

О ВЛИЯНИИ ДИНАМИКИ КАМЕННЫХ ГЛЕТЧЕРОВ НА СТОК В БАССЕЙНЕ Р. УЛКЕН АЛМАТЫ (БОЛЬШАЯ АЛМАТИНКА), СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ

© 2024 г. Л. С. Лебедева^{1,2*}, В. П. Капица², Ж. Д. Такибаев², В. В. Гончаренко^{1,2}, В. М. Лыткин¹, А. Н. Камалбекова^{3,4}

¹Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

²Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан

³Институт географии и водной безопасности, Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

* e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

Поступила в редакцию 19.08.2023 г.

После доработки 09.11.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Цель работы — исследование динамики каменных глетчеров и стока воды с них в бассейне р. Улкен Алматы (Большая Алматинка). Скорость смещения поверхности каменного глетчера Моренного выше, чем Городецкого, что связано с его повышенной льдистостью. Каменные глетчеры оказывают существенное влияние на водный режим, температуру и химический состав водотоков, формирующихся выходами воды из них.

DOI: 10.31857/S2076673424010041

ВВЕДЕНИЕ

Каменные глетчеры распространены во многих горных системах мира (Горбунов, Горбунова, 2010). О большом значении каменных глетчеров в формировании речного стока писал ещё А. Corte в 1976 г. (Corte, 1976). Вопрос о вкладе подземного льда каменных глетчеров в речной сток приобретает особую значимость на фоне резкого сокращения ледников и многолетних снежников. В отличие от ледников каменные глетчеры более устойчивы к изменениям климата и могут существовать даже при положительной среднегодовой температуре воздуха. Некоторые авторы (Jones et al., 2019) отмечают, что вытаивание льда каменных глетчеров может быть существенным вкладом в сток рек, однако для количественных оценок необходимы натурные измерения, которые проводятся всего лишь на нескольких каменных глетчерах в мире, преимущественно в Альпах.

Существенная гидрологическая роль каменных глетчеров показана в США на примере нагорья Большой Бассейн (Millar, Westfall, 2019), в Австрийских Альпах (Wagner et al., 2020), Швейцарских Альпах (Kenner et al., 2020), Чилийских Андах (Schaffer et al., 2019) и в Гималаях (Jones et al., 2021). В Альпах происходит постепенный переход от ледникового и снегового питания рек к питанию за

счет каменных глетчеров, подземных вод и жидких осадков (Brighenti et al., 2019). Каменные глетчеры могут играть все более важную роль в формировании водных экосистем альпийских рек в условиях продолжающейся деградации ледников.

Каменные глетчеры широко распространены в горах Центральной Азии, но до сих пор слабо изучены (Горбунов, 2006). Новая волна интереса к каменным глетчерам в XXI в. отчасти связана с их специфической реакцией на происходящие глобальные климатические изменения. На фоне интенсивного сокращения ледников многие каменные глетчеры выросли в размерах и активно наступают (Марченко, 2003; Вилесов и др., 2006; Галанин, 2009). Выявлено (Горбунов и др., 2018), что наиболее крупные залежи подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня сосредоточены в активных каменных глетчерах и современных моренах. Установлено, что объём ледников по отношению к объёму подземных льдов существенно уменьшился в связи с деградацией наземного оледенения, что может говорить о возросшей гидрологической роли каменных глетчеров (Bolch, Marchenko, 2009).

На хребтах северного Тянь-Шаня Иле Алатау (Заилийский Алатау) и Кюнгёй-Ала-Тоо общей площадью более 3000 км² расположен 551 каменный глетчер

(Kaab et al., 2021). Относительно хорошо изученными являются всего лишь несколько каменных глетчеров региона, в том числе расположенные в бассейне р. Улкен Алматы глетчеры Городецкого и Моренный. В 1923 г. Н. Н. Пальгов заложил геодезическую сеть у подножий фронтальных уступов указанных каменных глетчеров и осуществил в 1926 г. повторную тахеометрическую съёмку, определив скорости движения этих форм (Пальгов, 1957). В 1946 и 1960 гг. с этой опорной сети проведены съёмки уступов В. А. Зенковой, а в 1977 и 1994 гг. — сотрудниками Казахской высокогорной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН (Gorbunov et al., 1992). Авторы (Галанин и др., 2017) установили, что наиболее активные генерации каменного глетчера Городецкого находятся в талом состоянии и практически не содержат грунтовых льдов. (Медеу и др., 2021) сделали предварительный вывод о наличии большого количества воды в теле каменного глетчера Моренный, а (Shahgedanova et al., 2020) объяснили расхождение между рассчитанными с помощью гидрологической модели HBV-ETH и фактическими расходами воды р. Улкен Алматы во второй половине лета таянием подземных льдов каменных глетчеров, площадь которых достигает 30% от площади ледников. Полевые исследования стока воды с каменных глетчеров Иле Алатау ранее не выполнялись, за исключением разовых измерений температуры воды и нескольких определений изотопного состава (Галанин и др., 2017).

Цель работы заключалась в выявлении гидрологической роли трёх каменных глетчеров в бассейне р. Озёрная (Северный Тянь-Шань) и оценке динамики двух каменных глетчеров на основе экспедиционных данных 2019, 2021 и 2022 гг.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Гляциально-криогенные комплексы (далее — ГKK) Городецкого, Моренный и Тимофеева расположены в бассейне р. Озёрная (верхняя часть бассейна р. Улкен Алматы) в Иле Алатау (рис. 1). Каждый из них имеет длину более 3 км. Максимальным по размеру является ГKK Городецкого протяженностью почти 5 км. Основными элементами их строения являются несколько небольших ледников в истоках и крупный каменный глетчер в терминальной части, а также сочленяющее поле льдистых морен, подпрудных озёрных котловин и ложбин стока в средней части ГKK. Каменный глетчер (далее — КГ) Городецкого имеет длину около 3 км, КГ Моренный — около 2 км, КГ Тимофеева — около 1,5 км и лежат в интервале абсолютных высот 3030–3770 м над ур. моря. Очертания каменных глетчеров определяются по морфологическим признакам (Горбунов, Горбунова, 2010). Фронтальный уступ каменных глетчеров имеет крутизну естественного откоса и даже превышает её. Их поверхность на всём протяжении покрыта глыбами и щебнем гранитоидов, гранулометрический состав которых распределён неравномерно. Средние

размеры поверхностных обломков варьируют от 0,1 до 1 м. Встречаются участки нагромождения крупных глыб диаметром более 2–3 м.

В области питания каменных глетчеров расположены несколько одноименных ледников. По состоянию на 2022 г. площадь питающих КГ Моренный ледников составила 0,31 км² (четыре небольших ледника), КГ Городецкого — 3,07 км² (два ледника — Городецкий правый и Городецкий левый), КГ Тимофеева — 1,01 км² (ледник Тимофеева).

В краевых частях ледников встречаются подпрудные озёрные котловины, служащие промежуточными ёмкостями ледникового стока. Яркими признаками интенсивного внутреннего дренажа каменных глетчеров являются расположенные в основании фронтального откоса высокодебитные источники воды. КГ Моренный имеет два источника, КГ Городецкого — четыре и КГ Тимофеева — один. Сток осуществляется по хорошо выработанным стабильным руслам с твёрдым дном, покрытым гравийно-галечным материалом и валунами. Рассматриваемые каменные глетчеры относятся к активным.

Оценка движения КГ Городецкого и КГ Моренный основана на сравнении разновременных ортофотопланов, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (далее — БПЛА) DJI Phantom 25–27 августа 2019 г., DJI Mavic Pro 17–18 июня 2021 г. и DJI MATRICE300 RTK DJI Pilot 27 сентября в 2022 г. Полёты БПЛА проходили в автономном и RTK- (Real Time Kinematic) режиме с использованием специального программного обеспечения на высоте 100–300 м над поверхностью, что позволило достичь перекрытия снимков на 70%. В общей сложности для каждого участка исследований было сделано от 400 до 600 снимков. Вследствие ограничений по высоте и длительности полёта БПЛА в исследуемую область была включена только передняя, наиболее активная часть каменных глетчеров. Полученные аэрофотоснимки были обработаны в программах Agisoft PhotoScan и Pix4D. В результате обработки снимков были получены ортофотопланы и цифровые модели рельефа с разрешением 0,5–1,0 см/пикс.

Для оценки неточности измерений скоростей смещения поверхности каменных глетчеров были определены среднеквадратические ошибки (табл. 1) в процессе геометрического выравнивания изображений за рассматриваемые периоды по 15 контрольным наземным точкам, расположенным на окружающей и неизменяющейся поверхности вокруг каменных глетчеров. За эталон был принят ортофотоплан за 2022 г., так как съёмка проводилась с использованием базовой станции в режиме RTK.

Смещение поверхности каменных глетчеров определялось по оценке движения 130 точек, равномерно распределённых на поверхности КГ Моренного, и 163 точек на поверхности КГ Городецкого. В этих точках определены направление и скорость смещения поверхности между датами съёмки.

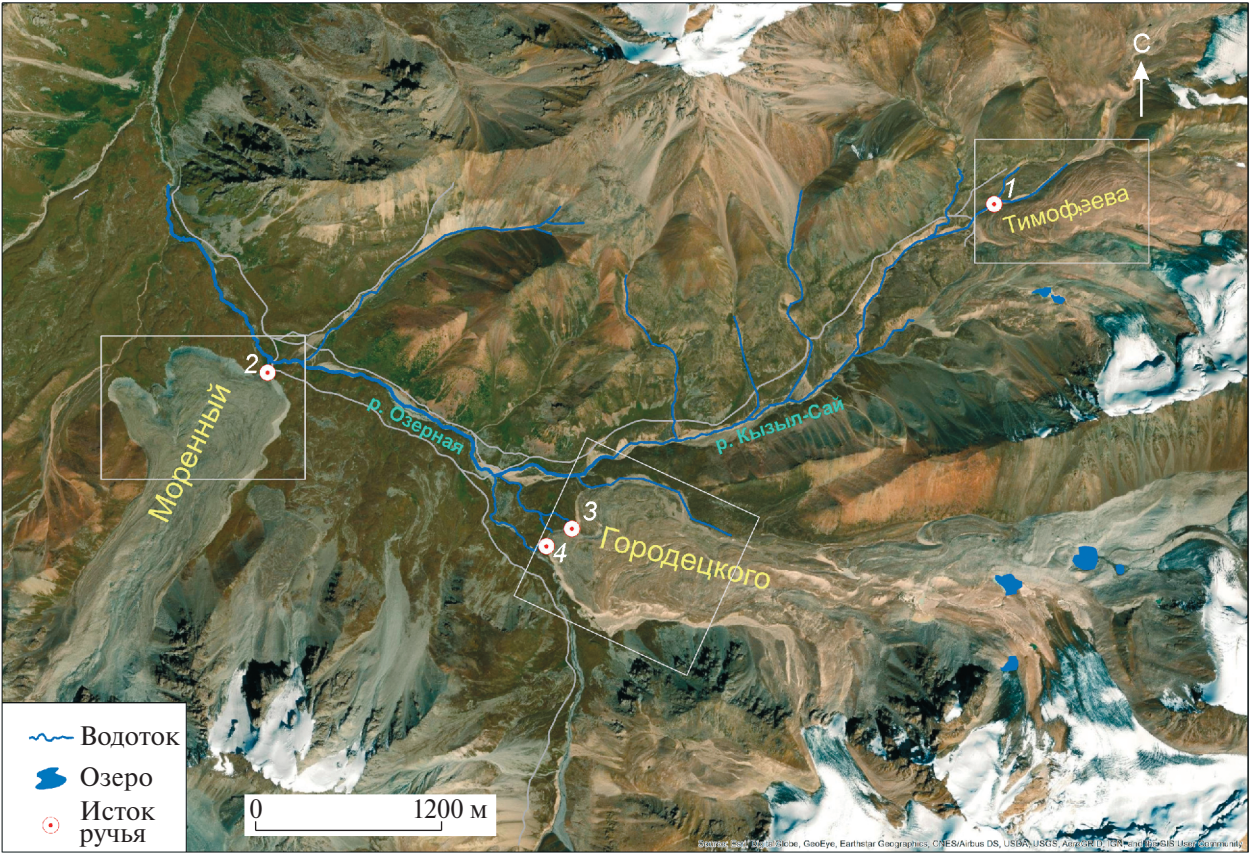


Рис. 1. Схема участка исследования.
Fig. 1. Scheme of the study site.

С помощью метода обратных взвешенных расстояний полученные значения в точках были интерполированы на исследованный фрагмент каменного глетчера в программе ArcMAP.

С 2018/19 г. ведутся автоматизированные измерения температуры воды в местах её выхода из тела КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева с помощью термических логгеров Onset HOBO с интервалом записи 4 часа. Логгеры были установлены на расстоянии от 1 до 3 м от подножия фронтального уступа и закреплены на дне водотока грузом. Один из логгеров на КГ Городецкого имел два температурных датчика: первый записывал температуру воды, а второй температуру воздуха на высоте 40 см от поверхности.

В течение экспедиционных исследований в 2019 и 2021 гг. отбирались пробы воды для определения химического состава — основных ионов и некоторых микрокомпонентов. Также в поле осуществлялись измерения расходов воды с помощью гидрометрической вертушки и ручные определения электропроводности и температуры воды ручьев с каменных глетчеров, ледниковых водотоков, родников и других природных вод в бассейне

Таблица 1. Горизонтальные среднеквадратичные ошибки положения наземных контрольных точек, м

Период анализа	Каменный глетчер Моренный	Каменный глетчер Городецкого
2019–2021	0.26	0.31–0.32
2019–2022	0.24	0.58
2021–2022	0.21	0.41

р. Озёрная с помощью портативного термокондуктометра НМ-200 (Республика Корея).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Движение КГ Городецкого и КГ Моренный. Величины смещения поверхности каменных глетчеров показаны на рис. 2–3. Хотя оба глетчера относятся к категории активных, величины их смещения значительно отличаются. Для рассматриваемых каменных глетчеров характерны контрастные величины смещения осевых и боковых частей.

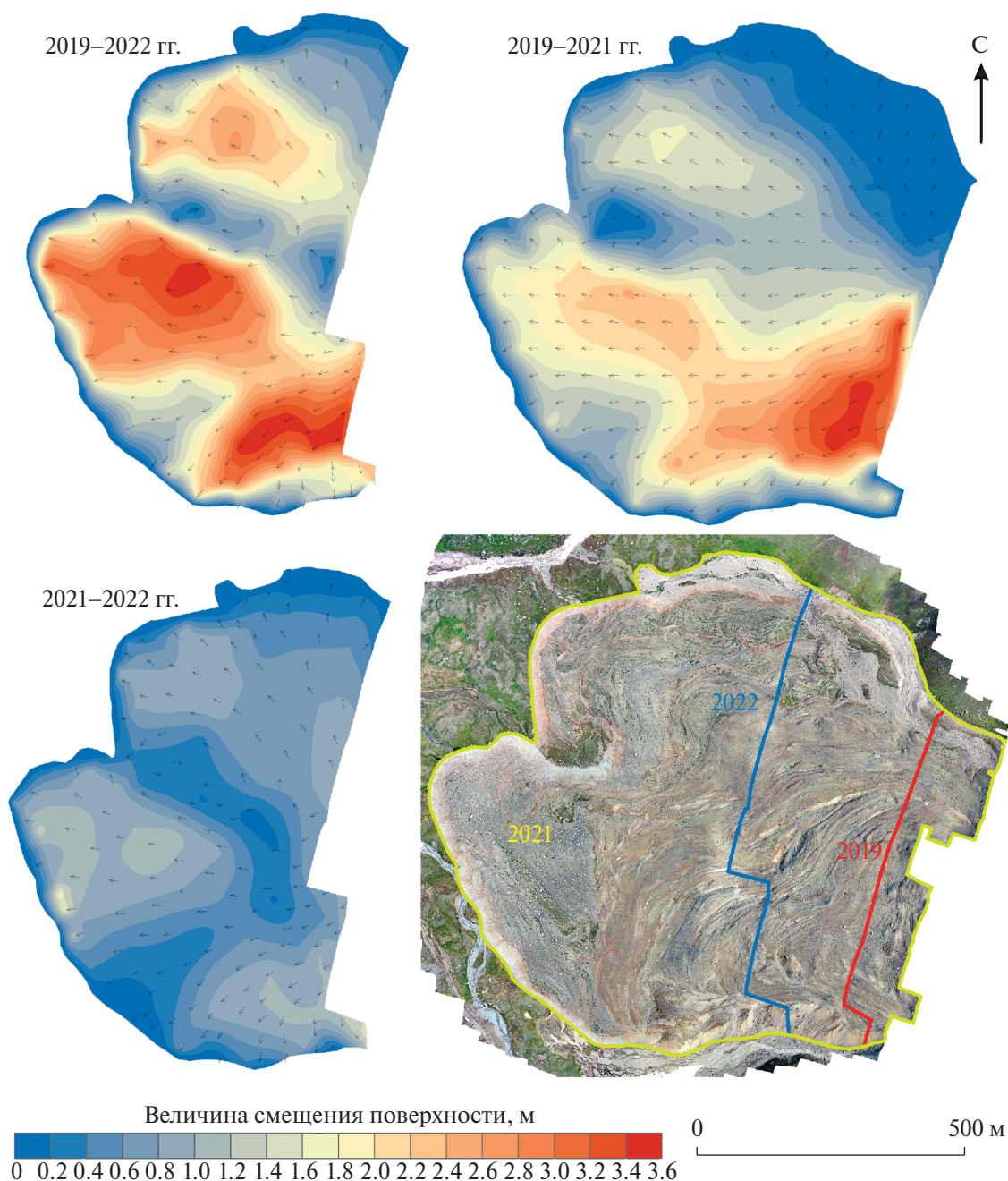


Рис. 2. Величина смещения поверхности каменного глетчера Городецкого за 2019–2022, 2019–2021 и 2021–2022 гг. Цветными линиями показаны области полетов БПЛА в разные годы.

Fig. 2. Surface displacement of Gorodetsky rock glacier for 2019–2022, 2019–2021 and 2021–2022. The colored lines show the areas of UAV flights in different years.

С 2019 по 2022 г. поверхность передней части КГ Городецкого сместилась на величину от 0 до 3.5 м. Выделяется три зоны с максимальными смещениями — на северо-западе (1.8–2.6 м за три года), западе (2.2–3.4 м за три года) и юге (2.2–3.6 м). Северо-западная и западная части движутся преимущественно в северо-западном и западном направлении, южная часть — в южном и юго-западном. Между ними

выделяются относительно стабильные области со смещениями поверхности до 1 м за три года. Более динамичные части выделяются в рельефе крутыми валами и ложбинами, стабильные отличаются более выровненной поверхностью, местами закреплённой растительностью.

Так как в 2020 г. измерения не проводились, годовая оценка скорости смещения поверхности

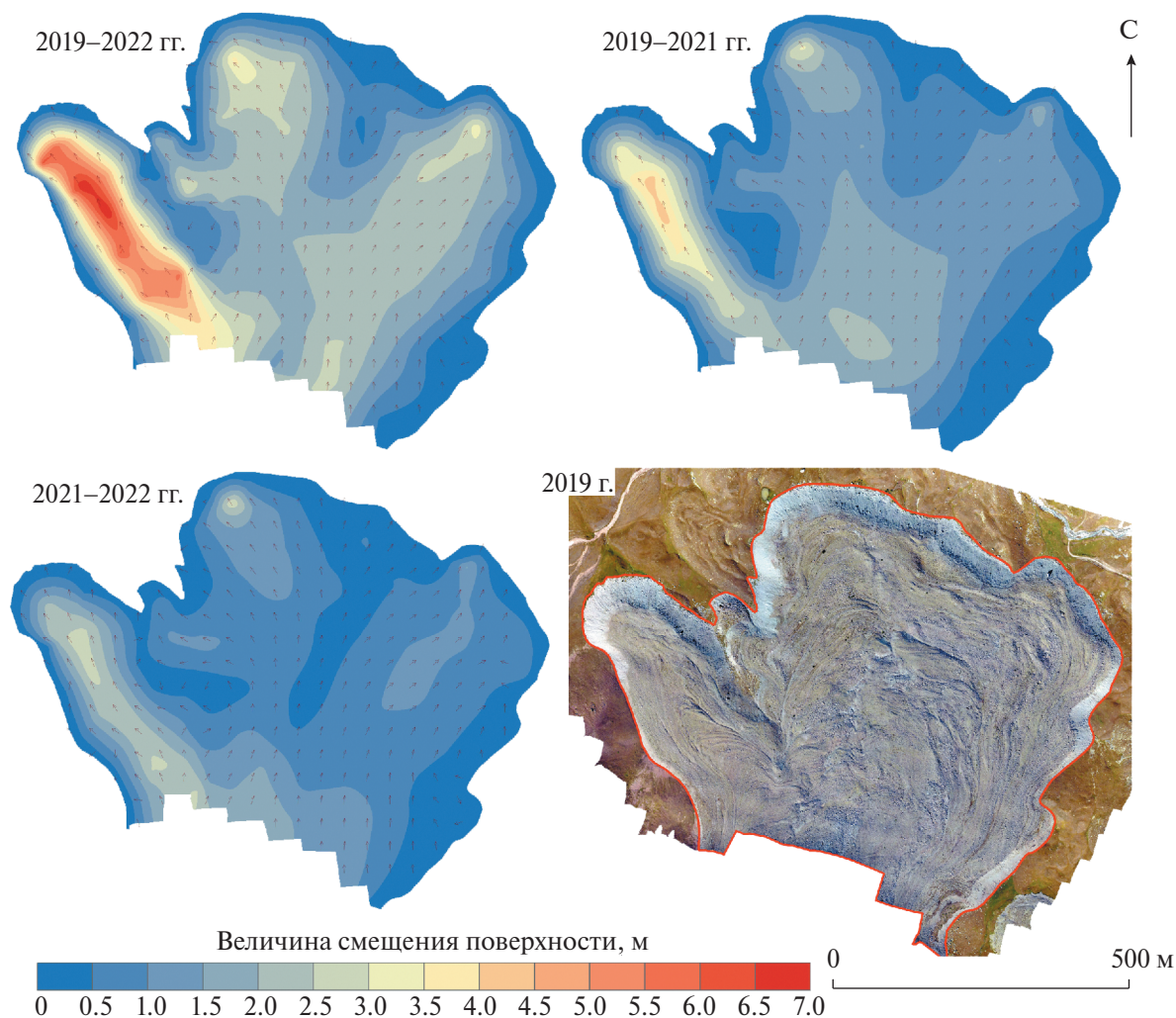


Рис. 3. Величина смещения поверхности каменного глетчера Моренный за 2019–2022, 2019–2021 и 2021–2022 гг.

Fig. 3. Surface displacement of the rock glacier Morenny for 2019–2022, 2019–2021 and 2021–2022.

каменного глетчера между 2019 и 2021 г. усреднена за два года. Она составляет от 0.1 м/год на севере и северо-востоке до 1.2 м/год в западной и до 1.8 м/год в южной части. Между 2021 и 2022 г. пространственные закономерности скорости смещения поверхности сохраняются, а абсолютные значения претерпевают разнонаправленные изменения. Они составляют до 0.9 м/год в северо-западной части, 1.8 м/год в западной и 1.5 м/год в южной.

С 2019 по 2022 г. поверхность передней части КГ Моренный (см. рис. 3) сместилась на величину от 0 до 7 м. Быстрее всего движется западная часть, которая сформировала вытянутое ответвление от основного тела в северо-западном направлении с острыми дугообразными складками. Северная и северо-восточная зоны активного движения характеризуются пониженными смещениями поверхности по сравнению с западной — до 3–3.5 м

за три года. В отличие от КГ Городецкого поверхность КГ Моренного практически не закреплена растительностью даже в зонах с околонулевыми скоростями смещения поверхности.

Средняя годовая оценка скорости смещения поверхности каменного глетчера между 2019 и 2021 г. составляет от 0.6–0.9 м/год в центральной и восточной частях до 1.5 м/год в северной части и до 2 м/год в наиболее активной западной части. С 2021 по 2022 г. поверхность КГ Моренный смещалась со скоростями до 3 м/год в западной и северной частях и до 1.5 м/год в центральной и восточной частях, то есть в среднем скорости в 2021/22 г. были выше, чем в 2019–2021 гг.

Расходы ручьёв. Ручьи, вытекающие из-под КГ Городецкого, имеют высокие расходы, суммарно составлявшие 870–1026 л/с в конце июля 2021 г. Группа сливающихся ручьёв, вытекающих из КГ Городецкого и впадающих в р. Озёрная, имели

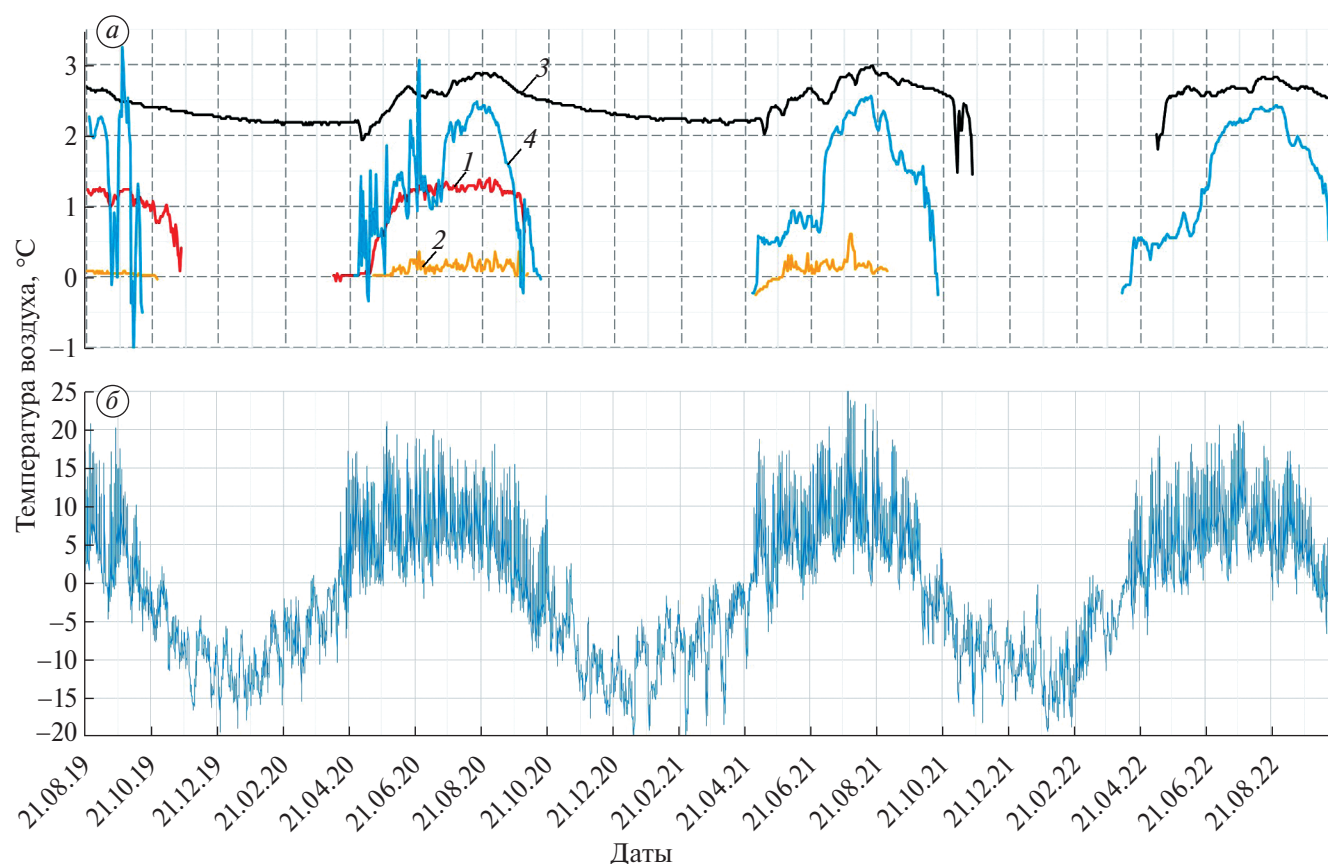


Рис. 4. Температура воды ручьёв, вытекающих из каменных глетчеров (к.г.) (а): 1 — руч. с к.г. Тимофеева, 2 — руч. с к.г. Моренный, 3 — руч. Главный с к.г. Городецкого, 4 — руч. Центральный с к.г. Городецкого; температура воздуха с августа 2019 по октябрь 2022 г. (б).

Fig. 4. Water temperature of streams flowing from rock glaciers (r.g.) (a): 1 — stream from r.g. Tourists, 2 — stream from r.g. Morenny, 3 — stream Main from r.g. Gorodetsky, 4 — stream Central from r.g. Gorodetsky; Air temperature from August 2019 to October 2022 (b).

расход 360 и 440 л/с 25 и 26 июля 2021 г. соответственно. Ручьи из КГ Городецкого, впадающие в р. Кызыл-Сай, имели расход 513 и 586 л/с в эти же даты.

Сток воды с КГ Моренный значительно меньше, чем с КГ Городецкого. Расход ручья составлял 1.7–2.1 л/с 24 и 26 июля 2021 г.

Расходы ручьёв, формирующихся выходами вод из каменных глетчеров, стабильны в течение дня и не имеют выраженной внутрисуточной динамики. Были также измерены расходы ручья, формирующегося без участия каменных глетчеров. Его основным источником питания в июле является таяние ледников в верхней части водосбора. Расход этого ручья составил 4.3 л/с в 9:45 и 45.8 л/с в 16:00 26 июля 2021 г., то есть колебания водности ледниковых ручьёв составляют сотни процентов в течение суток.

Температура воды ручьёв. Температуры воды ручьёв и воздуха показаны на рис. 4. Температурный режим четырёх ручьёв, вытекающих из КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева, отличается и имеет свои характерные особенности.

Ручьи, вытекающие из КГ Городецкого, имеют относительно высокую температуру, которая достигает +2...+3 °С. Температурный режим стока КГ Городецкого наблюдался в трёх источниках. Период их стока и ход температуры различается. Температура воды в главном выходе изменялась от +2...+3 °С с августа 2019 по октябрь 2021 г. с максимальными значениями в августе, минимальными — в марте и апреле. Плавное снижение температуры воды с сентября по апрель примерно на градус свидетельствует о том, что этот выход функционировал круглогодично в 2019–2021 гг. Это единственный из наблюдаемых водотоков, который не перемерзал в эти зимы. В ноябре 2021 г. записанная логгером температура понизилась до отрицательных значений, что говорит о перемерзании источника в месте установки логгера. Сток возобновился в конце апреля 2022 г. Период перемерзания продолжался 138 дней, что на 50 дней меньше, чем период отрицательных среднесуточных температур воздуха. Центральный выход из КГ Городецкого перемерзает ежегодно и имеет температуру воды +0.5...+1 °С

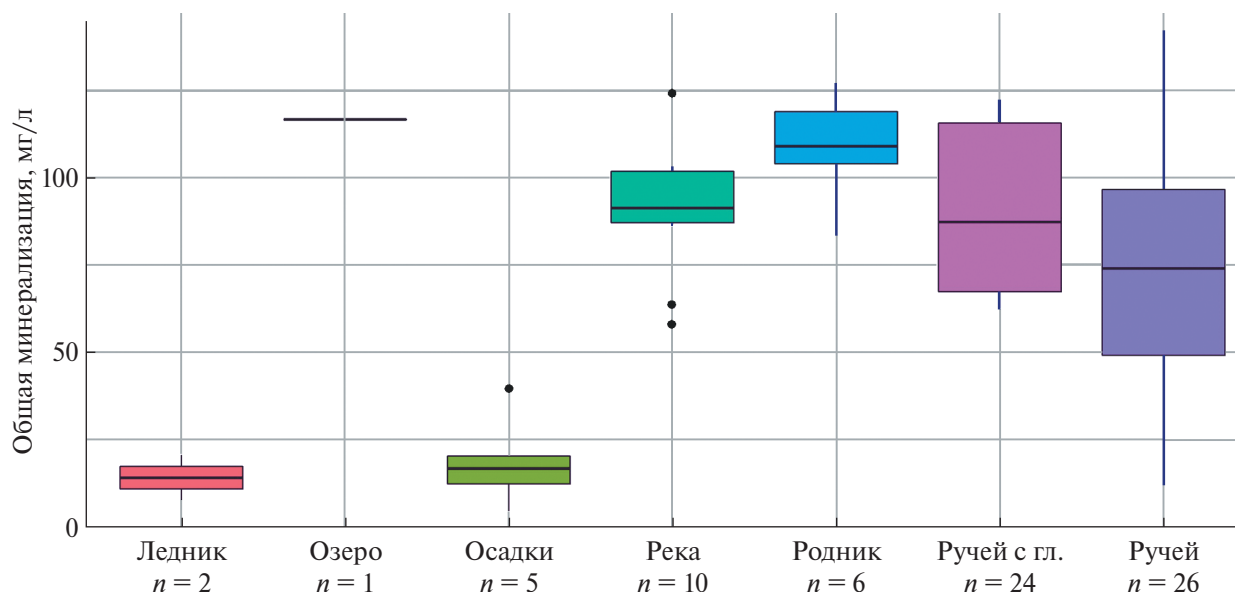


Рис. 5. Диаграммы размаха значений общей минерализации воды, мг/л.

Fig. 5. Diagrams of range of values of water TDS, mg/l.

с начала стока по конец июня и прогревается до $+2...+2.5$ °C в июле и августе. Достаточно резкий подъём температуры воды на $1-2$ °C за $10-15$ дней в начале июля предположительно связан с вытаиванием сезонных льдов в каменном глетчере. Продолжительность стока центрального выхода составляла 172 и 167 дней в 2020 и 2021 гг. соответственно, что на 5 и 9 дней больше, чем период положительных среднесуточных температур воздуха.

Ручей из КГ Моренный имеет околонулевую температуру воды в течение всего сезона стока, которая не превышает $+0.5$ °C. Продолжительность стока в 2020 г. составила 126 дней, что на 41 день меньше, чем продолжительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха.

Ручей с КГ Тимофеева характеризуется температурой воды около $+1$ °C. Логгер установлен на расстоянии нескольких десятков метров от фронтального уступа, что позволяет воде нагреться. Температура воды у её выхода из тела каменного глетчера составляет 0 °C.

Химический состав воды ручьёв. В августе 2019 г. было отобрано 19 проб воды, в июле 2021 г. — 55 проб воды атмосферных осадков, ручьёв, стекающих с каменных глетчеров, выходов подземных вод, снега, льда ледника и двух рек в бассейне р. Озёрная. Все воды относятся к ультрапресным с минерализацией от 4.7 до 142 мг/л (рис. 5). К наиболее минерализованным относятся воды некоторых ручьёв (> 124 мг/л), а также ручья, вытекающего из КГ Моренный (108–121 мг/л), воды озера (116 мг/л) и родники (84–126 мг/л). Самыми разбавленными являются воды ручьёв с ледниковым питанием (12–57 мг/л), жидких

осадков (20–40 мг/л), снега (4.7–17 мг/л) и льда ледника (7.7–20.7 мг/л). Воды ручьёв, стекающих с разных каменных глетчеров, отличаются характерными значениями общей минерализации: 62.7–71.4 мг/л для КГ Городецкого, 108–122 мг/л для КГ Моренного и 103–112 мг/л для КГ Тимофеева. Доля ионов магния относительно понижена в ручьях с КГ Моренный (5–16%), повышена в ручьях с КГ Тимофеева (14–37%) и имеет средние значения в ручьях с КГ Городецкого (11–31%). Доля сульфат-ионов в ручьях с КГ Городецкого выше (5–8%), чем в ручьях с КГ Моренного (2–4%).

Все опробованные воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым (по классификации О. А. Алекина), кроме одной пробы осадков и двух проб снега, которые относятся к гидрокарбонатно-натриевым водам.

ДИСКУССИЯ

Основными факторами, определяющими скорость движения каменных глетчеров, являются льдистость, температура пород, крутизна склона или днища долины и особенности морфологии каменного глетчера (Горбунов, Северский, 2010). Скорости движения обычно имеют пульсационный характер: они меняются по сезонам и от года к году. Оба исследованных каменных глетчера формируют три основные зоны движения в передней части, которые растекаются под разными углами от оси основного направления движения. Для КГ Городецкого это направления от юго-западного до северо-западного, для КГ Моренного — от северо-западного до северо-восточного. Максимальная скорость смещения поверхности

КГ Моренного с 2019 по 2021 г. — 2 м/год, КГ Городецкого — 1.8 м/год. С 2021 по 2022 г. поверхность КГ Моренного смещалась быстрее — с максимальной скоростью 3 м/год, а КГ Городецкого осталась неизменной — около 1.8 м/год. В среднем скорость смещения поверхности КГ Моренный выше, чем КГ Городецкого.

Существующие исследования каменных глетчеров КГ Городецкого и КГ Моренный также указывают на значительные различия в их строении, льдистости и особенностях движения. Выяснено (Kaab и др., 2021), что с 2012 по 2016 г. продвижение фронтального уступа наиболее активных южных частей КГ Городецкого составляло в среднем 0.8 м/год, а поверхностные скорости движения — 1.2 м/год. Наиболее динамичная западная часть КГ Моренный двигалась с поверхностной скоростью до 2 м/год, при этом продвижения фронтального уступа практически не происходило. Результаты нашего исследования указывают на увеличение скоростей смещения поверхности обоих глетчеров в 2021/22 г. по сравнению с предшествующими годами, что согласуется с широко обсуждаемой идеей об активизации движения каменных глетчеров при современных изменениях климата и отступании ледников. Различия в скоростях движения двух рассматриваемых глетчеров связаны с их внутренним строением. По-видимому, маломощный подвижный слой КГ Моренный сползает по относительно стабильному нижнему слою, вероятно высокольдистому, тогда как КГ Городецкого продвигается основной частью своей толщи (Kaab и др., 2021). Это согласуется с выводами (Галанин и др., 2017), что наиболее активная нижняя генерация КГ Городецкого находится в талом и высокообводненном состоянии и практически не содержит грунтовых льдов. Для однозначного описания внутреннего строения каменных глетчеров необходимы дополнительные исследования.

О значительных различиях в льдистости КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева и в распространении многолетнемёрзлых пород свидетельствуют проведённые наблюдения за температурным режимом воды ручьёв. Исследования в Австрийских Альпах показали, что существует прямая связь между температурой стока воды каменных глетчеров и его льдистостью.

Температура воды ручья, вытекающего из активного высокольдистого каменного глетчера, не превышала 1 °С, в то время как у неактивных, в которых лёд практически вытаял, она была выше 1.7 °С (Krainer, 2002; Krainer et al., 2007). Стабильно повышенные температуры ручьёв КГ Городецкого также свидетельствуют об отсутствии многолетнемёрзлых пород и существенных объёмов многолетних подземных льдов в его краевых генерациях, что согласуется с описанными выше результатами исследований (Галанин и др., 2017; Kaab et al., 2021).

Кроме этого, одним из косвенных показателей талого ложа краевой части служит наличие хорошей дренажной сети в теле каменного глетчера, которая проявляется наличием у фронтального откоса нескольких источников с большим расходом воды, один из которых не перемерзает в отдельные зимы. Это свидетельствует о значительных запасах подземных вод в теле каменного глетчера. Аккумуляция воды в теле каменных глетчеров при выпадении аномальных осадков может привести к последующему сбросу накопленной воды вместе с обломочным материалом в виде селевых потоков (Wagner et al., 2020). Так, в 2015 и 2019 гг. в верховьях р. Каргалы сформировались селевые потоки вследствие блокировки подземных каналов стока с оз. Безымянное в тыловой котловине каменного глетчера и последующего прорыва, что привело к подтоплению улиц, домов и автотранспорта г. Алматы (Докукин и др., 2020).

Малые расходы ручья КГ Моренный и его стабильно низкие температуры воды, наличие одного источника на всём протяжении фронтального уступа предполагают ограниченные запасы подземных вод в нём, наличие крупных блоков внутриглетчерных льдов и многолетнемёрзлых пород в отличие от КГ Городецкого. Кроме этого, проведённые в 2020 г. геофизические исследования (Желтенкова и др., 2020) методами ВЭЗ и ЗСБ в средней части КГ Моренный показали наличие высокоомных и высокополяризуемых пород с мощностью от 7 до 18 м, что свидетельствует о высокой льдистости этих горизонтов.

Различное соотношение основных ионов в химическом составе воды ручьёв, стекающих с каменных глетчеров, говорит о различных источниках их питания, различиях в химическом составе вмещающих пород и времени взаимодействия воды с породами, что также связано с отличительными особенностями строения, льдистости и динамики.

Отобранные пробы природных вод в бассейне р. Озёрная не позволяют однозначно судить о вкладе вытаявающих подземных льдов каменных глетчеров в сток воды, однако характерный химический состав ручьёв, стекающих с каждого каменного глетчера, их уровенный и температурный режим позволяют сделать вывод о трансформации стока за счёт влияния каменного глетчера. Трансформация стока выражается в отсутствии суточных колебаний уровня и температуры воды, а также в повышенной общей минерализации воды по сравнению с ручьями, где преобладает ледниковое питание. Обладая более или менее значительными запасами подземных вод, каменные глетчеры могут играть важную роль в поддержании речного стока в периоды пониженной водности рек.

ВЫВОДЫ

Максимальная скорость смещения поверхности КГ Моренный — 2–3 м/год, КГ Городецкого — 1.8 м/год. В среднем скорость смещения поверхности КГ Моренный выше, чем КГ Городецкого, что может быть связано с его повышенной льдистостью. Выявленное увеличение скоростей смещения поверхности обоих каменных глетчеров в 2021/22 г. по сравнению с предшествующими годами согласуется с широко обсуждаемой идеей об ускорении движения каменных глетчеров при современных изменениях климата и отступании ледников.

Каменные глетчеры оказывают существенное влияние на водный режим, температуру и химический состав водотоков, формирующихся выходами воды из них. Они отличаются практически полным отсутствием внутрисуточных колебаний уровня, температуры и удельной электропроводности воды, которые ярко выражены в летний период у рек и ручьёв с ледниковым питанием. Некоторые выходы воды из КГ Городецкого не замерзают зимой, что говорит о значительных запасах подземных вод в его теле. Воды каждого из трёх изученных каменных глетчеров отличаются характерной минерализацией, температурой и соотношением основных ионов. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока в периоды пониженной водности рек.

Благодарности. Работа выполнялась за счёт проекта НИОКТР 122012400106-7 “Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования”, проекта НИОКТР 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене” и при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта ИРН BR18574176 “Ледниковые системы трансграничных бассейнов Центральной Азии: состояние, современные и прогнозные изменения, роль в обеспечении водной безопасности стран региона”.

Acknowledgments. The work was funded by the project NIOKTR122012400106-7 “Groundwater of the permafrost zone: patterns of formation and regime, features of interaction with surface water and frozen rocks, prospects for use”, project NIOKTR122011800064-9 “Structure and key stages in the evolution of the continental permafrost zone in the Neopleistocene and Holocene” and Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR18574176) “Glacier systems of transboundary basins of Central Asia: state, current and forecast changes, role in ensuring water security of the countries of the region”.

ЛИТЕРАТУРА

- Вилесов Е. Н., Горбунов А. П., Морозова В. Н., Северский Э. В. Деграляция оледенения и криогенез на современных моренах Северного Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 1. С. 69–73.
- Галанин А. А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 49–61.
- Галанин А. А., Оленченко В. В., Христофоров И. И., Северский Э. В., Галанина А. А. Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 4. С. 58–74. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4\(58-74\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74))
- Горбунов А. П., Горбунова И. А. География каменных глетчеров мира. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 131 с.
- Горбунов А. П., Железняк М. Н., Северский Э. В. Оценка объемов подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 6. С. 35–44.
- Горбунов А. П., Северский Э. В. Скорости движения и деформации каменных глетчеров // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 69–75.
- Горбунов А. П. Каменные глетчеры азиатской России // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 1. С. 22–28.
- Докукин М. Д., Беккиев М. Ю., Калов Р. Х., Савернюк Е. А., Черноморец С. С. Каменные глетчеры — очаги формирования катастрофических селей // ГеоРиск. 2020. Т. XIV. № 2. С. 52–65.
- Желтенкова Н. В., Гагарин В. Е., Кошурников А. В., Набиев И. А. Режимные геокриологические наблюдения на высокогорных перевалах Тянь-Шаня // Арктика и Антарктика. 2020. № 3. С. 25–43.
- Марченко С. С. Криолитозона Северного Тянь-Шаня: прошлое, настоящее, будущее. Якутск: ИМЗ СО РАН. 2003. 106 с.
- Медеу А. Р., Пиманкин А. В., Гонтарь М. И., Пиманкина Н. В. Предварительные результаты геофизического исследования каменного глетчера Моренный // География и водные ресурсы. 2021. № 4. С. 5–9.
- Пальгов Н. Н. Наблюдения над движением одного из каменных глетчеров хребта Джунгарского Алатау // Изв. АН КазССР. Серия геологическая. 1957. № 2. С. 195–207.
- Bolch T., Marchenko S. Significance of Glaciers, Rockglaciers, and Ice-Rich Permafrost in the Northern Tien Shan as Water Towers under Climate Change Conditions // Proceedings of Workshop ‘Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia, Almaty, Kazakhstan, 28–30 November 2006, IHP-HWRP: Koblenz, Germany, 2009. P. 199–211.
- Brighenti S., Tolotti M., Bruno M. C., Wharton G., Pusch M. T., Bertoldi W. Ecosystem shifts in Alpine streams under

- glacier retreat and rock glacier thaw: A review // *Sci. Total Environ.* 2019. № 675. P. 542–559.
- Corte A. Rock glaciers // *Biuletin Periglacialny.* 1976. № 26. P. 125–127
- Jones D., Harrison S., Anderson K., Shannon S., Betts R. Rock glaciers represent hidden water stores in the Himalaya // *Sci. Total Environ.* 2021. № 793. 145368.
- Jones D. B., Harrison S., Anderson K., Whalley W. B. Rock glaciers and mountain hydrology: A review // *Earth-Science Rev.* 2019. № 193. P. 66–90.
- Gorbunov, A.P., Titkov, S.N., Polyakov, V. G. Dynamics of rock glaciers of the Northern Tien Shan and the Djungar Ala Tau, Kazakhstan. *Permafrost Periglac.* 1992. № 3. P. 29–39.
- Kääb A., Strozzi T., Bolch T., Caduff R., Trefall H., Stoffel M., Kokarev A. Inventory and changes of rock glacier creep speeds in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s // *The Cryosphere.* 2021. № 15. P. 927–949.
- Kenner R., Pruessner L., Beutel J., Limpach P., Phillips M. How rock glacier hydrology, deformation velocities and ground temperatures interact: Examples from the Swiss Alps // *Permafrost and Periglac Process.* 2020. № 31. P. 3–14.
- Krainer K. Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps // *Arctic, Antarctic and Alpine Research.* 2002. № 34 (2). P. 142–149.
- Krainer K., Mostler W., Spötl C. Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach // *Austrian Journ. of Earth Sciences.* 2007. № 100. P. 102–112.
- Schaffer N., MacDonell S., Réveillet M. Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes // *Reg Environ Change.* 2019. № 19. P. 1263–1279.
- Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z., Wade A., Yaitskaya N., Zhumabayev D. Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // *Water.* 2020. № 12 (3). P. 627.
- Wagner T., Brodacz A., Krainer K., Winkler G. Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps // *Grundwasser.* 2020. № 25. P. 215–230.

Citation: Lebedeva L. S., Kapitsa V. P., Takibaev Z. D., Goncharenko V. V., Lytkin V. M. Water flow and dynamics of rock glaciers in the Northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2024, 64 (1): 054–065. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010041

On the influence of rock glacier dynamics on the runoff in basin of the Ulken Almaty (Bolshaya Almatinka) River, Northern Tien Shan

L. S. Lebedeva^{a, b, #}, V. P. Kapitsa^b, Z. D. Takibaev^b, V. V. Goncharenko^{a, b},
V. M. Lytkin^a, A. N. Kamalbekova^{c, d}

^aMelnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

^bCentral Asian Regional Glaciological Center category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan

^cInstitute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan

^dAl-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

[#]e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

Received August 19, 2023; revised November 9, 2023; accepted March 31, 2024

The purpose of the work was to study the dynamics of mountain stone glaciers and streams flowing down from them for an understanding their hydrological significance. Two glaciers: Morenny and Gorodetsky, were analyzed, both located in the river Ulken Almaty (Big Almatinka) basin, Northern Tien Shan. On the average, the rate of surface displacement of the Morennoye glacier is higher than that of the Gorodetsky, which is associated with increased ice content of the last one. The increase in rates of surface displacement of both stone glaciers revealed in 2021–2022 when compared to previous years turned out to be consistent with the widely discussed idea of intensification of such glaciers dynamics under the present-day climate changes and glacier retreats. It was found that the stone glaciers have a pronounced influence on the water regime, temperature and chemical composition of watercourses formed by water running out from them. They are distinguished by the almost complete absence of intraday fluctuations

in the level, temperature, and specific electrical conductivity of water, which are more pronounced in rivers and streams with glacial alimentation during the summer time. Some waterflows from the Gorodetsky glacier do not freeze in winter, which is indicative of significant groundwater reserves in its body. The waters of each of the above stone glaciers differ in their characteristic mineralization, temperature, and the ratio of the major ions. The stable water flow from such glaciers can play an important role in maintaining a river runoff during periods of the low stream discharge.

Keywords: rock glacier, displacements rate, water flow, Northern Tien Shan, water source, hydrochemical tracer

REFERENCES

- Vilesov E. N., Gorbunov A. P., Morozova V. N., Sever-sky E. V. Degradation of glaciation and cryoceneses of modern moraines in the northern Tien Shan. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2006, 10 (1): 69–73 [In Russian].
- Galanin A. A. Rock glaciers of the North-Eastern Asia: mapping and geographical analysis. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2009, 13 (4): 49–61. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4\(58-74\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74)) [In Russian].
- Galanin A. A., Olenchenko V. V., Khristoforov I. I., Sever-sky E. V., Galanina A. A. Highly dynamic rock glaciers of Tien Shan. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2017, 21 (4): 58–74 [In Russian].
- Gorbunov A. P., Gorbunova I. A. *Geografiia kamennykh gletcherov mira*. Geography of rock glaciers of the world. Moscow: Association of Scientific Publications KMK, 2010: 131 p. [In Russian].
- Gorbunov A. P., Zheleznyak M. N., Seversky E. V. Estimate of the volume of ground ice in the Tien Shan mountains. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2018, 22 (6): 35–44 [In Russian].
- Gorbunov A. P., Seversky E. V. Rates of movements and deformations of rock glaciers. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2010, 14 (1): 69–75 [In Russian].
- Gorbunov A. P. Rock glaciers of the Asian Russia. *Kriosfera Zemli*. Earth's cryosphere. 2006, 10 (1): 22–28 [In Russian].
- Dokukin M. D., Bekkiev M. Yu., Kalov R. Kh., Saver-nyuk E. A., Chernomorets S. S. Rock glaciers as origination sites of the catastrophic debris flows. *GeoRisk World*. 2020, 14 (2): 52–65 [In Russian].
- Zheltenkova N. V., Gagarin V. E., Koshurnikov A. V., Nabiev I. A. Regime geocryological observations of the high altitude mountain passes of Tien Shan. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2020, 3: 25–43 [In Russian].
- Marchenko S. S. *Kriolitizona severnogo Tyan-Shania: proshloe, nastoyashee i budushee*. Cryolithozone of the Northern Tien Shan: past, present and future. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS. 2003: 106 p. [In Russian].
- Medeu A. R., Pimankin A. V., Gontar M. I., Piman-kina N. V. Preliminary results of a geophysical study of the Morenny rock glacier. *Geographya i vodnye resursy*. Geography and water resources. 2021, 4: 5–9 [In Russian].
- Palgov N. N. Observations on the movement of one of the rock glaciers of the Dzhungar Alatau ridge. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologicheskaya*. Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Geological series. 1957, 2: 195–207 [In Russian].
- Bolch T., Marchenko S. Significance of Glaciers, Rockglaciers, and Ice-Rich Permafrost in the Northern Tien Shan as Water Towers under Climate Change Conditions. Proceedings of Workshop 'Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia, Almaty, Kazakhstan, 28–30 November 2006, IHP-HWRP: Koblenz, Germany, 2009: 199–211.
- Brighenti S., Tolotti M., Bruno M. C., Wharton G., Pusch M. T., Bertoldi W. Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw: A review. *Sci. Total Environ*. 2019, 675: 542–559.
- Corte A. Rock glaciers. *Biuletin Periglacialny*. 1976, 26: 125–127.
- Jones D., Harrison S., Anderson K., Shannon S., Betts R. Rock glaciers represent hidden water stores in the Himalaya. *Sci. Total Environ*. 2021, 793: 145368.
- Jones D. B., Harrison S., Anderson K., Whalley W. B. Rock glaciers and mountain hydrology: A review. *Earth-Science Rev*. 2019, 193: 66–90.
- Gorbunov A. P., Titkov S. N., Polyakov V. G. Dynamics of rock glaciers of the Northern Tien Shan and the Djungar Ala Tau, Kazakhstan. *Permafrost Periglac*. 1992, 3: 29–39.
- Käb A., Strozzi T., Bolch T., Caduff R., Trefall H., Stoffel M., Kokarev A. Inventory and changes of rock glacier creep speeds in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s. *The Cryosphere*. 2021, 15: 927–949.
- Kenner R., Pruessner L., Beutel J., Limpach P., Phillips M. How rock glacier hydrology, deformation velocities and ground temperatures interact: Examples from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglac Process*. 2020, 31: 3–14.

- Krainer K.* Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 2002, 34 (2): 142–149.
- Krainer K., Mostler W., Spötl C.* Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach. *Austrian Journ. of Earth Sciences*. 2007, 100: 102–112.
- Schaffer N., MacDonell S., Réveillet M.* Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Reg Environ Change*. 2019, 19: 1263–1279.
- Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z., Wade A., Yaitskaya N., Zhumabayev D.* Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia. *Water*. 2020, 12 (3): 627.
- Wagner T., Brodacz A., Krainer K., Winkler G.* Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps. *Grundwasser* 2020, 25: 215–230.