

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 7th International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024



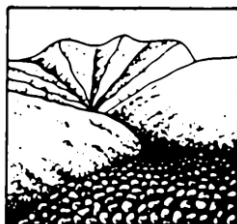
Edited by
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2024

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

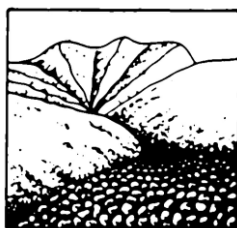
ООО «Геомаркетинг»
Москва
2024

泥石流： 灾害、风险、预测、防治

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日



編輯者

S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC

莫斯科

2024

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

泥石流：灾害、风险、预测、防治。 會議記錄 第七届国际会议. 中国成都。 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association



Особенности формирования стока ручьев каменных глетчеров Северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан

Л.С. Лебедева^{1,2}, В.В. Гончаренко^{1,2}

¹*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия,
lyudmilaslebedeva@gmail.com*

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

Аннотация. 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. Так, в 2015 и 2019 г. 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 близ г. Алматы. Целью нашей работы является исследование стока воды с каменных глетчеров в бассейне р. Улкен Алматы (Большая Алматинка), Северный Тянь-Шань. В 2023 г. было отобрано 90 проб воды из ручьев, рек, источников подземных вод и атмосферных осадков, велись автоматизированные измерения температуры и электропроводности воды в местах ее выхода из тела каменных глетчеров Городецкого и Моренный, осуществлялись ручные измерения расходов воды ручьев каменных глетчеров. 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 ручьев с ледниковым питанием. Некоторые выходы воды из каменного глетчера Городецкого не замерзают зимой, что говорит о значительных запасах подземных вод в его теле. Воды каждого из трех изученных каменных глетчеров отличаются характерной минерализацией, температурой и соотношением основных ионов. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока.

Ключевые слова: каменные глетчеры, Северный Тянь-Шань, механизмы формирования стока, гидрологический режим, химический состав воды, температура воды

Ссылка для цитирования: Лебедева Л.С., Гончаренко В.В. Особенности формирования стока ручьев каменных глетчеров Северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 273–284.

Streamflow formation of the rock glacier creeks in the Northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan

L.S. Lebedeva^{1,2}, V.V. Goncharenko^{1,2}

¹*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia, lyudmilaslebedeva@gmail.com*

²*Central Asian Regional Glaciological Centre as a category 2 under the auspices
of UNESCO, Almaty, Kazakhstan*

Abstract. The accumulation of water within the body of rock glaciers following abnormal precipitation can lead to the subsequent discharge of the accumulated water along with debris material in the form of debris flows. Thus, in 2015 and 2019, debris flows were formed in the upper reaches of the Kargaly River due to the blockage of underground



drainage channels from Lake Bezimyannoe in the rear basin of the rock glacier and the subsequent breakthrough, which led to the flooding of streets, houses, and vehicles near the city of Almaty. The aim of our work is to study the water runoff from rock glaciers in the Ulken Almaty river basin (Bolshaya Almatinka), Northern Tian Shan. In 2023, 90 water samples from streams, rivers, groundwater sources, and atmospheric precipitation were collected, automated measurements of water temperature and electrical conductivity at the Gorodetsky and Moraine rock glaciers creeks were carried out, and manual measurements of water discharges of rock glacier streams were performed. Rock glaciers have a significant impact on the water regime, temperature, and chemical composition of water. Rock glacier creeks are characterized by almost complete absence of intraday fluctuations in level, temperature, and specific electrical conductivity of water, which are pronounced in the summer period for rivers and streams with glacial feeding. Some water exits from the Gorodetsky rock glacier do not freeze in winter, indicating significant groundwater reserves within its body. The waters from each of the three studied rock glaciers differ in mineralization, temperature, and the ratio of major ions. The stable runoff from rock glaciers can play an important role in maintaining river flow.

Key words: *rock glaciers, Northern Tian Shan, runoff formation mechanisms, hydrological regime, water chemical composition, water temperature*

Cite this article: Lebedeva L.S., Goncharenko V.V. Streamflow formation of the rock glacier creeks in the Northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 273–284.

Введение

Каменные глетчеры распространены во многих горных системах мира [Горбунов и Горбунова, 2010]. О большом значении каменных глетчеров в формировании речного стока писал еще 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. Jones и соавт. [2019] отметили, что вытаявание 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]. А.П. Горбунов и соавт. [2018] выявили, что наиболее крупные залежи подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня сосредоточены в активных каменных глетчерах и современных моренах. Установлено, что объем ледников по отношению к объему 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 Кюнгей-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 съемку, определив скорости движения этих форм [Пальгов, 1957]. В 1946 и 1960 г. с этой опорной сети были проведены съемки уступов В.А. Зенковой, а в 1977 и 1994 г. – сотрудниками Казахской высокогорной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН [Gorbunov et al., 1992]. А.А. Галанин и соавт. [2017] установили, что наиболее активные генерации каменного глетчера Городецкого находятся в талом состоянии и практически не содержат грунтовых льдов. А.Р. Медеу и соавт. [2021] сделали предварительный вывод о наличии большого количества воды в теле каменного глетчера Моренный. М. Shahgedanova и соавт. [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].

Объекты исследования

Гляциально-криогенные комплексы (ГКК) Городецкого, Моренный и Тимофеева расположены в бассейне реки Озерная (верхняя часть бассейна р. Улкен Алматы) в Иле Алатау (рис. 1). Каждый из них имеет длину более 3 км. Максимальным по размеру является ГКК 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 озерных котловин и ложбин стока в средней части ГКК. Каменный глетчер (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 н.у.м. Очертания каменных глетчеров определяются по морфологическим признакам [Горбунов и Горбунова, 2010]. Фронтальный уступ каменных глетчеров имеет крутизну естественного откоса и даже превышает ее. Их поверхность на всем протяжении покрыта глыбами и щебнем гранитоидов, гранулометрический состав которых распределен 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 озерные котловины, служащие промежуточными емкостями 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 твердым дном, покрытым гравийно-галечным материалом и валунами. Рассматриваемые каменные глетчеры относятся к активным. Ручьи, образуемые источниками КГ, впадают в р. Кысыл-Сай и Озерную.

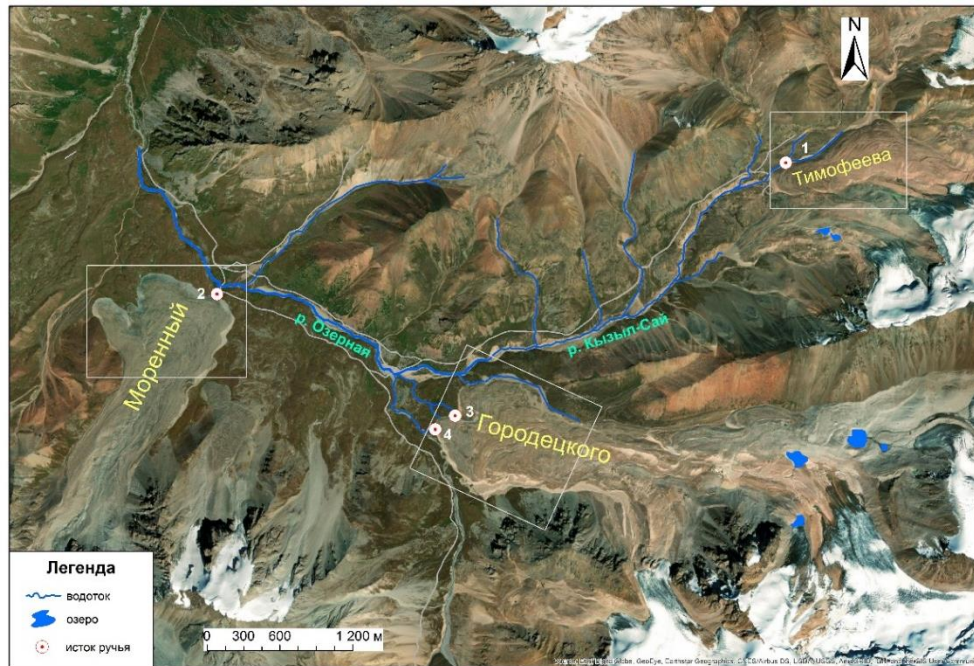


Рис. 1. Схема участка исследования. В качестве подложки использован снимок спутника GeoEye

Река Озерная вместе с р. Проходной образуют р. Улкен-Алматы. На ней функционирует гидрологический пост р. Улкен Алматы – в 1,1 км выше оз. Улкен Алматы (код поста 14239). Высота поста 2560 м н.у.м. Площадь водосбора 71.8 км². Средний расход воды на гидрологическом посту – 1,83 м³/с. Максимальный расход 26,1 м³/с наблюдался 4 июля 2015 г., минимальный 0,15 м³/с зафиксирован с 28 апреля по 17 мая 2019 г. Длина р. Озерная около 12 км. Высшая точка водосбора около 4400 м н.у.м., отметка истока реки – 3700 м н.у.м.

Река Улкен Алматы имеет смешанное питание (талые воды снегов и ледников, дождевые осадки, грунтовые воды). Она относится к рекам с весенне-летним половодьем. Наибольший сток наблюдается в июне-августе, наименьший – в феврале-апреле. Максимальные расходы воды на реке Улкен Алматы формируются за счет таяния снега и ледников с наложением на них дождевых паводков. Летне-осенняя межень устанавливается во второй декаде сентября и заканчивается в начале третьей декады ноября, зимняя – соответственно в начале третьей декады ноября и в середине третьей декады апреля. Межень характеризуется относительно устойчивыми расходами воды, плавно снижающимися к началу половодья. Первые ледовые образования в виде заберегов появляются в среднем 24 ноября, ранние – 7 ноября, поздние – 7 января. Средняя продолжительность ледостава 38 дней, наибольшая 108 дней, наименьшая 0 дней.

Река Улкен Алматы является основным источником поверхностных вод, используемых для водоснабжения г. Алматы (92%). Воды р. Улкен Алматы также используются для получения электроэнергии (каскад ГЭС) и других целей.

Методы

С 2018 и 2019 г. ведутся автоматизированные измерения температуры воды в местах ее 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 2023 г. отбирались пробы воды для определения химического состава – основных ионов, некоторых микрокомпонентов и стабильных изотопов воды. 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 р. Озерная с помощью портативного термокондуктометра НМ-200 (Республика Корея). Полевые выезды в верховья р. Озерная были выполнены девять раз за сезон: 9, 17 июня, 15, 21, 27 июля, 4, 16 августа, 2 и 28 сентября. Всего за полевой сезон было отобрано 90 проб воды из ручьев, рек, источников подземных вод и атмосферных осадков. Химические анализы водных проб выполнялись в геохимической лаборатории Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН методами титриметрии и капиллярного электрофореза.

Результаты

Расходы воды ручьев КГ

Ручьи, вытекающие из-под КГ Городецкого, имеют высокие расходы, суммарно составлявшие 873–1025 л/с в конце июля 2021 г., 1270 л/с 16 августа 2023 г. и 241 л/с 28 сентября 2023 г. Один ручей впадает непосредственно в р. Озерная, несколько других ручьев группируются в один, впадающий в приток р. Озерная р. Кысыл-Сай. Ручей КГ Городецкого, впадающий в р. Озерная, имел расход 360 и 440 л/с 25 и 26 июля 2021 г. соответственно, 484 л/с 16 августа 2023 г. и всего лишь 864 л/с 28 сентября 2023 г. Ручьи из КГ Городецкого, впадающие в р. Кысыл-Сай, имели расход 513 и 586 л/с 25 и 26 июля 2021 г. соответственно, 785 л/с 16 августа 2023 г. и 233 л/с 28 сентября 2023 г.

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., 10,8 л/с 16 августа 2023 г. Сток отсутствовал в конце сентября 2023 г.

Расход воды р. Улкен Алматы (р. Озерная) на гидрологическом посту «в 1,1 км выше оз. Улкен Алматы» 25 и 26 июля 2021 г. был 6,96 и 7,64 м³/с соответственно. Расход ручьев КГ Городецкого составлял 12,5 и 13,4% от стока р. Улкен Алматы (р. Озерная) на гидропосте, что является существенной величиной.

Расходы воды на гидрологическом посту за 2023 г. еще не опубликованы. Если принять, что август и сентябрь–октябрь 2023 г. близки по водности к среднемноголетним значениям (6,17 м³/с в августе и 2,66 м³/с в сентябре–октябре за период 2002–2021), то вклад ручьев КГ Городецкого в сток р. Улкен Алматы составил даже больше, чем в июле 2021 г. – около 20%, а в конце сентября – 9%.

Расходы ручьев, 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 2021 г. 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 ручьев составляет сотни процентов в течение суток.

Температура воды ручьев КГ

Температуры воды ручьев показаны на рис. 2. Температурный режим пяти ручьев, 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°C. Температурный режим стока КГ Городецкого наблюдался в трех источниках. Период их стока и ход температуры различается. Температура воды в главном выходе изменялась от +2...+3°C с августа 2019 по октябрь 2021 г. и с июня 2022 по сентябрь 2023 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 и в 2022–2023 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. Главный выход формирует наиболее многоводный ручей среди всех остальных выходов вод КГ. Центральный выход из КГ Городецкого перемерзает ежегодно и имеет температуру воды $+0,5...+1^{\circ}\text{C}$ с начала стока по конец июня и прогревается до $+2...+2,5^{\circ}\text{C}$ в июле и августе. Достаточно резкий подъем температуры воды на $1-2^{\circ}\text{C}$ за 10–15 дней в начале июля предположительно связан с вытаяванием 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.

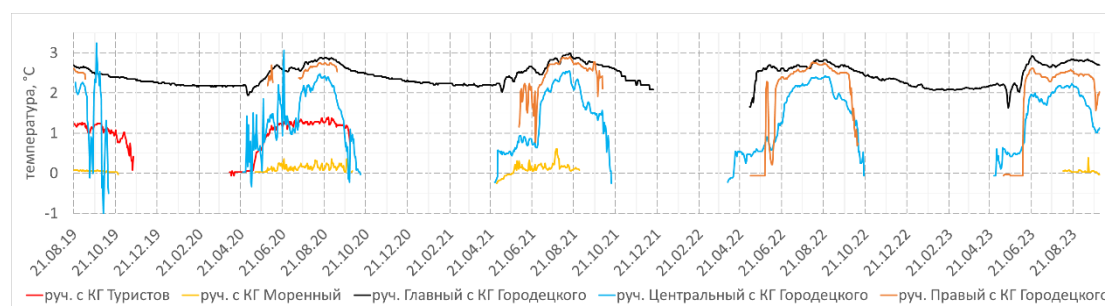


Рис. 2. Температура воды ручьев, вытекающих из каменных глетчеров (КГ), с августа 2019 по сентябрь 2023 г.

Ручей из КГ Моренный имеет околонулевую температуру воды в течение всего сезона стока, которая не превышает $+0,5^{\circ}\text{C}$. 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 $+1^{\circ}\text{C}$. Логгер установлен на расстоянии нескольких десятков метров от фронтального уступа, что позволяет воде нагреться. Температура воды у ее выхода из тела каменного глетчера оставляет 0°C .

Ход электропроводности воды ручьев КГ

С октября 2022 по сентябрь 2023 г. одновременно с температурой воды велись наблюдения за электропроводностью воды руч. Главный КГ Городецкого (рис. 3), которая является прокси для минерализации воды. Ход электропроводности обратно пропорционален изменениям температуры воды. Электропроводность медленно возрастает при зимнем понижении температуры воды и имеет максимальные значения в мае и июне, когда сток ручья, по-видимому, минимален. Минимальные значения электропроводности наблюдаются летом, со второй половины июня по сентябрь, что совпадает с многоводным сезоном при таянии снежников и ледников. Размах колебаний электропроводности крайне незначителен, от 47 до 67 См/м, что может говорить о существенной емкости подземных вод КГ.

Химический состав исследуемых природных вод

С июня по сентябрь 2023 г. было отобрано 90 проб воды. Химический состав анализировался совместно с результатами, полученными в 2019 и 2021 гг. В августе



2019 г. было отобрано 19 проб, в июле 2021 г. – 55 проб воды атмосферных осадков, ручьев, стекающих с каменных глетчеров, выходов подземных вод, снега, льда ледника и двух рек в бассейне р. Озерная. Все воды относятся к ультрапресным с минерализацией от 4,7 до 187 мг/л (рис. 4). К наиболее минерализованным относятся воды некоторых ручьев (> 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 ручьев 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 ручьев, стекающих с разных каменных глетчеров, отличаются характерными значениями общей минерализации: 63–90 мг/л для КГ Городецкого, 108–124 мг/л для КГ Моренного и 103–130 мг/л для КГ Тимофеева. Две пробы воды из руч. КГ Арчалы наиболее минерализованы среди ручьев КГ – 123 и 142 мг/л.



Рис. 3 Ход электропроводности воды руч. Главный КГ Городецкого

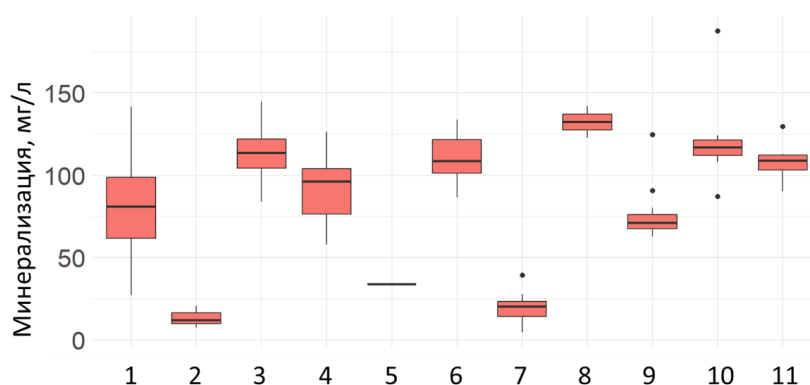


Рис. 4 Диаграммы размаха значений общей минерализации воды, мг/л, сгруппированные по типам опробованных природных вод: 1 – ручьи, 2 – ледник, 3 – источники подземных вод, 4 – р. Кысыл-Сай, 5 – озеро, 6 – р. Озерная, 7 – атмосферные осадки, 8 – руч. КГ Арчалы, 9 – руч. КГ Городецкого, 10 – руч. КГ Моренный, 11 – руч. КГ Тимофеева

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.

Доля ионов магния относительно понижена в ручьях с КГ Моренный (5–17%), повышена в ручьях с КГ Тимофеева (14–59%) и имеет средние значения в ручьях с КГ Городецкого (11–31%). Доля ионов магния понижена в водах р. Озерная выше впадения в БАО (11–26%) и повышена в верховьях р. Озерная выше контакта с КГ Городецкого (22–38%).

Доля сульфат-ионов в ручьях с КГ Городецкого выше (5–10%), чем в ручьях с КГ Моренного (2–6%).



На диаграмме рассеивания концентраций ионов магния и кальция (рис. 5) видно, что пробы некоторых типов природных вод группируются, что говорит об их стабильном химическом составе в течение 2019, 2021 и 2023 гг. Наиболее тесные группы образуют пробы атмосферных осадков, ручьев КГ Городецкого, ручья КГ Моренного и источников подземных вод.

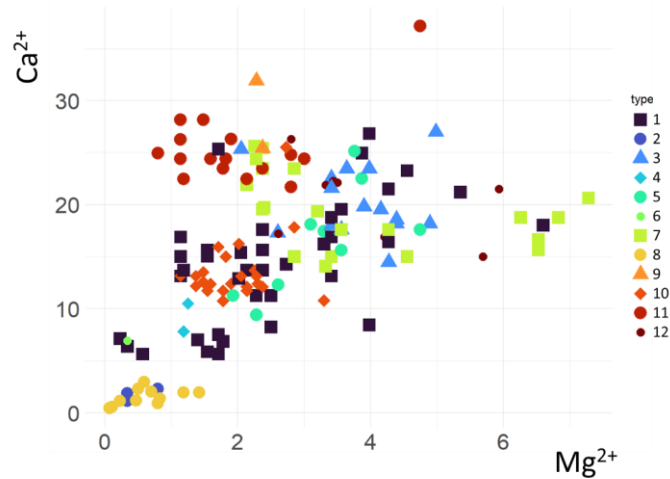


Рис. 5 Диаграммы рассеивания концентраций ионов магния и кальция, мг/л: 1 – ручьи, 2 – ледник, 3 – источники подземных вод, 4 – р. Киши Алматы, 5 – р. Кысыл-Сай, 6 – озеро, 7 – р. Озерная, 8 – атмосферные осадки, 9 – руч. КГ Арчалы, 10 – руч. КГ Городецкого, 11 – руч. КГ Моренный, 12 – руч. КГ Тимофеева

Водородный показатель отобранных проб составляет от 5 до 8 (рис. 6), то есть исследуемые воды имеют слабокислую, нейтральную и слабощелочную реакцию. Слабокислой и нейтральной реакцией с рН ниже 7 обладают воды атмосферных осадков (рН 5–7), а также расплавы ледникового льда (рН 6,4–6,6) и ручьи, стекающие непосредственно со снежников и ледников. К слабощелочным водам (рН > 7.5) относятся семь проб, все из них отобраны из ручьев КГ в августе. Ручьи КГ, как правило, имеют рН выше 7 в течение всего теплого сезона, за исключением поздней осени. Также повышенным водородным показателем характеризуются воды рек и ручьев в июле и августе, что может говорить о большем вкладе ручьев КГ в их питание в это время.

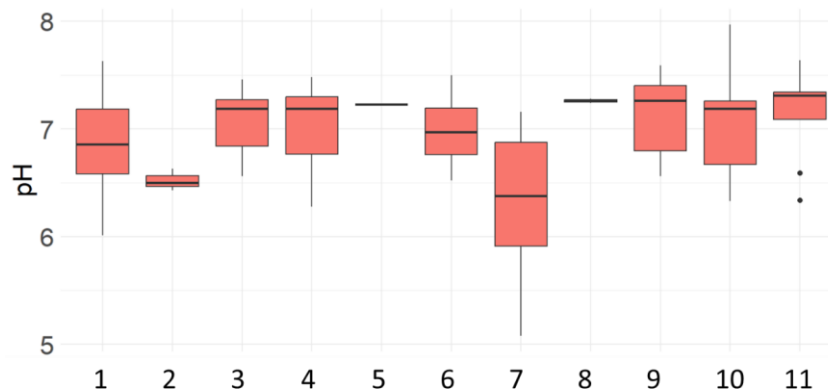


Рис. 6 Диаграммы размаха значений водородного показателя воды, сгруппированные по типам опробованных природных вод: 1 – ручьи, 2 – ледник, 3 – источники подземных вод, 4 – р. Кысыл-Сай, 5 – озеро, 6 – р. Озерная, 7 – атмосферные осадки, 8 – руч. КГ Арчалы, 9 – руч. КГ Городецкого, 10 – руч. КГ Моренный, 11 – руч. КГ Тимофеева



Сезонный ход минерализации и водородного показателя воды рек и ручьев КГ

Отобранные в течение 2023 г. пробы в устье р. Озерная (на гидрологическом посту), в ее верховьях и притоках позволили проследить сезонную динамику общей минерализации и водородного показателя (рис. 7).

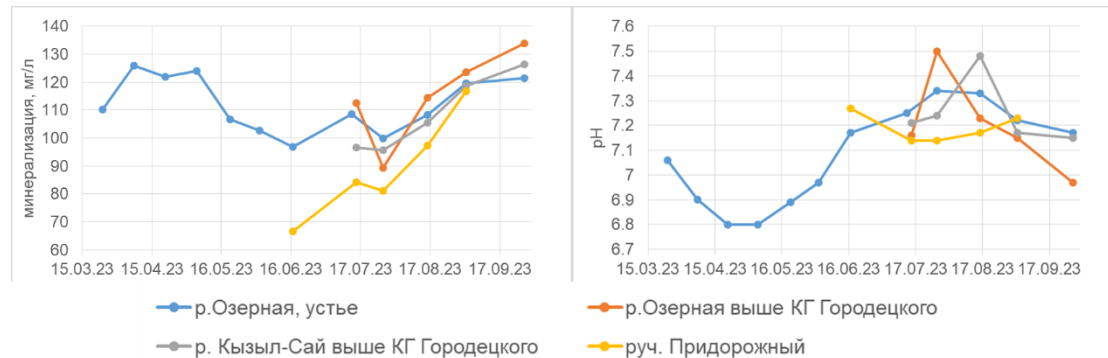


Рис. 7. Сезонный ход минерализации (слева) и водородного показателя (справа) воды р. Озерной и ее притоков

Оба показателя имеют выраженный сезонный ход. Общая минерализация воды р. Озерной в устье максимальна (до 126 мг/л) при минимальном стоке в апреле и начале мая и принимает пониженные значения (до 97 мг/л) в период повышенной водности с конца мая по август. В течение теплого сезона приток р. Озерная р. Кызыл-Сай имеет близкие к ней значения минерализации, а р. Озерная в верховьях (выше КГ Городецкого) на 5–10 мг/л более минерализована в августе-сентябре. Это говорит о том, что исток реки может формироваться относительно более минерализованными подземными водами, а вниз по течению происходит некоторое разбавление, то есть река питается менее минерализованными водами, в частности, ледниковых ручьев и водами ручьев КГ Городецкого. Малый приток р. Озерной руч. Придорожный, который преимущественно питается талыми ледниковыми водами, имеет пониженную минерализацию (до 66 мг/л) в июне-июле по сравнению с более крупными реками участка исследования, однако в начале сентября значения минерализации воды ручья приближаются к речным. В конце сентября вода в русле ручья отсутствовала, тогда как сток ручьев КГ Городецкого, рек Озерная и Кызыл-Сай, источников подземных вод продолжался.

Водородный показатель воды р. Озерная в устье (на гидрологическом посту) в течение всего года нейтральный, при этом минимален в конце апреля и начале мая (рН 6,8) и максимален в конце июля и августе (рН 7,3). Отдельные пробы р. Озерной в верховьях и р. Кызыл-Сай в конце июля и августе относятся к слабощелочным (рН 7,5).

Сезонная динамика минерализации воды двух наиболее полноводных, в том числе одного неперемежающегося, из трех ручьев КГ Городецкого (рис. 8) отсутствовала в 2023 г. Значения варьировались от 64 до 80 мг/л. Минерализация воды руч. Правый КГ Городецкого была идентична им до конца августа, а в сентябре повысилась до 127 мг/л, что может говорить о частичном разобщении питающей емкости подземных вод КГ при понижении водности. Минерализация руч. КГ Моренный выше, чем ручьев КГ Городецкого на 15–50 мг/л. Минерализация руч. КГ Моренный повышается от минимальных значений в июне (87 мг/л) до максимальных значений в начале сентября (124 мг/л). К концу сентября руч. КГ Моренный пересох.

Сезонная динамика водородного показателя воды ручьев КГ согласуется друг с другом и с его изменением в реках исследуемой территории. рН несколько выше в ручьях КГ Городецкого по сравнению с руч. КГ Моренный. Максимальные значения наблюдаются в июле (до 7,5), минимальные – в конце сентября (6,7).

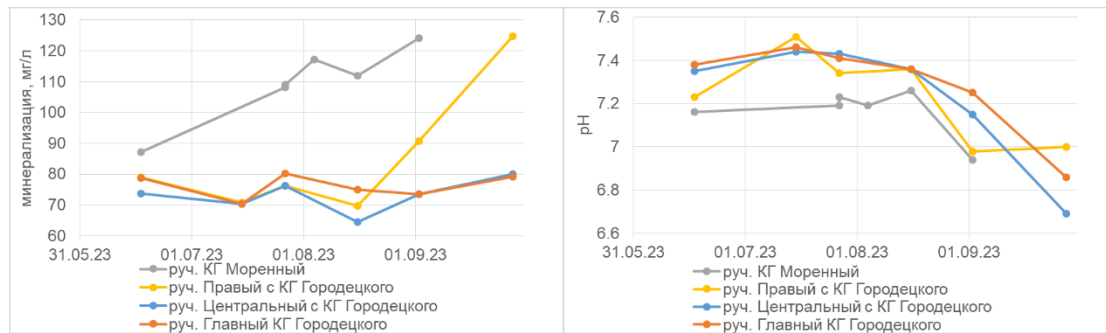


Рис. 8 Сезонный ход минерализации (слева) и водородного показателя (справа) воды ручьев с КГ Моренный и Городецкого

Обсуждение

О значительных различиях в льдистости КГ Городецкого, КГ Моренный и КГ Тимофеева и в распространении многолетнемерзлых пород свидетельствуют проведенные наблюдения за температурным режимом воды ручьев. 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°C , в то время как у неактивных, в которых лед практически вытаял, она была выше $1,7^{\circ}\text{C}$ [Krainer, 2002, Krainer et al., 2007]. Стабильно повышенные температуры ручьев КГ Городецкого также свидетельствуют об отсутствии многолетнемерзлых пород и существенных объемов многолетних подземных льдов в его краевых генерациях, что согласуется с результатами исследований А.А. Галанина с соавт. [2017] и А. Кааб с соавт. [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. Аккумуляции 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 г. в верховьях р. Каргалы сформировались селевые потоки вследствие блокировки подземных каналов стока с оз. Безымьянное 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 всем протяжении фронтального уступа предполагают ограниченные запасы подземных вод в нем, наличие крупных блоков внутриглетчерных льдов и многолетнемерзлых пород, в отличие от КГ Городецкого. Кроме этого, проведенные в 2020 г. Н.В. Желтенковой и др. [2020] геофизические исследования 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 ручьев, 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. Озерная не позволяют однозначно судить о вкладе вытаявающих подземных льдов каменных глетчеров в сток воды, однако характерный химический состав ручьев, стекающих с каждого каменного глетчера и их температурный режим позволяют сделать вывод о трансформации стока за счет 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. Так, 25 и 26 июля 2021 г. суммарные расходы ручьев КГ Городецкого составляли 12.5 и 13.4% от стока р. Улкен Алматы (р. Озерная) на гидропосте «в 1,1 км выше оз. Улкен Алматы». В августе 2023 г., предположительно, вклад ручьев КГ составил даже больше, чем в июле 2021 г. – около 20%, а в конце сентября – 9%.

Заключение

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 ручьев с ледниковым питанием. Некоторые выходы воды из КГ Городецкого не перемерзают зимой, что говорит о значительных запасах подземных вод в его теле. Воды каждого из трех изученных каменных глетчеров отличаются характерной минерализацией, температурой и соотношением основных ионов. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока.

Благодарность

Работа выполнялась за счет проекта НИОКТР122012400106-7 «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования», проекта НИОКТР122011800064-9 «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».

Список литературы

- Вилесов Е.Н., Горбунов А.П., Морозова В.Н., Северский Э.В. Деградация 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. Высокдинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 4. С. 58–74. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74)
- Горбунов А.П. Каменные глетчеры азиатской России // Криосфера Земли. 2006. т. X. № 1. С. 22–28.
- 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., Северский Э.В., Титков С.Н. Геокриологические условия Тянь-Шаня и Памира. Якутск, изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1996. 194с.



- 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
- Жданович А.Р. Большое Алматинское озеро и сейсмо-деструкционно-вбросовая гипотеза его формирования // *Известия НАН РК. Серия геологическая*. 2003, № 6, с. 94–108.
- 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.
- Куликовский К.Т. О происхождении горных озер в бассейнах рек Иссык и Большой Алматинки и их селезащитной роли // *Материалы по геологии и полезным ископаемым*. Вып. 4 (29). Алмата, изд-во «Наука» КазССР. 1971, с. 259–271.
- 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*. pp. 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
- Gorbunov, A. P., Titkov, S. N., Polyakov, V. G. Dynamics of rock glaciers of the Northern Tien Shan and the Jungar Ala Tau, Kazakhstan. *Permafrost Periglac*. 1992. 3. P. 29–39.
- 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.
- 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 Journal of Earth Sciences*. 2007. 100. P. 102–112.
- Millar, C. I., & Westfall, R. D. (). Geographic, hydrological, and climatic significance of rock glaciers in the Great Basin, USA // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2019. 51(1). P. 232–249.
- Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M. et al. 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. P. 215–230.