

УДК 550.461

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРНОГО АЛТАЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, А.М. Надеева

*Томский политехнический университет, Томск,**E-mail: osavichev@mail.ru, viktor_domarenko@mail.ru, prezident.2001n@mail.ru*

Выполнено исследование минералого-геохимического состояния водных объектов в Горном Алтае (бассейн Актру и участок плоскогорья Укок) в 2020-е гг. Получена оценка минерального состава фракции донных отложений с диаметром частиц менее 1 мм, химического состава поверхностных вод и вытяжек из донных отложений. Выявлены основные черты механизма формирования их состояния, связанные с интенсивным растворением первичных алюмосиликатов в зоне взаимодействия талых ледниковых вод с горными породами, насыщением вод на участках верхнего течения рек (11–20 км) и последующим осаждением и переотложением наносов. Сделано предположение о возможных изменениях геохимического состояния водных объектов при потеплении климата.

Ключевые слова: минералого-геохимическое состояние; пространственные изменения; поверхностные водные объекты; Горный Алтай.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17906

Дата поступления: 11.11.2025. Принята к печати: 11.12.2025

Горный Алтай характеризуется чрезвычайно разнообразными природными условиями – от горностепных до горно-ледниковых районов, причем все компоненты соответствующих природно-территориальных комплексов (ПТК) достаточно сильно реагируют на изменения климата. Это определяет актуальность исследований состояний тех компонентов ПТК, условий и механизмов их формирования в рамках общей проблемы изучения, прогнозирования и управления климатическими изменениями природных и социально-экономических систем. Особый интерес вызывают вопросы, связанные с изучением последствий деградации ледников. Обычно подобные работы связаны с оценкой фактических и/или прогнозных значений показателей рельефа, растительного покрова, водного стока

и химического состава поверхностных вод [Галахов и др., 1987; Оледенение..., 2006; Тимошок и др., 2008; Окишев, 2011; Пузанов и др., 2022].

Нами рассмотрен минералого-геохимический аспект указанной выше проблемы, что и определило цель исследования – оценка состояния отложений поверхностных водных объектов в условиях климатических изменений на примере горно-ледникового бассейна Актру (элемент речной системы «Актру – Чуя – Катунь – Обь») и участка плоскогорья Укок (болото в долине р. Аргамджи – элемента речной системы «Аргамджи – Калгуты – Ак-Аллаха (Аргут после впадения р. Жасатер) – Катунь – Обь») в Кош-Агачском районе республики Алтай. Задачи исследования:

1) предварительная оценка минерального

и химического состава донных и болотных отложений в разных условиях, которые ранее (в пределах голоцена) предположительно наблюдались в регионе; 2) выявление взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных (болотных) отложений и химическим составом поверхностных вод.

Предварительный характер оценок обусловлен общим дефицитом актуальной информации, полученной комплексно (в составе изучения различных сред) с использованием современных методов, и направлен на планирование дальнейших, более масштабных минералого-геохимических исследований горного Алтая. Выбор объектов связан со следующими обстоятельствами.

1. Горно-ледниковый бассейн Актуру площадью более 160 км² расположен в восточной части горного узла Биш-Иирду северного склона Северо-Чуйского хребта (интервал высот 1470–4044 м над уровнем моря). Бассейн включает в себя ряд горных ледников: долинные ледники Левый, Правый и Малый Актуру, ледники плоских вершин Водопадный и кар Малого Актуру, висячий ледник на вершине Кара-Таш и карово-висячий ледник Стажер [Галахов и др., 1987; Тимошок и др., 2008] и является, видимо, наиболее изученным горно-ледниковым бассейном в Северной Азии [Галахов и др., 1987; Оледенение..., 2006]. В его пределах выявлено общее сокращение ледников, в том числе – ледников Левый и, особенно, Малый Актуру [Оледенение..., 2006; Тимошок и др., 2008; Паромов и др., 2018]. В геологическом отношении эта территория сложена вулканогенно-терригенными и карбонатными отложениями

девонского возраста, прорванными диоритами, гранодиоритами, гранитами Актуринского интрузивного массива, в процессе становления которого сформировалась сложная полихронная магмо-рудно-метасоматическая система с полиметалльно-благороднометалльной специализацией (Zn, Pb, Cu, Hg, Au, Pt, Pd, Ag) [Гидрогеология СССР..., 1972; Государственная геологическая..., 2011; Гусев и др., 2014; Недра России..., 2001];

2. При отступлении ледников ожидается интенсификация взаимодействия в системе «вода – порода». Соответственно, территория, формирующаяся в процессе деградации ледника, представляет собой «природную лабораторию» для изучения подобных взаимодействий. Это определяет целесообразность отбора и последующего изучения проб грунтов и воды на участках ледников и на различном удалении от них в предположении определенной пропорциональности расстояния от ледника и времени взаимодействий [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2018; Савичев и др., 2024];

3. Изучение болотных экосистем в разных регионах мира, включая бассейн р. Обь, показало, что в торфах может аккумулироваться значительное количество минеральных веществ и органо-минеральных комплексов. Однако большая часть соответствующих исследований выполнена на равнинных, гораздо реже – в горных районах. Если предположить, что горные болота являются «фильтром», остававливающим значительную часть стока взвешенных минеральных веществ, то комплекс пунктов пробоотбора в бассейне Актуру целесообразно дополнить пунктом отбора проб болотных вод и торфа.

В бассейне Актру подобный объект пока не выявлен, но обнаружено болото в долине р. Аргамджи на плоскогорье Укок, расположенном в географическом отношении между хребтами Южного Алтая и Южно-Чуйским, а в геологическом – в пределах Талицко-Монголо-Алтайской геосинклинального поднятия; его составной частью является Калгутинский рудный район, приуроченный к крупной разрывной структуре и характеризующийся комплексным вольфрам-молибден-висмутовым оруденением со свинцом и медью [Гидрогеология СССР..., 1972; Недра России..., 2001; Поцелуев и др., 2008]. Несмотря на различия геологических условий, общие черты механизмов формирования геостока все же имеются (примерно одинаковые условия формирования и деградации оледенения в четвертичном периоде [Окишев, 2011]), что на данном этапе исследования определяет возможность сопоставления данных по бассейну Актру и Ак-Аллаха, включая водосбор р. Аргамджи.

Материалы и методы

В течение 1997–2023 гг. нами выполнен комплекс исследований поверхностных и подземных водных объектов Горного Алтая, что позволило накопить определенный объем гидрогеохимической информации [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2024]. В том числе, в 2022 г. в бассейне Актру были отобраны пробы воды и грунта в следующих объектах (рис. 1): А1) ручей Водопадный (здесь и далее для водотоков и озера: вода из интервала глубин 0.1–0.3 м от поверхности; донные отложения – в 0.2–1.0 м от уреза воды в слое 0.2 м от поверхности дна, смешанные пробы из точеч-

ных проб в вершинах в виде равнобедренного треугольника со стороной 1 м; для определения химического и минерального состава отбиралась фракция с диаметром частиц ≤ 1 мм); А2) река Актру в районе альплагеря Актру (вода и донные отложения), 20.4 км; А3) озеро Голубое, расположенное на границе ледника Левый Актру (вода и донные отложения); А4) река Актру при выходе с ледника Левый Актру, в 22.4 км от устья (вода и донные отложения); А5) ледник Левый Актру, краевой участок, прилегающий к озеру Голубое (проба льда с глубины 0.2–0.5 м и твердый материал на поверхности ледника, также смешанная проба из трех точечных проб); А6) ручей, вытекающий из ледника Малый Актру на участке, ранее (в 1989 г.) находившемся под ледником (вода и донные отложения). В 2023 г. выполнен отбор проб U7 болотных вод и торфяных отложений в долине р. Аргамджи на плоскогорье Укок: проба вода – также из слоя 0.1–0.3 м от поверхности, проба торфа – в слое 0.1–0.5 м.

Схема размещения пунктов отбора проб в 2022 и 2023 гг. приведена на рис. 1, их географические координаты – в табл. 1. При выполнении отбора проб с учетом требований [Требования..., 2002; Manual..., 2010; ГОСТ Р 59024-2020] проводились измерения pH, Eh, удельной электропроводности ЕС, температуры воды и фильтрация воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм для изучения соотношения коллоидной и взвешенно-коллоидной форм миграции химических элементов. В пробе торфяных отложений выделены фракция твердых веществ с диаметром частиц менее 1 мм и 0.002 мм (глинистый грунт [ГОСТ 25100-2020]).

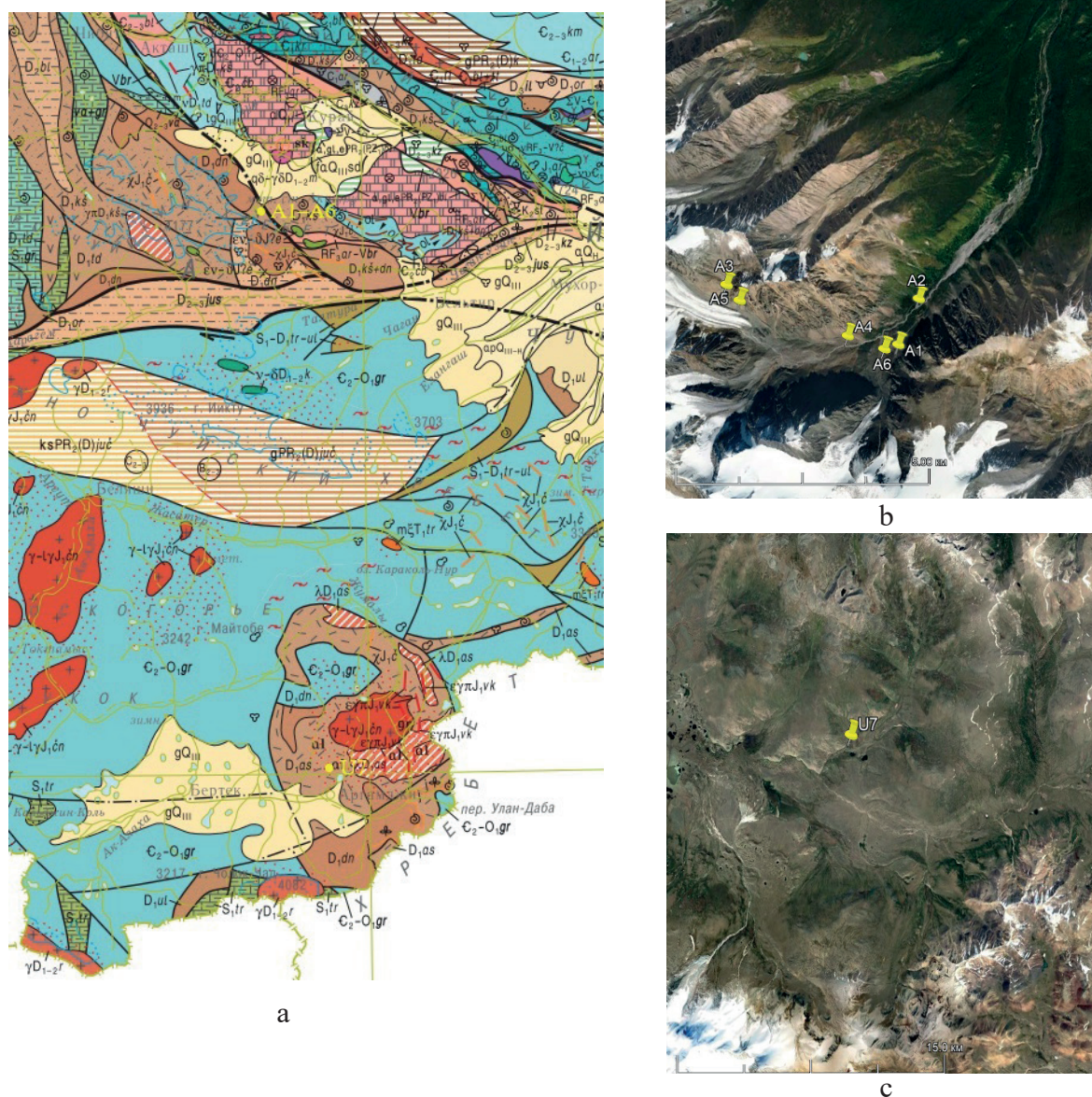


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб воды и грунтов в Горном Алтае в 2022–2023 гг.:
а) фрагмент геологической карты масштаба 1: 1000000, Алтай-Саянская серия, М-45 [Государственная геологическая..., 2011]; на снимке Google Earth: б) участок верхнего течения р. Актру; пункты А1, А2, А3, А4, А5, А6; в) долина р. Аргамджи, пункт U7 (табл. 1)

Fig. 1. Layout of water and soil sampling points in the Altai Mountains in 2022–2023:
а) fragment of the geological map at a scale of 1:1000000, Altai-Sayan series, M-45 [State Geological..., 2011]; in the Google Earth image: б) section of the upper reaches of the Aktru River; points A1, A2, A3, A4, A5, A6; в) the Argamdzhi River valley, point U7 (table 1)

Лабораторные работы по определению химического состава поверхностных вод в бассейне Актру (валовое содержание и фильтрат) и болотных вод (валовое содержание), водных вытяжек из донных отложений в бассейне Актру и кислотной вытяжки (с азотной кислотой) из торфяных

отложений в долине р. Аргамджи выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ с использованием следующих методов: рН, F^- – потенциометрический метод; перманганатная окисляемость ПО, содержания Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , CO_2 – титриметрический; Na^+ , K^+ –

атомно-эмиссионная спектрометрия с пламенной атомизацией; SO_4^{2-} – турбидиметрический; фосфаты – фотометрический; более 30 микроэлементов – масс-спектрометрический метод с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП) с использованием масс-спектрометра NexION 300D. Также в пробах донных отложений (фракция менее 1 мм) выполнен рентгенофазовый анализ. В пробах торфяных отложений в долине р. Аргамджи (фракции частиц менее 1 мм и 0.002 мм) в лабораториях ТПУ были проведены: 1) в ООО «Химико-аналитический центр «Плазма» (г. Томск) с использованием МС ИСП (МВИ № 001-ХМС-2007; ФР.1.31.2007.04107) – определение химического состава кислотных вытяжек (с использованием плавиковой кислоты); 2) в ТПУ – электронная микроскопия 20 проб минеральных включений в торф с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Более подробная информация о методах анализа приведена в [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2018; Савичев и др., 2024].

Анализ полученных данных включал оценку среднего арифметического A , коэффициентов корреляции r и погрешностей их определения δ_A и δ_r (1, 2), а также выявление регрессионных зависимостей при условии (3):

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

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

$$|k_i| \geq 2 \cdot \delta_{k_i}, |r| \geq 2 \cdot \delta_r, |r| \geq 0.7, R^2 \geq 0.36, \quad (3)$$

где N и σ – объем и стандартное отклонение; k_i и δ_{k_i} – коэффициенты регрессии и погрешности их определения; R^2 – квадрат корреляционного отношения.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что, согласно классификациям О.А. Алекина [Алекин, 1970], изученные водные объекты в целом за период наблюдений с 1997 по 2023 гг. характеризуются:

1) по минерализации – от пресных с очень малой минерализацией в случае талых ледниковых вод до пресных со средней минерализации в случае болотных вод; речные воды – пресные с очень малой и малой минерализацией;

2) по химическому составу:

- талые ледниковые воды – чаще гидрокарбонатные кальциевые первого или третьего типов (более 50%), реже – C^{Mg}_1 (более 30%, в том числе – в пункте А5 19.07.2022 г.) и C^{Na}_1 ;
- речные (и озерные) воды – в основном гидрокарбонатные кальциевые, преимущественно второго типа (65% случаев);
- болотные воды в долине р. Аргамджи (U7, 27.07.2023 г.) – гидрокарбонатные кальциевые первого типа.

По величине pH [Гидрохимические показатели..., 2007] талые ледниковые воды – слабокислые, прочие воды – нейтральные или слабощелочные; для болота в долине р. Аргамджи отмечена переходная окислительно-восстановительная обстановка (Eh 62 мВ) и самое высокое значение перманганатной окисляемости ПО (34 мгО/дм³), в остальных случаях – окислительная обстановка (Eh > 100 мВ) и ПО в среднем менее 5 мгО/дм³ (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав природных вод в горно-ледниковом бассейне Актру (2022 г.)
и болотных вод на плато Укок (2023 г.), химический и минеральный состав
донных и торфяных отложений

Table 1

Chemical composition of natural waters in the Aktru mountain-glacial basin (2022)
and swamp waters on the Ukok plateau (2023), chemical and mineral composition
of bottom and peat sediments

Показатель	Единицы измерения	Пункты отбора проб						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	U7
		руч. Водопадный	р. Актру, 20.4 км от устья	ледниковое озеро	р. Актру, 22.4 км от устья	ледник Левый Актру	руч. у ледника Малый Актру	болото в долине р. Аргамджи
Дата отбора		18.07.22	18.07.22	19.07.22	19.07.22	19.07.22	21.07.22	27.07.23
Широта	°	50.071	50.080	50.079	50.072	50.077	50.070	49.322
Долгота	°	87.772	87.776	87.724	87.758	87.728	87.768	87.911
Высота	м	2290	2147	2840	2334	2722	2234	2249
ПО	мгО/дм³	0.5	0.6	0.5	0.3	1.6	0.7	34.0
pH	ед. pH	7.43	7.89	7.61	8.04	6.40	7.74	7.40
Σ _{mi}	мг/дм³	54.5	95.7	108.5	90.7	15.5	101.4	432.3
HCO ₃ ⁻	мг/дм³	38.0	59.0	64.0	53.0	8.5	63.0	322.0
SO ₄ ²⁻	мг/дм³	2.3	12.5	18.0	13.0	<1.0	14.0	<1.0
Cl ⁻	мг/дм³	0.9	1.0	0.9	0.8	2.3	0.9	2.4
Ca ²⁺ (в)	мг/дм³	11.5	18.2	18.0	18.0	1.2	16.4	79.0
Ca (дв)	мг/кг	57.7	43.2	46.6	40.6	39.8	45.8	–
Mg ²⁺ (в)	мг/дм³	1.4	3.7	6.3	3.1	0.9	6.1	9.0
Mg (дв)	мг/кг	4.2	5.0	2.2	4.0	1.4	7.4	–
Na ⁺ (в)	мг/дм³	0.3	0.5	0.3	0.4	1.3	0.4	12.9
Na(дв)	мг/кг	1.7	2.6	0.9	1.2	1.3	1.2	–
K ⁺ (в)	мг/дм³	0.2	0.8	1.0	1.1	0.9	0.6	5.4
K(дв)	мг/кг	3.3	5.8	7.6	6.1	5.1	3.7	–
Si(в)	мг/дм³	0.800	10.620	0.480	4.210	4.380	0.230	8.62
Si(дв)	мг/кг	1.861	3.807	1.854	2.839	5.922	5.688	–
P(в)	мг/дм³	0.069	1.309	0.018	0.446	4.977	0.001	0.247
P(дв)	мг/кг	0.098	0.407	0.089	0.029	1.571	0.092	–
Fe(в)	мг/дм³	1.287	24.560	0.383	5.955	6.980	0.059	2.576
Fe(дв)	мг/кг	0.800	1.231	1.272	0.630	3.459	2.701	–
Li(в)	мкг/дм³	0.94	13.04	0.70	5.12	5.45	0.42	60.34
Li(дв)	мкг/кг	2.88	5.49	8.09	4.92	2.39	10.90	–
Al(в)	мкг/дм³	780	11929	202	3688	3519	35	14
Al(дв)	мкг/кг	2344	3082	3946	2669	3419	3553	–
Ti(в)	мкг/дм³	8.60	143.26	7.03	83.01	178.44	0.37	1.41
Ti(дв)	мкг/кг	11.66	33.88	45.72	13.48	133.52	111.30	–

Показатель	Единицы измерения	Пункты отбора проб						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	U7
		руч. Водопадный	р. Актру, 20.4 км от устья	ледниковое озеро	р. Актру, 22.4 км от устья	ледник Левый Актру	руч. у ледника Малый Актру	болото в долине р. Аргамджи
Со(в)	мкг/дм ³	0.94	20.66	0.36	5.77	8.40	0.02	0.84
Со(дв)	мкг/кг	0.60	1.53	1.88	0.69	7.16	2.18	–
Си(в)	мкг/дм ³	2.97	42.46	0.71	11.28	30.04	0.09	0.50
Си(дв)	мкг/кг	18.02	23.25	24.37	12.03	178.97	14.51	–
Zn(в)	мкг/дм ³	6.84	80.48	3.05	26.02	141.63	0.03	1.12
Zn(дв)	мкг/кг	0.73	45.17	10.00	2.53	27.81	6.93	–
Ва(в)	мкг/дм ³	17.31	177.08	2.57	47.96	59.87	0.94	25.79
Ва(дв)	мкг/кг	34.11	37.57	16.99	23.60	21.46	21.25	–
La(в)	мкг/дм ³	2.61	18.09	0.08	4.35	4.17	0.02	0.06
La(дв)	мкг/кг	0.36	0.49	0.92	0.23	2.96	0.87	–
Се(в)	мкг/дм ³	5.40	43.80	0.13	9.34	8.57	0.03	0.14
Се(дв)	мкг/кг	0.92	1.02	1.27	0.34	5.15	2.27	–
Au(v)	мкг/дм ³	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	<0.01
Au(дв)	мкг/кг	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.22	<0.01	–
U(в)	мкг/дм ³	0.20	1.89	0.13	1.02	0.30	0.20	9.15
U(дв)	мкг/кг	0.73	1.24	0.42	1.30	1.41	0.58	–
Содержание минерала в твердой фракции с диаметром частиц ≤1мм								
Альбит	%	20.9	24.2	22.6	17.2	16.9	12.8	23.3
Микроклин	%	0.0	7.4	7.5	8.4	5.5	2.6	10.8
Ортоклаз	%	3.2	3.2	5.1	7.2	4.1	2.1	0.0
Амфибол	%	0.0	0.0	1.4	0.0	2.0	0.0	0.0
Мусковит	%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.9
Клинохлор	%	7.3	9.4	28.2	12.7	20.6	10.6	2.2
Иллит	%	35.5	22.5	17.1	21.9	34.2	42.0	0.0
Каолинит	%	0.0	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Цеолит	%	0.9	0.6	0.9	2.0	1.4	0.0	0.0
Кальцит	%	1.6	1.8	4.9	3.1	0.0	3.8	0.0
Кварц	%	30.6	30.2	11.3	27.5	15.3	26.1	47.8

Примечание: рН – водородный показатель; Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}); ПО – перманганатная окисляемость; «в» – валовое содержание в воде; «дв» – содержание в водной вытяжке из донных отложений

Главные ионы находятся в по- в меньшей степени (менее 50%, но бо-
верхностных водах преимущественно лее 30% от валового содержания) – U.
(>50% от валового содержания) в рас- Прочие микроэлементы, а также крем-
творенной форме (возможно, частич- ний, фосфор, железо мигрируют в по-
но в виде коллоидов). Высокая доля верхностных водах в основном (<30%
содержания в фильтрате (после мембран- от валового содержания) во взвешен-
ного фильтра 0.45 мкм) отмечена и для Au, ном и коллоидном состоянии (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика форм миграции в водной среде и аккумуляции
в донных (болотных) отложениях в Горном Алтае

Table 2

Characteristics of migration forms in the aquatic environment and accumulation
in bottom (swamp) sediments in the Altai Mountains

Элемент	Отношение концентрации в фильтрате к валовому содержанию в водах горно- ледникового бассейна Актру в 2022 г.				Концентрации в вытяжках из донных (болотных) отложений в долине р. Аргамджи в 2023 г. с использованием азотной (N) и плавиковой кислот (F), включая вытяжку из глинистой фракции (F*)				
	A	δ_A	min	max	(N)	(F)	(F*)	(N)/(F)	(F*)/(F)
	% от валового содержания в водной среде				мг/кг			% от валового содер- жания с использо- ванием плавиковой кислоты	
Ca	60.5	17.1	16.3	99.9	7199	36939	17002	19.5	46.0
Mg	53.2	16.6	3.4	99.9	—	—	—	—	—
Na	77.6	9.2	46.4	98.8	129	14076	9370	0.9	66.6
K	59.9	13.1	15.0	95.3	—	—	—	—	—
Si	28.9	13.5	1.9	87.0	—	—	—	—	—
P	14.0	3.8	1.1	20.0	—	—	—	—	—
Fe	12.6	10.4	0.2	64.0	2692	23072	11189	11.7	48.5
Li	13.5	7.2	2.2	47.2	—	—	—	—	—
Al	14.3	12.7	0.4	77.7	—	—	—	—	—
Ti	10.6	9.0	0.4	55.6	—	—	—	—	—
Co	3.6	1.3	0.2	7.6	1.53	8.14	3.95	18.7	48.6
Cu	16.2	8.3	0.4	53.2	—	—	—	—	—
Zn	11.1	5.8	0.8	36.4	14.42	53.92	35.20	26.7	65.3
Ba	7.3	3.8	0.4	25.1	21.97	343.96	225.2	6.4	65.5
La	12.7	10.9	0.1	67.0	2.56	28.55	22.62	9.0	79.2
Ce	11.1	9.7	0.1	59.3	6.11	70.02	43.39	8.7	62.0
Au	62.1	12.8	10.7	97.7	<0.001	0.389	0.002	0.01	0.59
U	35.4	9.7	2.2	65.3	8.45	20.01	12.68	42.2	63.4

При этом отметим, что в июле 2022 г. отмечено статистически значимое снижение от ледников вниз по течению доли растворенной формы калия (коэффициент корреляции между концентрацией в фильтрате и расстоянием от истока р. Актру для: калия – $r = -0.75 \pm 0.19$, кобальта – $r = -0.89 \pm 0.10$, а для урана, напротив, – увеличение ($r = 0.71 \pm 0.22$).

В целом для поверхностных вод наблюдается общее увеличение содержа-

ний растворенных солей от ледников до горно-таежных и горно-степных участков (примерно в 11–17 км от нижней границы зоны абляции ледника Левый Актру), связанное с: 1) выщелачиванием горных пород при таянии ледового материала на границе ледников; 2) выносом глинистых частиц на участке от нижнего конца открытой поймы до выхода из горно-лесного в горно-степной участок и последующей аккумуляцией речных наносов и сорбцией на глинистых

частицах ряда микроэлементов [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2018; Савичев и др., 2024]. При этом, вследствие русловых процессов и внутригодовых изменений водного стока, может происходить переотложение наносов и, соответственно, изменение взаимодействия их с водами. С учетом этого закономерности пространственно-временного распределения геохимических показателей водных и кислотных вытяжек не столь очевидны, как в случае речных вод.

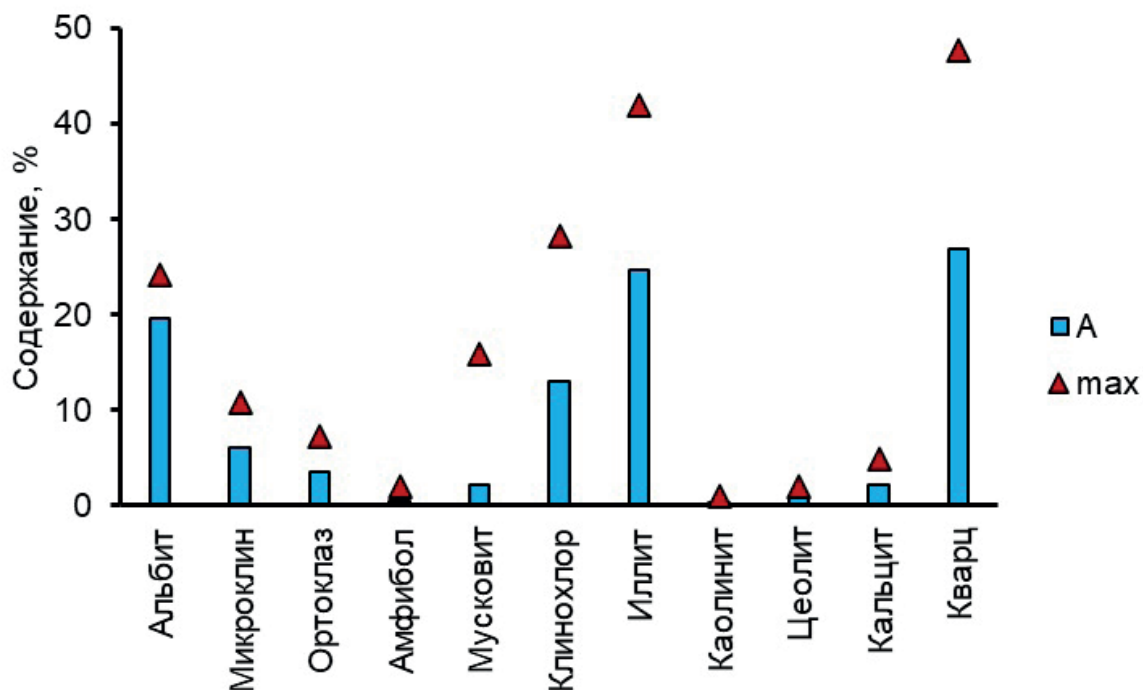
Полученные данные в целом подтверждают указанные выше предположения, а именно: 1) абсолютное и относительное содержание целого ряда химических элементов в растворенной (молекулярно-дисперсной) форме снижается по мере движения водных масс от ледников к участкам горной степи; 2) минеральный состав фракции с диаметром частиц ≤ 1 мм, наиболее подвижных в горных потоках [Савичев и др., 2018], представлен в основном плагиоклазами, кварцем, хлоритами и глинистыми минералами (каждая группа – более 10% от содержания, рис. 2а); вместе с тем, от ледников до горной степи уменьшается содержание хлоритов и увеличивается доля кварца во фракции донных отложений с диаметром частиц до 1 мм; амфиболы обнаружены только в отложениях на леднике Левый Актру и в озере Голубое, а мусковит – только в минеральных включениях в торфа болота в долине р. Аргамджи (табл. 1, рис. 2б).

Из этого следует, что, как и в случае других рек бассейна р. Обь (Томь, малые реки Киргизка, Омутная, Правая Сарала), а также р. Красной/Хонг в юго-восточной Азии (рр. Бан Тхи, Ченгу, Дай, Намду, Фодай), основные закономерности изменения минерального состава донных отложений

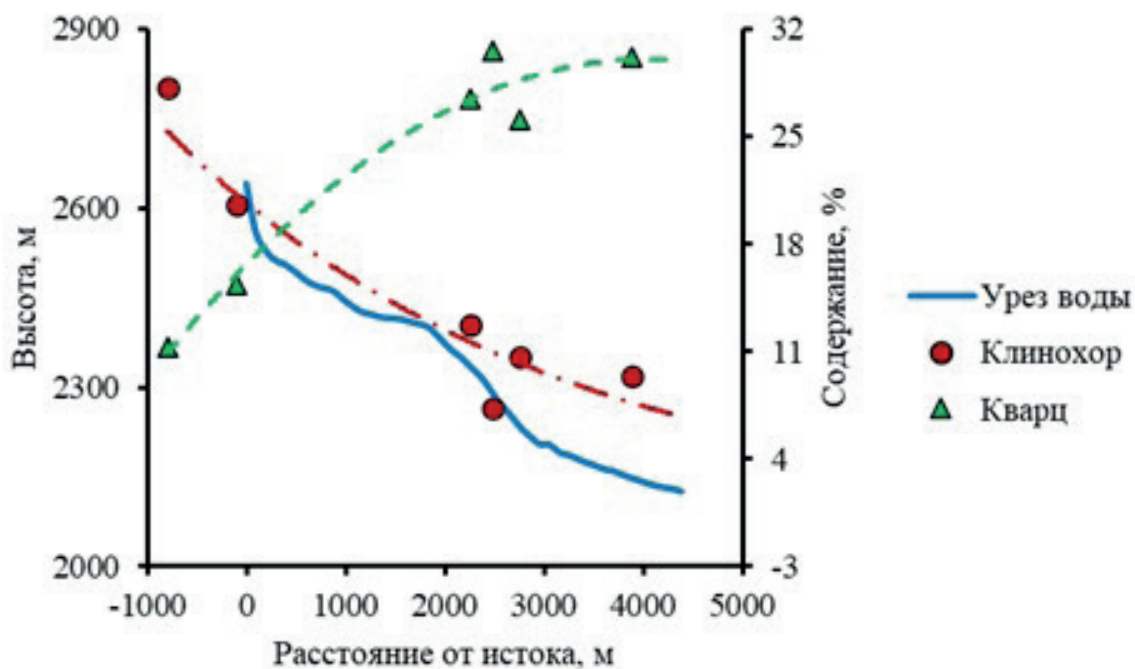
связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек протяженностью более 11–20 км при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости (логарифм произведения плотности и твердости) менее 1.26–1.27 [Савичев и др., 2018]. Кроме того, при формировании химического состава вод имеет значение соотношение форм миграции, способность к сорбции и образованию устойчивых органо-минеральных комплексов (с учетом гидрологических условий).

Так, доля предположительно растворенной формы миграции U , как указано выше, возрастает от ледников к горной степи, а максимальная концентрация (валовая) отмечена в болотных водах (табл. 1). Причем более 40% содержания этого элемента в минеральных включениях в торф приходится предположительно на органические соединения, а более 60% – на глинистую фракцию (в предположении, что анализ вытяжки с использованием азотной кислоты позволяет достоверно оценить содержание в органо-минеральных отложениях, а с плавиковой кислотой – полное содержание в минеральных частицах; табл. 2).

Другой пример – взаимосвязанное уменьшение в направлении от ледников к горно-степным участкам содержания клинохлора в донных отложениях и концентраций калия в вытяжках из них (табл. 3). Причем коэффициенты корреляции с валовой концентрацией K^+ и долей его растворенной формы менее 0.7 связаны не с отсутствием связей, а с их существенно нелинейным характером, обусловленным резким увеличением концентраций в болотных водах (рис. 3) и весьма неравномерным распределением в минеральных микровключениях (табл. 4).



a



b

Рис. 2. Основные минеральные ассоциации во фракции донных отложений в бассейнах Актру и Аргамджи с диаметром частиц ≤ 1 мм (а: А и max – среднее арифметическое и максимум)

и изменение содержаний клинохлора и кварца в отложениях бассейна Актру (b)

Fig. 2. Major mineral associations in the fraction of bottom sediments in the Aktru and Argamdzhi basins with a particle diameter of ≤ 1 mm (a: A and max are the arithmetic mean and maximum) and changes in the contents of clinocllore and quartz in the sediments of the Aktru basin (b)

Таблица 3

Статистически значимые коэффициенты корреляции между показателями химического и минерального состава донных и торфяных отложений

Table 3

Statistically significant correlation coefficients between the chemical and mineral composition of bottom and peat sediments

Показатель	Альбит	Микроклин	Ортоклаз	Амфибол	Клинохлор	Иллит	Каолинит	Цеолит
Высота	–	–	–	0.92	0.91	–	–	–
pH	–	–	–	-0.75	–	–	–	–
Cl ⁻ (в)	–	–	–	(0.79)	-	–	–	–
Ca(дв)	–	(-0.79)	–	-	-	–	–	–
Mg(дв)	–	-	–	(-0.82)	(-0.71)	–	–	–
Na ⁺ (в)	–	-	–	(0.71)	-	–	–	–
Na(ф)	–	(-0.79)	–	-	-	–	–	–
K ⁺ (в)	–	(0.95)	(0.71)	-	-	–	–	–
K(ф)	–	–	–	(0.72)	-	–	–	–
K(дв)	–	(0.88)	–	–	(0.74)	(-0.92)	(0.76)	-
Si(ф)	–	–	–	–	-	-	-	(-0.73)
PO ₄ ³⁻ (в)	–	–	–	(0.81)	–	–	–	–
P(дв)	–	–	–	(0.73)	–	–	–	–
Fe(ф)	–	–	–	–	–	–	–	(-0.71)
Al(ф)	(-0.72)	–	–	–	–	–	–	–
Al(дв)	–	–	–	–	(0.76)	–	–	–
Co(ф)	–	–	–	(0.9)	(0.86)	–	–	–
Co(дв)	–	–	–	(0.82)	–	–	–	–
Cu(дв)	–	–	–	(0.81)	–	–	–	–
Zn(ф)	–	(-0.95)	–	–	–	–	–	–
Ba(дв)	–	–	–	–	(-0.75)	–	–	–
La(ф)	(-0.71)	–	–	–	-	–	–	(-0.7)
La(дв)	–	–	–	(0.86)	-	–	–	–
Ce(ф)	(-0.71)	–	–	–	-	–	–	(-0.7)
Ce(дв)	–	–	–	(0.75)	-	–	–	–
Au(дв)	–	–	–	(0.78)	-	-	-	-
U(ф)	–	–	–	(-0.83)	-	-	-	-
Альбит	1.00	–	–	–	–	-	(0.74)	-
Микроклин	–	1.00	-	–	–	-0.87	-	-
Ортоклаз	–	–	1.00	–	–	-	-	0.90
Амфибол	–	–	–	1.00	0.82	-	-	-
Клинохлор	–	–	–	–	1.00	-	-	-
Иллит	–	–	–	–	–	1.00	(-0.74)	-

Примечания: в скобках приведены значимые коэффициенты корреляции, полученных по 6 пробам в горно-ледниковом бассейне Актру; в прочих случаях приведены значимые коэффициенты для валовых содержаний в воде, полученные и для бассейна Актру (6 проб) и для выборки с добавлением болотных вод в долине р. Аргамджи на плато Укок (7 проб)

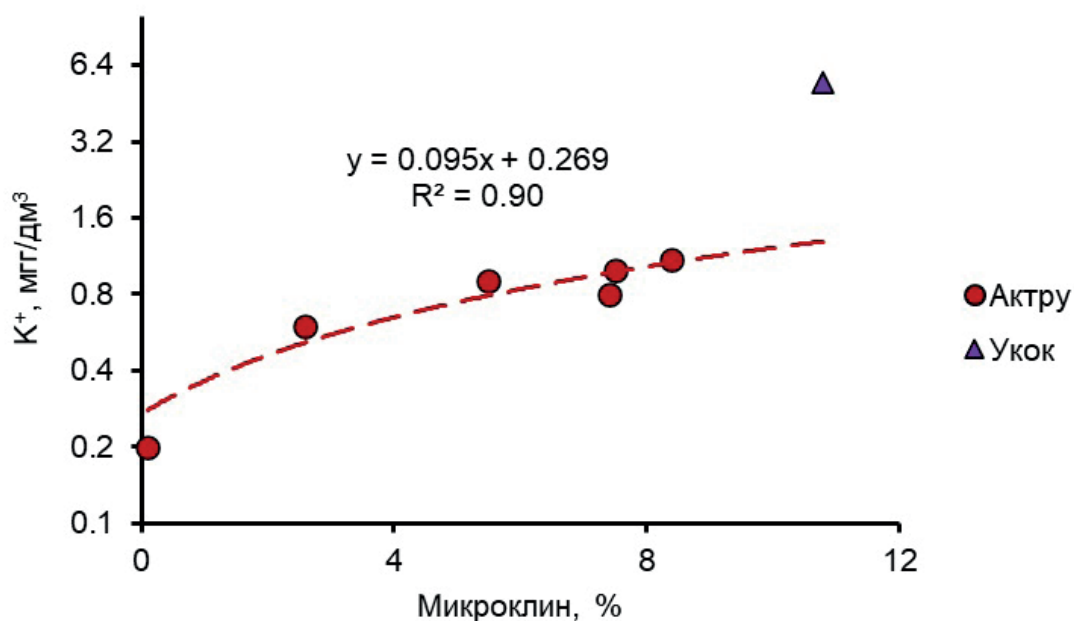


Рис. 3. Зависимость между содержанием микроклина в донных отложениях с диаметром частиц до 1 мм и валовыми концентрациями K^+ в поверхностных водах Горного Алтая

Fig. 3. The relationship between the microcline content in bottom sediments with particle diameters up to 1 mm and total K^+ concentrations in surface waters of the Altai Mountains

Таблица 4

Химический состав минеральных включений в торфяные отложения в долине р. Аргамджи (плато Укок) в 2023 г., % от веса (20 проб)

Table 4

Chemical composition of mineral inclusions in peat deposits in the Argamdzhī River valley (Ukok plateau) in 2023, % by weight (20 samples)

Элемент	Среднее арифметическое A	Погрешность определения среднего δ_A	Максимум
Al	5.5	1.0	16.7
Ca	4.3	1.8	30.8
Ce	4.2	1.8	22.8
Eu	0.4	0.2	1.8
Fe	2.9	0.9	11.8
La	1.8	0.7	9.1
Mg	0.4	0.2	4.0
Nd	1.8	0.8	13.8
P	2.2	1.0	14.3
K	1.2	0.5	7.4
Pr	0.2	0.2	2.3
Sm	0.3	0.1	2.3
Si	15.1	2.3	38.3
Na	0.4	0.3	6.9
S	0.1	0.1	2.2
Ti	3.2	2.4	46.1
Zr	3.4	2.4	37.7

С учетом этого эффекта целесообразно предусматривать больше внимания изучению заболоченных участков на границе различных ландшафтов, а также их использованию для снижения нагрузки на водные экосистемы при разработке месторождений полезных ископаемых, в том числе путем создания природно-технических систем со свойствами болот. Один из подходов к проектированию подобных комплексов изложен в [Савичев, 2008].

Заключение

Полученные данные о пространственном распределении химических элементов в поверхностных водах и вытяжках из фракции донных отложений с диаметром частиц менее 1 мм, а также их минеральном составе имеют предварительный характер. Тем не менее, их анализ позволяет, во-первых, уточнить методику геохимических поисков полезных ископаемых (акцент на поиск и изучение болотных отложений на границе горно-таежных и горностепных участков как в настоящее время, так и в ретроспективе) и предположить возможность снижения негативных последствий разработки месторождений твердых полезных ископаемых в горных районах путем создания искусственных или «доработки» естественных заболоченных участков или болот.

Во-вторых, общие закономерности формирования химического состава поверхностных вод и донных отложений в

горно-ледниковых бассейнах определяются интенсивным растворением первичных алюмосиликатов в зоне взаимодействия талых ледниковых вод с горными породами, в том числе (и особенно) мелкой фракцией продуктов их механического разрушения. При этом значительная часть ряда химических элементов находится в водном растворе в виде молекулярно-дисперсном и коллоидном состояниях. Затем, по мере перемещения водных масс от зоны абляции ледников к горно-таежным участкам (11–20 км от истоков рек) происходит насыщение и даже пересыщение вод относительно ряда минералов и органо-минеральных соединений, осаждение части наносов, их перераспределение по потоку и сорбция некоторых микроэлементов на частицах наносов. На выходе потоков на горностепные участки, особенно с малыми уклонами водной поверхности и благоприятными условиями для заболачивания долин, наблюдается дополнительная аккумуляция веществ всех форм миграции.

В-третьих, при дальнейшем потеплении климата и деградации ледников следует ожидать дополнительную аккумуляцию ряда химических элементов (в том числе, редкоземельных и урана) именно на границе горно-таежных и горностепных участков. Возможно, что при достаточно длительной устойчивой деградации ледников при общей аридизации климата могут формироваться значительные геохимические аномалии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

Список литературы

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Галахов В.П., Нарожнев Ю.К., Никитин С.А., Окишев П.А., Севастьянов В.В., Севастьянова Л.М., Шантыкова Л.Н., Шуров В.И. Ледники Актру (Алтай). Водно-ледовый и тепловой баланс горно-ледниковых бассейнов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 120 с.
- Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. Москва: Недра, 1972. 398 с.
- Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / Ред. Т.В. Гусева. Москва: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2007. 192 с.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Soils. Classification. Москва: Стандартинформ, 2020. 49 с.
- ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Water. General requirements for sampling. Москва: Стандартинформ, 2020. 35 с.
- Государственная геологическая карта масштаба 1: 1000000. Алтае-Саянская серия, лист М-45. Москва: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2011. 5 с.
- Гусев А.И., А.Ф. Коробейников, Пшеничкин А.Я., Домаренко В.А. Магмо-рудно-метасоматическая система Актуру в Горном Алтае // Успехи современного естествознания. 2014. № 7. С. 75–79.
- Недра России. В 2 т. Т.1. Полезные ископаемые / Ред. Н.В. Межеловский, А.А. Смыслов. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2001. 547 с.
- Окишев П.А. Рельеф и оледенение Русского Алтая. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2011. 382 с.
- Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. В.М. Котляков. Москва: 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
- Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Владимиров А.Г., Анникова И.Ю., Бабкин Д.И., Никифоров А.Ю., Котегов В.И. Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез. Томск, 2008. 226 с.
- Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Ермолаева Н.И., Зиновьев А.Т., Кошелева Е.Д., Краснороева Б.А., Ловцкая О.В., Папина Т.С., Рыбкина И.Д., Трошкин Д.Н., Шарабарина С.Н., Яныгина Л.В. Современные водохозяйственные и экологические проблемы бассейна Оби и прогноз состояния до 2030 года // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 45–58. doi: 10.35567/19994508_2022_6_3
- Савичев О.Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных био-геоценозов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 1. С. 69–74.
- Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Лепокурова О.Е. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 7. С. 43–56.

Савичев О.Г., Хващевская 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

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 / Ред. Э.К. Буренков. Москва.: ИМГРЭ, 2002. 92 с.

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

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. Vol. 34, no. 4. С. 364–370. doi: 10.1134/S1875372813040100

References

Alekin O.A. Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p. (in Russian).

Galakhov V.P., Narozhnev Yu.K., Nikitin S.A., Okishev P.A., Syevast'yanov V.V., Sevast'yanova L.M., Shantykova L.N., Shurov V.I. Ledniki Aktru (Altai). Vodnoledovyy i teplovoy balans gorno-lednikovyykh basseynov [Aktru Glaciers (Altai). Waterice and heat balance of mountain-glacier basins]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 120 p. (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR. T. 17. Kemerovskaya oblast' i Altayskiy kray [Hydrogeology of the USSR. Vol. 17. Kemerovo Region and Altai Krai]. Moscow: Nedra, 1972. 398 p. (in Russian).

Gidrokhimicheskiye pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy [Hydrochemical indicators of the state of the environment] / Ed. T.V. Guseva. Moscow: FORUM, INFRA-M. 2007. 192 p. (in Russian).

GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform, 2020. 49 p. (in Russian).

GOST R 59024-2020. Water. General requirements for sampling. Moscow: Standartinform, 2020. 35 p. (in Russian).

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta masshtaba 1: 1000000. Altaye-Sayanskaya seriya, list M-45 [State Geological Map, scale 1:1,000,000. Altai-Sayan Series, sheet M-45]. Moscow: VSEGEI, 2011. 5 p. (in Russian).

Gusev A.I., Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. Magmo-rudno-metasomaticheskaya sistema Akturu v Gornom Altaye [Magma-ore-metasomatic system Akturu in the Altai Mountains] // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Advances in modern natural science]. 2014. No. 7. P. 75–79. (in Russian).

Nedra Rossii. Poleznyye iskopayemyye [Subsoil of Russia]. In 2 volumes. Vol. 1. Useful minerals / Eds. N.V. Mezhelovsky, A.A. Smyslov. St. Petersburg: VSEGEI, 2001. 547 p. (in Russian).

Okishev P.A. Rel'yef i oledeneniye Russkogo Altaya [Relief and glaciation of the Russian Altai]. Tomsk: Publishing house of Tomsk. state University, 2011. 382 p. (in Russian).

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., Narozhny Yu.K., Shantykhova L.N. Assessment of modern dynamics and forecast of glaciological characteristics of the Maly Aktru glacier (Central Altai) // Ice and Snow. 2018. Vol. 58, no. 2. P. 171–182. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182

Potseluyev A.A., Rikhvanov L.P., Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Babkin D.I., Nikiforov A.Yu., Kotegov V.I. Kalgutinskoye redkometall'noye mestorozhdeniye (Gornyy Altay): magmatizm i rudogenez [Kalgutinskoe rare metal deposit (Altai Mountains): magmatism and ore genesis]. Tomsk, 2008. 226 p. (in Russian).

Puzanov A.V., Bezmaternykh D.M., Ermolaeva N.I., Zinoviev A.T., Kosheleva E.D., Krasnoyarova B.A., Lovtskaya O.V., Papina T.S., Rybkina I.D., Troshkin D.N., Sharabarina S.N., Yanygina L.V. Sovremennyye vodokhozyaystvennyye i ekologicheskiye problemy basseyna Obi i prognoz sostoyaniya do 2030 goda [Modern Water Management and Environmental Problems of the Ob Basin and the Forecast of the State until 2030] // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye [Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management]. 2022. No. 6. P. 45–58. (in Russian). doi: 10.35567/19994508_2022_6_3

Savichev O.G. Biologicheskaya ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniyem bolotnykh bio-geotsenozov [Biological treatment of wastewater using marsh biogeocenoses] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2008. Vol. 312, no. 1. P. 69–74. (in Russian).

Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Lepokurova O.E. Transformation of mineral composition of river sediments from sources to mouth of rivers // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. Vol. 329, no. 7. P. 43–56.

Savichev O.G., Khvaschevskaya A.A., Paromov V.V. Spatial 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 // Geosphere Research. 2024. No. 2. P. 143–155. doi: 10.17223/25421379/31/9

Timoshok Ye.Ye., Narozhny Yu.K., Dirks M.N., Skorokhodov S.N., Berezov A.A. Dinamika lednikov i formirovaniye rastitel'nosti na molodykh morenakh Tsentral'nogo Altaya [Dynamics of glaciers and formation of vegetation on young moraines of Central Altai]. Tomsk: NTL Publishing House, 2008. 208 p.

Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000 [Requirements for the production and results of multipurpose geochemical mapping at a scale of 1:200000] / Ed. E.K. Burenkov. Moscow: IMGRE, 2002. 92 p.

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

Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyy Altai) // Geography and Natural Resources. 2013. Vol. 34, no. 4. C. 364–370. doi: 10.1134/S1875372813040100

MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SEDIMENTS OF SURFACE WATER BODIES OF THE ALTAI MOUNTAIN UNDER CLIMATE CHANGES

O.G. Savichev, V.A. Domarenko, A.M. Nadeeva

Tomsk polytechnic university, Tomsk,

E-mail: osavichev@mail.ru, viktor_domarenko@mail.ru, prezident.2001n@mail.ru

A study of the mineralogical and geochemical state of water bodies in the Altai Mountains (the Aktru Basin and a section of the Ukok Plateau) was conducted in the 2020s. An assessment was made of the mineral composition of the fraction of bottom sediments with a particle diameter of less than 1 mm, the chemical composition of surface waters, and extracts from bottom sediments. The main features of the mechanism underlying their formation were identified, related to the intensive dissolution of primary aluminosilicates in the zone of interaction between glacial meltwater and rocks, water saturation in upstream river reaches (11–20 km), and subsequent sediment deposition and redeposition. A hypothesis was made regarding possible changes due to climate warming.

Keywords: mineralogical and geochemical state; spatial changes; surface water bodies; Gorny Altai.

Received November 11, 2025. Accepted: December 11, 2025

Сведения об авторах

Савичев Олег Геннадьевич – доктор географических наук, профессор отделения геологии Томского политехнического университета. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. ORCID: 0000-0002-9561-953X. E-mail: osavichev@mail.ru.

Домаренко Виктор Алексеевич – кандидат геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: viktor_domarenko@mail.ru.

Надеева Анастасия Михайловна – аспирант отделения геологии Томского политехнического университета. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: prezident.2001n@mail.ru.

Information about the authors

Savichev Oleg Gennadievich – Dr Sc. of Geographical Sciences, Professor of the Geology Department of Tomsk Polytechnic University. 30, Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia. ORCID: 0000-0002-9561-953X. E-mail: osavichev@mail.ru.

Domarenko Viktor Alekseevich – PhD of Geological and Mineralogical Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences. 30, Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia. E-mail: viktor_domarenko@mail.ru.

Nadeeva Anastasia Mikhailovna – Postgraduate student of the Geology Department of Tomsk Polytechnic University. 30, Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia. E-mail: prezident.2001n@mail.ru.