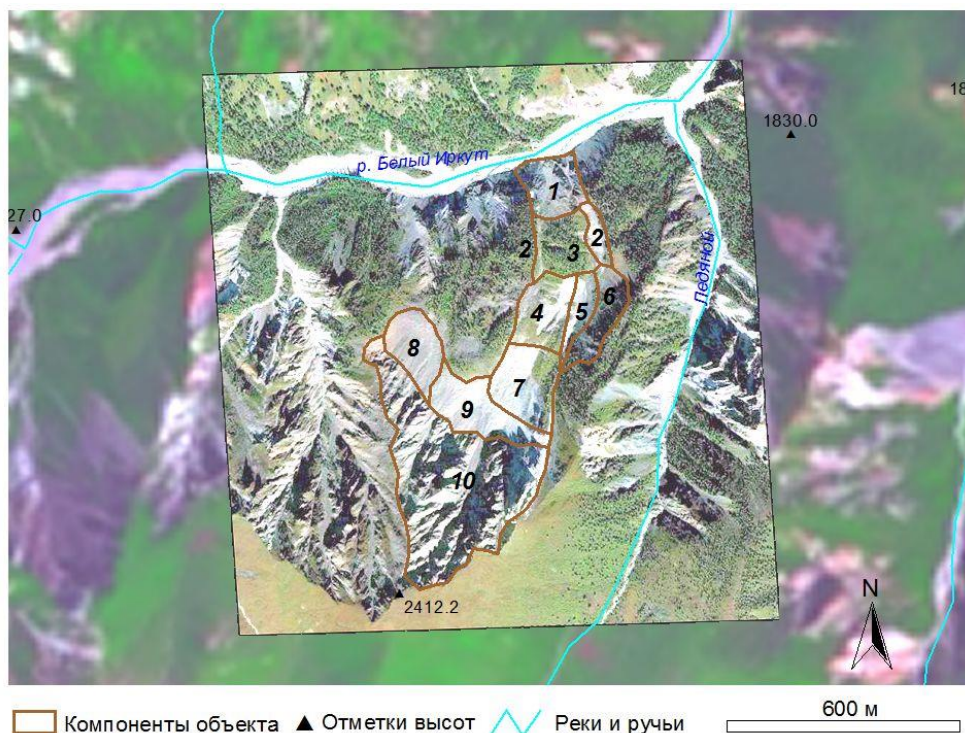


Рис. 5. Структура каменного глетчера, компоненты: 1 – конечная осыпь (фронтальный уступ); 2 – боковая морена; 3 – нижний участок, поросший кустарником и редколесьем; 4 – высокогорный луг (зандровая поляна); 5 – активный гребень; 6 – зона питания обломочным материалом; 7 – правый (основной, активный) язык; 8 – левый (не активный) язык; 9 – низ кара, ложе бывшего ледника; 10 – верх кара (современные осыпи); фон – космоснимок Landsat и фрагмент Quick Bird

Fig. 5. Structure of the rock glacier, components: 1 – the final scree (frontal ledge); 2 – side moraine; 3 – the lower area, overgrown with shrubs and woodland; 4 – alpine meadow (sandur); 5 – the active crest; 6 – feeding area with chip material; 7 – the right tongue (main, active); 8 – the left tongue (not active); 9 – the bottom of the kar, the bed of the former glacier; 10 – the top of the kar (modern scree); background is space image Landsat and Quick Bird

Верхнюю часть структуры представляют крутые склоны кара (10). В отдельных кулуарах склона вероятно формируются снежники и фирновые образования, представляющие временную зону питания в начале лета. Ниже выположенный участок кара (9) – бывшее основное ложе ледника. Возможно под обломочным материалом сохранилось ледяное ядро. Как видно, ледник спускался двумя языками: левого не активного потока (8) и правого активного (7) соответственно. Из зоны питания (6) поступает дополнительный обломочный материал со склонов. Активный гребень (5) состоит из современного обломочного материала, имеет трещины отрыва, в которых просматриваются ледяные вкрапления (вероятно это эмбриональный каменный глетчер, по классификации Галанина). Левее гребня расположен пологий участок (4) в виде луговины. Ниже по центру расположен участок, уже поросший кустарником и «пьяным» редколесьем (3), с

боковой мореной (2). Заканчивается вся эта структура фронтальным уступом и «живой» осыпью (1), с которой постоянно в русло Бел. Иркута скатываются камни. Весь МЛКО (7, 5, 4, 3, 2, 1) неравномерно движется вниз. Со стороны Бел. Иркута на осыпи (фронтальном уступе) видна линия соприкосновения рыхлого материала, сцементированного льдом, с коренными породами. Высота ступени около 15 м. Она же является истоком образования наледи на склоне осыпи. В летнее время – это постоянный сток глетчера.

По данным георадарного зондирования (рис. 6) толщина льда составляет значительную часть МЛКО.

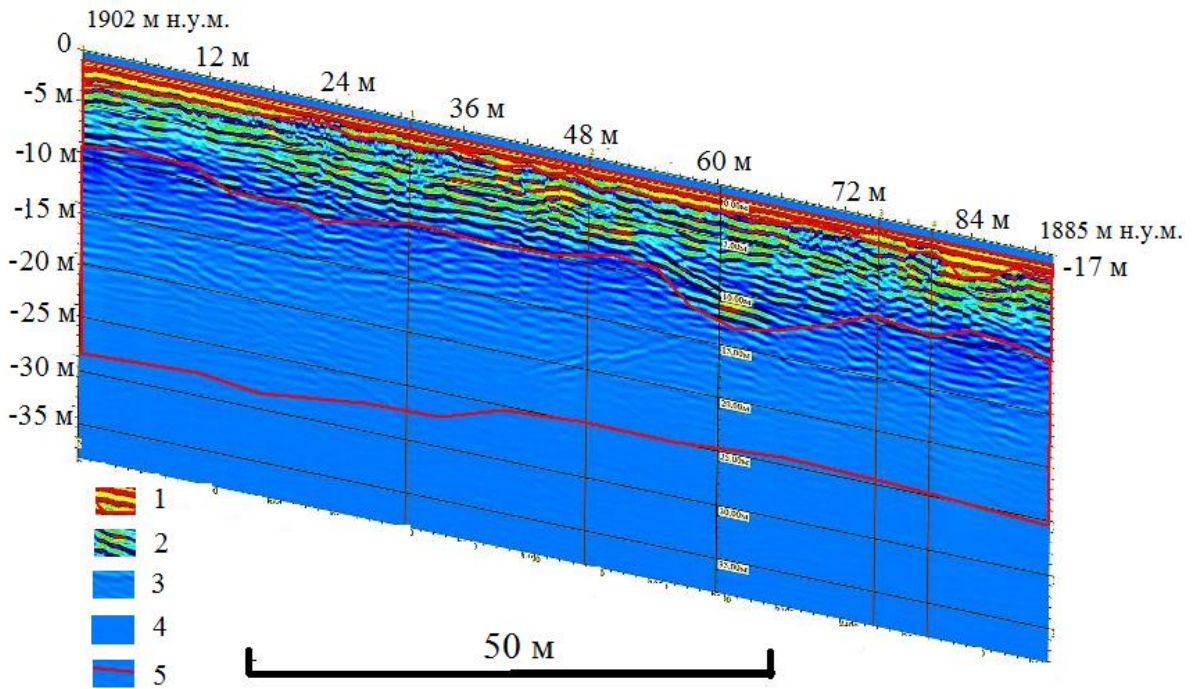


Рис. 6. Радарограмма МЛКО вдоль структуры 5 и 3 (см. рис. 5) длиной 92 м с учётом рельефа: 1 – каменная кровля; 2 – ледово-каменное тело (примерно в равных соотношениях льда и обломочного материала); 3 – метаморфический лёд (ледяное ядро); 4 – ложе (мёрзлые коренные породы); 5 – линии разграничения сред (1–2–3–4)

Fig. 6. Radarogram along structure 5 and 3 (see figure 5) 92 m long, taking into account relief: 1 – rock roof; 2 – ice-rock body (approximately equal ratios of ice and debris material); 3 – metamorphic ice (ice core); 4 – lodge (dark indigenous breeds); 5 – region demarcation lines (1–2–3–4)

Верхний слой каменного гребня (5) около 2 м составлен каменными обломками, под кровлей до 7 м – каменно-ледовая масса, ниже до 15–20 м ледяное тело. Мёрзлые коренные породы начинаются с 20–25 м. По площади разреза соотношение соответствующих структур 1:2:3 – составляет в процентах соответственно 6:30:64 %. Основную долю объекта представляет лёд. Согласно другой радарограмме полученной ближе к уступу – толщина кровли увеличивается до 3 м, соотношение ледово-каменного тела и ледяного ядра почти одинаковы суммарно до 15 м. Нам не удалось получить чёткую границу ложа каменного глетчера. При изучении каменных глетчеров Тянь-Шаня исследователи [Галанин и др., 2017] устанавливали $\epsilon = 6$, а также использовали георадары Око-2 и Питон с разной центральной частотой. На частоте 50 МГц лучше прорабатываются глубинные части объекта, а на частоте 300 МГц – кровля. В нашем же распоряжении был прибор с частотой 100 МГц.

МЛКО находится в диапазоне высот 1810–2030 м н.у.м. Схема продольного разреза представлена рис. 7, а геоморфологическая обстановка – рис. 8.

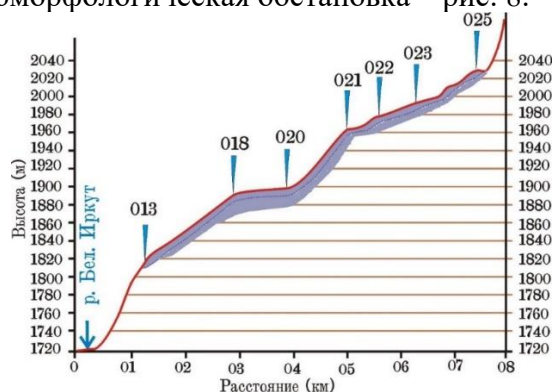


Рис. 7. Гипсометрический профиль МЛКО с точками наблюдения (тН: 013–025)

Fig. 7. Gipsometric profile with observation points (pO: 013–025)

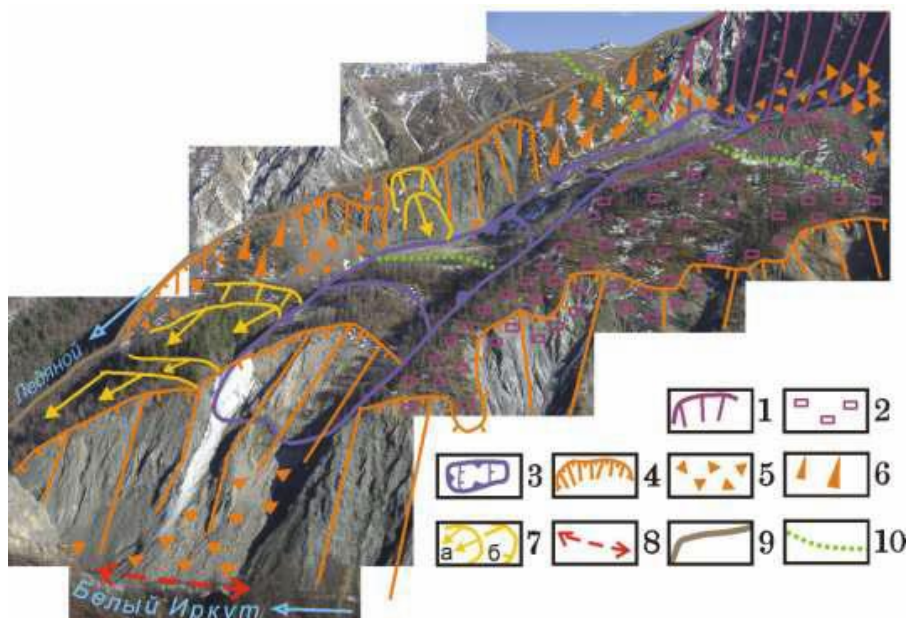


Рис. 8. Общий вид МЛКО Активный: 1– стенка кара п/л Бакалавров ЕГФ, в современном виде представляющая часть денудационной осыпи, частично обеспечивающая каменный поток обломочным и водным материалом; 2 – моренный материал; 3 – контуры основного тела; 4 – денудационная часть живой современной Бело-Иркутной осыпи; 5 – аккумуляционная часть современной осыпи (коллювий); 6 – солифлюкционно-деувияльные отложения; 7 – оползни: а) деляпсий, б) плоскости скольжения, 8 – наиболее опасный участок тропы по Белому Иркуту; 9 – водораздел Белого Иркута и руч. Ледяного; 10 – граница леса

Fig. 8. General view of the Aktivniy rock glacier: 1 – wall kar p/g Bachelors EGF, in its modern form representing part of the denudation scree, partially providing the stone flow of the fragmentation and water material; 2 – moraine material; 3 – contours of the main body; 4 – the denuclearization part of the living modern Bel-Irkut scree; 5 – the accumulation part of modern scree (colluvium); 6 – solvulation-deuvial deposits; 7 – landslides: a) delapia, b) sliding planes; 8 – the most dangerous section of the trail on the Belyi Irkut river; 9 – the watershed of the Belyi Irkut river and the Ledynoy river; 10 – forest boundary

Длина каменного глетчера от выхода его на живую Белоиркутскую осыпь (тН 013) до стенки кара (тН 025) составляет 660–670 м (см. рис. 5). Здесь же на осыпи он имеет максимальную ширину, достигающую 120–150 м. Подошва мёрзлых грунтов каменного потока в тН 013 лежит на абсолютной высоте 1810 м (в 60–80 м над поймой реки), а в верхней части (тН 025) – на высоте 2020–2030 м. Таким образом, амплитуда вертикального размаха МЛКО составляет 200–210 м. На профиле потока в его разных частях можно выделить от трёх до семи выровненных площадок. Горизонтальная или слабонаклонная площадка в верхней части кара-трога глетчера (тН 025) представляет собой дно кара бывшего ледника и в настоящее время находится на высоте 2030 м. Выше неё по краю с коренным скальным склоном или по подножию коллювиальных аккумулятивных конусов осыпей проходит последняя, самая верхняя в системе глетчера трещина отрыва похожая на бергшрудн каровых ледников. Такие параметры верхнего и нижнего уровней выровненных площадок (кара и трога) соответствуют 7 СВУК (Портулановский уровень) или сартанскому возрасту периода оледенения второй его фазе 11 тыс. лет тому назад [Коваленко, 2011]. Поскольку кар сформировался в столь древнее время в рыхлых геологических породах (зелёные и чёрные хлоритовые сланцы), «глетчер» обеспечил себе новую жизнь после оптимума голоцена. Однако его низкое расположение привело к более быстрой деградации по сравнению с современными ледниками такими как Перетолчина и Радде. Он забронировался обломочным материалом, а в нижней части дополнительно почвенным чехлом, став погребённым ледником, или каменным глетчером языковидного типа. Его движение не прекращается круглогодично благодаря сохранившемуся ледяному ядру – это естественное движение глетчера с образованием на поверхности трещин-бергшруднов, но заполненных породой, скрывающей лед.

Центральная часть тела каменного глетчера разбита поперечными и продольными (краевыми) трещинами отрыва и скольжения, что создаёт грядовозападинный рельеф выположенных разноуровневых (повышающихся к стенке кара) поверхностей и довольно высокие извилистые уступы перпендикулярные направлению движения глетчера.



Рис. 9. Слева фото процесса георадарного профилирования гребня 5 (см.рис. 5), далее выше виден участок 7 и крутой склон кара 10; справа – выдвигание передовой нижней части потока с «пьяным» лесом на живую осыпь 1

Fig. 9. On the left is the photo of the process of geo-radar profiling of the crest 5 (see figure 5), then above you can see the area 7 and the steep slope of the kar 10; on the right is the extension of the front end of the stream with a «drunk» forest on the «live» scree 1

ВЫВОДЫ

Изучаемая формация является несомненно объектом анализа при палеогеографических и палеоклиматических реконструкциях позднего голоцена Георадарное исследование позволило выявить погребённый лёд и определить соотношение каменной кровли, смеси лёд-камни и долю метаморфического льда. Вероятно, как ледник объект сформировался в период похолодания 5 или 3 тыс. лет назад (см. рис. 3 а), а судя по глубинной структуре сохранившегося ледяного ядра, деградация и погребение произошли 1–1,5 тыс. лет назад. МЛКО имеет следующие метрические характеристики: общая длина от верха кара до русла реки 1150 м, длина активной движущейся части – 660 м, длина осыпи – 140 м, средняя ширина 200 м, общая площадь, включая кар – 0,3 км²; площадь активного правого языка – 0,1 км²; площадь осыпи – 0,024 км²; общая толщина в средней части – 25 м; толщина ледяного ядра – 12 м; толщина каменно-ледовой массы до 10 м, толщина кровли до 3 м. Для дальнейшего подповерхностного исследования необходимо варьирование параметрами георадара. Планируется георадарное профилирование верхней и нижней частей МЛКО Активный, поскольку исследована только его средняя часть. А также необходимо провести зондирование на разных частотах и разных значениях диэлектрической проницаемости для более точного определения состава кровли глетчера и его ложа. На основе информации ДЗЗ проводится мониторинг скорости движения отдельных компонентов объекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счёт средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4); при поддержке РФФИ, гранта № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at the expense of the state task (subject No АААА-А21-121012190056-4); supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 20-05-00253А «Transformation of geosystems of the Baikal natural area».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьякова Г.С., Горяевчева А.А., Останин О.В., Оленченко В.В., Бирюков Р.Ю. Геофизические исследования внутреннего строения гляциально-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая. Лёд и Снег, 2020. Т. 60. № 1. С. 109–120. DOI: 10.31857/S2076673420010027.
2. Галанин А.А. Каменные глетчеры: история изучения и современные представления. Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2008. № 3. С. 15–33.
3. Галанин А.А. Каменные глетчеры: вопросы терминологии и классификации. Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2010, № 4. С. 2–11.
4. Галанин А.А., Оленченко В.В., Христофоров И.И., Северский Э.В., Галанина А.А. Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня. Криосфера Земли, 2017. Т. XXI. № 4. С. 58–74. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74).
5. Горбунов А.П. Каменные глетчеры Азиатской России. Криосфера Земли, 2006. Т. X. № 1. С. 22–28.
6. Горбунов А.П. Каменные глетчеры, ледники и вечная мерзлота в Иране. Криосфера Земли, 2013. Т. XVII. № 1. С. 28–34.
7. Гросвальд М.Г. Каменные глетчеры Восточного Саяна. Природа, 1959. № 2. С. 89–91.

8. *Ивановский Л.Н.* Гляциальная геоморфология гор (на примере Сибири и Дальнего Востока). Новосибирск: Наука, 1981. 173 с.
9. *Каталог ледников СССР*. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 64 с.
10. *Китов А.Д., Иванов Е.Н., Балязин И.В., Коваленко С.Н., Мункоева Э.В.* Третья 2014 года экспедиция на Мунку-Сардык клуба Портулан. Вестник кафедры географии ВСГАО. 2014. № 4 (11). С. 79–84.
11. *Коваленко С.Н.* Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 1. Формы локального оледенения долин рек Мугувек и Белого Иркутта. Вестник кафедры географии ВСГАО, 2011. № 1. С. 38–62.
12. *Коваленко С.Н., Китов А.Д., Мункоева Э.В., Зацепина Н.А.* «Каменный глетчер» Белого Иркутта. Вестник кафедры географии ВСГАО, 2013. № 1–2 (7). С. 29–38.
13. *Останин О.В., Дьякова Г.С.* Морфодинамическая классификация каменных глетчеров Алтая. География и природопользование Сибири, 2013. № 16. С. 114–125. <http://elibrary.ru/item.asp?id=22897061>.
14. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
15. *Barsch D.* Rock glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 331 p.
16. *Imbrie J. and Imbrie K.P.* Ice ages: Solving the mystery. Cambridge: Harvard University Press, 1986. 224 p.
17. *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. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.
18. *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. V. 30. No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
19. *Lambrecht A., Mayer C., Hagg W., Popovnin V., Rezepkin A., LomidzeN., Svanadze D.* A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus. The Cryosphere, 2011. V. 5. P. 525–538.
20. *Maurer H., Hauck C.* Instruments and methods geophysical imaging of alpine rock glaciers. Journ. of Glaciology, 2007. V. 53. № 180. P. 110–120.

REFERENCES

1. *Barsch D.* Rock glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 331 p.
2. *Dyakoval G.S., Goreyavcheva A.A., Ostanin O.V., Olenchenko V.V., Biryukov R.Yu.* Geophysical studies of the internal structure of glacial-permafrost stone formations of the Central Altai. Ice and Snow, 2020. V. 60. No 1. P. 109–120 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673420010027
3. *Imbrie J. and Imbrie K.P.* Ice ages: Solving the mystery. Cambridge: Harvard University Press, 1986. 224 p.
4. *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. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.
5. *Galanin A.A.* Rock glaciers: the study history and modern conceptions Vestnik SVNC DVO RAN, 2008. No 3. P. 15–33 (in Russian).
6. *Galanin A.A.* Rock glaciers: the problems of terminology and classification. Vestnik SVNC DVO RAN, 2010. No 4. P. 2–11 (in Russian).

7. Galanin A.A., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I., Severskiy E.V., Galanina A.A. Highly dynamic rock glaciers of Tien Shan. *Earth's cryosphere*, 2017. V. XXI. No 4. P. 58–74 (in Russian).
 8. Gorbunov A.P. Rock glaciers of the Aasian Russia. *Earth's cryosphere*, 2006. V. X. No 1. P. 22–28 (in Russian).
 9. Gorbunov A.P. Rock glaciers, glaciers and permafrost in Iran. *Earth's cryosphere*, 2013. V. XVII. No 1. P. 28–34 (in Russian).
 10. Groswald M. G. Rock Glaciers of East Sayan. *Nature*, 1959. № 2. P. 89–91 (in Russian).
 11. Ivanovsky L.N. Glacial Geomorphology of the Mountains (in the example of Siberia and the Far East). Novosibirsk: Science, 1981. 173 p. (in Russian).
 12. 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. V. 30. No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
 13. Kitov A.D., Ivanov E.N., Balyazin I.V., Kovalenko S.N., Munkoyev E.V. Third 2014 expedition to The Munku-Sardyk Club Portulan. *Herald of the Department of Geography of VSGAO*, 2014. No 4 (11). P. 79–84 (in Russian).
 14. Kovalenko S.N. Gatial Geomorphology of the Munku-Sardyk district. Article 1. Forms of local glaciation of the valleys of the Muguvek and White Irkut rivers. *Herald of the Department of Geography of VSGAO*, 2011. No 1. P. 38–62 (in Russian).
 15. Kovalenko S.N., Kitov A.D., Munkoeva E.V. Szezepin N.A. "Rock Glacier" of Bely Irkut. *Herald of the Department of Geography of VSGAO*, 2013. No 1–2 (7). P. 29–38 (in Russian).
 16. Lambrecht A., Mayer C., Hagg W., Popovnin V., Rezepkin A., LomidzeN., Svanadze D. A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus. *The Cryosphere*, 2011. V. 5. P. 525–538.
 17. Macheret Ju.Ja. Radio-echo sounding of glaciers. Moscow: Scientific World, 2006. 392 p. (in Russian).
 18. Maurer H., Hauck C. Instruments and methods geophysical imaging of alpine rock glaciers. *Journ. of Glaciology*, 2007. V. 53. № 180. P. 110–120.
 19. Ostanin O.V., Diakova G.S. Morfodynamic classification of Altai rock glaciers. *Geography and natural use of Siberia*, 2013. No 16. P. 114–125. <http://elibrary.ru/item.asp?id=22897061> (in Russian).
 20. USSR Glacier Inventory. V. 16. Iss. 1. Part. 3–5. Iss. 2. Part. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).
-