

Научная статья
УДК 550.461 + 556.314
doi: 10.17223/25421379/31/9

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ГОРНО-ЛЕДНИКОВОМ БАСЕЙНЕ АКТРУ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ) И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ



Олег Геннадьевич Савичев¹, Альбина Анатольевна Хвощевская²,
Владимир Валерианович Паромов³

^{1,2} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ OSavichev@mail.ru

² Garibova@yandex.ru

Аннотация. Проведен анализ данных о химическом составе речных, ледниковых и подземных вод в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай) и на прилегающих территориях в 1997–2000, 2012–2014, 2019, 2022 гг. Выявлены тенденции изменения состава природных вод в ряду «ледник – речные воды – подземные воды». Установлено увеличение минерализации, концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- в водах притоков р. Актру. Предположительно, это связано с увеличением площади соприкосновения воды с горными породами, ранее находившимися под ледниками и (или) при отрицательной температуре.

Ключевые слова: гидрохимические изменения, горно-ледниковый бассейн Актру, Алтай

Благодарности: авторы признательны сотрудникам Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета, Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Сибирского регионального центра ФГБУ «Гидроспецгеология», сотрудникам и студентам кафедры гидрологии Национального исследовательского Томского государственного университета, участвовавшими в проведении полевых и лабораторных работ в рамках рассматриваемого исследования в 1997–2022 гг.

Источник финансирования: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00039).

Для цитирования: Савичев О.Г., Хвощевская А.А., Паромов В.В. Пространственно-временные изменения химического состава компонентов водных объектов в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай) и на прилегающих территориях // Геосферные исследования. 2024. № 2. С. 143–155. doi: 10.17223/25421379/31/9

Original article
doi: 10.17223/25421379/31/9

SPATIAL AND LONG-TERM CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER OBJECTS COMPONENTS IN THE AKTRU MOUNTAIN-GLACIER BASIN (GORNÝ ALTAI) AND IN THE ADJACENT TERRITORIES

Oleg G. Savichev¹, Albina A. Khvashevskaya², Vladimir V. Paromov³

^{1,2} National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

³ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ OSavichev@mail.ru

² Garibova@mail.ru

Abstract. The analysis of data on the chemical composition of river, glacial and groundwater in the Aktru mountain-glacial basin (Gorny Altai, Russian Federation) and in the adjacent territories (the Tyute River, section of the Kurai Valley) in 1997–2000, 2012–2014, 2019, 2022. The data were obtained under the guidance and directly by the authors, together with employees and students of the Tomsk Polytechnic and Tomsk State Universities, the Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, the Siberian Regional Center of the Federal State Budgetary Institution "Gidrospegeologiya". The objects of study are the Aktru River and its tributaries (the Big and Small Aktru rivers), the Tyuty River, the Left and Small Aktru glaciers (ablation zone and firn zone), groundwater of Quaternary deposits and Precambrian deposits. The potentiometric, conductometric, fluorimetric, titrimetric, turbidimetric, photometric, stripping voltammetric, atomic

absorption, neutron activation, atomic emission, mass spectrometric method with inductively coupled plasma methods have been used. The analysis of temporal changes was carried out according to the data on the content of the main ions, Fe, Cu, Zn obtained by the same methods (titrimetric, turbidimetric, atomic absorption, stripping voltammetric). It has been established that spatial changes in the mineralization of natural waters of a mountain-glacial basin are characterized by its general increase in the direction "glacier → river water → groundwater". Against the background of this increase, there is an increase in the concentrations of a number of chemical elements in the headwaters of the tributaries of the Aktru River and at the border of the mountain-forest and mountain-steppe areas. This is due to the intense leaching of rocks during the melting of ice material at the glacier boundary with the active participation of microflora and the suspension of solid particles in the flow in the sources of mountain streams, the peculiarities of channel processes, accompanied by the accumulation of products of interaction between water and rocks. When studying long-term changes, it is shown that during 1997–2022. There is some activation of interactions in the "water – rock" system in the sources of mountain streams. It occurs, presumably, due to an increase in the area of contact between water and rocks that were previously under glaciers and/or at sub-zero temperatures. The consequence of this activation is a slight increase in the salinity of the waters of the tributaries of the Aktru River (the Bolshoi and Maliy Aktru rivers), mainly due to an increase in the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} and HCO_3^- . Changes in the concentrations of other main ions, as well as Fe, Cu, Zn, are much less pronounced. Two to three kilometers downstream in the waters of the Aktru river, waters of different compositions mix and, possibly, part of the sediments, including poorly soluble substances, formed in the glacier ablation zone, are deposited. As a result, even in the Aktru station area, temporary changes in the chemical composition of river waters, if any, are no longer so obvious.

Keywords: *hydrochemical changes, Aktru mountain-glacial basin, Altai*

Acknowledgments: The authors are very grateful to the staff of the hydrogeochemical laboratory of National Research Tomsk Polytechnic University, the Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, the Siberian Regional Center of the Federal State Budgetary Institution "Gidrospeetsgeologiya", staff and students of the Department of Hydrology of National Research Tomsk State University, who participated in field and laboratory work within the framework of this study in 1997–2022.

Source of financing: The research was carried out using the Russian Scientific Foundation grant (project no. 23-27-00039).

For citation: Savichev O.G., Khvaschevskaya A.A., Paromov V.V. (2024) Patial and long-term changes in the chemical composition of water objects components in the Aktru mountain-glacier basin (Gorny Altai) and in the adjacent territories. *Geosfernyye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 143–155. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/31/9

Введение

В последние десятилетия наблюдаются заметные изменения климата во многих регионах мира, включая Сибирь и Центральную Азию [Кислов, 2006; Shiklomanov et al., 2013], что не может не сказываться на состоянии водных объектов, в том числе в горно-ледниковых бассейнах Алтая [Оледенение..., 2006; Поповин, 2006; Тимошок и др., 2008; Паромов, Шантыкова, 2001]. В свою очередь, это должно так или иначе повлиять на состояние водных экосистем р. Обь на всем её протяжении и, соответственно, определяет актуальность исследований реакции горно-ледниковых экосистем на эволюцию климата, окружающей среды и механизмов их саморегуляции.

Далее рассматривается аспект подобных работ, связанный с изучением геохимического состояния водных объектов в бассейне р. Актру (элемент речной системы Актру – Чуя – Катунь – Обь – Карское море) и на прилегающих к нему территориях. Цель исследования – выявление пространственно-временных изменений химического состава речных и ледниковых вод в бассейне Актру на основе обобщения гидрохимических данных, полученных в 1997–2000, 2012–2014, 2019, 2022 гг., включая ранее частично опубликованные материалы за 1997–2013 гг. [Савичев и др., 2002; Savichev, Paromov, 2013; Паромов и

др., 2014; Savichev et al., 2016; Савичев и др., 2019; Пасечник и др., 2020].

Объекты и методика исследования

Район исследования – бассейн р. Актру, расположенный на северном склоне Северо-Чуйского хребта в горном узле Биш-Иирду и характеризующийся наличием семи ледников общей площадью около 16 км² (Правый, Левый и Малый Актру, Водопадный, Кар Малого Актру, висячий ледник на горе Караташ, карово-висячий ледник Стажер), и прилегающие к нему водосбор р. Тютё (также приток р. Чуя) и участок Курайской долины. Снеговая линия проходит на высоте 3 200 м и выше [Галахов и др., 1987; Нарожный и др., 2006; Тимошок и др., 2008]. При этом в последние десятилетия наблюдается её подъём и деградация оледенения в бассейне Актру [Паромов, Шантыкова, 2001; Нарожный и др., 2005; Паромов и др., 2018].

Основными объектами исследования являются ледники Левый и Малый Актру (фирновая зона и зона абляции), водотоки Малый и Большой Актру, собственно река Актру и подземные воды (отложения четвертичного возраста и докембрия) в Курайской долине (рис. 1). Дополнительно использованы данные о химическом составе реки Тютё и подземных

вод в с. Курай [Состояние..., 2010; Пасечник и др., 2020]. Общая идея заключается в попытке оценки изменения химического состава вод от ледников до устья р. Актру за период с 1997 по 2022 г.

Методика исследования включала в себя:

1) полевые работы по отбору проб в 1997 (речных вод и льда – В.В. Паромов), 1998 (подземных и речных вод, льда – О.Г. Савичев, Е.В. Домрочева), 1999 (речных вод и льда – В.В. Паромов), 2000 (льда – В.В. Паромов), 2012 (речных вод и льда – под руководством В.В. Паромова), 2013 и 2014 (речных вод, льда и донных отложений – под руководством В.В. Паромова), 2019 (подземных вод – сотрудники Сибирского регионального центра ФГБУ «Гидро-спецгеология» [Пасечник и др., 2020]), 2022 гг. (речных вод, льда и донных отложений – О.Г. Савичев, О.Г. Савичева), в том числе: 1.1) проб вод водотоков и озера Голубое (в 1997, 1998, 1999, 2012, 2013, 2014, 2022 гг.) в слое 0,1–0,3 м от водной поверхности с учетом требований [Требования..., 2002; Manual..., 2010; ГОСТ Р 59024-2020]; 1.2) подземных вод (в 1998, 2019 гг.) согласно [Требования..., 2002; Weight, 2008; Manual..., 2010; ГОСТ Р 59024-2020]; 1.3) ледового материала (в 1997, 1998, 1999, 2000, 2012, 2022 гг.) в приповерхностном слое 0,2–0,5 м с учетом [Manual..., 2010; ГОСТ 17.1.5.05-85]; 1.4) донных отложений (в 2013, 2014, 2022 гг.) в 0,2–1,0 м от уреза воды в слое 0,2 м от поверхности дна (в 2013 и 2014 гг. – точечные пробы, в 2022 г. – смешанные пробы из точечных проб в вершинах в виде равнобедренного треугольника со стороной 1 м) согласно [Требования..., 2002; Manual..., 2010; ГОСТ 17.1.5.01-80]; 1.5) подземных вод из скважин (Курай – Кызыл-Таш, в 2019 г. одна проба – из родника [Пасечник и др., 2020]) с учётом требований [Weight, 2008; Manual, 2010]; 1.6) при отборе проб воды О.Г. Савичевым проводились полевые измерения pH, удельной электропроводности EC , окислительно-восстановительного потенциала Eh , температуры воды T_w , в 2022 г. дополнительно проведена фильтрация воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мк для изучения соотношения растворённо-коллоидной и взвешенно-коллоидной форм миграции химических элементов; 1.7) в 2013 и 2014 гг. (под руководством В.В. Паромова) – измерения расходов воды рек Актру и Тютё; всего отобрано 47 проб воды и 12 проб донных отложений; 2) лабораторные работы по определению химического состава поверхностных и подземных вод, донных отложений в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ) непосредственно и (или) под руководством А.А. Хвощевской с использованием следующих методов: 2.1) в пробах речных, подземных и талых вод:

pH, F^- – потенциометрический метод; удельная электропроводность EC – кондуктометрический; бихроматная окисляемость BO – флуориметрический; перманганатная окисляемость PO , содержания Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , CO_2 – титриметрический; Na^+ , K^+ – атомно-эмиссионная спектрометрия с пламенной атомизацией; SO_4^{2-} – турбидиметрический; NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Si , Fe – фотометрический; более 30 микроэлементов – инверсионно-вольтамперометрический, атомно-абсорбционный (1997, 1998, 1999, 2000 гг.), нейтронно-активационный (микроэлементы в 1998 г. в ядерно-геохимической лаборатории ТПУ; аналитики Е.Г. Вертман, А.Ф. Судыко, Л.Ф. Богущкая), атомно-эмиссионная спектрометрия (2013, 2014 гг.) и масс-спектрометрический метод с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП) с использованием масс-спектрометра NexION 300D (в 2019 и 2022 гг.); 2.2) в водных вытяжках из донных отложений (фракция ≤ 1 мм): pH – потенциометрический метод, удельная электропроводность EC – кондуктометрический, в 2022 г. микроэлементы – МС-ИСП (NexION 300D); пробоподготовка включала в себя доведение проб до воздушно-сухого состояния, растирание в фарфоровой ступке, перемешивание в круглодонной колбе в течение 3 мин навески 50–100 г с добавлением деионизированной воды в соотношении 1:5, центрифугирование в течение 5 мин; 2.3) в кислотных вытяжках из донных отложений (фракция ≤ 1 мм) в 2013 и 2014 гг. – атомно-эмиссионная спектрометрия; пробоподготовка предполагала высушивание до воздушно-сухого состояния и растирание в фарфоровой ступке, затем навеска пробы (0,2–0,5 г) помещалась в полиэтиленовую пробирку с добавлением 3 мл азотной кислоты, очищенной с помощью системы Distillasid BSB-939-IR (Berghof, Германия) и прогревалась в микроволновой печи на минимальной мощности (100–300 W) в течение 10 мин без закипания раствора, после чего объем полученного раствора доводился деионизированной водой до 50 мл; 2.4) в 1998 г. также было проведено определение органических микропримесей хроматомасс-спектрометрическим методом (Ю.П. Туров, И.Д. Пирогова, М.П. Гузиева, Институт органической химии СО РАН) и микроорганизмов (Н.Г. Наливайко, гидрогеохимическая лаборатория ТПУ) [Савичев и др., 2002; Savichev, Paromov, 2013; Savichev et al., 2016]; исследования рентгенофазового состава донных отложений р. Актру выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета (Центр поддержан грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012)).

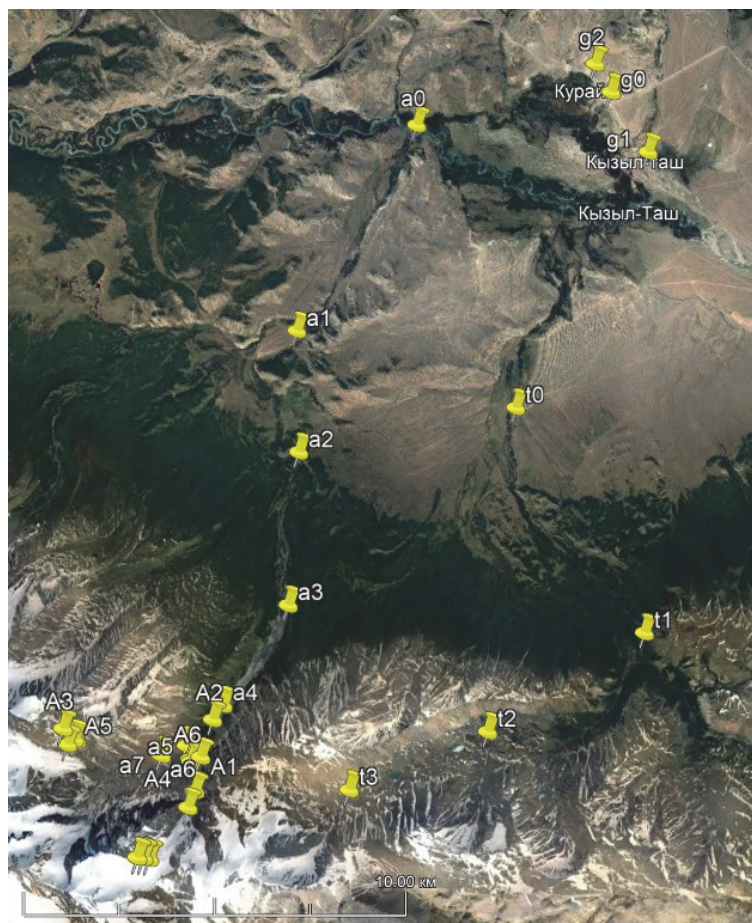


Рис. 1. Схема размещения пунктов отбора проб: g0...g2 – подземные воды; t0...t3 – р. Тютё; прочие пункты – речные воды и ледники в водосборе р. Актру, включая A1...A5 – пункты в 2022 г.

Fig. 1. Layout of sampling points: g0...g2 are groundwater; t0...t3 are the Tyuty River; other observation points are river waters and glaciers in the Aktru River's basin including A1...A5 are points in 2022

3) статистический и визуальный анализ полученных данных, а также данных Сибирского регионального центра ФГБУ «Гидроспецгеология», полученных по данным опробования в с. Курай в летний период 1999–2001, 2003, 2004, 2019 гг. [Состояние..., 2010; Пасечник и др., 2020]), включая расчет погрешностей среднего арифметического δ_A (1) и коэффициентов корреляции δ_r (2); корреляционные и регрессионные связи принимались значимыми с уровнем значимости 5 % при выполнении условия (3):

$$\delta_A \approx \sigma \cdot N^{-0.5}, \quad (1)$$

$$\delta_r \approx (1 - r^2) \cdot (N - 1)^{-0.5}, \quad (2)$$

$$N \geq 6; |r| \geq 0,7; r \geq 2 \cdot \delta_r; k_r \geq 2 \cdot \delta_k, \quad (3)$$

где N – объем выборки; σ – среднее квадратическое отклонение; r – коэффициент корреляции; k_r и δ_k – коэффициент регрессии и погрешность его определения [СП 33-101-2003]; все расчеты выполнены в MS Excel;

4) термодинамические расчеты (расчеты индекса насыщения SI) с использованием программного комплекса Solution+, разработанного О.Г. Савичевым в

вычислительной среде MS Excel на основе метода констант [Савичев и др., 2003]:

$$SI = \lg PA - \lg K_{neq}, \quad (4)$$

где PA – произведение активностей группы веществ; K_{neq} – константа неустойчивости; отрицательные значения индекса SI свидетельствуют о потенциальном недосыщении, а положительные – о пересыщении раствора относительно рассматриваемого минерала.

Результаты исследования и их обсуждение

Пространственные закономерности. Талые ледниковые воды, по классификации О.А. Алекина [Алекин, 1970], – пресные с очень малой минерализацией, в среднем гидрокарбонатные кальциевые первого типа (табл. 1; 3 случая из 9 – Ca_1 ; 2 случая из 9 – Ca_{III} ; 3 случая из 9 – Mg ; 1 случай из 9 – Na_1), по величине pH – в среднем слабокислые [Гидрохимические..., 2007].

Речные воды также пресные, причем в верхнем (выше по течению от лагеря Актру) и в среднем (от

лагеря Актру до конца открытого участка поймы) течении – с очень малой минерализацией, а в нижнем течении – с малой минерализацией. Примерно такое же распределение минерализации и по длине р. Тютё, что указывает на общую тенденцию – увеличение минерализации от истоков до участка нижнего течения (от горно-ледникового к горно-лесному и горно-степному участкам), причем с некоторым снижением в горно-степной части ближе к устью (рис. 2, табл. 1). По химическому составу воды р. Актру в среднем гидрокарбонатного класса, группы кальция, второго типа (в 13 случаях из 20 – C^{Ca}_{II} , в 3 случаях – C^{Ca}_I , в 4 – C^{Ca}_{III} , табл. 1), воды р. Тютё – в 3 случаях из изученных 4 – C^{Ca}_{III} (в одном случае – C^{Mg}_I). По величине pH речные воды в летний период (время проведения работ в течение 1997–2022 гг.) – преимущественно слабощелочные, что объясняется достаточно высоким насыщением кислородом [Алекин, 1970].

Минерализация подземных вод в Курайской долине в целом закономерно выше, чем речных вод в водосборе р. Актру (согласно [Shvartsev, 2008], по причине более замедленного, по сравнению с реками,

водообменом и, следовательно, большего времени взаимодействия воды с породами). Химический состав этих вод характеризуется преобладанием ионов HCO_3^- и Ca^{2+} : в среднем для 8 проб и в 6 случаях из 8 – C^{Ca}_{II} ; по одному случаю (из 8) – C^{Ca}_{III} и C^{Mg}_I . По величине pH подземные воды в целом (в летний период 1998–2001, 2003, 2004, 2019 гг.) – слабощелочные.

В целом от ледников до речных вод на участках среднего и нижнего течения горных водотоков (рр. Актру и Тютё) отмечается переход от недонасыщенных (к кварцу, карбонатам и гуматам кальция и магния) талых ледниковых и снеговых вод до условно равновесных или даже перенасыщенных вод уже в истоках горных водотоков, после чего наблюдается определенная стабилизация или даже некоторое снижение индекса насыщения речных вод по целому ряду реакций. В подземных водах Курайской долины индексы реакций всех систем дополнительно возрастают и соответствуют перенасыщению вод относительно кварца, гуматов кальция, кальцита и доломита (рис. 3).

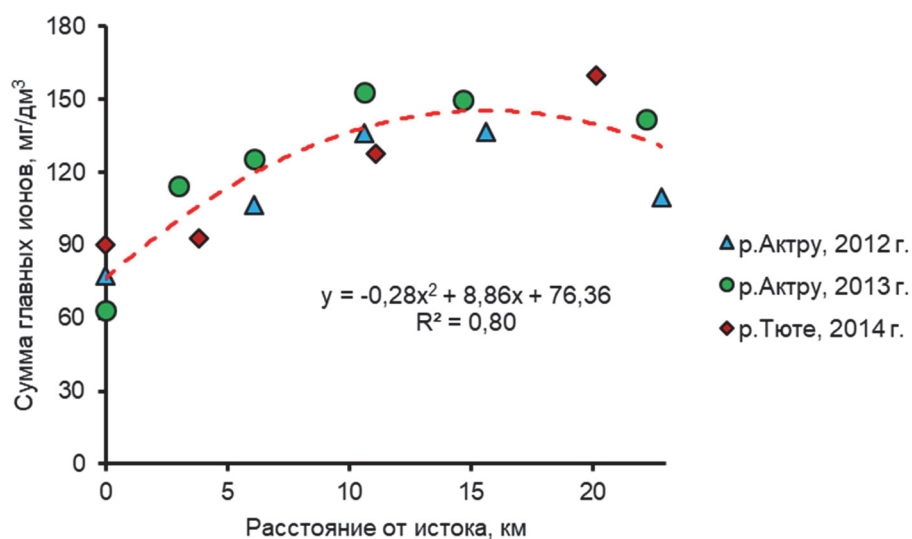


Рис. 2. Изменения суммы главных ионов в водах р. Актру в 2012 и 2013 гг. и р. Тютё в 2014 г.

Fig. 2. Changes in the sum of the main ions in the waters of the Aktru in 2012 and 2013 and the Tyuty River in 2014

Таблица 1

Общая характеристика химического состава ледниковых, речных и подземных вод рассматриваемой территории

Table 1

General characteristics of the chemical composition of glacial, river and groundwater in the researched area

Показатель	Единицы измерения	Ледники Левый и Малый Актру, Водопадный		Истоки р. Актру		р. Актру – участок среднего течения		р. Актру – участок нижнего течения		Подземные воды в с. Курай	
		<i>A</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>N</i>
pH	ед. pH	5,56	8	8,04	7	7,88	5	8,20	7	8,01	8
ЕС	мКС/см	10	3	68	6	98	4	121	7	275	3
Классификация*	–	C^{Ca}_I	–	C^{Ca}_{II}	–	C^{Ca}_{II}	–	C^{Ca}_{II}	–	C^{Ca}_{II}	–
Σ_{mi}	мг/дм³	21	9	66	7	97	5	153	7	235	8

Показатель	Единицы измерения	Ледники Левый и Малый Актру, Водопадный		Истоки р. Актру		р. Актру – участок среднего течения		р. Актру – участок нижнего течения		Подземные воды в с. Курай	
		A	N	A	N	A	N	A	N	A	N
Ca ²⁺	То же	2,3	9	12,1	7	14,8	5	25,3	7	32,6	8
Mg ²⁺	—/—	0,5	9	2,2	7	2,6	5	4,4	7	13,7	8
Na ⁺	—/—	0,7	9	0,7	7	5,4	5	6,4	7	3,5	8
K ⁺	—/—	0,4	9	0,7	7	1,1	5	1,5	7	0,6	8
HCO ₃ ⁻	—/—	13,4	9	40,1	7	46,6	5	83,3	7	158,7	8
CO ₃ ²⁻	—/—	0,0	9	1,7	7	6,7	5	6,0	7	0,4	8
SO ₄ ²⁻	—/—	1,0	9	7,3	7	17,8	5	25,0	7	21,1	8
Cl ⁻	—/—	2,6	9	1,4	7	1,9	5	1,5	7	3,9	8
NO ₃ ⁻	—/—	0,73	4	0,75	6	0,63	5	0,59	7	2,04	8
NO ₂ ⁻	—/—	0,01	4	0,01	6	0,01	5	0,00	7	0,01	8
NH ₄ ⁺	—/—	0,29	4	0,06	6	0,05	5	0,08	7	0,08	9
PO ₄ ³⁻	—/—	1,00	3	0,13	5	0,10	3	0,03	4	0,02	4
F ⁻	—/—	0,03	9	0,52	7	0,28	5	0,32	7	0,12	7
Si	—/—	0,90	9	1,77	7	1,41	5	1,49	7	3,39	7
Fe	—/—	1,16	8	3,48	7	3,95	5	2,05	7	0,05	8
PO	мгО/дм ³	4,4	9	1,9	7	0,6	5	0,8	7	2,4	6
Li	мкг/дм ³	3,7	9	3,0	7	2,7	5	3,8	7	0,02	8
Hg	То же	0,02	7	0,04	6	0,12	3	0,54	4	0,02	8
Zn	—/—	55,4	9	16,6	7	10,0	5	16,7	7	7,7	7
Cd	—/—	0,04	7	0,08	4	0,08	5	0,11	7	0,05	4
Pb	—/—	5,0	9	3,8	7	1,4	5	3,2	7	0,2	6
Cu	—/—	4,8	9	4,6	7	3,0	5	5,0	7	1,4	7
Al	—/—	812	5	1913	6	1410	5	442	7	142	7

Примечание. A – среднее арифметическое; N – объем выборки; Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); * классификация природных вод по химическому составу по О.А. Алекину [1970].

Note. A is arithmetic mean; N is the sample size; Σ_{mi} is the sum of the main ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); * classification of natural waters by chemical composition according to O.A. Alekin [1970].

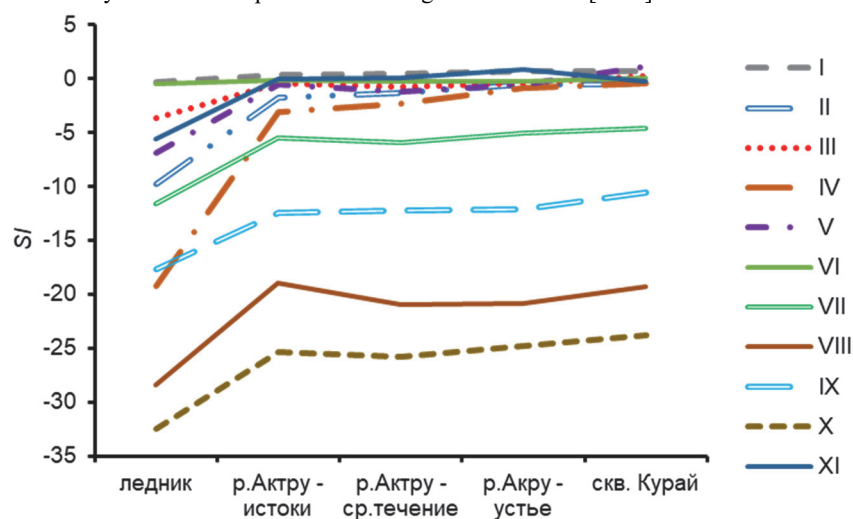


Рис. 3. Изменения индексов насыщения; реакции

I) Ca(ГК) = Ca²⁺ + ГК; II) CaCO₃(кальцит) = Ca²⁺ + CO₃²⁻; III) CaCO₃(кальцит) + CO₂ + H₂O = Ca²⁺ + 2·HCO₃⁻; IV) CaMg(CO₃)₂(доломит) = Ca²⁺ + Mg²⁺ + 2·CO₃²⁻; V) CaMg(CO₃)₂(доломит) + 2·CO₂ + 2·H₂O = Ca²⁺ + Mg²⁺ + 4·HCO₃⁻; VI) SiO₂(кварц) + 2·H₂O = H₄SiO₄⁰; VII) CaAl₂Si₂O₈(анортит) + 2·H⁺ + 6·H₂O = Al₂O₃·3·H₂O(гипсбит) + 2·H₄SiO₄⁰ + Ca²⁺; VIII) CaAl₂Si₂O₈(анортит) + 2·H⁺ + H₂O = Al₂Si₂O₇·2·H₂O(каолинит) + Ca²⁺; IX) 2·NaAlSi₃O₈(альбит) + 11·H₂O + 2·CO₂ = Al₂Si₂O₇·2·H₂O(каолинит) + 2·Na⁺ + 2·HCO₃⁻ + 4·H₄SiO₄⁰; X) 3·KAlSi₃O₈(ортоклаз) + 2·H⁺ + 12·H₂O = KAl₃Si₃O₁₀OH₂(мусковит) + 2·K⁺ + 6·H₄SiO₄⁰; XI) 2·KAl₃Si₃O₁₀OH₂(мусковит) + 2·H⁺ + 3·H₂O = 3·Al₂Si₂O₇·2·H₂O(каолинит) + 2·K⁺

Fig. 3. Saturation index changes; reactions

I) Ca(HA) = Ca²⁺ + HA(humic acids); II) CaCO₃(calcite) = Ca²⁺ + CO₃²⁻; III) CaCO₃(calcite) + CO₂ + H₂O = Ca²⁺ + 2·HCO₃⁻; IV) CaMg(CO₃)₂(dolomite) = Ca²⁺ + Mg²⁺ + 2·CO₃²⁻; V) CaMg(CO₃)₂(dolomite) + 2·CO₂ + 2·H₂O = Ca²⁺ + Mg²⁺ + 4·HCO₃⁻; VI) SiO₂(quartz) + 2·H₂O = H₄SiO₄⁰; VII) CaAl₂Si₂O₈(anorthite) + 2·H⁺ + 6·H₂O = Al₂O₃·3·H₂O(gibbsite) + 2·H₄SiO₄⁰ + Ca²⁺; VIII) CaAl₂Si₂O₈(anorthite) + 2·H⁺ + H₂O = Al₂Si₂O₇·2·H₂O(kaolinite) + Ca²⁺; IX) 2·NaAlSi₃O₈(albite) + 11·H₂O + 2·CO₂ = Al₂Si₂O₇·2·H₂O(kaolinite) + 2·Na⁺ + 2·HCO₃⁻ + 4·H₄SiO₄⁰; X) 3·KAlSi₃O₈(orthoclase) + 2·H⁺ + 12·H₂O = KAl₃Si₃O₁₀OH₂(muscovite) + 2·K⁺ + 6·H₄SiO₄⁰; XI) 2·KAl₃Si₃O₁₀OH₂(muscovite) + 2·H⁺ + 3·H₂O = 3·Al₂Si₂O₇·2·H₂O(kaolinite) + 2·K⁺

Возможное объяснение этого факта заключается в максимальном: 1) выщелачиванием горных пород при таянии ледового материала на границе ледников при активном участии микрофлоры и взвешивании в потоке твердых частиц в истоках горных водотоков; 2) выносе глинистых частиц на участке от нижнего конца открытой поймы до выхода из горно-лесного в горно-степной участок, на границе которого происходит аккумуляция речных наносов и сорбция на частицах ряда микроэлементов; 3) размыве русла рек на горно-степных участках и переложении наносов и увеличении притока в русло вод с большим временем и площадью контакта с горными породами.

Эти предположения подтверждаются данными, во-первых, о распределении содержаний главных ионов Σ_{mi} и взвешенных веществ C_{ss} по длине р. Тютё в июле 2014 г. (на выходе с ледника и в середине горного участка: $\Sigma_{mi} = 90\text{--}93 \text{ мг/дм}^3$ и $C_{ss} = 100 \text{ мг/дм}^3$; на границе горного и горно-степного участков: $\Sigma_{mi} = 128 \text{ мг/дм}^3$ и $C_{ss} = 50 \text{ мг/дм}^3$; в 20,1 км от устья: $\Sigma_{mi} = 160 \text{ мг/дм}^3$ и $C_{ss} = 125 \text{ мг/дм}^3$). Во-вторых, по материалам изучения донных отложений в июле 2013 г. [Savichev et al., 2016] отмечено значительное (более 20 %) присутствие каолинита во фракции донных отложений с диаметром частиц менее 0,01 мм на участках верхнего и нижнего течения р. Актру при том, что речные воды на всем протяжении реки обычно близки к равновесию с этим минералом. В-третьих, в 1998 г. выявлено последовательное увеличение в ряду «лёд в зоне абляции ледника Левый Актру – водоток ниже ледника Левый Актру – р. Актру (граница

горно-лесного и горно-степного участков)» содержания денитрифицирующих микроорганизмов (1 000; 100; 1 кл/мл соответственно), значительная часть которых представлена хемоорганотрофами, окисляющими органическое вещество до CO_2 и H_2O [Савичев и др., 2002]. В-четвертых, в июле 2022 г. в ряду «лёд – речные воды – озёрные воды» отмечены, с одной стороны, самые высокие валовые концентрации PO_4^{3-} , NH_4^+ и ряда микроэлементов в ледниковой воде (Ti, Zn, Sb, Pb) и (или) в твёрдых отложениях (Ti, Zn, Sb, Pb, B, Sc, V, Cr, Co, Y, La, Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Yb, Er, U) в зоне абляции ледника Левый Актру, а с другой – общее увеличение от ледника вниз по течению валовых содержаний (в ряду $A5 \rightarrow A4 \rightarrow A2$) в речной воде Al, Rb, Pb, Y, La, Ce, Nd, Sm и ряда других элементов и некоторого снижения доли их растворённо-коллоидной форм по сравнению со взвешенно-коллоидной. Вниз по течению от ледника Левый Актру также уменьшается доля растворённо-коллоидных форм Fe, B, Ti, V, Cr, Co, Cu (табл. 2).

В изменении содержаний химических элементов в кислотных и водных вытяжках из донных отложений в 2013 и 2022 гг. хорошо заметные однонаправленные тенденции в целом не выявлены [Savichev et al., 2016]. Хотя нельзя не отметить зафиксированные в 2022 г. максимумы концентраций Fe, Si, P, B, Sc, Ti, V, Cr, Co, Cu, As, Y, Sb, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb, Pb, U в твердых отложениях на поверхности (языка) ледника Левый Актру (табл. 2), что с учетом указанных выше фактов свидетельствует об интенсивном выщелачивании частиц горных пород в зоне абляции ледника в результате их взаимодействия с тальми водами и микроорганизмами.

Таблица 2

Химический состав поверхностных вод и водных вытяжек из донных отложений в водосборе реки Актру в 2022 г.

Table 2

Chemical composition of surface waters and water extracts from bottom sediments in the catchment area of the Aktru River in 2022

Показатель	Единицы измерения	Пункт отбора проб (см.рис. 1)					
		A1	A6	A4	A2	A3	A5
		Ручей Водопадный	Истоки р. Малый Актру	р. Большой Актру, верхнее течение	р. Актру, лагерь Актру	Голубое озеро	Ледник Левый Актру
Дата	—	18.07.2022	21.07.2022	19.07.2022	18.07.2022	19.07.2022	19.07.2022
Широта	°	50,071	50,070	50,072	50,080	50,079	50,077
Долгота	°	87,772	87,768	87,758	87,776	87,724	87,728
Высота	М	2 290	2 234	2 334	2 147	2 840	2 722
T_w	°C	7,5	6,3	5,6	8,0	7,4	—
Eh	мВ	101	166	130	121	118	120
pH	ед. pH	7,43	7,74	8,04	7,89	7,61	6,40
CO_2	мг/дм ³	3,5	1,8	0,0	1,8	5,3	1,8
PO	мгО/дм ³	0,5	0,7	0,3	0,6	0,5	1,6
Σ_{mi}	мг/дм ³	55	101	91	96	109	16
$\text{Ca}^{2+}(\text{a})$	мг/дм ³	11,5	16,4	18,0	18,2	18,0	1,2
Ca(w)	мг/кг	58	46	41	43	47	40
$\text{Mg}^{2+}(\text{a})$	мг/дм ³	1,4	6,1	3,1	3,7	6,3	0,9
Mg(w)	мг/кг	4,2	7,4	4,0	5,0	2,2	1,4
$\text{Na}^+(\text{a})$	мг/дм ³	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	1,3

Показатель	Единицы измерения	Пункт отбора проб (см.рис. 1)					
		A1	A6	A4	A2	A3	A5
		Ручей Водопадный	Истоки р. Малый Актру	р. Большой Актру, верхнее течение	р. Актру, лагерь Актру	Голубое озеро	Ледник Левый Актру
Na(w)	мг/кг	1,7	1,2	1,2	2,6	0,9	1,3
K ⁺ (a)	мг/дм ³	0,2	0,6	1,1	0,8	1,0	0,9
K(w)	мг/кг	3,3	3,7	6,1	5,8	7,6	5,1
HCO ₃ ⁻ (a)	мг/дм ³	38	63	53	59	64	9
CO ₃ ²⁻ (a)	мг/дм ³	<0,5	<0,5	1,2	<0,5	<0,5	<0,5
SO ₄ ²⁻ (a)	мг/дм ³	2,3	14,0	13,0	12,5	18,0	0,5
Cl ⁻ (a)	мг/дм ³	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	2,3
F ⁻ (a)	мг/дм ³	2,88	0,05	0,17	1,01	0,05	0,05
NH ₄ ⁺ (a)	мг/дм ³	0,25	0,06	0,09	0,09	0,04	0,87
NO ₂ ⁻ (a)	мг/дм ³	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
NO ₃ ⁻ (a)	мг/дм ³	0,66	1,30	1,26	1,01	1,95	0,29
PO ₄ ³⁻ (a)	мг/дм ³	0,50	0,13	0,13	0,13	0,36	2,92
P(a)	мг/дм ³	70	1	446	1309	18	4977
P(s)	%	20,0	20,0	2,9	1,1	20,0	20,0
P(w)	мкг/кг	97	92	28	407	89	1571
Si(a)	мг/дм ³	0,80	0,23	4,21	10,62	0,48	4,38
Si(s)	%	32,8	86,2	6,7	3,0	42,1	1,9
Si(w)	мг/кг	1,86	5,69	2,84	3,81	1,85	5,92
Fe(a)	мг/дм ³	1,29	0,06	5,96	24,56	0,38	6,98
Fe(s)	%	1,5	64,0	0,5	0,2	8,5	0,7
Fe(w)	мг/кг	0,80	2,70	0,63	1,23	1,27	3,46
Al(a)	мкг/дм ³	779	35	3688	11929	202	3519
Al(s)	%	1,0	77,7	0,8	0,4	4,8	0,9
Al(w)	мкг/кг	2344	3553	2669	3082	3946	3419
Cu(a)	мкг/дм ³	3,0	0,1	11,3	42,5	0,7	30,0
Cu(s)	%	3,8	53,2	1,4	0,4	23,4	15,0
Cu(w)	мкг/кг	18,0	14,5	12,0	23,3	24,4	179,0
Zn(a)	мкг/дм ³	6,8	<0,1	26,0	80,5	3,1	141,6
Zn(s)	%	36,4	20,0	3,4	0,8	3,3	2,5
Zn(w)	мкг/кг	0,73	6,93	2,53	45,17	10,00	27,81
Ti(a)	мкг/дм ³	8,60	0,37	83,01	143,26	7,03	178,44
Ti(s)	%	1,2	55,6	0,7	0,4	3,9	1,8
Ti(w)	мкг/кг	11,7	111,3	13,5	33,9	45,7	133,5
La(a)	мкг/дм ³	2,61	0,02	4,35	18,09	0,08	4,17
La(s)	%	0,2	67,0	0,3	0,1	6,8	1,5
La(w)	мкг/кг	0,36	0,87	0,23	0,49	0,92	2,96
Ce(a)	мкг/дм ³	5,40	0,03	9,34	43,80	0,13	8,57
Ce(s)	%	0,2	59,3	0,3	0,1	5,4	1,3
Ce(w)	мкг/кг	0,92	2,27	0,34	1,02	1,27	5,15

Примечание. (a) – валовое содержание; (s) – растворенная форма и часть коллоидной формы (после мембранного фильтра 0,45 мк); (w) – содержание в водной вытяжке из донных отложений.

Note. (a) is gross content; (s) is dissolved form and part of the colloidal form (after the membrane filter 0,45 microns); (w) is content in water extract from bottom sediments.

Временные (многолетние) закономерности. Количество пунктов сопоставления гидрохимических данных за разные годы весьма ограничено (два пункта на р. Малый Актру и по четыре пункта на леднике Левый Актру, рр. Большой Актру и Актру (лагерь Актру)). Тем не менее визуальный анализ материалов наблюдений позволяет говорить об определенном увеличении со второй половины 1990-х гг. суммы главных ионов Σ_{mi} , концентраций HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} в водах рек Большой и Малый Актру (рис. 4).

Не столь однозначно изменение в указанных водах концентраций Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , Fe, Cu, Zn. Менее очевидна динамика гидрохимических показателей

вод р. Актру у лагеря Актру и в водах, полученных при таянии проб льда ледника Левый Актру (рис. 4).

С учётом этих и указанных выше данных можно предположить, что наблюдается некоторое увеличение выноса ряда веществ при деградации ледников (судя по увеличению в поверхностных водах на этих участках концентраций Ca, K, P, Al, Fe, Cu, Zn, Pb), причем непосредственно вблизи них. Вопрос об их источнике требует специальных исследований, но можно отметить, что, по данным [Savichev et al., 2016; Савичев и др., 2019], во фракциях донных отложений 0,01–5 мм присутствует кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, слюда, кальцит, хлорит; во фракции с диаметром частиц

менее 0,01 мм – кварц, слюда, хлорит, часто – каолинит, иногда альбит, кальцит, цеолит, в верхнем и среднем течении р. Актру – калиевый полевой шпат.

Уже в 2–3 км от ледников происходит: 1) смешение водных масс с химическим составом, формирующимся в условиях различных соотношений дождевых, талых вод и вод, фильтрующихся через морен-

ные отложения ледников с разной скоростью деградации; 2) отложение части наносов, в том числе малорастворимых веществ, образующихся при взаимодействии воды с горными породами. Косвенным подтверждением последнего предположения служат результаты расчета индекса насыщения речных вод относительно гуматов кальция (рис. 5).

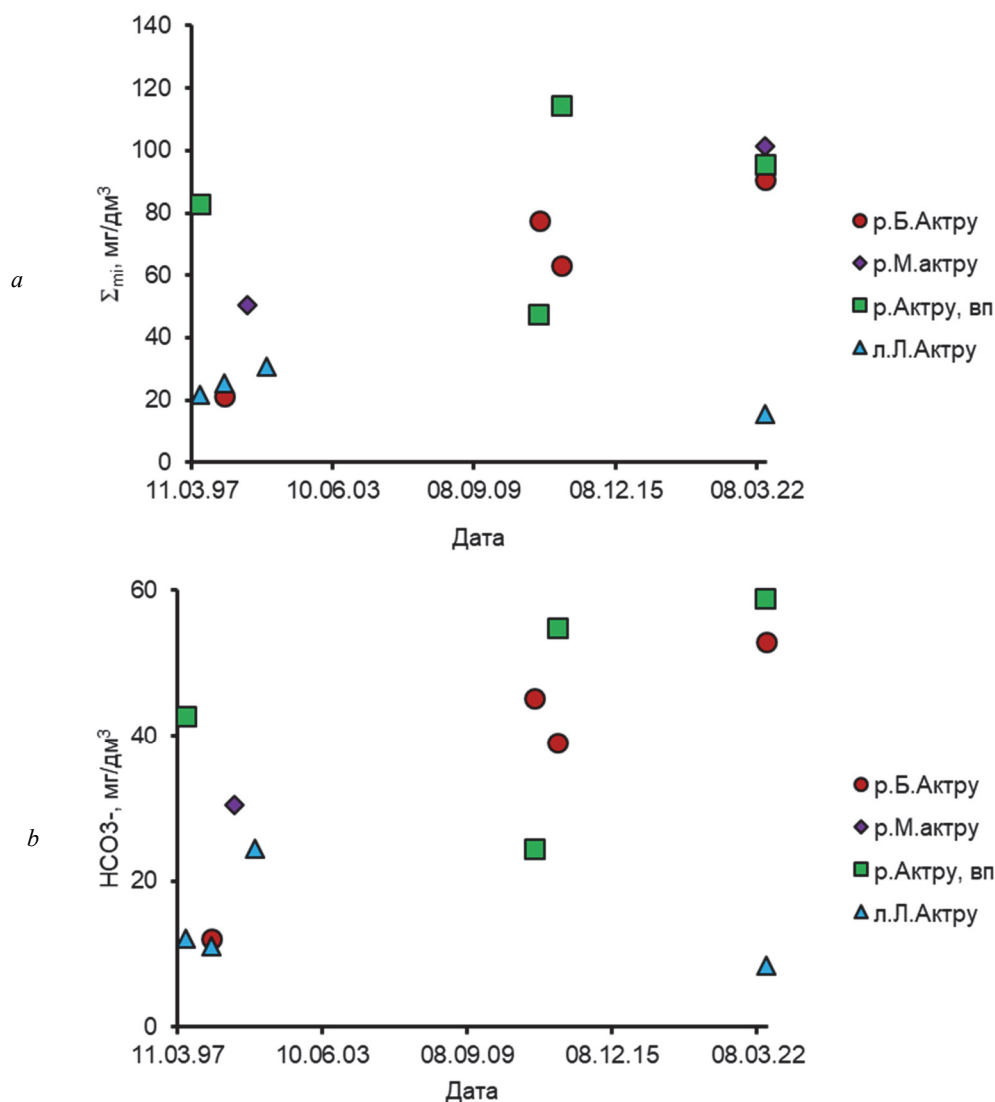


Рис. 4. Изменения суммы главных ионов Σ_{mi} (a) и содержания HCO_3^- (b) в водах р. Актру в 1997–2022 гг.

Fig. 4. Changes in the sum of the main ions Σ_{mi} and (a) HCO_3^- (b) in the waters of the Aktru River in 1997–2022

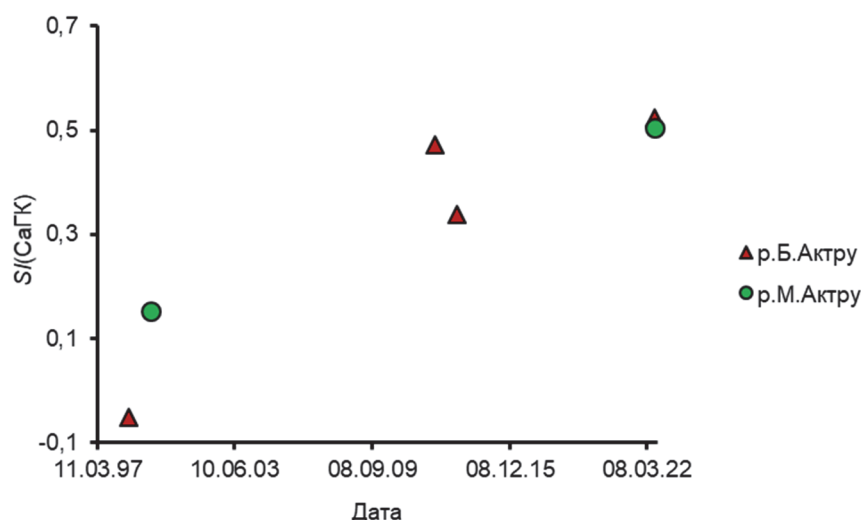


Рис. 5. Изменения индексов насыщения речных вод относительно гумата кальция ($\text{Ca(ГК)} = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}$)

Fig. 5. Changes in the saturation indices of river waters relative to calcium humate ($\text{Ca(НА)} = \text{Ca}^{2+} + \text{НА}$)

Более полное представление о временных изменениях могло бы быть получено при анализе динамики водного стока при допущении постоянства параметров, установленной в [Паромов и др., 2014] зависимости между модулем водного стока M_Q (л/(с×км²)) и величины Σ_{mi} :

$$\Sigma_{mi} = \exp((5,4377 \pm 0,3620) - (0,0071 \pm 0,0028) \cdot M_Q);$$

квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,66$.

Однако в настоящее время есть ряд вопросов по восстановлению пропусков гидрометеорологических наблюдений, проводившихся до 1994 г. специалистами Росгидромета, а в последние годы – в ТГУ и ИМКЭС СО РАН [Вершинин и др., 2014; Zemtsov, Savichev, 2015], что определяет актуальность соответствующего отдельного исследования.

Заключение

Пространственные изменения минерализации природных вод горно-ледникового бассейна характеризуются её общим увеличением в направлении «ледник → речные воды → подземные воды», на фоне которого отмечается рост концентраций ряда химических элементов в истоках притоков р. Актру и на границе горно-лесного и горно-степного участков.

Это объясняется интенсивным выщелачиванием горных пород при таянии ледового материала на границе ледников при активном участии микрофлоры и взвешивании в потоке твердых частиц в истоках горных водотоков, особенностями русловых процессов, сопровождающимися аккумуляцией продуктов взаимодействия вод с горными породами.

В течение 1997–2022 гг. наблюдается некоторая активизация взаимодействий в системе «вода – порода» в истоках горных водотоков. Она происходит, предположительно, за счет увеличения площади соприкосновения воды с горными породами, ранее находившимися под ледниками и (или) при отрицательной температуре. Как следствие этой активизации – некоторое увеличение минерализации вод притоков р. Актру – рек Большой и Малый Актру, причем преимущественно из-за роста концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- . Изменение концентраций других главных ионов, а также Fe, Cu, Zn выражено гораздо хуже. В 2–3 км ниже по течению в водах р. Актру происходит смешение вод разного состава и, возможно, отложение части наносов, включая малорастворимых веществ, образующихся в зоне абляции ледников. В результате этого уже в районе лагеря Актру временные изменения химического состава речных вод если и есть, то уже не столь очевидны.

Для уточнения полученных выводов целесообразно расширение программы исследований на стационарах Актру с целью: 1) восстановления рядов водного стока и выявления их временной изменчивости; 2) систематического изучения химического состава речных вод на разном удалении от ледников и в разные фазы водного режима; 3) изучения содержания углекислого газа в приземных слоях атмосферного воздуха и в речных водах с учетом необходимости более глубокого понимания поведения карбонатной системы как одного из важных факторов эволюции геохимического состояния водных объектов рассматриваемой территории; 4) оценки роли микрофлоры в формировании химического состава природных вод на границе ледников.

Список источников

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Вершинин Д.А., Уймаинова В.А., Овсянников С.А. Сток взвешенных наносов р. Актру и особенности его режима за последние 50 лет // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 381. С. 226–231.
- Галахов В.П., Нарожнев Ю.К., Никитин С.А., Окишев П.А., Севастьянов В.В., Севастьянова Л.М., Шантыкова Л.Н., Шуруп В.И. Ледники Актру (Алтай). Водно-ледовый и тепловой баланс горно-ледниковых бассейнов / отв. ред. Д.А. Бураков. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 120 с.
- Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / под ред. Т.В. Гусевой. М. : ФОРУМ, ИНФРА-М, 2007. 192 с.
- ГОСТ 17.1.5.01-80. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis. М. : Изд-во стандартов, 1984. 7 с.
- ГОСТ 17.1.5.05-85. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. General requirements for surface and sea waters, ice and atmospheric precipitation sampling. М. : Изд-во стандартов, 2000. 11 с.
- ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Water. General requirements for sampling. М. : Стандартинформ, 2020. 35 с.
- Кислов А.В. Изменения и изменчивость глобального климата // Современные глобальные изменения природной среды : в 2 т. Т. 1. М. : Научный мир, 2006. С. 118–129.
- Нарожный Ю.К., Никитин С.А., Лукьянов А.А., Осипов А.В. Горно-ледниковый бассейн Актру: новые морфометрические и ресурсные характеристики // Вопросы географии Сибири. Вып. 26. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2006. С. 67–74.
- Нарожный Ю.К., Паромов В.В., Шантыкова Л.И. Возможные тенденции изменения режима ледников и климата высокогорья Алтая до 2010 г. // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 220–224.
- Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / под ред. В.М. Котлякова. М. : Наука, 2006. 482 с.
- Паромов В.В., Нарожный Ю.К., Шантыкова Л.Н. Оценка современной динамики и прогноз гляциологических характеристик ледника Малый Актру (Центральный Алтай) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 2. С. 171–182. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182
- Паромов В.В., Савичев О.Г., Шантыкова Л.Н., Торгашева К.А. Ионный сток и химический состав вод ледниковой реки Актру (Горный Алтай) // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 383. С. 227–231.
- Паромов В.В., Шантыкова Л.И. Динамика гидрометеорологических характеристик высокогорья Алтая во второй половине XX века // Материалы гляциологических исследований. 2001. Вып. 90. С. 112–116.
- Пасечник Е.Ю., Гусева Н.В., Савичев О.Г., Льготин В.А., Балобаненко А.А., Домаренко В.А., Владимирова О.Н. Микроэлементный состав подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби как фактор формирования их эколого-геохимического состояния // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 4. С. 54–63. doi: 10.18799/24131830/2020/4/2593
- Поповнин В.В. Современная эволюция ледников Земли // Современные глобальные изменения природной среды : в 2 т. Т. 1. М. : Научный мир, 2006. С. 507–577.
- Савичев О.Г., Домаренко В.А., Арбузов С.И., Пшеничкин А.Я., Вильгельм Е.А. Условия выноса и аккумуляции химических элементов в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай) // Разведка и охрана недр. 2019. № 3. С. 55–62.
- Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. 2003. № 2. С. 108–119.
- Савичев О.Г., Нарожный Ю.К., Паромов В.В., Фахрутдинов Р.Ф. Химический и микробиологический состав водно-ледниковых объектов в бассейне р. Актру (Горный Алтай) // Материалы гляциологических исследований. 2002. Вып. 92. С. 187–191.
- Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2009 г. / гл. ред. В.А. Льготин. Томск : Томскгеомониторинг, 2010. Вып. 6. 193 с.
- СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. 72 с.
- Тимошок Е.Е., Нарожный Ю.К., Диркс М.Н., Скороходов С.Н., Березов А.А. Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая. Томск : Изд-во НТЛ, 2008. 208 с.
- Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1 : 200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. М. : ИМГРЭ, 2002. 92 с.
- Manual on Stream Gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Savichev O., Matveenko I., Paromov V. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation) // MATEC Web of Conferences. 2016. No. 85 (2): 01031. P. 1–7. doi: 10.1051/mateconf/20168501031
- Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyi Altai) // Geography and Natural Resources. 2013. V. 34, No. 4. P. 364–370. doi: 10.1134/S1875372813040100
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.G. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections // Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences / Groisman and Gutman (eds). Springer, 2013. Ch. 4. P. 111–154. URL: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4569-8_4
- Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. 2008. V. 46, No. 13. P. 1285–1398.
- Weight W.D. Hydrogeology Field Manual. 2nd ed. 2008. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
- Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research // International Journal of Environmental Studies. 2015. V. 72, No. 3. P. 386–396. doi: 10.1080/00207233.2015.1019299

References

- Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1970. 444 p. In Russian
- Vershinin D.A., Uimanova V.A., Ovsyannikov S.A. *Stok vzveshennykh nanosov r. Aktru i osobennosti yego rezhima za posledniye 50 let* [The runoff of suspended sediments of the Aktru river and features of his regime over the past 50 years] // *Bulletin of the Tomsk State University*. 2014. 381. pp. 226–231. In Russian
- Galakhov V.P., Narozhnev Yu.K., Nikitin S.A., Okishev P.A., Sevastyanov V.V., Sevastyanova L.M., Shantykhova L.N., Shurov V.I. *Ledniki Aktru (Altay). Vodno-ledovyy i teplovoy balans gorno-lednikovyykh basseynov* [Glaciers Aktru (Altai). Water-ice and thermal balance of mountain-glacial basins] / eds. D.A. Burakov. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1987. 120 p. In Russian
- Gidrokhimicheskiye pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment] (2007) ed. T.V. Guseva. Moscow: FORUM, INFRA-M. 192 p. In Russian
- GOST 17.1.5.01-80. *Obshchiye trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy vodnykh ob'yektov dlya analiza na zagryaznennost'*. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis. Moscow: Publishing house of standards. 1984. 7 p. In Russian
- GOST 17.1.5.05-85. *Obshchiye trebovaniya k otboru prob poverkhnostnykh i morskikh vod, l'da i atmosferykh osadkov*. General requirements for surface and sea waters, ice and atmospheric precipitation sampling. Moscow: Publishing house of standards. 2000. 11 p. In Russian
- GOST R 59024-2020. *Voda. Obshchiye trebovaniya k otboru prob*. Water. General requirements for sampling. Moscow: Standartinform. 2020. 35 p. In Russian
- Kislov A.V. *Izmeneniya i izmenchivost' global'nogo klimata* [Changes and variability of the global climate]. In: *Sovremennyye global'nyye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. In 2 volumes, V.1. Moscow: Nauchnyy mir. 2006. pp. 118–129. In Russian
- Narozhnyy Yu.K., Nikitin S.A., Luk'yanov A.A., Osipov A.V. *Gorno-lednikovyy basseyn Aktru: novyye morfometricheskiye i resursnyye kharakteristiki* [The Aktru mountain-glacial basin: new morphometric and resource characteristics]. *Voprosy geografii Sibiri – Problems of Geography of Siberia*. Issue. 26. Tomsk: Publishing House of Tomsk University. 2006. pp. 67–74. In Russian
- Narozhny Yu.K., Paromov V.V., Shantykhova L.I. *Vozmozhnyye tendentsii izmeneniya rezhima lednikov i klimata vysokogor'ya Altaya do 2010* [Possible trends in changes in the regime of glaciers and climate in the Altai highlands up to 2010]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy – Materials of glaciological research*. 2005. 98, pp. 220–224.
- Oledeneniye Severnoy i Tsentral'noy Yevrazii v sovremennuyu epokhu* [Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era] / ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Nauka. 2006. 482 p. In Russian
- Paromov V.V., Narozhnyy YU.K., Shantykhova L.N. *Otsenka sovremennoy dinamiki i prognoz glyatsiologicheskikh kharakteristik lednika Malyy Aktru (Tsentral'nyy Altay)* [Assessment of modern dynamics and forecast of glaciological characteristics of the Maly Aktru glacier (Central Altai)] // *Lod i sneg – Ice and snow*. 2018. 58 (2). pp. 171–182. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182. In Russian
- Paromov V.V., Savichev O.G., Shantykhova L.N., Torgasheva K.A. *Ionnyy stok i khimicheskiy sostav vod lednikovoy reki Aktru (Gornyy Altay)* [Ion sink and chemical composition of the waters of the Aktru glacial river (Gorny Altai)] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Tomsk State University*. 2014. 383. pp. 227–231. In Russian
- Paromov V.V., Shantykhova L.I. *Dinamika gidrometeorologicheskikh kharakteristik vysokogor'ya Altaya vo vtoroy polovine XX veka* [Dynamics of hydrometeorological characteristics of the Altai highlands in the second half of the 20th century. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy – Materials of glaciological research*. 2001. 90. pp. 112–116. In Russian
- Pasechnik E.Yu., Guseva N.V., Savichev O.G., Domarenko V.A., Vladimirova O.N. Trace elements composition of underground waters of the upper hydrogeodynamic zone in the basin of upper ob as a factor of formation of their ecological-geochemical condition // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2020. 331 (4). pp. 54–63. doi: 10.18799/24131830/2020/4/2593. In Russian
- Popovnin V.V. *Sovremennaya evolyutsiya lednikov Zemli* [Modern evolution of the Earth's glaciers]. In: *Sovremennyye global'nyye izmeneniya prirodnoy sredy* [Modern global changes in the natural environment]. In 2 volumes, V.1. Moscow: Nauchnyy mir. 2006. pp. 507–577. In Russian
- Savichev O.G., Domarenko V.A., Arbuzov S.I., Pshenichkin A.Ya., Wilhelm E.A. *Usloviya vynosa i akkumulyatsii khimicheskikh elementov v gorno-lednikovom bassejne Aktru (Gornyy Altay)* [Conditions for the removal and accumulation of chemical elements in the Aktru mountain-glacial basin (Gorny Altai)]. *Razvedka i okhrana neдр – Exploration and protection of mineral resources*. 2019. 3. pp. 55–62. In Russian
- Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Composition and balance of bottom sediments of the river. Tom with river waters] // *Geoekologiya – Geoecology*. 2003. 2. pp. 108–119. In Russian
- Savichev O.G., Narozhny Yu.K., Paromov V.V., Fakhruddinov R.F. *Khimicheskiy i mikrobiologicheskiy sostav vodno-lednikovyykh ob'yektov v bassejne r.Aktru (Gornyy Altay)* [Chemical and microbiological composition of water-glacial objects in the Aktru river basin (Gorny Altai)]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy – Materials of glaciological research*. 2002. 92. pp. 187–191. In Russian
- Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal'nogo okruga v 2009* [A condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2009]. Ed. by V.A. Lgotin. Tomsk. Tomskgeomonitring Publ. 2010. 6. 193 p. In Russian
- SP 33-101-2003. *Opreделение osnovnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Rulebook 33-101-2003. Definition of the main hydrological characteristics]. Moscow: Gosstroy Rossii Publ., 2004. 72 p. In Russian
- Timoshok E.E., Narozhny Yu.K., Dirks M.N., Skorokhodov S.N., Berezov A.A. *Dinamika lednikov i formirovaniye rastitel'nosti na molodykh morenakh Tsentral'nogo Altaya* [Glacier dynamics and vegetation formation on young moraines of the Central Altai]. Tomsk: NTL Publishing House. 2008. 208 p. In Russian
- Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotsелеvogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000] Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow: IMGRE Publ. 2002. 92 p. In Russian

Manual on Stream Gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. 2010. 252 p.

Savichev O., Matveenkov I., Paromov V. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation) // MATEC Web of Conferences. 2016. 85 (2): 01031. pp. 1–7. doi: 10.1051/mateconf/20168501031.

Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gorniy Altai) // Geography and Natural Resources. 2013. 34 (4). pp. 364–370. doi: 10.1134/S1875372813040100.

Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.G. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. In: Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences / Groisman and Gutman (eds). Springer. 2013. Ch. 4. pp. 111–154. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4569-8_4.

Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. Geochemistry International. 2008. 46(3). pp. 1285–1398.

Weight W.D. Hydrogeology Field Manual. 2-nd edition, 2008. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc. 2008. 751 p.

Zemtsov V.A., Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research. International Journal of Environmental Studies. 2015. 72(3). pp. 386–396. doi: 10.1080/00207233.2015.1019299.

Информация об авторах:

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: OSavichev@mail.ru

Хващевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: Garibova@yandex.ru

Паромов В.В., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Вклад авторов:

Савичев О.Г. – научное руководство; концепция исследования; полевые работы; анализ данных; написание исходного текста; итоговые выводы.

Хващевская А.А. – руководство и непосредственное участие в лабораторных работах; доработка текста; итоговые выводы.

Паромов В.В. – проведение полевых работ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Savichev O.G., Dr. Sci. (Geography), Professor, Department of Geology, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: OSavichev@mail.ru

Khvashchevskaya A.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: Garibova@mail.ru

Paromov V.V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Hydrology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Contribution of the authors:

Savichev O.G. – scientific guidance; research concept; field work; data analysis; writing the original text; final conclusions.

Khvashchevskaya A.A. – leadership and direct participation in laboratory work; text revision; final conclusions.

Paromov V.V. – carrying out field work.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2022; одобрена после рецензирования 02.02.2023; принята к публикации 13.06.2024

The article was submitted 10.11.2022; approved after reviewing 02.02.2023; accepted for publication 13.06.2024