

РАЗРАСТАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОРЕНЫ НА ЯЗЫКЕ ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ ЗА ПЕРИОД ПРЯМОГО ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В.В. Поповнин, А.А. Резепкин, Л.Г. Тиелидзе*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; begemotina@hotmail.com

** Тбилисский государственный университет имени И. Джавахишвили,*

Институт географии имени Вахушти Багратиони, 0177, Тбилиси, ул. Тамарашвили, 6, Грузия

Поверхностная морена на господствующей в настоящее время регрессивной стадии оледенения – характерный атрибут нижних частей активных горных ледников. При этом моренный материал на поверхности ледников существенно влияет на абляцию, сток и баланс их массы. На леднике Джанкуат (Центральный Кавказ) поверхностная морена изучается как прямыми полевыми методами, так и дистанционными картографическими. За период прямого мониторинга толщина моренного чехла была трижды картографирована авторами на основе съемок, проведенных по всей заморененной площади. Выявлено безусловное разрастание моренного покрова на языке Джанкуата: с 2 % от площади ледника в 1968 г. до 13 % в 2010 г., т. е. в 6,5 раза за 42 года. С 1983 по 2010 г. прирост толщины морены в прифронтальной части достиг местами 70 см, а объем моренного материала на леднике увеличился на 141 %. Такие изменения отразились на виде полей баланса массы ледника и на его абсолютных значениях. Морена в целом оказывает бронирующее (экранирующее) воздействие на таяние, в результате чего ежегодное уменьшение объема ледникового стока в среднем составляет 20 %.

Ледник, поверхностная морена, мореносъемка, мониторинг, баланс массы, абляция, Центральный Кавказ

SUPERFICIAL MORAINES EXPANSION ON THE DJANKUAT GLACIER SNOUT OVER THE DIRECT GLACIOLOGICAL MONITORING PERIOD

V.V. Popovnin, A.A. Rezepkin, L.G. Tielidze*

Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; begemotina@hotmail.com

** Javakishvili Tbilisi State University,*

Vakhushti Bagrationi Institute of Geography, 0177, Tbilisi, Tamarashvili str., 6, Georgia

Superficial moraine is an inherent attribute of the lower belts of active alpine glaciers at currently prevalent regressive stage of their evolution. Debris on the snout surface influence drastically ablation and mass balance of a glacier and thereby glacier-derived liquid run-off as well. Superficial moraine at the Djankuat glacier, representative for the Central Caucasus, is both examined in the course of direct fieldwork and mapped by means of remote sensing. Debris thickness was mapped thrice during the direct monitoring period as a result of 3 direct surveys, covering the entire debris-covered area of the snout. The study reveals evident debris expansion on the Djankuat snout: covering only 2 % of the entire glacier area in 1968, its share grew up to 13 % by 2010, resulting thereby in 6.5-fold enlargement during 42 years. Debris layer became thicker by 70 cm in some points near the terminus during 1983–2010 whereas volume of lithogenic matter over the whole glacier experienced 141 % increment. This process changed mass balance values and mutilated its spatial pattern. In general, debris cover renders a screening effect upon melt-rate, and thereby glacier-derived liquid bulk run-off turns out to be reduced annually by ca. 20 % on average.

Glacier, superficial moraine, debris thickness survey, monitoring, mass balance, ablation, Central Caucasus

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Поверхностная морена, создающая чехол для нижних частей ледников, в настоящее время является их неотъемлемой составляющей. Современный этап эволюции горного оледенения практически повсеместно характеризуется активной фоновой дегляциацией, что сопровождается интенсивным накоплением моренного материала на поверхности ледника и в приледниковом поясе. Чаще всего его исследуют с позиции селевой опас-

ности, исходящей из перигляциальной зоны [Томашевская и др., 2013]. Однако дегляциация ведет и к росту чехла поверхностной морены на самом леднике как по площади, так и по мощности. Моренный чехол коренным образом влияет на все процессы, происходящие в пределах занятых им частей ледников. Он предопределяет интенсивность абляции на этих участках и сток с них, а также обуславливает облик полей баланса массы и

его расходной составляющей на языке: маломощный (первые сантиметры) моренный покров усиливает подморенное таяние, а более толстый слой, наоборот, ослабляет его вплоть до полного прекращения [Bozhinskiy et al., 1986].

Обладая отличными от ледяной поверхности теплофизическими характеристиками, поверхностная морена формирует особую структуру теплообмена ледника с атмосферой, а изменение морфологии моренного чехла в конечном счете ведет к изменению внешнего вида всего ледника. Тем не менее изучение поверхностной морены в настоящее время не входит в программу традиционного гляциологического мониторинга. Репрезентативный для Центрального Кавказа ледник Джанкуат – редкое исключение из этого правила. Начало наблюдением за разрастанием поверхностной морены на нем было положено одновременно с развертыванием программы комплексного гляциологического мониторинга в 1968 г. [Ледник..., 1978]. Таким образом, изучение поверхностной морены ведется здесь уже более 40 лет, при этом преемственность методики наблюдений и состава исполнителей обеспечивает сравнимость получаемых данных. Это позволяет судить о векторе развития чехла поверхностной морены за последние десятилетия, а также о том влиянии, которое он оказывает на баланс массы и эволюцию ледника, что составляет главную цель исследования. Достичь ее предполагалось решением следующих задач: 1) провести повторные мореносъемки по всей

замороженной площади языка; 2) построить карты толщины поверхностной морены на разные рубежи времени; 3) оценить изменения как площади, так и мощности транспортируемой ледником морены; 4) охарактеризовать гидрологический эффект развития моренного чехла на леднике; 5) оценить репрезентативность выводов о роли морены в эволюции ледника Джанкуат по отношению к горному оледенению всего Центрального Кавказа.

ПРЯМЫЕ И ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРЕННОГО ЧЕХЛА

Сегодня двумя основными методами изучения развития поверхностной морены на леднике Джанкуат (Центральный Кавказ) являются картографический и метод прямых полевых измерений. Пока не осуществлена интерпретация данных радиолокационных исследований морены, проведенных в последние годы. Кроме того, планируется провести высокоточный анализ динамики поверхностной морены с помощью новейшей геодезической аппаратуры типа лазерных сканеров и профилографов.

Картографический метод исследования изменений морфометрии основан на сопоставлении шести крупномасштабных (1:10 000) топографических карт с сечением горизонталей 10 м, построенных по результатам наземных фототеодолитных съемок ледника в 1968, 1974, 1984, 1992, 1996 и 2006 гг., причем первая и последняя охватывали не только сам ледник, но и весь горно-ледниковый бассейн. Все съемки проводились с фиксированных базисов [Золотарев, Поповнин, 1993], а все карты были составлены в единой условной системе координат и высот. Лишь недавно, в 2009–2010 гг., с помощью дифференциальных GPS-приемников Trimble был осуществлен переход от нее к географической системе. Помимо этого последняя топооснова была частично актуализирована в 2010 г. в результате обновления контура нижней половины ледника. На всех картах специальным условным знаком обозначались участки, покрытые поверхностной мореной, морфометрия которой обсчитывалась с помощью средств ГИС-анализа.

Используя эти топоосновы, для детального анализа любую гляциологическую информацию по леднику Джанкуат традиционно систематизируют по 13 высотно-морфологическим зонам (ВМЗ) – частям ледниковой поверхности, выделенным по принципу относительной однородности своей морфологии. Порядковые номера зон возрастают с высотой, а их границы чаще всего совпадают с изогипсами (рис. 1). Нижние четыре зоны ежегодно представляют типичную область абляции, ВМЗ V и VI можно рассматривать как пояс миграции фирновой линии год от года, а бо-

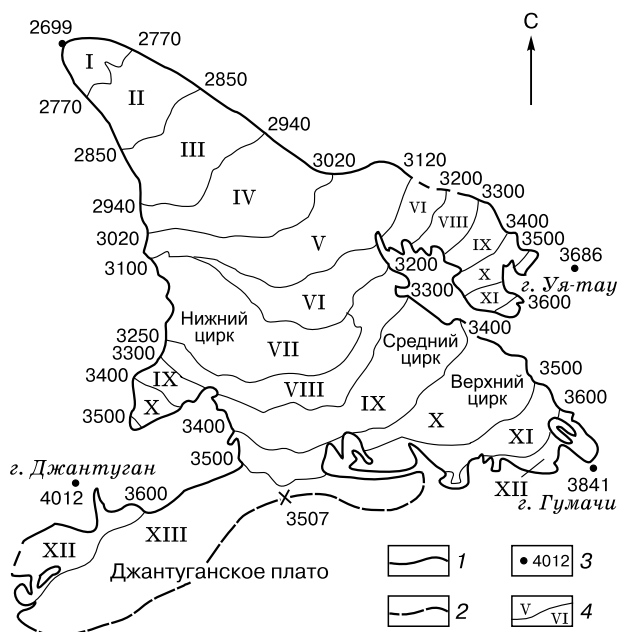


Рис. 1. Высотно-морфологические зоны ледника Джанкуат:

1 – граница ледника; 2 – ледоразделы; 3 – вершины и их абсолютные отметки; 4 – номера зон и их границы.

лее высокие зоны в основном относятся к области питания.

Однако для выявления изменения во времени массы моренного материала дистанционные методы оказываются непригодными. Необходимы полноценные наземные съемки толщины литогенного чехла, охватывающие всю заморененную часть ледника. Примеры таких полных мореносъемок на ледниках земли единичны, и Джанкуат относится к этим редким объектам.

Первое полное исследование толщины морены h на Джанкуате для оценки ее гидрологического влияния на ледниковый сток было проведено в 1983 г. Методически оно походило на измерения толщины снежного покрова и осуществлялось на основе определения h в дискретных промерных пунктах. Н.С. Бассин и др. [1983] на памирских ледниках Шульба, Русского географического общества, Кульджилга и Подкова располагали эти точки в шахматном порядке, что, однако, не обеспечивало надлежащую детальность рисунка изолиний на участках холмисто-западного рельефа моренной поверхности. Изобилие линейных, вытянутых вдоль оси движения ледника (см. рисунок на обложке) элементов моренного мезорельефа при больших вариациях h в различных частях языка требует поиска других решений. Поэтому для мореносъемки оправдан ландшафтный принцип, когда шахматный порядок рассредоточения точек измерения на участках сплошного чехла с относительно монотонным мезорельефом сочетается с профилями поперек моренных валов, состоящими из точек, хотя и недалеко разнесенных, но типичных в ландшафтном отношении (перегибы, бровки, вершины и т. п.). Тогда в зависимости от конкретной формы моренного мезорельефа, наблюдаемой исследователем на местности, он может принять решение о сгущении промерных пунктов на сложных участках (например, при поперечном профилировании моренных валов) и об их рассеивании на однородных (моренные плащи). Именно такой принцип был использован при мореносъемке Джанкуата. За «сплошной моренный покров» принимался чехол с проективным покрытием более 80 %. Процедура измерения включала внедрение металлических щупов между камнями до ледяной поверхности либо ручные раскопки, которые представляли порой полноценные шурфы. Отсчет имел точность 1 см, а естественная шероховатость обломочного чехла при этом сглаживалась с помощью жестяного кольца, насаживаемого на щуп и нивелирующего уровень моренной кровли. Толщина морены была измерена таким способом в 133 точках. В 1994 г. исследование было повторено с увеличенной точностью и детальностью: значения h измерялись в 240 точках. Тогда же для заморененной части ледника была частично обновлена топооснова. В результа-

те получены две карты мощности моренного чехла в нижней части Джанкуата по состоянию на 1983 и 1994 гг., первичный анализ которых был произведен ранее [Porožnin, Rozoga, 2002].

Аналогичная работа была проведена на Джанкуате летом 2010 г. Способ измерений остался таким же: пенетрация моренной толщи металлическим зондом или ручные раскопки, чтобы визуально убедиться в достижении кровли глетчерного льда, погребенного под слоем морены. Измерения были произведены в 189 точках по всей заморененной поверхности ледника. Значения h в каждой точке вручную наносились на маршрутную топооснову ледника. Кроме того, для точного позиционирования каждой точки ее координаты записывались в память портативного GPS-приемника Garmin eTrex Summit. Детальные прямые полевые исследования толщины моренного покрова, в отличие от примеров определения данного параметра на основе спутниковой информации [Mihalcea et al., 2008], сложны и трудоемки. Измерения толщины покрова поверхностной морены на леднике Джанкуат заняли 1,5 месяца, они производились в диапазоне абсолютных высот от 2700 до 3300 м. В том случае, если мощность морены в точке не превышала 20 см, величина h осреднялась по трем измерениям.

В дальнейшем данные мореносъемки 2010 г. с помощью средств ГИС-анализа были проинтерполированы по методу обратного взвешенного расстояния. В результате построена третья карта толщины моренного покрова, которая позволяет проследить изменение массы моренного материала на всей площади ледника в течение 27 лет.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОРЕНЫ НА ЛЕДНИКЕ ДЖАНКУАТ

Сопоставление разновременных карт позволяет говорить о том, что часть площади ледника, занятая поверхностной мореной, закономерно увеличивается: 1968 г. – 2 %, 1974 г. – 4 %, 1984 г. – 7 %, 1992 г. – 8 %, 1996 и 1999 гг. – 10 %, 2010 г. – 13 % (рис. 2).

Рассмотрим процесс увеличения площади поверхностной морены на леднике более подробно, по высоко-морфологическим зонам. Выявляется естественная закономерность: чем ближе к фронту ледника расположена зона, тем быстрее протекает процесс ее бронирования литогенным панцирем (рис. 3). Самая нижняя ВМЗ I (абс. высота 2700–2770 м) в 1968 г. была забронирована поверхностной мореной лишь на 40 %, тогда как в настоящее время она практически полностью скрыта под моренным чехлом. Увеличение площади, занятой моренным материалом, произошло с 1968 по 2010 г. и в других ВМЗ: II (2770–2850 м) – с 15 до 55 %, в III (2850–2940 м) – с 17 до 32 %, в IV (2940–3020 м) – с 8 до 24 %, в V (3020–3120 м) – с 3 до

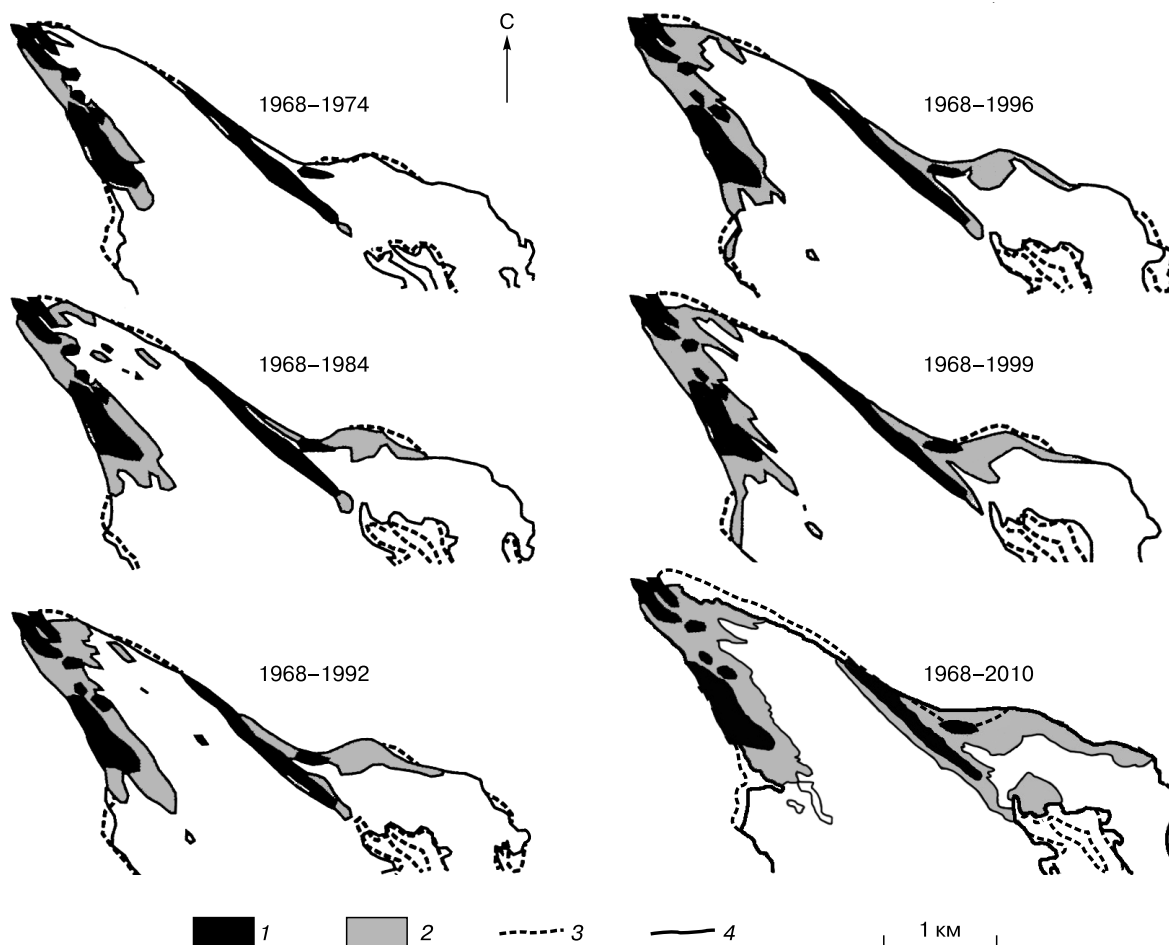


Рис. 2. Динамика приращения заморененной площади ледника Джанкуат в 1968–2010 гг.

1 – моренный чехол в 1968 г.; 2 – приращение моренного чехла до указанного срока; 3 – граница ледника на 1968 г.; 4 – граница ледника на указанный срок.

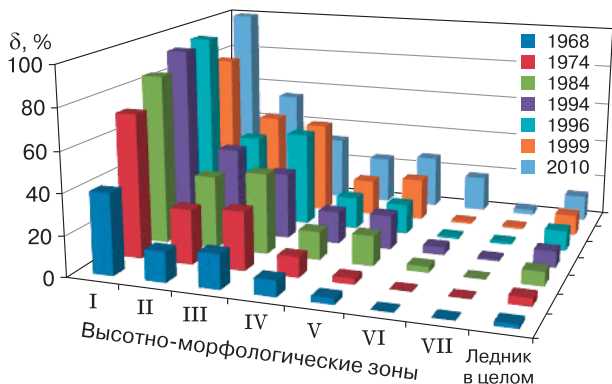


Рис. 3. Динамика приращения заморененной площади ледника Джанкуат в 1968–2010 гг. по высотно-морфологическим зонам.

ВМЗ: I – 2700–2770 м; II – 2770–2850 м; III – 2850–2940 м; IV – 2940–3020 м; V – 3020–3120 м; VI – 3120–3200 м; VII – 3200–3300 м; δ – покрытость площади ВМЗ мореной, %.

26 %, в VI (3120–3200 м) – с 0 до 18 %, в VIII (3200–3300 м) – с 0 до 3 %. Редкие случаи уменьшения зональной площади поверхностной морены между двумя последовательными сроками объясняются либо полным стаиванием ледяного ядра под моренным чехлом (т. е. данный участок перестает быть ледником, например, в ВМЗ I за период 1996–1999 гг.), либо смещением морены в нижележащую ВМЗ вследствие течения льда. Скачкообразное увеличение площади моренного материала в верхних ВМЗ, кроме обычных процессов, связано с вытаиванием на языке обломков, поступивших на ледник в результате крупных каменных обвалов в области питания в 2001–2002 гг. (см. рисунок на обложке).

За 1968–2010 гг. ортогональная площадь ледника уменьшилась с 2,990 до 2,688 км², т. е. за 38 лет ледник потерял 10 % своей площади. Физическая площадь ледника оставалась практически неизменной в 1968 и 1974 гг. – 3,034 и 3,039 км²

соответственно, а к 1984 г. уменьшилась до 2,913 и далее до 2,816 км² в 1992 г., 2,767 км² в 1996 г. и 2,740 км² в 1999 г. В этой связи необходимо отметить, что на колебания общей площади Джанкуата оказывает влияние процесс миграции ледораздела на пригребневом Джантуганском фирновом плато на территории Грузии, который в отдельные периоды времени то приводил к ускоренному сокращению площади, то, наоборот, компенсировал ее убыль на северном макросклоне [Алейников и др., 1999].

Граница ледника на языке гораздо менее динамична, чем на скальном обрамлении фирнового бассейна. Это следствие малой толщины льда на облицовке, измеряемой лишь первыми метрами, в результате на стадии деградации преобладание отрицательных значений баланса массы приводит к полному стайванию маломощного льда. Этот процесс особенно активизировался в 1998 г., когда резко выросло количество обвалов и камнепадов со скальных гребней [Pogopin, Naruse, 2005], вызвав увеличение толщины моренного материала и площади, занимаемой им на поверхности ледника.

Наибольшая толщина моренного чехла всегда отмечалась вдоль осей срединных моренных валов и в маргинальных частях языка, где движущаяся

морена соединяется с отложенной (рис. 4). Самый тонкий слой поверхностной морены был всегда приурочен к внутренней периферии забронированной мореной зоны. Если покров сложен материалом, диспергированным в теле ледника и выходящим на поверхность языка в результате вытаявания после прохождения ледопадов и неровностей подледного рельефа, горизонтальные градиенты толщины моренного чехла малы, а моренные валы обрамлены относительно широкими полосами тонкого каменистого моренного чехла. Этот случай наблюдался на левой части ледника Джанкуат. Вертикальные напряжения здесь меньше, поэтому течение полос льда при приближении к языку носит параллельный или даже дивергентный характер. На обширном участке в ВМЗ II–III морена представляет собой как бы единое литогенное тело со сглаженными чертами холмисто-западинного мезорельефа и минимальными горизонтальными градиентами h . Возле конца ледника ситуация меняется: здесь снова доминируют продольные формы с увеличенной мощностью морены и значительными ее вариациями, что вызвано выходом базального льда с большей объемной концентрацией моренного материала. В 1983 г. именно к этому сектору был приурочен максимум величины h ,

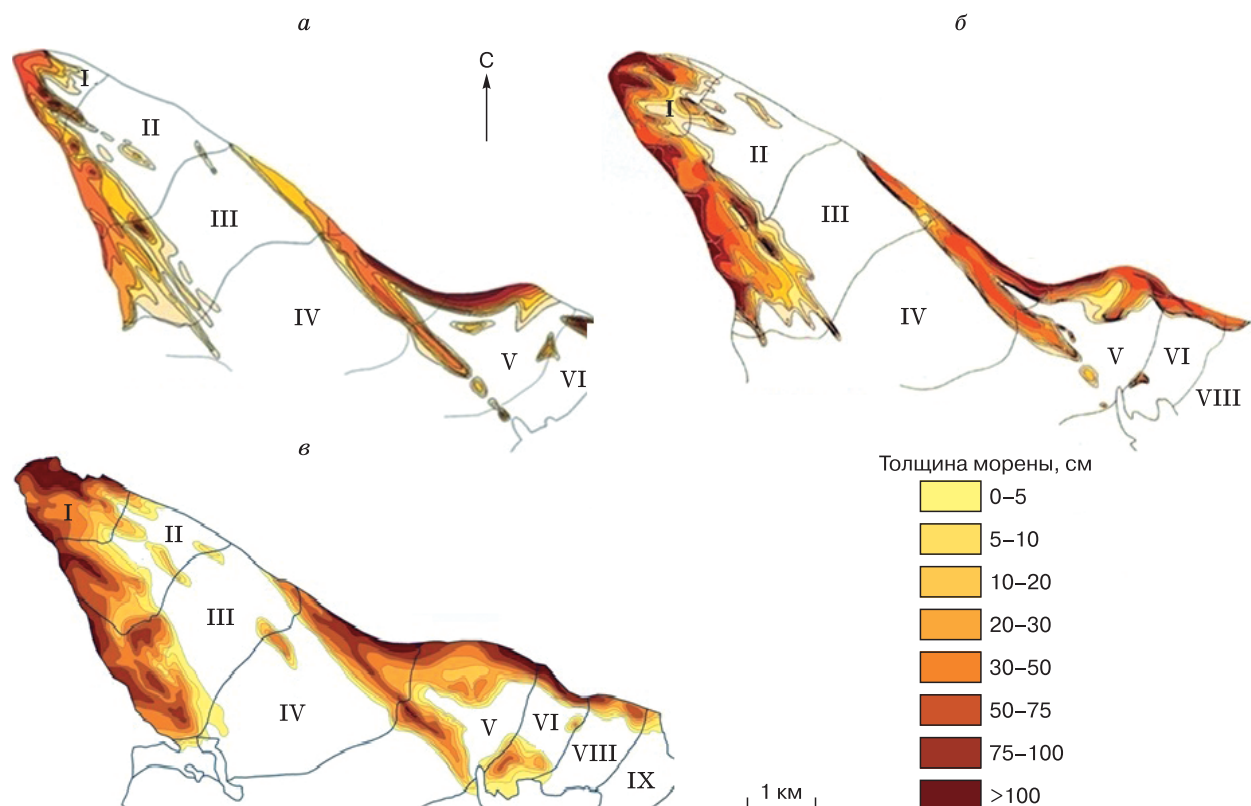


Рис. 4. Толщина моренного покрова на леднике Джанкуат по высотно-морфологическим зонам (I–IX).

а – 1983 г.; б – 1994 г.; в – 2010 г.

равный 183 см [Поповнин, 2003], а в 1994 г. там был найден участок с мореной толщиной до 280 см.

В 2010 г. наибольшие мощности поверхностной морены были также зафиксированы в ВМЗ I. Экстремальными оказались точки с толщиной морены 260 и 245 см, находящиеся в непосредственной близости от края ледника. В то же время в ВМЗ I часто отмечались также толщины морены в 35–40 см. Средняя толщина моренного покрова составила 100 см.

ВМЗ II ледника характеризуется меньшими значениями h и большим разнообразием форм моренного рельефа: здесь присутствуют и моренные валы, и равномерный чехол, и тонкие, недавно образовавшиеся моренные плащи. Основной моренный материал в ВМЗ II сосредоточен у орографически левого борта ледника. Наибольшая толщина моренного покрова в 2010 г. составила 119 см. Самые же низкие фоновые значения $h = 5–13$ см были отмечены на моренных плащах ближе к орографически правому борту ледника. В среднем мощность морены по этой зоне составила 51 см.

Кровля моренного материала ВМЗ III образует довольно однородную поверхность, местами рассеченную каналами стока талых вод, где глетчерный лед под литогенным покровом залегает в основном на глубине не более 6–13 см. Наибольшая толщина морены в этой зоне составляет 101 см. При этом h весьма равномерно и закономерно убывает при удалении от орографически левого борта ледника. Среднезональная толщина морены здесь (38 см) – наименьшая среди всех ВМЗ ледника, где есть моренный чехол.

Поверхностная морена ВМЗ IV сосредоточена в основном у орографически правого борта ледника в виде срединно-моренного вала, образующегося при слиянии двух потоков льда (С и D на

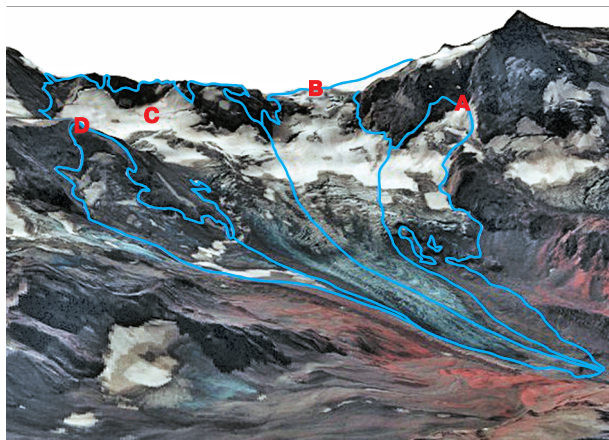


Рис. 5. Ледяные потоки, составляющие тело ледника Джанкуат:

А – с северного склона г. Джантуган; В – с Джантуганского фирнового плато; С – из верхнего цирка под г. Гумачи; D – с северного склона г. Уя-тау.

рис. 5), и “кармана” между этим валом и границей ледника. В настоящее время ее толщина не превышает 79 см, а среднее по зоне значение $h = 51$ см.

Моренный чехол ВМЗ V приурочен к подножию горы Уя-тау на орографически правой периферии ледника. Наибольшие значения h здесь приурочены к краю ледникового тела, вероятно потому, что наряду с каменными обвалами из-за его пределов ледниковый поток, перед тем как устремиться ниже, прижимается к крутому скальному борту, откладывая основную часть моренного материала именно там. Минимум h среди всех промерных пунктов мореносъемки 2010 г. в этой зоне составил 9 см (моренный плащ на крутом подножие склона Уя-тау), а максимум – 73 см (у орографически правого края ледника). Средняя по зоне толщина морены равняется 40 см.

В зоне VI моренный материал сконцентрирован в форме сравнительно узкой полосы, совпадающей с ледяной поверхностью большой крутизны, вследствие чего в ближайшее время не исключено его гравитационное перераспределение в нижележащую зону. В этом случае он попадет в сектор особенно мощного моренного покрова ВМЗ V, тем самым еще более увеличив его толщину. В целом на территории ВМЗ VI превалирует относительно тонкий слой морены. Несмотря на это, h местами здесь достигает немалых величин – 107 см, что обеспечивает среднезональное значение 42 см.

В 2010 г. впервые за историю мореносъемок контуры моренного чехла внедрились в пределы ВМЗ VIII, где было сделано несколько измерений h . Моренный материал также представлен узкой полосой, разграничивающей поток D ледника Джанкуат и ледник Висячий. Толщина морены по промерным точкам варьировалась от 5 до 72 см, в среднем по зоне составил 40 см.

В целом по леднику следует отметить, что в ВМЗ I–III моренонакопление вдоль орографически левого борта ледника, помимо прямых каменных обвалов со склона долины, обеспечивается в основном потоком А (см. рис. 5), особенно сильно деградирующим в последнее время. Еще в 1970-х гг. в эту ветвь вливался лежащий выше небольшой безымянный ледничок на гребне горы Джантуган, но сегодня его висячий язык отделен от нижнего цирка Джанкуата непрерывным поясом обнажившихся коренных пород. Это ведет к еще большей интенсификации обвально-осыпной деятельности со склонов скального обрамления, недавно освободившихся от ледниковой нагрузки и потому неустойчивых.

Поток D, являющийся наряду с потоком С основным поставщиком моренного материала для ВМЗ IV–VIII, стекает с крутого склона Уя-тау и также сильно деградирует, что приводит к избыточной подпитке подножий коллювием. Помимо этого со склона Уя-тау регулярно сходят лавины, перенося значительное количество каменного ма-

териала. Порой они достигают катастрофических масштабов, как, например, в апреле 1980 г. и начале мая 1997 г., когда высота конуса выноса достигала 15 м. При росте снежности зим и повышении зимних температур, что наблюдается на Центральном Кавказе в последнее время, частота схода лавин со склона Уя-тау, в том числе и катастрофических, будет увеличиваться.

Вследствие указанных причин в ближайшее время следует ожидать резкой интенсификации моренонакопления в ВМЗ I–IV, причем рост толщины поверхностной морены будет носить экспоненциальный характер.

**РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА**

Ледник Джанкуат является одним из немногих, если не единственным в мире, где толщина

моренного покрова по всей его площади определялась прямым методом трижды. Идентичность применяемой методики и преемственность состава исполнителей работ обеспечили надлежащую сопоставимость результатов. Из сравнения разновременных карт толщины моренного покрова (см. рис. 4) следует, что за прошедшие 27 лет не было какой-либо принципиальной смены механизма, обуславливающего пространственные закономерности в распределении каменного материала. По-прежнему основная масса вытаявающих обломков тяготеет к осям линейно вытянутых структур и перифериям языка, где чехол поверхностной морены сливается с боковыми валами. Однако в количественном исчислении масса литогенной мантии, влекомой ледником на своей поверхности, имеет значительные приращения (табл. 1, 2).

Таблица 1. Средние значения мощности морены в разных высотно-морфологических зонах ледника Джанкуат по результатам мореносъемок

Номер ВМЗ	h, см		Δh, см	h, см	Δh, см
	1983 г.	1994 г.	1983–1994 гг.	2010 г.	1983–2010 гг.
I	29	45	+16	100	+71
II	22	43	+21	51	+32
III	14	30	+16	38	+24
IV	34	47	+13	51	+17
V	31	32	+1	40	+9
VI	37	38	+1	42	+5

Таблица 2. Распределение толщины моренного материала

Номер ВМЗ	Год	Толщина моренного чехла h, см							Толщина морены в среднем по ВМЗ, см
		0–10	11–20	21–30	31–50	51–75	76–100	>100	
I	1983	32,4	14,7	10,8	22,5	15,7	2,9	1,0	29
	1994	26,5	10,3	12,2	16,4	12,2	6,1	16,3	45
	2010	–	6,7	–	16,7	20,0	16,6	40,0	100
II	1983	34,4	22,9	13,1	25,5	4,1	–	–	22
	1994	25,4	11,0	7,3	18,2	20,0	12,7	5,4	43
	2010	7,0	9,3	11,6	18,6	32,6	13,9	7,0	51
III	1983	53,7	18,6	19,0	6,6	1,7	0,4	–	14
	1994	28,3	22,4	16,4	13,4	9,0	6,0	4,5	30
	2010	16,3	18,6	9,3	27,9	16,3	7,0	4,6	38
IV	1983	27,6	13,4	14,9	24,6	4,5	9,0	6,0	34
	1994	13,5	10,8	10,8	24,3	27,0	8,2	5,4	47
	2010	–	15,7	19,8	19,8	32,3	7,3	4,1	51
V	1983	38,5	16,3	13,3	10,4	4,5	8,9	8,1	31
	1994	33,2	16,6	10,4	16,7	12,5	6,4	4,2	32
	2010	10,5	18,0	28,5	26,0	3,5	8,5	5,1	40
VI	1983	15,4	23,1	7,7	19,2	23,1	11,5	–	37
	1994	22,2	11,2	11,1	22,2	22,2	11,1	–	38
	2010	–	–	20,0	60,0	20,0	–	–	42
Ледник в целом	1983	39,0	17,7	14,8	16,3	5,6	4,0	2,6	28
	1994	25,9	14,6	11,7	17,7	15,4	7,9	6,8	39
	2010	7,9	13,7	14,3	23,3	20,1	10,6	10,6	54

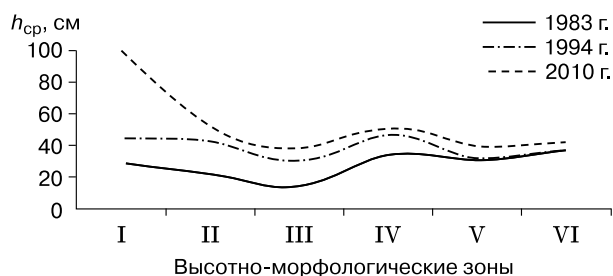


Рис. 6. Изменения средних по высотно-морфологическим зонам значений мощности моренного чехла ($h_{ср}$) между мореносъемками разных лет.

ВМЗ: I – 2700–2770 м; II – 2770–2850 м; III – 2850–2940 м; IV – 2940–3020 м; V – 3020–3120 м; VI – 3120–3200 м.

В зоне I наблюдается наиболее интенсивный прирост мощности морены, а с набором абсолютной высоты прирост постепенно уменьшается. Тем самым происходит естественное перемещение моренного материала в нижние части ледника. За исключением концевой части ледника, в закономерностях прироста мощности моренного чехла в целом прослеживается известная пропорциональность (рис. 6).

Исходя из данных табл. 2, можно говорить о повсеместном увеличении мощности поверхностной морены на леднике: почти везде наблюдается смещение модальных значений мощности в сторону более высоких величин. Этот процесс отмечается во всех высотно-морфологических зонах, но особенно ярко он выражен в ВМЗ I, где на долю значений $h > 100$ см приходится 40 % измерений. По леднику в целом в 1983 и 1994 гг. самую боль-

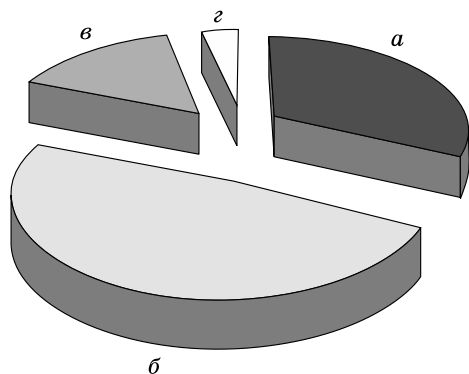


Рис. 7. Суммарная площадь заморененных ледников (S) различных морфологических типов на Центральном Кавказе.

а – $S = 119,6$ км², сложнодолинные; б – $S = 179,9$ км², долинные; в – $S = 59,4$ км², карово-долинные; з – $S = 13,1$ км², каровые.

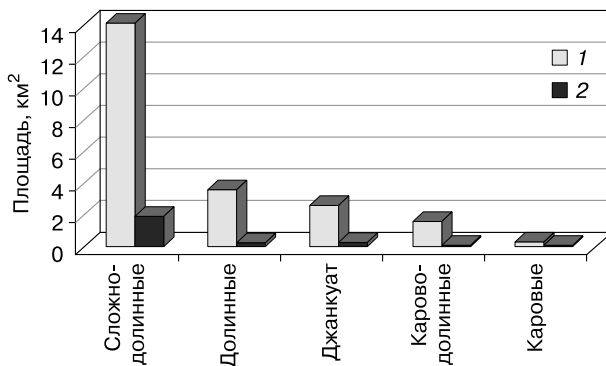


Рис. 8. Средние площади заморененных ледников (1) различных морфологических типов и поверхностных морен на них (2) на Центральном Кавказе.

шую площадь зон (39 и 26 % соответственно) занимали скопления литогенного материала наименьшей толщины – градация 0–10 см. К 2010 г. наибольшая масса морены (23 %) уже представлена градацией 31–50 см. Эта закономерность находит отражение и в возрастании средней по леднику толщины моренного покрова от первой мореносъемки к последней: в 1983 г. она составляла 28 см, в 1994 г. – 39 см, а в 2010 г. – уже 54 см, т. е. почти вдвое больше, чем в начале мониторинга.

Таким образом, все произведенные исследования указывают на явное утолщение моренного чехла на языке ледника Джанкуат. Важно, что полученные результаты можно распространить и на другие ледники Центрального Кавказа. Репрезентативность ледника Джанкуат для Центрального Кавказа по морфологическим и масс-балансовым показателям предполагалась еще до начала прямого гляциологического мониторинга [Ледник..., 1978], и в настоящее время нет оснований подвергать ее сомнениям. Какова же степень его репре-

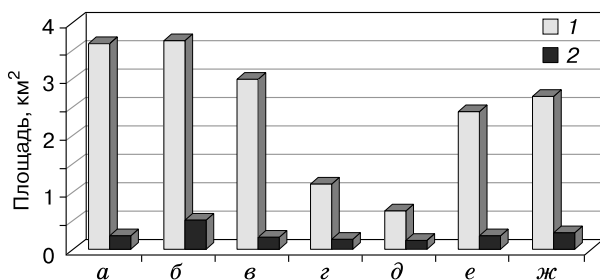


Рис. 9. Средние площади заморененных ледников (1) и поверхностных морен на них (2) в различных речных бассейнах Северного Кавказа:

а–д – бассейны рек: а – Малка, б – Черек, в – Чегем, г – Кубань, д – правых притоков р. Сунжи; е – Северный Кавказ; ж – Джанкуат.

зентативности в отношении аккумуляции моренного материала на его поверхности?

Для ответа были изучены данные о площадях ледников и площадях моренного чехла на них, представленные в Каталоге ледников СССР [1967]. Среди заморененных ледников больше всего на Центральном Кавказе распространены простые долинные ледники, к которым относится и Джанкуат, – 51 ледник суммарной площадью около 180 км², в то время как на долю сложнодолинных ледников приходится около 120 км², а карово-долинных – около 59 км² (рис. 7). Анализ средних площадей заморененных ледников, принадлежащих разным морфологическим типам, и площадей моренного чехла на них также указывает на репрезентативность Джанкуата (рис. 8). Его площадь составляет 2,7 км², а площадь поверхностной морены на нем чуть больше 0,3 км² (по данным 2010 г.), в то время как для долинных и карово-долинных ледников, составляющих основную массу оледенения Центрального Кавказа, средняя площадь равна 3,6 и 1,6 км² при средней площади морены 0,3 и 0,1 км² соответственно.

Типичность Джанкуата выдерживается и при рассмотрении географической составляющей распределения забронированных поверхностной мореной ледников, осредненной по речным бассейнам (рис. 9). Так, средняя площадь заморененного ледника в бассейне рек Малка и Баксан составляет 3,6 км² при средней площади морены на единичном леднике 0,23 км² (заморененные ледники составляют 26 % от площади бассейна); в бассейне Черка средняя площадь заморененного ледника – 3,7 км² при средней площади морены 0,5 км² (25 % ледников бассейна имеют моренный покров); в бассейне Чегема эти величины составляют 3,0 и 0,2 км² (23 %) соответственно и т. д. В среднем по Северному Кавказу заморененный ледник имеет площадь 2,4 км², а морена на нем занимает 0,3 км² [Каталог..., 1967]. Подобная репрезентативность Джанкуата с позиций развития поверхностной морены дает основание распространять полученные на нем результаты о закономерностях влияния моренного чехла на эволюцию современного горного оледенения на другие ледники региона.

Крайняя скудость данных прямых измерений подморенной абляции на иных ледниках Кавказа не позволяет достоверно оценить степень универсальности выводов о гидрологическом эффекте поверхностной морены. Преобладание на Джанкуате заморененных участков с мощностью слоя обломков более 5–7 см однозначно свидетельствует о том, что бронирующее (экранирующее) воздействие чехла морены на подморенную абляцию и сток превалирует над эффектом усиления таяния, происходящего под тонким слоем камней, причем фоновое ослабление общеледниковой абляции год

от года колеблется на уровне 20 %. Единственные на Кавказе однотипные оценки влияния морены на ледниковый сток были получены на леднике Зопхито в Грузии [Lambrecht et al., 2011], где значения ослабления таяния практически совпали с полученными на Джанкуате, несмотря на то, что было отмечено различие между смежными макросклонами Кавказа в темпах разрастания чехла поверхностной морены (на грузинском леднике зафиксированный по спутниковой информации прирост шел медленнее).

ВЫВОДЫ

Результаты мониторинга пространственного положения моренного чехла на поверхности ледника Джанкуат указывают на безусловное увеличение площади, объема и массы моренного материала. Впервые в мировой практике предприняты три повторные съемки толшины поверхностной морены, охватывающие всю заморененную площадь ледника. Составленные по результатам прямых измерений карты его толщины демонстрируют явное разрастание моренного покрова за предыдущие 27 лет как по площади (от 0,252 км² в 1983 г. до 0,344 км² в 2010 г.), так и по мощности (прирост от 10 см в верхней части языка до 70 см в его прифронтальной части) при сохранении основных пространственных закономерностей распространения. В 2010 г. поверхностной мореной было занято около 61 % площади языка. Установлено, что объем поверхностной морены за 1983–2010 гг. увеличился на 141 % (с 70,33 до 169,59 тыс. м³). Выяснено, что ослабление или бронирование абляции моренным чехлом происходит на 93 % заморененной части языка и лишь на оставшихся 7 % территории чехол способствует усилению подморенного таяния. Ежегодно ледниковый сток недополучает порядка 20 % своего объема вследствие развития на леднике поверхностной морены. Столь большое распространение литогенной оболочки на дневной поверхности, безусловно, возводит процессы развития поверхностной морены в число важнейших факторов, предопределяющих дальнейшую эволюцию Джанкуата с точки зрения как баланса его массы, так и его геометрии.

Помимо неоднократно показанной ранее гляциологической (преимущественно масс-балансовой и морфометрической) репрезентативности Джанкуата для Центрального Кавказа, сегодня у авторов есть все основания считать его вполне репрезентативным и с позиций сформированного на нем моренного чехла. Доказана типичность степени заморененности опорного ледника в масштабах оледенения всего региона. Таким образом, качественные закономерности современной динамики процесса моренонакопления и роль этого процесса во внешнем массоэнергетическом обмене ледни-

ков можно распространить на другие гляциальные объекты северного макросклона Центрального Кавказа и даже (в известных пределах) на ледники Грузии.

Авторы выражают благодарность В.Г. Пастухову за действенную помощь и советы по представлению материалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-05-00491а) и Программы поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-335.2014.5).

Литература

- Алейников А.А., Золотарев Е.А., Поповнин В.В. Поле скоростей ледника Джанкуат // Материалы гляциол. исслед., 1999, вып. 87, с. 169–176.
- Бассин Н.С., Демченко В.В., Соколов Л.Я., Янбулат А.А. Количественный анализ моренного покрова некоторых ледников Памира // Материалы гляциол. исслед., 1983, вып. 46, с. 61–65.
- Золотарев Е.А., Поповнин В.В. Гипсометрия ледника Джанкуат: изменения после МГД (с 1968 по 1984 г.) // Материалы гляциол. исслед., 1993, вып. 77, с. 58–66.
- Каталог ледников СССР. Т. 8, вып. 2, ч. 5 / Э.С. Боровик, В.И. Кравцова. Л., Гидрометеиздат, 1967, 145 с.
- Ледник Джанкуат / Под ред. И.Я. Боярского. Л., Гидрометеиздат, 1978, 184 с.
- Поповнин В.В. Подморенная абляция на языке ледника // Материалы гляциол. исслед., 2003, вып. 94, с. 31–41.
- Томашевская И.Г., Тихановская А.А., Петров М.А. Отступление ледников – фактор возникновения гляциальных селей // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 83–86.
- Vozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V. Role of debris cover in the thermal physics of glaciers // J. Glaciol., 1986, vol. 32, No. 111, p. 255–266.
- Lambrecht A., Mayer C., Hagg W. et al. A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus // The Cryosphere, 2011, vol. 5, p. 525–538.
- Mihalcea C., Mayer C., Diolaiuti G. et al. Spatial distribution of debris thickness and melting from remote-sensing and meteorological data, at debris-covered Baltoro glacier, Pakistan // Ann. Glaciol., 2008, vol. 48, p. 49–57.
- Popovnin V.V., Naruse R. A 34-year-long record of mass balance and geometric changes of the Djankuat Glacier, Caucasus // Bull. Glaciol. Res., 2005, vol. 22, p. 113–125.
- Popovnin V.V., Rozova A.V. Influence of sub-debris thawing on ablation and runoff of the Djankuat Glacier in the Caucasus // Nordic Hydrol., 2002, vol. 33, No. 1, p. 75–94.

Поступила в редакцию
14 августа 2014 г.