
ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324.43

ПОЛУВЕКОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МОRENНОГО ПОКРОВА ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ (КАВКАЗ)

© 2025 г. В. В. Поповнин*, А. С. Губанов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: begemotina81@gmail.com

Поступила в редакцию 02.06.2025 г.

После доработки 26.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Продолжающаяся деградация ледника Джанкуат выражается и в разрастании моренного чехла на поверхности льда. За 56 лет после начала прямых измерений в 1968 г. заморененная площадь ледника выросла с 2 до 20 %. Моренный покров меняет структуру теплового баланса поверхности ледника, существенно влияя на абляцию льда. Маломощный (< 7 см) чехол способен приводить к усилению таяния подморенного льда, тогда как по мере дальнейшего утолщения слоя морены таяние прогрессивно ослабляется вплоть до полной парализации при слое свыше 1.5 м толщиной. По результатам полевой съёмки моренного чехла в 2022 г. была построена очередная, четвёртая карта толщины моренного покрова, продолжающая серию аналогичных карт по состоянию на 1983, 1994 и 2010 гг. Толщина морены сильно варьирует по высотным поясам, а в среднем по всему леднику она достигает 60 см, что более чем вдвое превышает среднее значение для 1983 г. Таким образом, все проведённые 4 мореносямки разных лет свидетельствуют о том, что гидрологическая роль моренного чехла всегда сводилась к однозначному эффекту общего ослабления таяния для ледника в целом. Объём моренного материала за 39-летний период 1983–2022 гг. возрос в 4 раза – до 275 тыс. м³, несмотря на то, что площадь ледника за тот же период значительно сократилась – более чем в полтора раза как для физической поверхности, так и для ортогональной проекции. Демонстрируется ускорение прироста моренных масс за последнее десятилетие. Активизация денудационных процессов вследствие прогрессирующей дегляциации скального обрамления фирнового бассейна вызывает более интенсивное поступление на ледник коллювиального материала. Вместе с подъёмом кинематической границы питания это приводит к повышению верхней границы распространения поверхностной морены на леднике.

Ключевые слова: моренный чехол, ледник, поверхностная морена, съёмка толщины морены, абляция, Центральный Кавказ, баланс массы, мониторинг

DOI: 10.7868/S2412376525040055

ВВЕДЕНИЕ

Моренный покров и его роль в эволюции горного оледенения как на региональном (Nakawo, Rana, 1999; Scherler et al., 2011), так и на локальном уровне (Pratap et al., 2015; Moeller et al., 2016; Rowan et al., 2021; Kunmar et al., 2025) в последнее время становятся объектами повышенного интереса в гляциологическом сообществе. Известно, что поверхностная морена на горных ледниках образуется в результате трёх процессов: отложения коллювиального материала на ледниковой поверхности; вытаивания внутренней морены; переноса материала с ложа ледника

на поверхность вдоль плоскостей скальвания. Последние десятилетия обнажившиеся от ледовой облицовки надледниковые склоны стали поставщиком свежего обломочного материала, в том числе в большом объёме: так, на опорном леднике Джанкуат на Кавказе масштабные обвалы 2001 и 2003 гг. к 2024 г. достигли языка, существенно изменив конфигурацию площади моренного покрова. На текущей стадии деградации ледников, при которой интенсифицируется привнос моренного материала с освобождённых от льда склонов и повышается верхняя граница распространения моренного покрова, морена начинает играть всё более значимую роль

в эволюции ледника, особенно в его языковой части.

Дегляциация ведёт к росту чехла морены на леднике не только по площади, но и по толщине. Он существенно влияет на характер аблации подморенного льда, что напрямую отражается на ледниковом стоке и балансе массы ледника. Согласно основоположникам (Østrem, 1959; Ходаков, 1972; Nakawo, Young, 1981) и их последователям (Richardson, Brook, 2010; Reznichenko et al., 2010; Anderson et al., 2021; Miles et al., 2022) чехол небольшой мощности, обычно до 2–5 см, а для условий Кавказа – даже до 7–9 см (Bozhinskiy et al., 1986; Verhaegen et al., 2024), ускоряет таяние, тогда как более толстый бронирует лёд, ослабляя таяние вплоть до его практического прекращения.

Отличные от чистого льда теплофизические характеристики поверхностной морены изменяют облик полей баланса массы и его компонентов: влияние литогенного материала испытывает не только поле аблации, но и поле аккумуляции из-за неизбежных геоморфологических трансформаций моренного мезорельефа. Несмотря на то что изменения моренного чехла не входят в программу стандартного гляциологического мониторинга (Østrem, Brugman, 1991), на опорном для Кавказа леднике Джанкуат такие работы регулярно проводятся – в первую очередь ради уточнения масс-балансовых оценок, выводимых в ходе вычислений стандартными гляциологическими приёмами. С самого начала полноценного комплексного гляциогидрометеорологического мониторинга в 1967–1968 балансовом году (Ледник Джанкуат, 1978) площадь, занятая поверхностной мореной, обязательно картировалась в крупном масштабе 1:10000 на каждой из восьми периодически обновляемых топооснов ледника. Позднее в программу наблюдений на леднике Джанкуат стали включаться и повторные съёмки толщины моренного покрова по всей занятой им площади активного ледника. Ранее они были предприняты в 1983, 1994 и 2010 гг. Результаты выполненных по единой методике прямых измерений и последующего тематического картографирования составляют уникальную серию наблюдений за эволюцией площади и объёма моренного покрова: возможно, по степени изученности динамики преобразований поверхностной морены у серии по леднику Джанкуат нет аналогов в мире. Полученные данные позволяют оценить влияние моренного материала на баланс массы ледника.

Работа посвящена результатам выполненной в 2022 г. четвёртой по счёту мореносямки и продолжает серию исследований, посвящённых эволюции моренного материала на леднике Джанкуат (Popovnin, Rozova, 2002; Поповнин и др., 2015; Резепкин, Поповнин, 2018) и его анализу в контексте изменения площади, толщины и гидрологического эффекта. В силу признанной репрезентативности ледника Джанкуат можно допустить универсальность выводов по нему для оледенения всего Центрального Кавказа. Качественно близкие тенденции можно найти и в обзоре процессов развития чехла поверхности морены на ледниках обоих макросклонов Главного Кавказского хребта за минувшие 30–40 лет (Tielidze et al., 2020).

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ И ПОЛЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРЕННОГО ЧЕХЛА

На леднике Джанкуат исследуются два основных геометрических параметра моренного покрова: его площадное распределение и толщина. Основные методы исследования в первом случае – это картографические приёмы, а во втором – полевые площадные мореносямки.

За более чем полувековую историю гляциологического мониторинга на леднике Джанкуат созданы восемь крупномасштабных (1:10000) топографических карт с сечением изогипс 10 м и отображением моренного покрова условным знаком. Первые шесть карт – 1968, 1974, 1984, 1992, 1996 и 2006 гг. – построены по выполненным фототеодолитным съёмкам с единой системы базисов (Золотарёв, Поповнин, 1993) в локальной условной системе высот и координат. Более поздние карты 2013 и 2018 гг. построены с помощью современного программного обеспечения как в условных, так и в географических координатах, причём ранее построенные карты также приведены к географической системе.

Исследование морены в 2022 г. опиралось на актуальную к тому моменту топооснову 2018 г. (рис. 1). Гляциологическая информация на леднике Джанкуат традиционно систематизируется по 13 высотно-морфологическим зонам (далее – ВМЗ), пронумерованным с языка до ледосбора ледника Джанкуат на Джантуганском фирновом плато.

Толщина морены h_m устанавливалась в ходе зондирования каменной толщи металлическими щупами, а в промерных точках с особо мощной

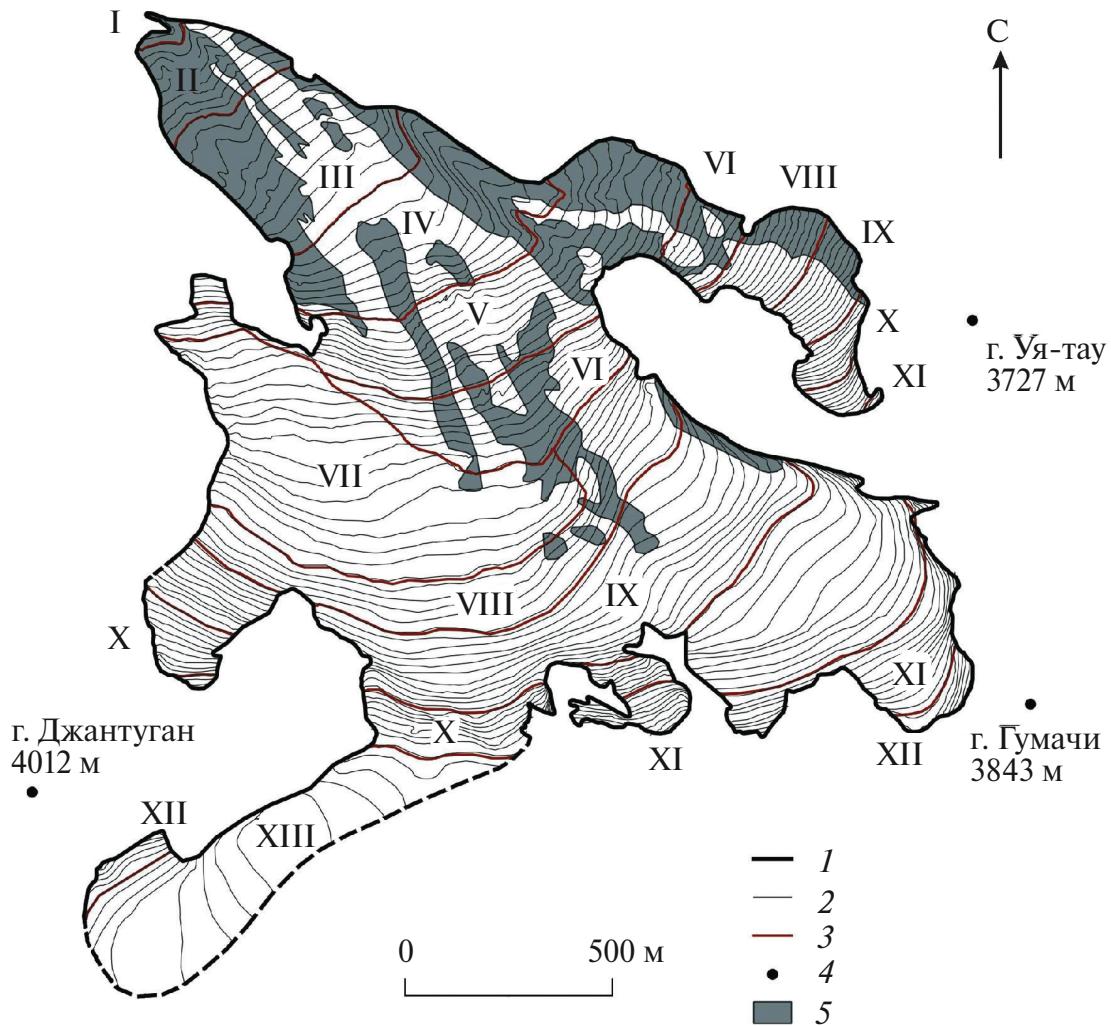


Рис. 1. Ледник Джанкуат. Римскими цифрами показана нумерация высотно-морфологических зон (ВМЗ): 1 – граница ледника; 2 – изогипсы через 10 м абс.; 3 – граница ВМЗ; 4 – вершина; 5 – моренный покров на 2022 г.

Fig. 1. The Djankuat Glacier. Roman numerals indicate the numbering of alti-morphological zones (AMZ): 1 – glacier boundary; 2 – isohypsies, at 10 m intervals; 3 – AMZ boundary; 4 – summit; 5 – debris cover in 2022

мореной – путём ручных экскаваций до кровли погребённого льда. Учреждение сети дискретных промерных точек исходило прежде всего из изогипсометрического профилирования замороженных участков и далее из ландшафтного принципа при дислокации промеров. За сплошной мореной покров принимались участки, проективная покрытость которых моренным материалом превышала примерно 80 %. Точность определения h_m составляла 1 см, а уровень кровли грубообломочного материала устанавливался по итогам нивелирования неровной поверхности камней жестяным кольцом переменного диаметра 10–30 см в зависимости от механического состава обломков. Сплошной плащ морены на леднике

Джанкуат сконцентрирован в основном на периферийных участках языка и в линейных грядах, вытянутых вдоль линий тока (рис. 2). Методика неизменна и наследуется из предыдущих съёмок моренного чехла (Поповнин и др., 2015). Такая методическая преемственность позволяет говорить об относительной изотропности результатов, получаемых в поле в ходе мореносъёмок разных лет.

Описанным способом в 2022 г. h_m была измерена в 170 точках в диапазоне абсолютных высот от 2750 до 3400 м. Результаты позиционировались на местности с помощью GPS-приёмника Garmin GPSMAP 66SR и картографировались на печатной топооснове ледника Джанкуат.

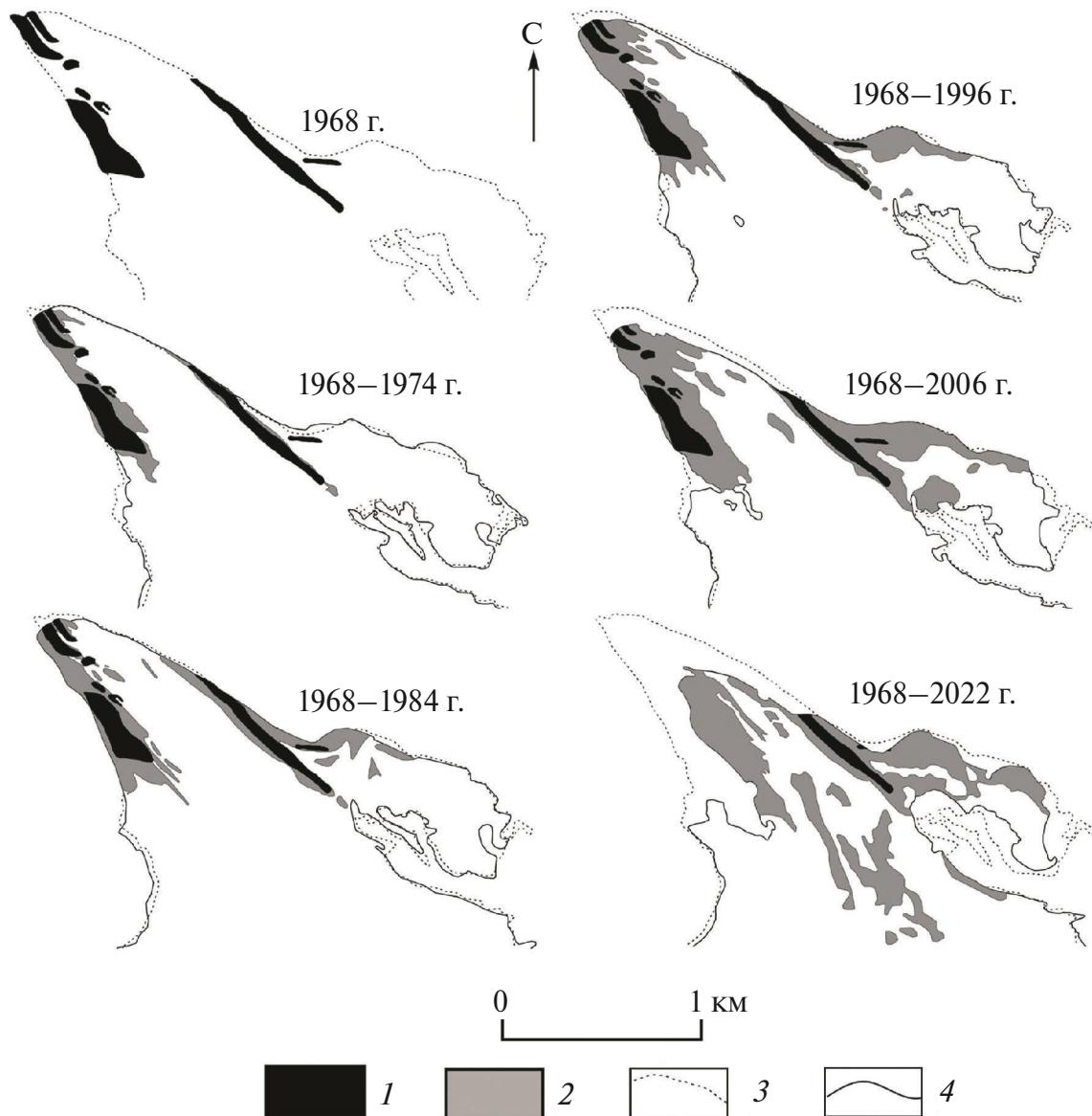


Рис. 2. Динамика прироста моренного чехла ледника Джанкуат в 1968–2022 гг.: 1 – площадь поверхности морены в исходном 1968 г.; 2 – прирост площади морены от 1968 г. до указанного рубежа времени; 3 – контур ледника на 1968 г.; 4 – контур ледника на указанный рубеж времени

Fig. 2. The dynamics of debris cover areal increments on the Djankuat Glacier within 1968–2022: 1 – initial debris cover area in 1968; 2 – debris area increment since 1968 till the given point in time; 3 – glacier contour in 1968; 4 – glacier contour at the given point in time

Полевой материал был далее подвергнут ГИС-анализу в ПО ESRI ArcMap 10.6, посредством чего была построена новая карта толщины моренного чехла. Тем самым общая хронология наблюдений за толщиной моренного покрова на леднике Джанкуат в ходе четырёх предпринятых съёмок достигла 39 лет на фоне 56-летнего мониторинга разрастания моренного чехла по площади.

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОРЕНЫ НА ЛЕДНИКЕ ДЖАНКУАТ

Разрастание морены по площади. Карты распространения моренного чехла по топоосновам разных лет позволяют наглядно оценить динамику его развития. Их сопоставление выявляет неуклонное разрастание поверхности морены

на леднике: она занимала 2 % площади ледника в 1968 г., 4 % в 1974 г., 7 % в 1983 г., 8 % в 1994 г., 13 % в 2010 г., а к последней мореносямке 2022 г. её доля возросла уже до 20 %, в абсолютных единицах составляя 0.46 км² (см. рис. 2; табл. 1). Распределение моренного покрова по различным ВМЗ согласуется с естественной закономерностью: доля заморененной поверхности в площади конкретной ВМЗ снижается с высотой (рис. 3). С 1968 по 2022 г. площадь, занятая мореной, в I ВМЗ (до высоты 2770 м) выросла с 40 до 96 %, II – с 15 до 77 %, III – с 17 до 56 %, IV – с 8 до 50 %, V – с 3 до 42 %. В VI ВМЗ (выше 3120 м) первые заморененные участки стали появляться только с 1984 г., а в VII ВМЗ – с 1994 г. Наконец, проведённая в 2022 г. мореносямка, использующая последнюю на тот год топооснову 2018 г., фиксирует появление свежих моренных образований уже в VIII–X ВМЗ, начиная с высоты 3420 м на участке склона горы Уя-тау, прилегающем к правой границе ледника, где подпитка каменным материалом происходит с контрфорса, отделяющего эту ветвь ледника Джанкуат от малого ледника Висячий. Отмечено, что данный участок склона ошибочно отдешифрирован в каталоге ледников России по состоянию на вторую декаду XXI в. (Каталог ледников России..., 2025) как независимый ледник, тогда как его обособление (да и то не полное) от ледника Джанкуат произошло лишь к 2024 г. В 2018–2022 гг. поток льда с г. Уя-тау, пусть и сильно заморененный в своём подножном сегменте, всё ещё однозначно сливался

с магистральным ледником, судя по итогам его многократных прямых обследований в ходе наземного мониторинга, вскрывающим черты их общего движения хотя бы в единой системе трещин, частично закамуфлированных обломками камней.

Интенсификация на рубеже ХХ–ХХI вв. обвальных процессов (Popovnin, Naruse, 2005; Резепкин, Поповнин, 2018), добавила значительное количество моренного материала, который постепенно транспортируется с верхних в более низкие зоны ледника. Особенно крупные обвалы пород произошли в 2001 и 2003 гг. В 2022 г. основная масса этих обвалов находилась в средних (IV–IX) зонах ледника Джанкуат (см. рис. 3), составляя большую часть сконцентрированного там литогенного материала. Как уже указывалось, предыдущие мореносямки вообще не фиксировали моренных покровов выше VI ВМЗ: обвалы начала 2000-х годов находились в области аккумуляции и были погребены в фирновой и ледяной толще. По результатам прошлых мореносямок наибольшие площади, закрытые мореной, наблюдались в I–III ВМЗ, где моренный материал слился в единый массив, сплошь бронируя орографически левую периферию языка. Однако к 2022 г. основная масса морены оказалась сосредоточенной в III–V ВМЗ.

Немаловажную роль здесь сыграло изменение конфигурации языка вследствие сокращения языковой части ледника Джанкуат, которая стала заметно меньше по площади и круче.

Таблица 1. Площадь моренного покрова по высотно-морфологическим зонам (ВМЗ) в 2022 г.

Table 1. Debris cover area by alti-morphological zones (AMZ) in 2022

№ ВМЗ	Площадь ВМЗ, км ²	Площадь морены, км ²	Доля моренного чехла в площади ВМЗ, %
I	0.005	0.005	96.2
II	0.059	0.046	77.4
III	0.147	0.083	56.5
IV	0.176	0.087	49.6
V	0.238	0.100	42.0
VI	0.142	0.060	42.4
VII	0.309	0.010	3.1
VIII	0.230	0.036	15.6
IX	0.343	0.030	8.9
X	0.304	0.001	0.3
Ледник в целом	2.301	0.458	19.9

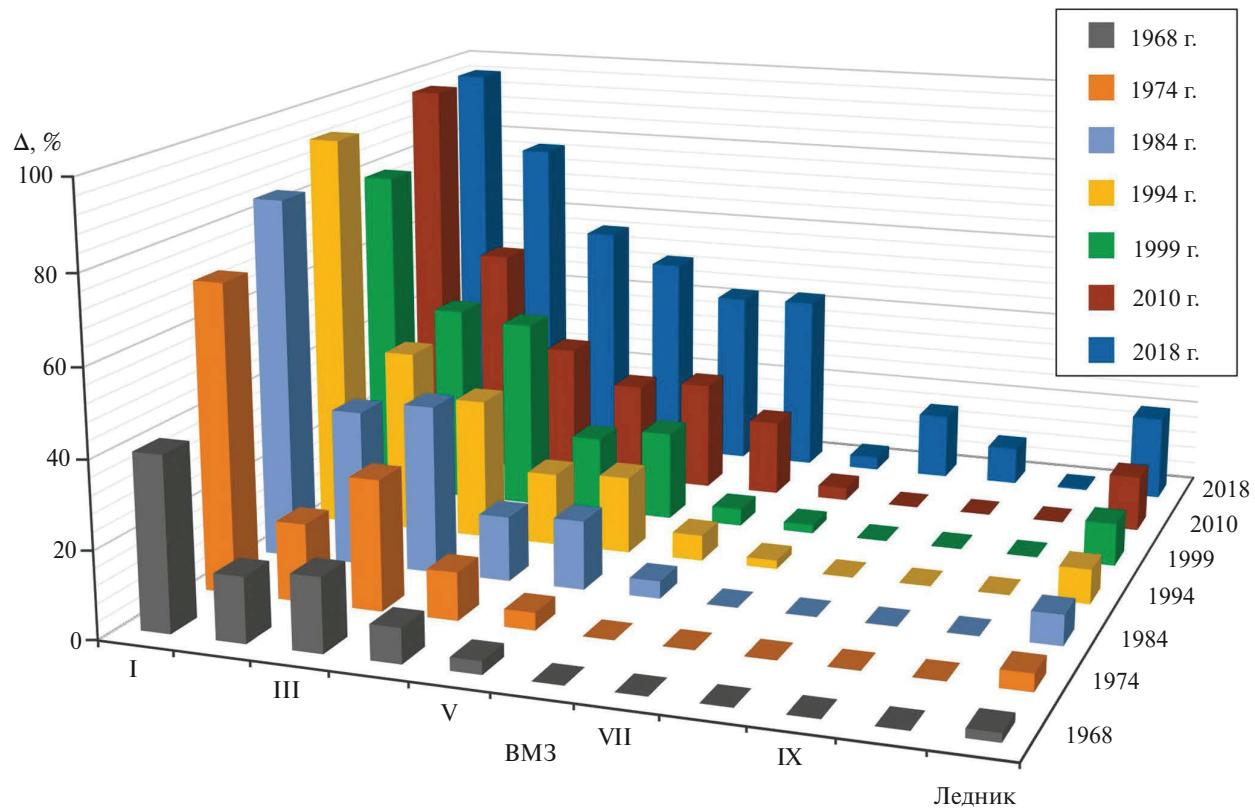


Рис. 3. Динамика приращения заморененной площади ледника Джанкуат и его высотно-морфологических зон (обозначены римскими цифрами по оси абсцисс) по топоосновам разных лет периода 1968–2018 гг.: Δ – доля площади высотно-морфологических зон, перекрытой мореной, %

Fig. 3. The dynamics of debris-covered areal increments for the Djankuat Glacier and its alti-morphological zones (marked by Roman numerals along the abscissa axis) between the topographic maps of different years within the 1968–2022 period. Δ is the percentage of the debris-covered part of an alti-morphological zone

Преимущественно именно за счёт сокращения языка физическая поверхность ледника уменьшилась за 1968–2022 гг. с 3.234 до 2.505 км², а площадь его ортогональной проекции – с 2.990 до 2.299 км². Заметные на рис. 2 колебания соотношений между площадями чистого и заморененного льда в каждой ВМЗ – следствие транспортировки каменных агрегатов течением ледника и перемещения материала из одной ВМЗ в другую, гипсометрически более низкую, либо вообще отложения его за пределы ледника вследствие полного стаивания краевых сегментов. Активизация одних и ослабление других потоков льда на леднике к тому же определяется не только климатическими и орографическими факторами, но и миграцией ледораздела на пригребневом Джантуганском фирновом плато, которая определяет массу льда, поступающего в центральный поток ледника Джанкуат (Алейников и др., 2002).

В итоге за истекшие полвека язык сильно забронировался, а верхняя граница распространения морены обнаружила тенденцию к постоянному повышению. Эта граница выступает в качестве важного входного параметра при моделировании эволюции геометрии и водно-ледовых ресурсов ледника (Postnikova et al., 2023). Разительные перемены в распространении моренного чехла по поверхности ледника Джанкуат связаны не только с интенсификацией поступления литогенного материала, но и с постепенным подъёмом кинематической границы питания, отмечаемым в ходе современной деградации оледенения Кавказа: в результате вытаивание на дневную поверхность самых верхних порций морены регистрируется всё выше и выше по течению ледника.

Увеличение толщины моренного покрова. Главный результат исследования – современная карта толщины моренного покрова (рис. 4), ставшая для ледника Джанкуат четвёртой

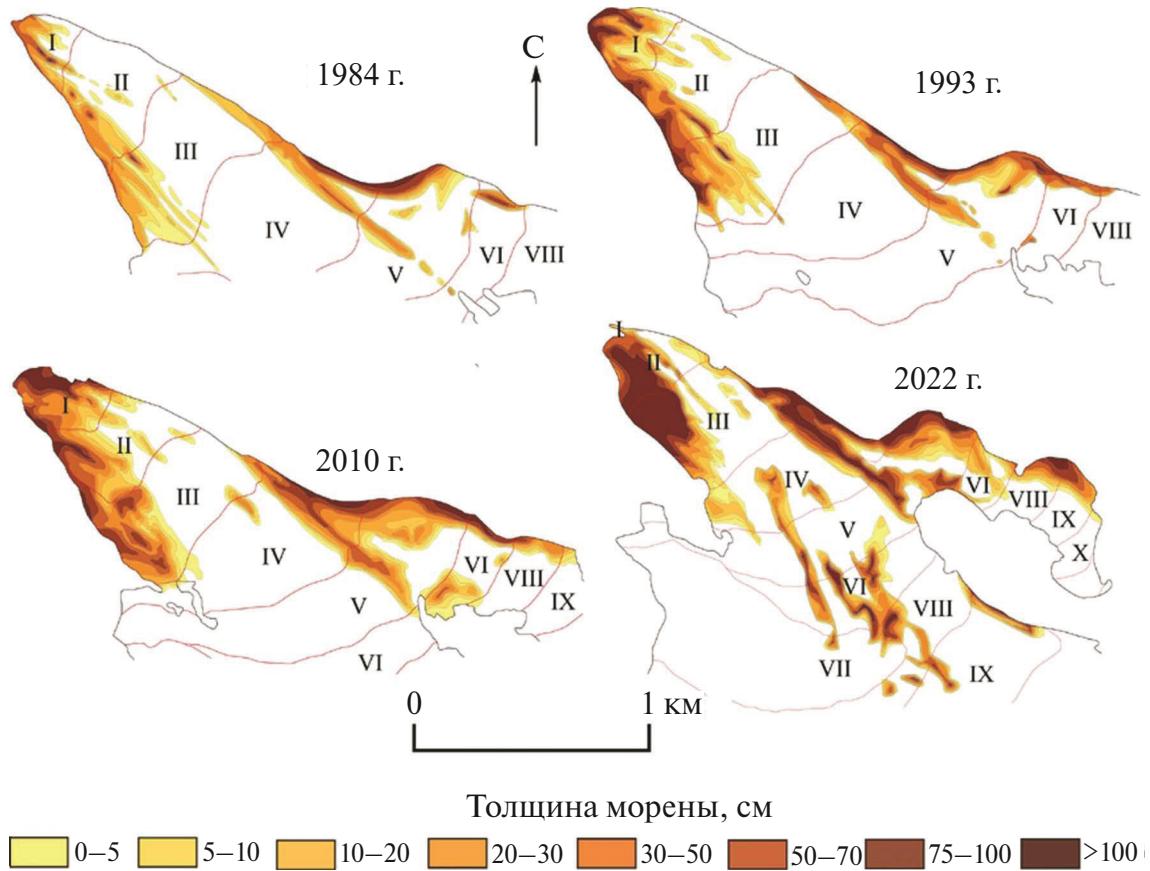


Рис. 4. Толщина поверхностной морены на леднике Джанкуат по материалам мореносъемок разных лет. Римскими цифрами указана нумерация ВМЗ

Fig. 4. Thickness of the superficial moraine on the Djankuat Glacier based on surveys from different years. Roman numerals indicate the numbering of alti-morphological zones

в серии. Наименьшие значения 2–5 см приурочены к внутренней, граничащей с чистым льдом, периферии моренного чехла. Наибольшие же толщины, более 2 м, наблюдаются вдоль центральных осей срединных моренных валов, что отмечалось и в работах предыдущих лет (Popovnin, Rozova, 2002; Поповнин и др., 2015), а также в маргинальных частях языка, где происходит контакт движущейся поверхностной морены с отложенной боковой и где аккумулируется перемещаемый моренный материал, вытаивающий ниже кинематической границы питания.

Осреднённые толщины морены в разных ВМЗ по результатам последней и предыдущих трёх мореносъемок приведены в табл. 2. Видно, что количественно масса литогенного материала по всем зонам преимущественно прирастает. В 2022 г. толщина моренного покрова в I ВМЗ составила в среднем порядка 50 см, что вдвое

меньше значений 2010 г. Это связано с изменением морфометрии самой низкой части языка. Если ранее в данную зону переносилась моренная масса, где она и накапливала в изрядных количествах, то в последующие 12 лет из-за отступления фронта I ВМЗ потеряла большую часть площади, моренный материал которой был отложен за пределами ледника и перешёл в категорию абляционной морены предполья. Теперь I ВМЗ – это лишь крутой лоб, где значительный моренный покров не задерживается.

Кардинальное по сравнению с 2010 г. изменение конфигурации языка вывело в лидеры и по площади, и по толщине чехла II и III ВМЗ. Средняя мощность морены в них принимает значения 84 и 102 см соответственно. На орографически левом фланге языка моренный чехол представлен единственным телом (см. рис. 4), как бы обволакивающим положительные формы ледникового мезорельефа, образованные

Таблица 2. Средние значения толщины моренного покрова (h) и их изменения (Δh) за 1983–2022 гг. по высотно-морфологическим зонам ледника Джанкуат

Table 2. Debris cover thickness (h) and its change over 1983–2022 (Δh), averaged by alti-morphological zones of the Djankuat Glacier

ВМЗ	h , см				Δh , см		
	1983	1994	2010	2022	2010–2022	1994–2022	1983–2022
I	29	45	100	51	-49	+6	+22
II	22	43	51	102	+51	+59	+80
III	14	30	38	84	+46	+54	+70
IV	34	47	51	60	+9	+13	+26
V	31	32	40	53	+13	+21	+22
VI	37	38	42	35	-7	-3	-2
VII	—	—	—	40	+40	+40	+40
VIII	—	—	—	42	+42	+42	+42
IX	—	—	—	40	+40	+40	+40
X	—	—	—	3	+3	+3	+3

благодаря бронирующему и тормозящему подморенное таяние эффекту мощной литогенной оболочки (рис. 5). Здесь же, в III ВМЗ, в 2022 г. был встречен максимум толщины поверхностной морены: он составил 259 см. В настоящий момент этот пояс ледника является главной областью аккумуляции моренного материала.

Наибольшая масса поверхностной морены в IV ВМЗ сосредоточена у правого борта. Она представлена преимущественно отложениями у края ледника и огромным валом срединной морены, который отделяет основное тело ледника от потока льда с г. Уя-тау. К тому же до IV ВМЗ “доехала” полоса обвала 2001 г., вызывая прогрессирующую аккумуляцию обломков у подножья крутых средних зон ледника. Максимальная мощность морены в этой зоне составила 210 см, а среднезональное значение – 60 см.

Морена в V и VI ВМЗ ледника Джанкуат также в основном приурочена к его орографически правой границе и склону г. Уя-тау. Она прижимается к борту ледникового потока и подпитывается постоянными обвалами с освободившихся от льда склонов. Несмотря на значительный угол наклона ледниковой поверхности, вытаивающие здесь ригели тоже способствуют задержанию моренного материала, поступающего из участков выше по течению льда. Другая широко распространённая здесь разновидность форм моренного мезорельефа – каменистые гряды крупных обвалов, транспортируемые ледником. Средняя

толщина морены в V и VI ВМЗ составила соответственно 35 и 53 см, а максимальная – 106 и 119 см.

Данные табл. 2 позволяют сделать вывод об увеличении модальной мощности моренного покрова во всех высотно-морфологических зонах, что подтверждается и спектрами значений h суммарно во всему леднику (рис. 6). Если в 1983 и 1994 гг. по леднику в целом наибольшую площадь занимали скопления материала самых минимальных толщин – градации 0–5 и 5–10 см, то в 2010 г. наибольшая доля морены была приурочена к диапазону 30–50 см, а в 2022 г. и вовсе преобладают толщины более 100 см (19%). Такая закономерность увеличения по площади доли наибольших мощностей находит отражение и в возрастании средней толщины морены по всему леднику: в 1983 г. она равнялась 28 см, в 1994 г. – 39 см, в 2010 г. – 54 см, а в 2022 г. – 60 см, что более чем вдвое превышает значения в начале мониторинга. Среднее значение в 2022 г. выросло не так сильно по сравнению с 2010 г. потому, что значительно увеличилась площадь моренного покрова на языке за счёт “спустившегося” сверху каменного материала крупных обвалов начала 2000-х годов.

Рост объёма моренного материала. Эта же логика прослеживается и в объёме моренной толщи. Наличие данных о площади и толщине морены позволяют оценить её объём V (табл. 3). В 2022 г. он составил почти 276 тыс. m^3 . Наименьшие объёмы характерны для I и X ВМЗ, что

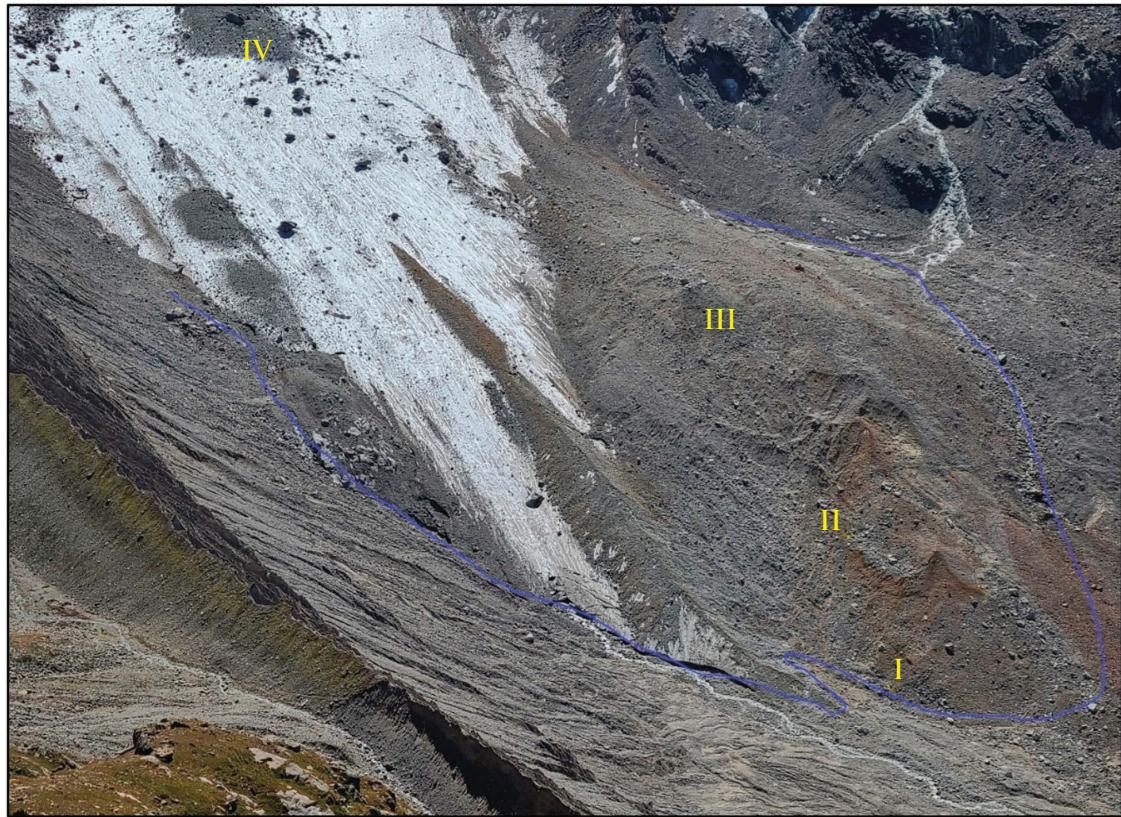


Рис. 5. Моренные отложения на языке ледника Джанкуат. Римскими цифрами обозначены номера ВМЗ. Фото А.С. Губанова (август 2023 г.)

Fig. 5. Morainic deposits on the Djankuat Glacier snout, August 2023. Roman numerals indicate the numbering of altimorphological zones. Courtesy of A.S. Gubanov, Esq.

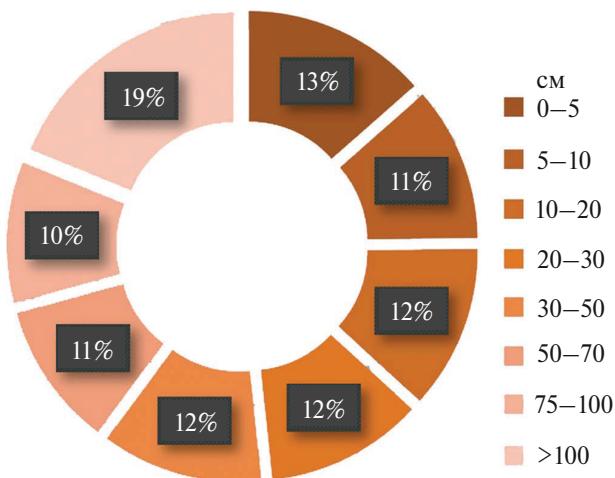


Рис. 6. Доли суммарной заморененной площади ледника (%) на 2022 г., представленные скоплениями каменного материала разной мощности h

Fig. 6. Shares of the total debris-covered glacier area, %, status 2022, represented by stony matter of different thickness h

просто объясняется наименьшими площадями или самой зоны (I ВМЗ), или части, занятой в ней моренным покровом (X ВМЗ). Максимумы же, закономерно для объёма, наблюдаются с III по V ВМЗ, что сходится с максимумами площади морены в зонах (IV и V ВМЗ) либо обязано собой экстремумам толщины моренного чехла (III ВМЗ). Объём моренного покрова на 1968 г., исходя из первой топоосновы 1968 г. и примерной (Ледник Джанкуат, 1978) оценки средней толщины покрова, определён приблизительно в 18 тыс. м³. По итогам первой мореносъёмки в 1983 г. объём поверхностной морены составил уже 70.3 тыс. м³, в 1994 г. – 123.2 тыс. м³, а к 2010 г. увеличился до 169.6 тыс. м³ (табл. 4). Таким образом, за 39 лет между первой и последней мореносъёмками объём морены вырос почти в 4 раза (на 392 %), а по сравнению с 1968 г. – в 15 раз (на 1433 %), несмотря на то что площадь ледника – как физическая, так и ортогонально спроектированная, – значительно сократилась (более чем в 1.5 раза за 1983–2022 гг.).

Таблица 3. Объём (м^3) моренного покрова по ВМЗ и по градациям толщин: результаты мореносямки 2022 г.**Table 3.** Debris volume, m^3 , by AMZs and by graded thickness values: debris survey 2022

№ ВМЗ	0–5 см	5–10 см	10–20 см	20–30 см	30–50 см	50–75 см	75–100 см	100+ см	По ВМЗ в целом
I	4	23	56	92	102	1910	254	0	2440
II	115	260	419	479	856	2260	6325	35 809	46 522
III	312	637	1074	1703	2586	3095	5774	54 279	69 461
IV	263	890	1917	2522	3035	4793	8516	30 631	52 566
V	331	803	1827	2915	6125	7737	10 304	22 901	52 942
VI	213	598	1403	2692	4386	4045	3369	4271	20 975
VII	37	91	149	251	632	946	1373	371	3849
VIII	144	328	843	1406	1924	2522	2358	5481	15 006
IX	98	248	569	1152	2042	2991	3505	1510	12 116
X	25	4	0	0	0	0	0	0	29
Σ	1541	3882	8255	13 211	21 689	30 299	41 777	155 254	275 907

Таблица 4. Объём поверхностной морены (м^3) на леднике Джанкуат, 1968–2022 гг.**Table 4.** Debris volume, m^3 , on the Djankuat Glacier in 1968–2022

Год	Объём морены, тыс. м^3
1968	~18
1983	70.3
1994	123.2
2010	169.6
2022	275.9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной в 2022 г. площадной мореносямки продолжили мониторинг поверхностного моренного чехла ледника Джанкуат. Данные свидетельствуют о продолжении тренда увеличения площади, толщины моренного материала, а также его объёма, несмотря на сокращение площади языка. Как следствие можно констатировать прогрессирующее воздействие чехла морены на баланс массы ледника Джанкуат. Анализ составленной в 2022 г. карты выявляет новую, по сравнению с анализом 2010 г., закономерность распространения моренного материала: растёт роль фактора привноса обломочных агрегатов за счёт обвалов со скал, ранее закрытых ледяной облицовкой, но ныне в результате дегляциации активно подвергающихся выветриванию. Преобладание и разрастание на леднике Джанкуат доли

участков, занятых мореной мощностью более 7 см (толщина, при превышении которой морена начинает ослаблять абляцию), усиливает общее бронирующее воздействие моренного чехла, способствуя тем самым относительному сокращению подморенного стока и в некоторой степени — консервации и сохранению водно-ледовых ресурсов на неблагоприятной для горного оледенения регressiveвой фазе его эволюции.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии” (№ 121051100164-0). Авторы выражают благодарность К.А. Ибраеву и А.М. Чеховских за помощь в получении полевых данных.

Acknowledgements. Research has been undertaken within the framework of the State Assignment “Evolution of the cryosphere under the climate change and anthropogenic impact”, No. 121051100164-0. The authors are grateful to K.A. Ibrayev and A.M. Chehovskikh for their assistance in raw field data obtaining.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алейников А.А., Золотарёв Е.А., Поповин В.В. Распознавание ледораздела на перемётных ледниковых комплексах (Джантуганское плато на Кавказе) // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2002. № 3. С. 36–43.

Золотарёв Е.А., Поповин В.В. Гипсометрия ледника Джанкуат: изменения после МГД (с 1968 по 1984 г.) // Материалы гляциологических исследований. 1993. Вып. 77. С. 58–66.

- Каталог ледников России // Электронный ресурс. <https://sites.google.com/view/glaciersrussia/> Дата обращения: 18.07.2025.
- Ледник Джанкуат / Ред. И.Я. Боярский. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 184 с
- Popovnin V.V., Resepkin A.A., Tuelidze L.G.* Разрастание поверхности морены на языке ледника Джанкуат за период прямого гляциологического мониторинга // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 89–98.
- Resepkin A.A., Popovnin V.V.* О влиянии поверхностной морены на состояние ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) к 2025 г. // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 307–321. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-307-321>
- Ходаков В.Г.* Расчёт аблации льда под слоем морены // Материалы гляциологических исследований. 1972. Вып. 20. С. 105–108.
- Anderson L.S., Armstrong W.H., Anderson R.S., Buri P.* Debris cover and the thinning of Kennicott Glacier, Alaska: in situ measurements, automated ice cliff delineation and distributed melt estimates // The Cryosphere. 2021. V. 15. P. 265–282. <https://doi.org/10.5194/tc-15-265-2021>
- Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V.* Role of debris cover in the thermal physics of glaciers // Journal of Glaciology. 1986. V. 32. № 111. P. 255–266.
- Kunmar P., Mehta M., Basu T., Pant S., Mondal T.S., Rana A.S., Kumar V.* Surface ablation variability and dirt cone development: A case study of the Parkachik and Durung-Drung Glaciers, Zanskar Himalaya, India // Physics and Chemistry of the Earth. 2025 (in press).
- Miles E.S., Steiner J.F., Buri P., Immerzeel W.W., Pellicotti F.* Controls on the relative melt rates of debris-covered glacier surfaces // Environment Research Letters. 2022. V. 17. P. 064004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6966>
- Moeller R., Moeller M., Kukla P.A., Schneider C.* Impact of supraglacial deposits of tephra from Grímsvötn volcano, Iceland, on glacier ablation // Journal of Glaciology. 2016. V. 62. № 235. P. 933–943. <https://doi.org/10.1017/jog.2016.82>
- Nakawo M., Rana B.* Estimate of ablation rate of glacier ice under a supraglacial debris layer // Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography. 1999. V. 81. № 4. P. 695–701. <https://doi.org/10.1111/1468-0459.00097>
- Nakawo M., Young G.J.* Field experiments to determine the effect of a debris layer on the ablation of glacier ice // Annals of Glaciology. 1981. № 2. P. 85–91. <https://doi.org/10.3189/172756481794352432>
- Østrem G.* Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges // Geografiska Annaler. 1959. V. 41. P. 228–230.
- Østrem G., Brugman M.* Glacier mass-balance measurements. Nat. Hydrology Res. Inst. (NHRI) Publ. NHRI Sci. Rep. Saskatoon, Canada. 1991. № 4. 224 p.
- Popovnin V.V., Rozova A.V.* Influence of sub-debris thawing on ablation and runoff of the Djankuat Glacier in the Caucasus // Nordic Hydrology. 2002. V. 33. № 1. P. 75–94. <https://doi.org/10.2166/nh.2002.0005>
- Popovnin V.V., Naruse R.* A 34-year-long record of mass balance and geometric changes of the Djankuat Glacier, Caucasus // Bulletin of Glaciol. Research. 2005. V. 22. P. 113–125.
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M.* Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers // Frontiers in Earth science. 2023. V. 11. P. 1256696. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696>
- Pratap B., Dobhal D.P., Mehta M.* Influence of debris cover and altitude on glacier surface melting: A case study on Dokriani Glacier, Central Himalaya, India // Annals of Glaciology. 2015. V. 56. P. 9–16. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A971>
- Reznichenko N., Davies T., Shulmeister J., McSaveney M.* Effects of debris on ice-surface melting rates: an experimental study // Journal of Glaciology. 2010. V. 56. P. 384–394. <https://doi.org/10.3189/002214310792447725>
- Richardson J.M., Brook M.S.* Ablation of debris-covered ice: some effects of the 25 September 2007 Mt Ruapehu eruption // Journal of Royal Society of New Zealand. 2010. V. 40. P. 45–55.
- Rowan A.V., Egholm D.L., Quincey D.J., Hubbard B., King O., Miles E.S., Miles K.E., Hornsey J.* The role of differential ablation and dynamic detachment in driving accelerating mass loss from a debris-covered Himalayan glacier // Journal of Geophys. Research. Earth Surface. 2021. V. 126. P. 1–20. <https://doi.org/10.1029/2020JF00576101>
- Scherler D., Bookhagen B., Strecker M.R.* Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover // National Geoscience. 2011. № 4. P. 156–159. <https://doi.org/10.1038/NGE01068>
- Tielidze L.G., Bolch T., Wheate R.D., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Zemp M.* Supra-glacial debris cover changes in the Greater Caucasus from 1986 to 2014 // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 585–598.
- Verhaegen Y., Rybak O., Popovnin V.V., Huybrechts P.* Quantifying supraglacial debris-related melt-altering effects on the Djankuat Glacier, Caucasus, Russian Federation // Journal of Geophys. Research: Earth Surface. 2024. V. 129. № 4. P. e2023JF007542.

Citation: Popovnin V.V., Gubanov A.S. Half-century evolution of the debris cover on the Djankuat Glacier, the Caucasus. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (4): 584–596. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040055.

Half-century evolution of the debris cover on the Djankuat Glacier, the Caucasus

© 2025 V. V. Popovnin*, A. S. Gubanov

Lomonosov Moscow State University, Russia

*e-mail: begemotina81@gmail.com

Received July 2, 2025; revised July 26, 2025; accepted September 25, 2025

The ongoing degradation of the Djankuat Glacier is also reflected in the expansion of the debris cover on the ice surface. During the 56 years since the start of direct measurements in 1968, the debris-covered glacier area has grown from 2% to 20%. The layer of superficial moraine changes the structure of the heat balance of the glacier surface, significantly affecting ice ablation. A thin (< 7 cm) cover can lead to increased melting of sub-debris ice, whereas as the debris layer thickens further, melting progressively weakens until complete vanishing after the debris cover thickness exceeds 1.5 m. Based on the results of a field survey of the debris cover in 2022, another, fourth map of the debris thickness was compiled, continuing a series of similar maps as of 1983, 1994 and 2010. The mean debris thickness varies greatly by altitudinal belts, and currently it reaches on average 60 cm throughout the glacier, which is more than twice the average all-glacier value for 1983. Thus, all the 4 debris surveys conducted over the years indicate that the hydrological role of the debris cover has always come down to an unambiguous effect of a general melt-rate weakening for the glacier as a whole. The total volume of moraine material increased 4-fold over the 39-year-long period 1983–2022, up to 275 thousand m³, despite the fact that the glacier area has significantly decreased over the same period by more than 1.5 times for both the physical surface and its orthogonal projection. The acceleration of debris mass growth over the last decade is demonstrated. Activation of denudation processes due to progressive deglaciation of the rock revetment above the firn basin causes a more intensive influx of colluvial material to the glacier. Together with the rise of the kinematic equilibrium line, this leads to an increase in the upper boundary of the debris-covered surface on the glacier.

Keywords: debris cover, glacier, superficial moraine, debris thickness, survey ablation, the Central Caucasus, mass balance, monitoring

REFERENCES

- Aleynikov A.A., Zolotaryov E.A., Popovnin V.V. Ice divide detection on the twinned glaciers: A case study of the Djantugan firn plateau in the Caucasus. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya.* Moscow University Bulletin. Series 5: Geography. 2002, 3: 36–43. [In Russian].
- Zolotaryov E.A., Popovnin V.V. Hypsometry of the Dzhankuat Glacier: its changes after the IHD (1968–1984). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1993, 77: 58–66. [In Russian].
- Glacier Inventory of Russia. Retrieved from: <https://sites.google.com/view/glaciersrussia>. Last access: 18 July 2025. [In Russian].
- Lebednik Dzhankuat.* Djankuat Glacier. Leningrad: Hydro-meteoizdat. 1978: 184 p. [In Russian].
- Popovnin V.V., Rezepkin A.A., Tielidze L.G. Superficial moraine expansion on the Djankuat glacier snout over the direct glaciological monitoring period. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2015, 19 (1): 89–98. [In Russian].
- Rezepkin A.A., Popovnin V.V. Influence of the surface moraine on the state of Djankuat Glacier (Central Caucasus) by 2025. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2018, 58 (3): 307–321. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-307-321>
- Khodakov V.G. A calculation of ice ablation under the moraine layer. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1972, 20: 105–108. [In Russian].
- Anderson L.S., Armstrong W.H., Anderson R.S., Buri P. Debris cover and the thinning of Kennicott Glacier, Alaska: In situ measurements, automated ice cliff delineation and distributed melt estimates. *The Cryosphere.* 2021, 15: 265–282. <https://doi.org/10.5194/tc-15-265-2021>

- Bozhinskiy A.N., Krass M.S., Popovnin V.V.* Role of debris cover in the thermal physics of glaciers. *Journ. of Glaciology.* 1986, 32 (111): 255–266.
- Kunmar P., Mehta M., Basu T., Pant S., Mondal T.S., Rana A.S., Kumar V.* Surface ablation variability and dirt cone development: a case study of the Parkachik and Durung-Drung Glaciers, Zanskar Himalaya, India. *Physics and Chemistry of the Earth.* 2025 (in press).
- Miles E.S., Steiner J.F., Buri P., Immerzeel W.W., Pellicotti F.* Controls on the relative melt rates of debris-covered glacier surfaces. *Environment Research Letters.* 2022, 17: 064004.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6966>
- Moeller R., Moeller M., Kukla P.A., Schneider C.* Impact of supraglacial deposits of tephra from Grímsvötn volcano, Iceland, on glacier ablation. *Journal of Glaciology.* 2016, 62 (235): 933–943.
<https://doi.org/10.1017/jog.2016.82>
- Nakawo M., Rana B.* Estimate of ablation rate of glacier ice under a supraglacial debris layer. *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography.* 1999, 81 (4): 695–701.
<https://doi.org/10.1111/1468-0459.00097>
- Nakawo M., Young G.J.* Field experiments to determine the effect of a debris layer on the ablation of glacier ice. *Annals of Glaciology.* 1981, 2: 85–91.
<https://doi.org/10.3189/172756481794352432>
- Østrem G.* Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges. *Geografiska Annaler.* 1959, 41: 228–230.
- Østrem G., Brugman M.* Glacier mass-balance measurements. National Hydrology Research Institute. Publ. NHRI Sci. Rep. Saskatoon, Canada. 1991, 4: 224.
- Popovnin V.V., Rozova A.V.* Influence of sub-debris thawing on ablation and runoff of the Djankuat Glacier in the Caucasus. *Nordic Hydrology.* 2002, 33 (1): 75–94.
<https://doi.org/10.2166/nh.2002.0005>
- 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, 22: 113–125.
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M.* Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers. *Frontiers in Earth science.* 2023, 11: 1256696.
<https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696>
- Pratap B., Dobhal D.P., Mehta M.* Influence of debris cover and altitude on glacier surface melting: A case study on Dokriani Glacier, Central Himalaya, India. *Ann. Glaciol.* 2015, 56: 9–16.
<https://doi.org/10.3189/2015AoG70A971>
- Reznichenko N., Davies T., Shulmeister J., McSaveney M.* Effects of debris on ice-surface melting rates: An experimental study. *Journ. of Glaciology.* 2010, 56: 384–394.
<https://doi.org/10.3189/002214310792447725>
- Richardson J.M., Brook M.S.* Ablation of debris-covered ice: Some effects of the 25 September 2007 Mt Ruapehu eruption. *Journ. Roy. Soc. of New Zealand.* 2010, 40: 45–55.
- Rowan A.V., Egholm D.L., Quincey D.J., Hubbard B., King O., Miles E.S., Miles K.E., Hornsey J.* The role of differential ablation and dynamic detachment in driving accelerating mass loss from a debris-covered Himalayan glacier. *Journ. of Geophys. Research: Earth Surface.* 2021, 126: 1–20.
<https://doi.org/10.1029/2020JF005761ol>
- Scherler D., Bookhagen B., Strecker M.R.* Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *National Geoscience.* 2011, 4: 156–159.
<https://doi.org/10.1038/Ngeo1068>
- Tielidze L.G., Bolch T., Wheate R.D., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Zemp M.* Supra-glacial debris cover changes in the Greater Caucasus from 1986 to 2014. *The Cryosphere,* 2020, 14: 585–598.
- Verhaegen Y., Rybak O., Popovnin V.V., Huybrechts P.* Quantifying supraglacial debris-related melt-altering effects on the Djankuat Glacier, Caucasus, Russian Federation. *Journ. of Geophys. Research: Earth Surface.* 2024, 129 (4): e2023JF007542.