

Д. А. ГАНЮШКИН*, Е. П. КУНАЕВА**, К. В. ЧИСТЯКОВ*, И. В. ВОЛКОВ*

*Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9, Россия,
Ganushkinspbgu@mail.ru, kirill.chistyakov@gmail.com, iliavolkov1990@gmail.com

**Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского,
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, Россия, kunaevahelen@gmail.com

ДЕШИФРИРОВАНИЕ ГЛЯЦИОГЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ ГОРНОГО МАССИВА МОНГУН-ТАЙГА

Исследование посвящено проблеме распознавания гляциальных форм рельефа в аридных горных районах Азии на космических снимках. Рассматривается территория горного массива Монгун-Тайга, расположенного на стыке горных сооружений Русского Алтая, Саян и Монгольского Алтая и представляющего собой объект многолетних работ географов Санкт-Петербургского государственного университета. В массиве присутствуют современные ледники суммарной площадью около 20 км², аридность климата благоприятна для сохранения многочисленных следов древнего оледенения. Теоретической основой работы послужило представление о гляциогенных комплексах — природных комплексах, морфология и структура которых сформирована современным и древними оледенениями. На основании морфологических различий выделено три группы гляциогенных комплексов, отнесенных по времени образования к MIS 4, MIS 2 и к позднему голоцену. По результатам сопоставления данных полевых гляциогеоморфологических и палеогеографических работ на территории горного массива Монгун-Тайга и соответствующего изображения на космических снимках составлены эталоны дешифрирования различных групп гляциогенных комплексов, на основе которых создана карта гляциогенных комплексов второго и третьего порядка для всего массива. По данным картометрических измерений получены основные характеристики ледников массива Монгун-Тайга для десяти различных временных срезов. Выявлено, что в максимум MIS 4 ледники выходили в предгорья, их площадь превышала современную более чем в 25 раз при депрессии фирновой границы около 800 м. Наибольшие площади занимали ледники южных экспозиций, что связывается с преобладанием в то время северо-западных влагонесущих потоков. В максимум MIS 2 сохранялась экспозиционная асимметрия оледенения, но оно имело долинный характер. Установлено, что в малую ледниковую эпоху площадь ледников превышала современную в 2,4 раза при депрессии фирновой границы в 120 м.

Ключевые слова: аридные горы, дешифрирование, космические снимки, гляциальные формы рельефа, палеореконструкция оледенения, древнее оледенение.

D. A. GANYUSHKIN*, E. P. KUNAEVA**, K. V. CHISTYAKOV*, I. V. VOLKOV*

*St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7–9, St. Petersburg, 199034, Russia,
Ganushkinspbgu@mail.ru, kirill.chistyakov@gmail.com, iliavolkov1990@gmail.com

**A. F. Mozhaikii Military-Space Academy, ul. Zhdanovskaya, 13, St. Petersburg, 197198, Russia,
kunaevahelen@gmail.com

INTERPRETATION OF GLACIOGENIC COMPLEXES FROM SATELLITE IMAGE OF THE MONGUN-TAIGA MOUNTAIN RANGE

This investigation is concerned with the problem of recognition of glacial landforms in arid mountainous areas of Asia using satellite imagery. We examine the territory of the Mongun-Taiga mountain range located at the interface of the Russian Altai, Sayan and Mongolian Altai mountains which has been studied for many years by geographers of St. Petersburg State University. The mountain range is home to modern glaciers totaling about 20 km in area, and its climate aridity is favorable for the preservation of a large body of evidence of ancient glaciation. The theoretical basis for this effort was provided by the idea of glaciogenic complexes, i. e. natural complexes, the morphology and structure of which is formed by modern and ancient glaciations. Using the morphological differences we identified three groups of glaciogenic complexes and assigned their formation time to MIS 4, MIS 2, and to the Late Holocene. Results from comparing data of glacio-geomorphological and paleogeographical studies on the territory of the Mongun-Taiga mountain range with corresponding satellite images were used to develop interpretation standards for different groups of glaciogenic complexes, forming the basis for compiling the map of glaciogenic complexes of the second and third order for the entire mountain range. Cartometric measurements were used in obtaining the main

characteristics of the glaciers of the Mongun-Taiga for ten different time spans. It is found that during the MIS 4 maximum the glaciers advanced to the piedmonts, and their area exceeded the present-day area by more than a factor of 25, with the firn line depression of about 800 m. The largest areas were occupied by glaciers of southward aspects, which is accounted for by a predominance of north-westward moisture-carrying glacial streams at that time. The aspect asymmetry of glaciation persisted during the MIS 2 maximum but it had a valley character. It is established that in the Little Ice Age the area of the glaciers exceeded the present-day area by a factor of 2.4, with the firn line depression of 20 m.

Keywords: arid mountains, interpretation, satellite imagery, glacial landforms, paleoreconstructions of glaciation, ancient glaciation.

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования Земли в современном мире находят широкое применение во многих сферах науки. В гляциологии дистанционные методы активно используются для оценки характеристик современных ледников, мониторинга снежного покрова, создания палеореконструкций.

Построение тематической карты всегда сопряжено с выбором картографической основы, для формирования и актуализации которой применяются космические снимки. Региональные физико-географические различия диктуют необходимость создания соответствующих региональных эталонов дешифрирования, учитывающих местную специфику физико-географических объектов. Горный массив Монгун-Тайга, несмотря на труднодоступность, характеризуется наличием обширного материала, полученного за последние 50 лет путем непосредственных наблюдений. Задача использования космических снимков при составлении карты гляциогенных комплексов района состоит в том, чтобы с максимальной достоверностью выявить особенности рельефа, связанные с колебаниями ледников позднего неоплейстоцена и голоцена.

Горный массив Монгун-Тайга с одноименной вершиной расположен на юго-западе Республики Тыва, на границе с Монгольской Народной Республикой. Массив находится на стыке Русского и Монгольского Алтая, системы Саян-Танну-Ола и горного обрамления Котловины Больших Озер. Располагаясь на северо-западе бессточной Внутренней Азии, он относится к бассейну Котловины Больших Озер. Господствующая вершина массива с абс. выс. 3970,5 м имеет координаты 50°16'30" с. ш. и 90°08'00" в. д. Массив имеет в плане форму овала, вытянутого с юго-запада на северо-восток, его площадь на высотах более 2600 м составляет 579 км².

Первые научные данные о массиве Монгун-Тайга появились в начале XX в. [1], когда В. В. Сапожников впервые отметил наличие здесь современных ледников и мощных древних морен. Древнее и современное оледенение массива в разные годы изучали Н. А. Ефимцев [2], Е. Д. Донченко [3], Ю. П. Селиверстов [4], В. С. Ревякин [5] и Р. М. Мухаметов [6]. С конца 1980-х гг. по настоящее время комплексное изучение высокогорных ландшафтов массива Монгун-Тайга проводится Центрально-Азиатской экспедицией факультета географии и геоэкологии, ныне Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета. Согласно полевым исследованиям 2007–2013 гг., в массиве имеется 30 ледников суммарной площадью 20,3 км² [7].

Благоприятная для визуального дешифрирования особенность района исследований — это длительное сохранение гляциальных черт рельефа, унаследованность связей между образованиями гляциального генезиса, обусловленная аридностью климата, малой эрозией, низкой скоростью биологических процессов, неразвитостью почвенно-растительного покрова. Низкие температуры, высокая интенсивность морозного выветривания, малое количество осадков способствуют долгой консервации погребенных ледниковых льдов. Все это определяет четкость большинства ледниковых форм рельефа на аэрофотоснимках и космических снимках, дешифрирование которых облегчается почти полным отсутствием лесной растительности.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЛЕДНИКОВЫХ ФОРМАХ РЕЛЬЕФА ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ ДЕШИФРИРОВАНИИ

Вопросы морфологии морен внутриконтинентальных гор исследованы в работах [2, 8–15].

М. И. Иверонова [8] выделила три основные генетические формы конечно-моренных образований, последовательно сменяющие друг друга вверх по долине: валы фронтальной и боковых морен насыпания, холмисто-грядовый рельеф, единый конечно-моренный язык — каменный глетчер.

Л. Н. Ивановский [9] на Алтае выявил следующие моренные формы: конечные морены и насыпные, сформировавшиеся при обратимом ледниковом процессе, и конечные морены насыпания,

образованные при необратимом ледниковом процессе; моренно-холмистый рельеф, возникающий в долинах, где при деградации оледенения образуется мертвый лед; каменные глетчеры, которые представляют морены малых форм оледенения.

П. А. Окишев [13] по морфогенетическим признакам выделяет три основных типа морен: пластовые, грядовые и грядово-холмистые. Пластовые морены — значительные по площади поля сплошных или почти сплошных моренных отложений изменчивой мощности в межгорных котловинах у подножья гор и в приустьевой части долин. Грядовые морены представляют собой линейно-вытянутые формы, поверхность которых осложнена более мелкими неровностями.

Ю. П. Селиверстов [4] в юго-западной Туве описывал моренные комплексы двух морфологических типов: предгорно-площадные конусовидные (более древние) и типично горно-долинные (более молодые). При разработке представлений о гляциогенных комплексах мы постарались учесть опыт вышеупомянутых типизаций.

Вопросы дешифрирования гляциального рельефа на космических снимках достаточно подробно освещены в недавней совместной публикации отечественных и зарубежных исследователей [16], в которой на территории Алтая и Западного Саяна картировались четыре категории форм рельефа: краевые морены, холмисто-западинный рельеф (*hummocky terrain*), очертания ледников и ледниковые долины. Разделения морен на подтипы не предпринималось.

Рассмотрим подходы авторов к дешифрированию морен и холмисто-западинного рельефа. Критериями идентификации морен служило затенение за счет изменения топографии (относительный рельеф) и модификация цвета за счет изменений почв, влажности и растительного покрова. Также используются сопряженные формы рельефа, такие как прежние каналы стока талых вод. При этом авторы отмечают, что разрешение снимков Landsat позволяет идентифицировать недавно сформированные или крупные моренные образования, тогда как выделение малых моренных форм на днищах долин затруднительно, а при дешифрировании боковых морен моренный материал на склонах долин становится маломощным или размытым. Холмистый рельеф представлен неравномерно расположенными отложениями, состоящими из округлых или удлиненных холмов и западин, содержащих как моренный, так и флювиальный материал. Авторы связывают его формирование в Алтае-Саянах с мертвым льдом, поскольку подобный рельеф проявляется как в дистальной, так и в проксимальной части краевых морен. Важными идентификационными критериями подобного рельефа являются высокая встречаемость озер и вариации почвенного увлажнения и растительного покрова между холмами и западинами.

Моренные формы рельефа преобразуются мерзлотными процессами [17]; в частности, развитие термокарстовых озер на краевых моренах увеличивает их сходство с холмистым рельефом, что может приводить к ошибкам.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выделение в районе исследования следов воздействия древних ледников на рельеф осуществлялось нами в рамках представления о гляциогенных комплексах (ГК) — природных комплексах, морфология и структура которых сформирована современным и древними оледенениями.

М. И. Иверонова [8] отмечала, что можно говорить о преобладании тех или иных форм моренного рельефа в горной стране, а не об одинаковом развитии одних и тех же форм во всех горных странах. В связи с этим подчеркиваем региональный характер предлагаемого нами варианта типологии ГК.

Выделяются активные, переходные и малоактивные ГК, различные по морфологии и динамической активности создавших их ледников.

Активные ГК образуются в глубоко врезанных отрицательных формах рельефа при отчетливо выраженной экзарационной, транспортирующей и аккумулятивной деятельности ледников, приводящей к формированию цирков, каров, трогов, конечных морен.

Малоактивные ГК созданы ледниками, воздействие которых на рельеф выражается в интенсивном физическом выветривании горных пород у их краевых частей и развитии эрозионных форм при их таянии. Такие ледники развиваются на поверхностях выравнивания и пологих малорасчлененных склонах, не оказывают ни существенного экзарационного, ни аккумулятивного воздействия на рельеф и представляют собой аналоги высокоширотных пассивных ледников [18].

ГК переходного типа образованы деятельностью маломощных склоновых ледников при среднем уклоне их поверхности более 15–17°. Такие ледники не вырабатывают троговый профиль долин, вытекающие с них водотоки часто формируют ущелья V-образной формы, однако могут формировать небольшие конечно-моренные валы.

В данной работе рассматриваются особенности дешифрирования ГК активного типа, наиболее отчетливо выделяющихся на космических снимках.

Различаются несколько иерархических уровней, или порядков, ГК, соответствующих как различному масштабу ГК, так и разной ранговости отраженных в них климатических событий. ГК первого порядка соответствуют диапазону существования ледников в плейстоцене. ГК второго порядка соотносятся с оледенениями или крупными стадиями; для активного и переходного типов они подразделяются на три группы, различные по морфологии, пространственному положению и возрасту: предгорно-котловинные, среднегорные и высокогорные.

Морены предгорно-котловинных ГК развиты в местах выхода долин в предгорья, а также прослеживаются на троговых плечах до цирков на уровне около 3100 м, далее вместе с ними выклиниваются. В период формирования этих морен выдвигавшиеся в предгорья языки ледников распластывались и образовывали маломощные лопасти. При деградации ледников шли интенсивное бронирование ледниковых лопастей и образование мертвого льда с последующими термокарстовыми процессами, свидетельством чего служит холмисто-моренный рельеф с термокарстовыми котловинами и озерцами. Предгорно-котловинные ГК сопоставимы с пластовыми моренами в понимании П. А. Окишева [13] и выделенными Ю. П. Селиверстовым [19] предгорно-площадными конусовидными.

Морены среднегорных ГК занимают днища трогов, прослеживаясь на более низких по отношению к моренам предыдущей группы троговых плечах до цирков на уровне 2600–2700 м. В максимум соответствующего оледенения ледники за редким исключением не выходили из трогов. По мере возвратно-поступательной деградации сформировались конечно-моренные валы, часто подпруживающие озера. Морены, представляющие собой основу этих ГК, соответствуют грядовым моренам по П. А. Окишеву [13] и типичным горно-долинным комплексам, описанным Ю. П. Селиверстовым [19].

Различия в положении морен указанных двух разных генераций на плечах трогов помимо разной мощности ледников связываются с эрозионной деятельностью на фоне поднятия гор в разделявший эти периоды теплый временной интервал. Множественные находки в приледниковой зоне массива древесины, погребенной моренами, с радиоуглеродным возрастом в интервале 39,3–57,8 [20, 21] и 27–25 тыс. л. н. [22] позволяют выявить наличие теплого временного интервала, когда ледники массива были существенно меньше современных. Соответственно, время формирования упомянутых ГК связывается нами с периодами MIS 4 и MIS 2.

Высокогорные ГК включают примыкающие к современным ледникам молодые морены, каменные глетчеры гляциального происхождения и их горное обрамление (включая нивально-экзарационные формы). Перечисленные гляциально-аккумулятивные образования вполне соответствуют третьей генетической форме конечно-моренных образований в представлении М. И. Ивероновой [8] или моренам малых форм оледенения в типизации морен Л. Н. Ивановского [9, 10]. Морены представлены обычно смежными или надвинутыми друг на друга валами двух-трех стадий, часто образующими моренный пьедестал, на котором находятся современные ледники. Для морен типичны незадернованность, четкость в плане, большая вертикальная мощность, слабая переработка эрозией. За счет наличия в большинстве морен ледяного ядра различия между ними и каменными глетчерами не всегда очевидны, и можно выделить ряд переходных форм между ними. По времени формирования мы относим все эти образования к позднему голоцену. Меньшие, чем сейчас, размеры ледников в предшествовавший теплый период раннего и среднего голоцена подтверждаются находками в приледниковой зоне массива древесины с календарным возрастом 9120 ± 110 лет (ЛУ-6949) [23], $10\,380 \pm 200$ (СОАН 8116) и 6260 ± 90 лет (СОАН 8117) [21], а также серией датировок погребенного торфа, почв и древесины в диапазоне 6–3,6 тыс. л. н. [24]. Принадлежность морен молодого облика к позднему голоцену подтверждается образцами почвы, погребенной мореной, с календарным возрастом 5590 ± 230 лет, (ЛУ-7283), отобранными в долине р. Шара-Хорагай [23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При работе использовался широкий спектр дистанционных и картографических материалов (табл. 1). Предварительная обработка космических снимков проведена с использованием цифровой фотограмметрической системы и включала в себя следующие этапы: географическую привязку по орбитальным данным; определение проекции (UTM46/WGS 84); выполнение радиометрической и геометрической коррекции; ортокоррекцию с использованием цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2, имеющей пространственное разрешение ~ 30 м; улучшение визуального восприятия (использование пространственных частотных фильтров); спектральные преобразования мультиспектральных снимков для выделения определенных характеристик изображения.

Характеристика используемых материалов для создания карты гляциогенных комплексов массива Монгун-Тайга

Номер п/п	Вид съемки (пространственное разрешение)	Дата съемки, для карт — год издания	Комбинация каналов
1	Landsat 8 / (30 м)	2013–08–12	432 «естественные цвета»
2	Landsat 8 / (30 м)	2013–08–12	582 «псевдоцвета»
3	Landsat 8 / (15 м)	2013–08–12	Панхроматический
4	Landsat 7 / (30 м)	2000–09–10	752 «псевдоцвета»
5	Landsat 7 / (30 м)	2000–09–10	543 «псевдоцвета»
6	Landsat 7 / (15 м)	2001–09–04	Панхроматический
7	SPOT 5 (5 м)	2011–09–19	«Естественные цвета»
8	SPOT 5 (2,5 м)	2011–09–19	Панхроматический
9	АФС	1966–07–10	Панхроматический
10	Топографические карты, м-б 1:100 000	1982	
11	Топографические карты, м-б 1:25 000	1965	

Одиночные аэрофотоснимки были географически привязаны с использованием опорных точек и трансформированы в систему координат UTM46/WGS 84. Данные дистанционного зондирования Земли были совмещены в ГИС MapInfo на основании географической привязки к исследуемой территории.

Нами применялся метод наземного маршрутного дешифрирования [25], включавший в себя описания, измерения и фотографирование на эталонных участках. Все измерения в массиве проводились с использованием GPS (США) — глобальной системы определения местоположения текущих координат.

Распознавание объектов проводилось на основании метода визуального дешифрирования по эталонам [25, 26]. Они были составлены по наземным наблюдениям, в которых указаны следующие характеристики: характерные изображения объектов на местности, на аэрофотоснимке, на космическом снимке, на топографической карте; отличительные характеристики объектов; способы переноса объектов на карту.

Использованные нами критерии выявления морен, представляющих собой основу ГК, во многом схожи с предложенными в работе [16], при этом мы использовали снимки с большим разрешением и сопоставляли результаты дешифрирования с непосредственными полевыми наблюдениями. Предгорно-котловинные ГК выделяются на АФС и космических снимках как образования лопастной формы с характерным рисунком неупорядоченной волнистости, «морщинистости», соответствующей холмисто-моренному или мелкогрядовому рельефу (рис. 1). Типично и наличие на снимках мелких темных пятен, соответствующих термокарстовым котловинам, подчеркнутым ерниками, имеющими более темную окраску по отношению к тундрово-степной растительности. На топографических картах в некоторых случаях моренные комплексы MIS 4 выделяются горизонталями как пологие возвышения, испещренные мелкими и округлыми термокарстовыми озерами и котловинами.

Среди морен реконструированных нами стадий оледенения MIS 4 наименее информативны самые ранние, относящиеся к домаксимальной стадии, сохранившиеся лишь в междуречье р. Орта-Шегетей и Толайты после выхода их на равнину. На других участках массива данные отложения были перекрыты второй, максимальной стадией, но в пределах нижних частей этих двух долин после первой стадии, вероятно, имело место врезание долин. За счет этого ледники максимальной стадии, несмотря на большее площадное распространение, залегали на более низких гипсометрических уровнях. Моренные шлейфы первой постмаксимальной стадии в основном вложены в морены максимума, однако в некоторых долинах (Балыктыг, Орта-Шегетей, Толайты) надвинуты на них или образуют совместные формы. Гляциогенные комплексы второй постмаксимальной стадии MIS 4 имеют в большинстве долин меньшее площадное распространение и ширину, но вниз по долинам ее морены надвинуты, а в долинах рек Толайты и Орта-Шегетей значительно (на 4,5–5 км) выдвигаются дальше, чем более древние.

Конечные моренные валы среднегорных ГК максимума MIS 2 в большинстве случаев отчетливо диагностируются как на аэрофотоснимках, так и на космических снимках (см. рис. 1), на топографических картах м-ба 1:100 000 они проявляются характерным изгибом горизонталей, кроме того, хорошо видны моренно-подпрудные озера или заболоченные участки на месте прежних озер.

Слабая задернованность высокогорных ГК (рис. 2) на мультиспектральных снимках выражается серым или коричневым цветом морен, резко контрастирующим с зеленоватой окраской окружающих

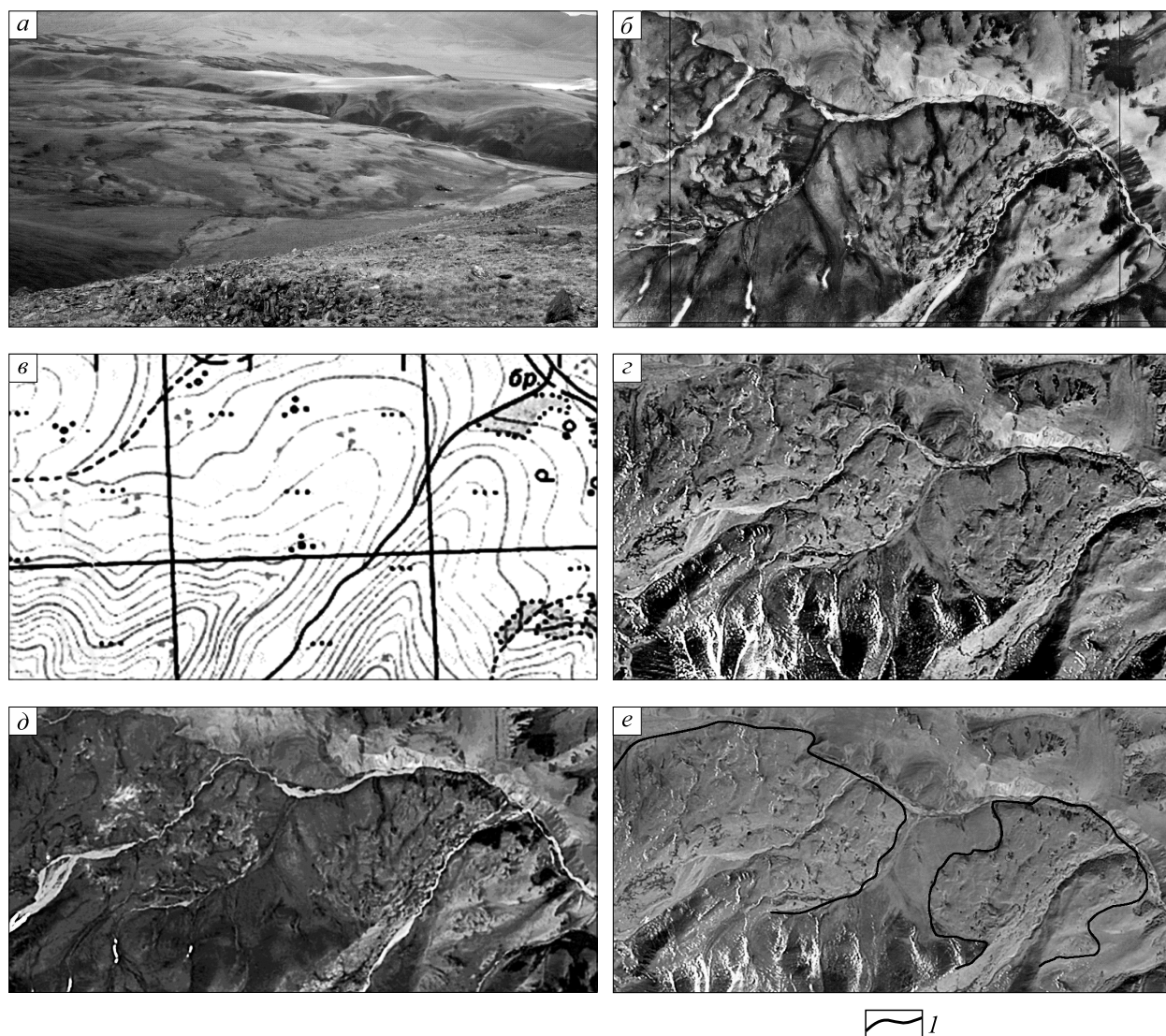


Рис. 1. Пример эталонного участка — предгорно-котловинные гляциогенные комплексы максимума MIS 4 в месте выхода долин рек Правый Мугур и Восточный Мугур в предгорья.

Изображение: *а* — на местности, *б* — на аэрофотоснимке (1966–07–10), *в* — на топографической карте, *г* — на космоснимке (SPOT 5 2011–09–19), *д* — на космоснимке Landsat 8 (2013–08–12); *е* — способ переноса на карту. *1* — контуры реконструированного ледника.

субальпийских лугов и тундр, что позволяет с легкостью их диагностировать. Особенно это характерно для морен малой ледниковой эпохи, обычно надвинутых или местами перекрывающих более древние морены исторической стадии. Приведенный на рис. 2 пример долины р. Шара-Хорагай — один из немногих случаев, когда морены малой ледниковой эпохи и исторической стадии далеко отстоят друг от друга.

Второй признак морен позднего голоцена — это четкость и резкость их очертаний; часто моренные комплексы имеют вид не валов, а языков или моренных пьедесталов, на которых расположены языки современных ледников.

Третья характерная черта — наличие в них ледового ядра ледникового происхождения. Начиная с конца 1990-х гг. интенсификация термокарстовых процессов на моренах малой ледниковой эпохи привела к развитию многочисленных термокарстовых западин, термоэрозионных форм, оползней, выделяющихся на крутых участках моренных валов в виде резких и контрастных темных полос, заметных на снимках разрешением выше 15 м.

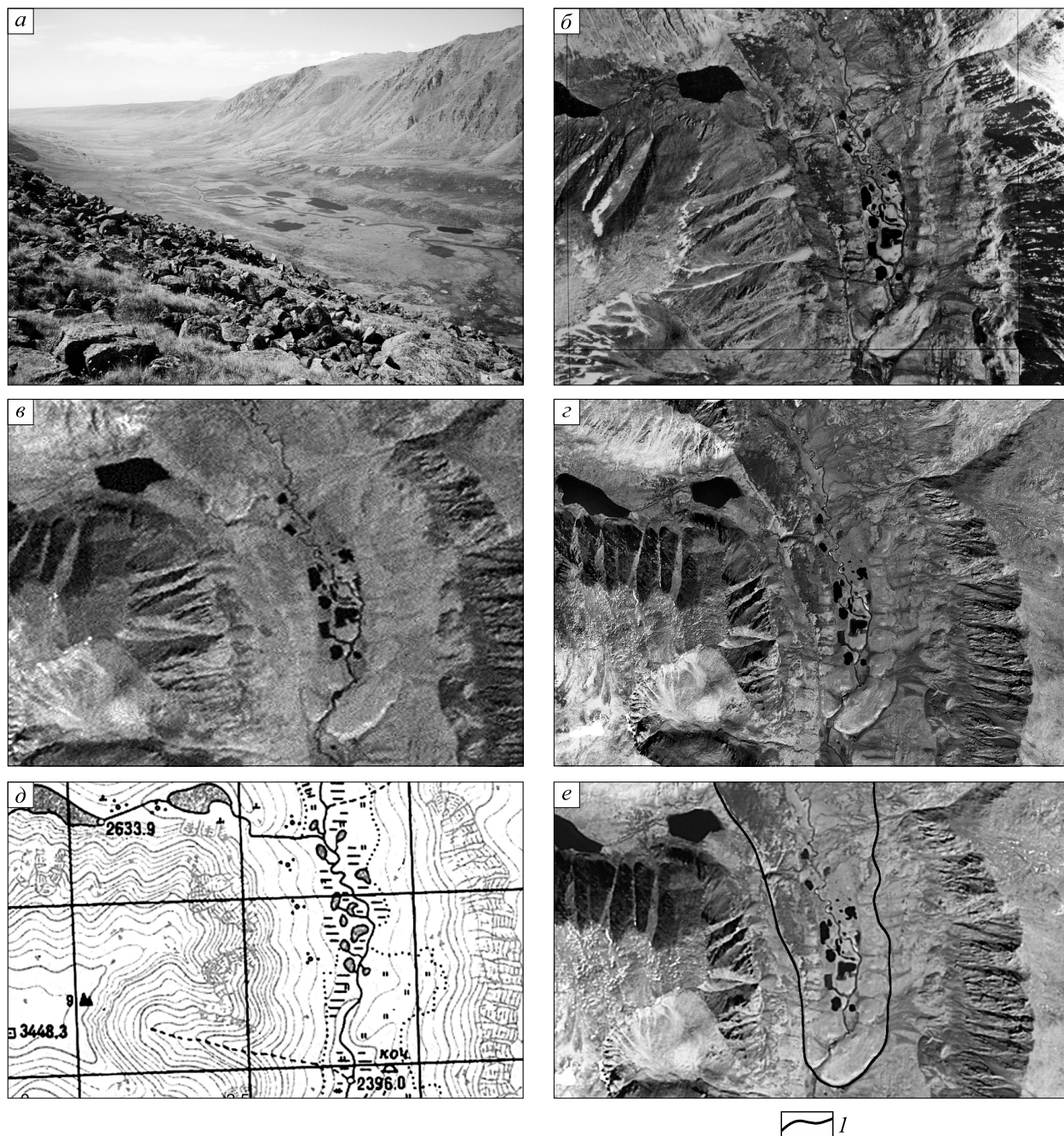


Рис. 2. Пример эталонного участка — высокогорный гляциогенный комплекс — верховья р. Шара-Хорагай с четко выраженными моренами исторической стадии и малой ледниковой эпохи.

Изображение: *a* — на местности, *б* — на аэрофотоснимке (1966–07–10), *в* — на космоснимке Landsat 8 (2013–08–12), *г* — на топографической карте, *д* — на космоснимке (SPOT 5 2011–09–19); *е* — способ переноса на карту.

1 — см. рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе дешифрирования дистанционных материалов и результатов полевых измерений была построена карта ГК второго и третьего порядков для всего горного массива Монгун-Тайга, фрагмент которой представлен на рис. 3.

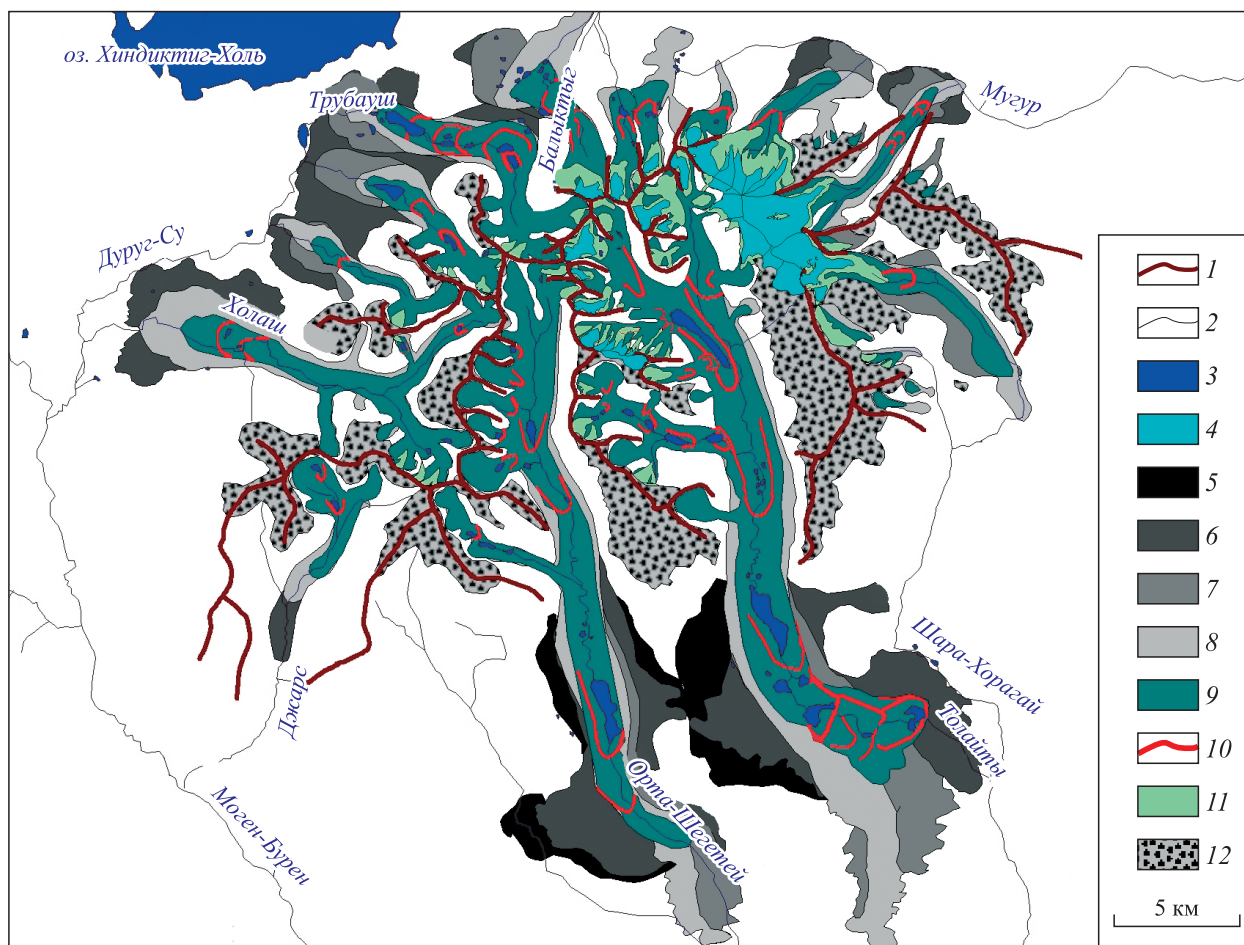


Рис. 3. Схема расположения ГК массива Монгун-Тайга.

1 — водоразделы; 2 — реки; 3 — современные озера; 4 — современные ледники. Предгорно-котловинные гляциогенные комплексы: 5 — первой стадии оледенения MIS 4, 6 — второй (максимальной по площади ледников) стадии оледенения MIS 4, 7 — третьей стадии оледенения MIS 4, 8 — четвертой стадии оледенения MIS 4; среднегорные гляциогенные комплексы: 9 — оледенения MIS 2, 10 — наиболее четко выраженные стадийные морены оледенения MIS 2; 11 — высокогорные гляциогенные комплексы (малая ледниковая эпоха); 12 — позднеплейстоценовые гляциогенные комплексы малоактивного типа.

Измерения и вычисления на основе созданных карт ГК и топоосновы (площади, максимальная и минимальная высоты, длины, относительная ширина ледников) позволили составить каталоги реконструированных ледников и определить основные характеристики прошлого и современного оледенения массива (табл. 2). Высота фирновой границы для реконструированных ледников определялась методом Куровского [27, 28]:

$$\bar{z}_f = \frac{z_f F + \Delta F (z_1 + z_2) / 2}{F + \Delta F}, \text{ где } \bar{z}_f \text{ — реконструированная высота фир-}$$

новой границы; F — современная площадь ледника; ΔF — различия в площади реконструированного ледника и современного ледника; z_1 — современная высота конца ледника; z_2 — высота конца реконструированного ледника.

Согласно нашей реконструкции, в максимум MIS 4 площадь ледников превышала современную более чем в 25 раз при депрессии фирновой границы около 800 м. По имеющимся для Алтая в целом оценкам, позднеплейстоценовое оледенение более чем в 35 раз превышало современное при величине депрессии фирновой границы 800–850 м [13]. Вероятно, сравнительно небольшой масштаб ледников массива Монгун-Тайга был связан с меньшим, по отношению к другим районам Русского Алтая, количеством осадков. Свыше 75 % всей площади оледенения массива приходилось на предгорные ледники, они полностью занимали все основные долины массива, выходили из них и растекались, образуя

Основные характеристики прошлого и современного оледенения массива

ГК 2-го порядка	ГК 3-го порядка (стадии)	Количество, ед.	Площадь, км ²	Высота фирновой границы, м
MIS 4 (предгорно-котловинные)	Максимальная	49	516	2585
	I – постмаксимальная	53	449	2595
	II – постмаксимальная	53	417	2595
MIS 2 (среднегорные)	Максимальная	52	318	2695
	I – постмаксимальная	42	267	2705
	II – постмаксимальная	43	225	2770
	III – постмаксимальная	46	200	2825
	IV – постмаксимальная	47	138	2880
Поздний голоцен (высокогорные)	Историческая	88	85	3155
	Малая ледниковая эпоха	87	49,5	3265
	Современное оледенение	30	20,2	3390

обширные лопасти с малой динамической активностью. На северо-западе массива, где предгорья расположены на несколько сотен метров выше, выходявшие из соседних долин потоки льда сливались, образуя почти непрерывный ледяной пояс на протяжении примерно 20 км вдоль массива.

Наибольшая площадь оледенения характерна для долин юго-восточной и северо-западной экспозиций, при этом оледенение бассейнов рек юго-восточной экспозиции Толайты и Орта-Шегетей доминировало по площади, хотя в наше время в массиве главенствуют ледники северо-восточной и восточной экспозиций, относящиеся к бассейнам рек Мугур и Шара-Хорагай, приуроченные к подветренным склонам, при преобладании юго-западного направления влагонесущих атмосферных потоков.

Данное явление отмечалось еще В. В. Сапожниковым [1], связывавшим малое развитие ледников севера массива в прошлом с открытой формой долин притоков р. Каргы и их малой длиной. Ю. П. Селиверстов [19] считал, что асимметрия оледенения соответствует специфике его развития и функционирования, регулируемого главным образом геоморфологическими и гидроклиматическими особенностями.

Показателем различий в снегонакоплении на склонах северных и южных экспозиций служат расчеты интенсивности оледенения, т. е. отношения суммарной площади оледенения данного речного бассейна к длине участка, окаймляющего бассейн горного гребня. Мы использовали методику, при которой учитывалась длина гребня основного водораздела и водоразделов долин между несущими оледенение цирками.

Анализ результатов расчета интенсивности оледенения речных бассейнов и ледников массива в максимум MIS 4 показывает, что ее значения для бассейнов рек юго-восточной экспозиции (Толайты и Орта-Шегетей) в 2–3 раза превышают аналогичные значения для других бассейнов: Западный Балыктыг — 3,8 км²/км, Правый и Восточный Балыктыг — 2,1, Западный Мугур — 0,8, Правый Мугур — 2,1, Восточный Мугур — 1,6, Шара-Хорагай — 2,9, Кара-Бельдир — 1, Толайты — 4,5, Орта-Шегетей — 4,3, Джаарс — 1,1, Холаш — 2, Дуругсу — 2,9 км²/км. Поскольку использование нами относительного показателя (интенсивности оледенения) должно нивелировать влияние различной протяженности склонов разной экспозиции, возможно следующее объяснение экспозиционной асимметрии оледенения MIS 4. В эпоху максимума оледенения основное направление влагонесущих потоков было не юго-западное, как в настоящее время, а северо-западное. Наветренные склоны получали наибольшее количество твердых осадков, однако максимальная их аккумуляция имела место на подветренных юго-восточных склонах за счет метелевого переноса. Напротив, наименьшая аккумуляция снега происходила на склонах, параллельных влагонесущим потокам, т. е. юго-западных и северо-восточных.

Наибольшее продвижение ледников MIS 4 имело место во вторую постмаксимальную стадию, когда, несмотря на частичную деградацию предгорных ледниковых лопастей, по долинам рек Толайты и Орта-Шегетей морены максимальной стадии были перекрыты, концы ледников опустились соответственно на 290 и 210 м по сравнению с их высотой в максимальную стадию. Подобный надвиг стадияльных морен (II фазы) на более древние (I фазы) на юго-восточном Алтае отмечал Л. Н. Ивановский [9]. Данное явление он объясняет тектоническими поднятиями горных хребтов этого района.

Действительно, врезание долин в период потепления перед второй постмаксимальной стадией MIS 4 могло приводить к увеличению динамической активности ледников и началу их трансформации из предгорных в долинные. Кроме того, за длительный период оледенения долина в результате эрозионной деятельности ледника приобретала троговую форму. Это в конечном итоге (без существенного изменения баланса массы) могло способствовать уменьшению сил трения и увеличению скоростей движения.

Возможно также, что уменьшение площади ледника и более низкое высотное положение конечной «лопасти» связано с подвижками ледников в рассматриваемую стадию. Морфологические особенности долины рек Толайты и Орта-Шегетей — достаточно большие площади ледниковых притоков в верховьях долин и их малая ширина (в диапазоне высот 2500–2350 м) в районе границы питания — могли приводить к затруднению расхода накопленного вещества и к появлению динамической неустойчивости. Кроме того, большая врезанность долин не могла способствовать перетеканию льда на выровненные поверхности, что наблюдалось в бассейнах других рек.

Приуроченность подвижки к более поздней, относительно максимума, стадии MIS 4 может быть объяснена изменением температурного режима ледника на границе контакта ледника с ложем. Так как на протяжении всего оледенения мощность ледников в районе границы питания превышала 200 м, то с течением времени на нижней границе ледника температура могла повыситься до температуры плавления с появлением здесь слоя воды, которая могла существенно уменьшить силу трения и увеличить скорости движения.

Среди причин роста динамической активности ледников можно рассматривать и гипотетическое потепление климата, которое могло приводить к уменьшению вязкости льда и к увеличению поверхностных скоростей движения.

В максимум MIS 2 сохранялась экспозиционная асимметрия оледенения, отмеченная нами для ледников MIS 4, что свидетельствует о сходстве в преобладающем направлении влагонесущих потоков. Однако само оледенение уже носило долинный характер, а концы ледников не достигали предгорий.

Для позднего голоцена наиболее детально реконструировано оледенение малой ледниковой эпохи. Площадь ледников в этот период превышала современную в 2,4 раза при депрессии фирновой границы в 120 м. Последняя величина значительно превосходит существующие оценки депрессии фирновой границы для ледников Алтая в малую ледниковую эпоху. Например, П. А. Окишев [12, 13] приводит величину 70 м для Алтая в целом.

Несовпадение наших оценок с этими данными связаны с тем, что расчеты исследователями депрессии фирновой границы, как правило, выполнялись для крупных долинных ледников, реагирующих на климатические изменения менее резко, чем малые. Расчеты депрессии для долинных ледников массива дают величины от 40 до 115 м, что не противоречит имеющимся по Алтаю оценкам.

Таким образом, точная идентификация объектов на снимках стала возможной благодаря многолетним полевым исследованиям территории массива, большому количеству данных дистанционного зондирования различного разрешения и обширному картографическому материалу. Способ визуального дешифрирования по выделенным элементам гляциогенных комплексов показал хорошую сходимость с результатами полевых геоморфологических и палеогеографических исследований изучаемой территории.

Методические аспекты работы могут быть использованы при проведении аналогичных исследований в других районах аридной внутриконтинентальной Азии. Предположение об изменении направления влагонесущих потоков в период максимумов MIS 4 и MIS 2 требует проверки на более обширном региональном палеогляциологическом и палеоклиматическом материале, что во многом диктует необходимость продолжения подобных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14–05–00796, 13–05–41075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников В. В. Монгольский Алтай в истоках Иртыша и Кобдо. Путешествия 1906–1911 гг. — Томск: Изд-во Импер. Том. ун-та, 1911. — 416 с.
2. Ефимцев Н. А. Четвертичное оледенение Западной Тувы и восточной части Горного Алтая. — М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 163 с.

3. Донченко Е. Д. Оледенение Шапшальского хребта и его динамика в историческое время (по результатам аэрофотосъемки) // Гляциология Алтая. — 1962. — № 2. — С. 146–172.
4. Селиверстов Ю. П. Современное оледенение Мунгун-Тайги (юго-запад Тувы) // Изв. ВГО. — 1972. — Т. 104, № 1. — С. 40–44.
5. Ревякин В. С. Каталог ледников СССР. Т. 15: Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1: Горный Алтай и Верхний Иртыш. Ч. 8: Бассейны р. Каргы, Моген-Бурен. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 80 с.
6. Мухаметов Р. М. Колебания ледниковых систем Алтае-Саянской горной страны: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО АН СССР, 1988. — 16 с.
7. Чистяков К. В., Каледин Н. В., Москаленко И. Г., Ганюшкин Д. А., Глебова А. Б., Зелепукина Е. С., Хрущев С. А., Сыромятина М. В., Козачек А. В., Гаврилкина С. А., Севастьянов Д. В., Новиков С. А., Богатуров Д. С., Музалёв А. А., Амбурцев Р. А., Ступин Ю. А. Горы и люди: изменения ландшафтов и этносы внутриконтинентальных гор России. — СПб.: ВВМ, 2010. — 438 с.
8. Иверонова М. И. Процессы формирования современных морен в Тянь-Шане // Труды Ин-та географии АН СССР. — 1952. — Т. 49, № 1. — С. 33–54.
9. Ивановский Л. Н. Вопросы сопоставления конечных морен на Алтае // Гляциология Алтая. — 1965. — № 4. — С. 49–69.
10. Ивановский Л. Н. О морфологии конечно-моренных образования Алтая // Гляциология Алтая. — 1962. — № 2. — С. 37–58.
11. Максимов Е. В. Проблемы оледенения Земли и ритмы в природе. — Л.: Наука, 1972. — 296 с.
12. Окишев П. А. Динамика оледенения Алтая в позднем плейстоцене и голоцене. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1982. — 210 с.
13. Окишев П. А. Рельеф и оледенение Русского Алтая. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. — 382 с.
14. Москаленко И. Г., Селиверстов Ю. П., Чистяков К. В. Горный массив Монгун-Тайга (Внутренняя Азия). Опыт эколого-географической характеристики. — СПб.: Изд-во РГО, 1993. — 94 с.
15. Ганюшкин Д. А., Москаленко И. Г., Селиверстов Ю. П. Оледенение массива Монгун-Тайга (Внутренняя Азия) в максимум малой ледниковой эпохи и его эволюция // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология, география. — 1998. — № 4 (28). — С. 27–37.
16. Blomdin R., Heyman J., Stroeven A. P., Haettestrand C., Harbor J. M., Gribenski N., Jansson K. N., Petrakov D. A., Ivanov M. N., Alexander O., Rudoy A. N., Walther M. Glacial geomorphology of the Altai and Western Sayan Mountains, Central Asia // Journ. of Maps. — 2016. — N 1 (12). — P. 123–136.
17. Sheinkman V. S. Glaciation in the High Mountains of Siberia. — Amsterdam: Elsevier Inc., 2011. — P. 883–907.
18. Большианов Д. Ю. Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. — СПб.: Изд-во Арктического и антарктического НИИ, 2006. — 247 с.
19. Селиверстов Ю. П. Ритмика создания гляциальных образований гор. Причины и ранговость ритмов горных оледенений // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология, география. — 1993. — № 4 (28). — С. 60–70.
20. Ганюшкин Д. А. Оледенение и климатические условия вюрмского мегаэпистадия массива Монгун-Тайга // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология, география. — 1999. — № 3 (21). — С. 88–93.
21. Назаров А. Н., Соломина О. Н., Мыглан В. С. Динамика верхней границы леса и ледников Центрального и Восточного Алтая в голоцене // ДАН. — 2012. — Т. 444, № 6. — С. 1–5.
22. Ревушкин А. С. О находке ископаемой древесины на хребте Монгун-Тайга (Юго-Западная Тува) // Изв. СО АН СССР. Сер. биол. — 1979. — № 2. — С. 46–47.
23. Ganiushkin D., Chistyakov K., Kunaeva E. Fluctuation of glaciers in the southeast Russian Altai and northwest Mongolia Mountains since the Little Ice Age maximum // Environmental Earth Sciences. — 2015. — N 3 (74). — P. 1883–1904.
24. Чистяков К. В., Ганюшкин Д. А., Москаленко И. Г., Зелепукина Е. С., Амосов М. И., Волков И. В., Глебова А. Б., Гузэль Н. И., Журавлев С. А., Прудникова Т. Н., Пряхина Г. В. Горный массив Монгун-Тайга. — СПб.: Арт-Экспресс, 2012. — 310 с.
25. Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М.: Аспект-Пресс, 2004. — 184 с.
26. Аковецкий В. И. Дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1983. — 376 с.
27. Kurowsky L. Die Hohe der Schneegrenze mit besonderer Berücksichtigung der Finsteraargorngruppe // Pencks Geogr. Abhandlungen. — 1891. — N 5. — S. 115–160.
28. Глазырин Г. Е. Распределение и режим горных ледников. — СПб.: Гидрометеиздат, 1985. — 181 с.

Поступила в редакцию 9 марта 2016 г.