

ественным показателям и оценку влияния техногенных факторов на изменение уровней и качества подземных вод. Записка сопровождается экспликационными таблицами и включает обязательные разделы по характеристике качества и загрязнения, а также характеристике уровня режима подземных вод основных водоносных горизонтов.

9. Рабочий коллектив по государственному гидрогеологическому картографированию должен состоять из составительской и оформительской групп.

Выводы

Для достижения целей программных документов, решения проблем, обозначенных в настоящей статье, дальнейшие региональные работы рекомендуется направить:

1. В области обзорного картографирования:
— поэтапное создание ГИС «Гидрогеологическая основа России»;

— актуализация и издание современных гидрогеологической и инженерно-геологической карт России.

2. В области мелко-среднемасштабного картографирования и съемок (доизучения):

— достижение ежегодного прироста гидрогеологической, инженерно-геологической и геоэкологической изученности: масштаба 1:1 000 000 — 150–200 тыс. км²/год; масштаба 1:200 000 — 16–19 тыс. км²/год.

3. Внедрить схему общего гидрогеологического районирования территории России.

4. Подготовить, апробировать и ввести в действие научно-методические документы, повышающие эффективность региональных работ:

— методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов государственных гидрогеологических карт России масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000;

— требования и принципы стратификации разреза гидрогеологических структур;

— методические рекомендации по оценке защищенности подземных вод при региональных работах государственных масштабов;

— требования к созданию и использованию в интерактивном режиме фонда фактографической и картографической гидрогеологической и инженерно-геологической информации;

— рекомендации по апробации и государственному учету прогнозных ресурсов кат. P₂ — P₃ питьевых, технических и минеральных подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голицын, М.С. Особенности методики гидрогеологического и геоэкологического мелкомасштабного картографирования в различных природно-техногенных условиях Российской Федерации / М.С. Голицын, Т.А. Конохова, О.Н. Астанина, Т.А. Кузнецова // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 8. — С. 22–27.
2. Государственная программа Российской Федерации «Воспроизводство и использование природных ресурсов» Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 322.
3. Егоров, Т.С. Особенности гидрогеологического расчленения плиоцен-четвертичных отложений Печорского артезианского бассейна / Т.С. Егоров, В.В. Ершов // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 8. — С. 32–36.

4. Лукьянчиков, В.М. Состояние региональных гидрогеологических работ / В.М. Лукьянчиков // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 8. — С. 6–11.

5. Плотникова, Р.И. К оценке прогнозных ресурсов подземных вод / Р.И. Плотникова, В.М. Лукьянчиков // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 3. — С. 7–10.

6. Челидзе, Ю.Б. Общее гидрогеологическое Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 (методика и технология, результаты и проблемы) / Ю.Б. Челидзе // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 8. — С. 68–73.

© Коллектив авторов, 2019

Лукьянчиков Валерий Михайлович // lvml@mail.ru
Плотникова Роза Ивановна // riplotnikova@mail.ru
Челидзе Юрий Борисович // jurbor37@mail.ru
Егоров Тимофей Сергеевич // egorchik_tima@mail.ru
Ершов Вячеслав Вячеславович // ilfsm@mail.ru
Кашина Нина Павловна // kashin-nin@yandex.ru

УДК 550.461

**Савичев О.Г., Домаренко В.А., Арбузов С.И.,
Пшеничкин А.Я., Вильгельм Е.А. (Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет)**

УСЛОВИЯ ВЫНОСА И АККУМУЛЯЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНО-ЛЕДНИКОВОМ БАСЕЙНЕ АКТРУ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

*Анализ геохимической информации, полученной в горно-ледниковом бассейне Актру в течение 1997–2013 гг., показал, что уровень содержания вещества в речных водах определяется наличием доступного для взаимодействия вещества, сорбционной способностью донных отложений и наносов, условно равновесной концентрацией вещества в одной среде, а также удельными скоростями растворения — осаждения и сорбции — десорбции в условиях рассматриваемого природно-территориального комплекса. Исходя из указанной зависимости и результатов анализа данных о химическом составе речных вод, донных отложений и почв, сделано предположение о перспективности дополнительных поисков полезных ископаемых на участке 12–1 км от устья р. Актру в пределах ее долины. Дополнительной целью такого исследования может быть оценка скорости современного формирования участков с повышенным содержанием химических элементов. **Ключевые слова:** вынос и аккумуляция, химические элементы, горно-ледниковый бассейн Актру, Алтай.*

Savichev O.G., Domarenko V.A., Arbuzov S.I., Pshenichkin A.Ya., Wilgelm E.A. (National research Tomsk Polytechnic University)
ABLATION AND ACCUMULATION CONDITION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE MOUNTAIN-GLACIAL BASIN AKTRU (MOUNTAIN ALTAI)

Analysis of geochemical data obtained from mountain-glacial basin during the period from 1997 to 2013 shows that content of substance in river waters depends of the presence of an available for interaction substance, the sorption capacity of bottom sediments, conditionally equilibrium concentration of

the substance in the same medium, as well as specific rates of dissolution — sedimentation and sorption — desorption under the conditions of the considered natural territorial complex. Basing on the pointed dependence and results of analyzed data of chemical composition of river waters, bottom sediments and soils it is assumed that an additional prospecting for minerals in the area of 12–1 km from the mouth of the r. Aktru within its valley is very perspective. As an additional (applied) purpose of the research could be rate estimation of forming of areas with a high content of chemical elements. Keywords: ablation and aggradation (accumulation), chemical element, mountain glacial basin Aktru.

Введение

Анализ условий выноса и аккумуляции химических элементов является одним из важнейших этапов теоретического обоснования геохимических методов поисков полезных ископаемых, эффективность которых остается недостаточно высокой, особенно в труднодоступных горных территориях. Это определяет общую актуальность подобных исследований, особенно в горных районах Азии.

Объектом исследований является горно-ледниковый бассейн Актру (элемент речной системы Актру — Чуя — Катунь — Обь). Данный бассейн расположен на территории Республики Алтай, в восточной части горного узла Биш-Иирду северного склона Северо-Чуйского хребта, в интервале высот 1470–4044 м над уровнем моря. Площадь бассейна составляет более 160 км². Около 10 % этой территории покрыто комплексом горных ледников: долинные ледники Левый, Правый и Малый Актру, ледники плоских вершин Водопадный и кар Малого Актру, висячий ледник на вершине Кара-Таш и карово-висячий ледник Стажер [9].

Водосборная площадь бассейна Актру 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 (МРМС) с полиметалльно-благороднометалльной специализацией (Zn, Pb, Cu, Hg, Au, Pt, Pd, Ag). Отмечаются повышенные концентрации рения [2]. Но в целом геохимическая изученность МРМС остается неудовлетворительной. В связи с этим была сделана попытка увязать между собой данные о химическом составе коренных пород, речных и ледниковых вод, донных отложений водосборного бассейна р. Актру с целью выявления условий выноса и аккумуляции ряда химических элементов на изученной территории для обоснования рациональной методики геохимических методов поисков применительно к условиям высокогорья.

Исходная информация и методика исследования

Исходная информация о минеральном и химическом составе коренных пород, химическом составе ледниковых (талых) и речных вод, донных отложений р. Актру была получена непосредственно авторами или при их участии в период 1997–2013 гг. и частично

опубликована в работах [2, 10, 11]. Дополнительно были использованы материалы государственного мониторинга геологической среды [8], геоэкологических исследований ледников Актру [1, 3, 4] и государственной геологической карты масштаба 1: 1 000 000 (Алтай-Саянская серия, лист М-45. ФГУП «ВСЕГЕИ», 2006).

Исследование включало в себя два основных этапа: 1) выявление пространственно-временных изменений химического состава вод водных объектов территории бассейна и сопоставление их с данными о минеральном и химическом составе коренных источников; 2) разработка математической модели, описывающей указанные изменения и позволяющей уточнить плотность и положение сети геохимических наблюдений.

Предложена следующая последовательность выполнения этапов: 1) обобщение и статистический анализ геохимических данных для выявления общих тенденций изменения геохимического состояния вод по территории бассейна (выявление экстремальных значений, проверка на однородность, корреляционный и регрессионный анализ); 2) термодинамические расчеты для оценки направленности процессов растворения и осаждения; 3) разработка математической модели изменения концентраций ряда химических элементов в поверхностных водах и ориентировочная оценка соотношения процессов сорбции и растворения — осаждения для определения ключевых факторов гидрохимического выноса и аккумуляции химических элементов от ледников до Курайской котловины; 4) сопоставление данных о химическом составе поверхностных вод, донных и коренных отложений для разработки рекомендаций по выбору параметров сети геохимического опробования в горно-ледниковых бассейнах (на примере бассейна р. Актру).

Схема размещения пунктов опробования приведена на рис. 1. Определение химического состава проб воды, коренных образований и донных отложений, отобранных в летний период 1997–2000, 2012, 2013 гг., проводилось в гидрохимической лаборатории и лаборатории «Золото — платина» Томского политехнического университета (ТПУ). Более подробные сведения о методиках отбора и анализа проб воды, донных и коренных пород, их статистического анализа и термодинамических расчетов, выполненных с помощью программного комплекса «Solution», приведены в работах [2, 11].

Математическая модель распространения веществ в поверхностных водах и донных отложениях построена на основе аналитического решения уравнения (1) при допущениях (2, 3) в виде уравнения (4):

$$\frac{dC}{dt} = k_p \cdot (C_p - C) + k_s \cdot (S - k_c \cdot C) \quad (1),$$

$$k_c = k_m \cdot (S_m - S) \quad (2),$$

$$k_r = k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S) + k_p \quad (3),$$

$$C = C_e + (C_0 - C_e) \cdot e^{-k_r \tau} \quad (4),$$

где t и τ — координата времени и время взаимодействия в системе «вода — порода» при движении водных масс от ледников до устья р. Актру; k_p, k_s, k_c, k_m — коэффициенты, характеризующие удельные скорости процессов растворения — осаждения и сорбции — десорбции; C и S — концентрация вещества в воде и донных отложениях; C_0 и C_p — начальная и равновесная концентрации вещества в воде; S_m — максимальная сорбционная емкость донных отложений; C_e — решение уравнения (1) при условии $\frac{dC}{dt}$ в виде уравнения (5),

которое при $k_p = 0$ и/или $C = C_p$ соответствует уравнению изотермы адсорбции Лэнгмюра:

$$C_e = \frac{k_s \cdot S + k_p \cdot C_p}{k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S) + k_p} = C_{e,sds} + C_{e,sp} \quad (5),$$

где $C_{e,sds}$ и $C_{e,sp}$ — составляющие концентрации вещества в растворе, ориентировочно отражающие вклад процессов сорбции — десорбции и растворения — осаждения соответственно [5].

Ранее, в работе [7] было высказано и обосновано данными гидрохимических наблюдений в бассейне Оби предположение о том, что распределение вероятностей концентраций C в изолированной системе «вода — порода» ориентировочно можно рассматривать как логнормальное с математическим ожиданием, равным среднему геометрическому C_g с учетом изменений водного стока по водосборной территории. Используя этот подход, начальные концентрации в данной работе в первом приближении рассматривались как средние геометрические значения для талых ледниковых вод $C_{g,gl}$ (т.е. $C_0 = C_{g,gl}$), а равновесные концентрации в речных водах $C_{p,x}$ на удалении x от устья реки — по уравнению (6):

$$C_{p,x} = C_{g,r} \cdot \left(\frac{Q_x}{Q_{g,r}} \right)^{k(Q)} \quad (6),$$

где Q_x — расход воды на расстоянии x от устья; $Q_{g,r}$ и $C_{g,r}$ — средние геометрические значения расхода воды и концентрации вещества (в речных водах) по длине реки (в шести створах); $k(Q)$ — эмпирический коэффициент.

Проверка соответствия расчетных значений, полученных по уравнениям (4–6), выполнена с использованием критерия:

$$F_{NS} = 1 - \frac{\sum(x_i - y_i)^2}{N \cdot D_y} \quad (7),$$

где y_i и x_i — измеренные и расчетные значения исследуемой величины; N и D_y — объем выборки и дисперсия измеренных значений y ; расчет принимается удовлетворительным, если $F_{NS} > 0.36$.

Результаты исследования и их обсуждение

В геологическом строении бассейна р. Актру принимают участие отложения девонского возраста, представленные в районе ледника Левый Актру пестроцветными вулканомиктовыми и известковистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, вулканомиктовыми конгломератами, прослоями известняков, доломитами, а в районе ледника Малый Актру — эффузивами и туфами кислого состава, терригенными породами, прослоями известняков. Вулканогенно-терригенные образования прорваны телами интрузивного комплекса Актру. В нижней части бассейна (Куррайская котловина) присутствуют метаморфические комплексы протерозоя, слагающие фундамент котловины, перекрытый озерно-ледниковыми, ледниковыми и водными отложениями неоплейстоцена (пески, алевроиты, глины ленточные). Многоплановые разно-

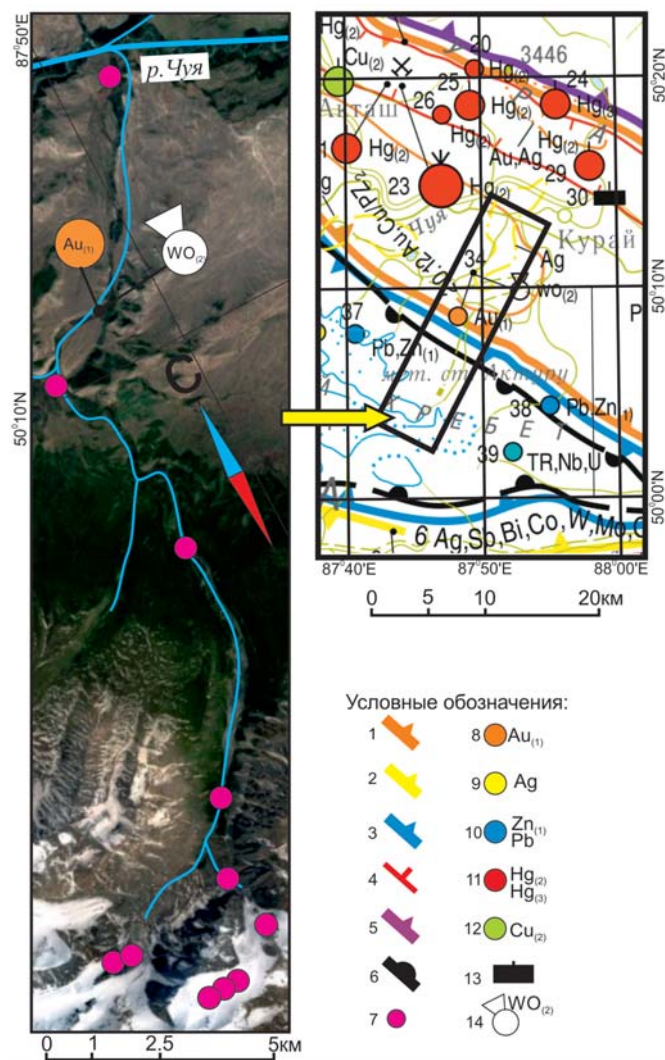


Рис. 1. Схема размещения пунктов наблюдений в горно-ледниковом бассейне Актру в 1997–2013 гг.: 1 — Алтае-Кузнецко-Северосаянская Hg-Fe-Au-рудная минерагеническая провинция; 2 — Юлгий-Юстыдская многометалльная минерагеническая зона; 3 — Салаиро-Алтайская Hg-Au-полиметаллическая минерагеническая область; 4 — Сарасинская Au-Hg-провинция; 5 — Западно-Саянская TR-Au-Fe-рудная минерагеническая зона; 6 — потенциальная Бельгешаская Hg-Pb-Zn-флюоритоносная рудоносная зона; 7 — места отбора проб; 8 — месторождения золота Au-Cu-скарновой формации; 9 — месторождения серебра; 10 — Pb-Zn-месторождения полиметаллической формации; 11 — месторождения ртути: Hg₍₂₎-ртутная аргиллизитовая карбонатная формация, Hg₍₃₎-ртутная аргиллизитовая терригенная формация; 12 — месторождения меди W (Bi, Cu)-Co-сульфоарсенидной формации; 13 — месторождения каменного угля; 14 — месторождения волластонита скарнового генетического типа

возрастные тектонические структуры усложняют геологический рисунок площади.

С интрузивными телами Актурина массива генетически связана сульфидная минерализация, приуроченная к приконтактовым известковым скарнам, слагающим линейные тела протяженностью до 500 м при видимой мощности до 70 м. Главным рудным минералом скарнов является халькопирит (до 10 %), с которым связаны аномальные концентрации Au (0.3–2.0 г/т) и Ag (до 50 г/т). Содержание Cu в рудах достигает 0.5–1.0 %, кроме того наблюдаются аномальные концентрации Zn — до 1 %, Bi — до 0.1 %, Re — 20–50 мг/т [2]. Повышенные содержания золота (до 0,2 г/т) отмечаются также в гидротермально-измененных гранодиоритах.

В шести пробах донных отложений, отобранных В.В. Паромовым в 2013 г. по длине р. Актру в точках в 0.2–1.0 м от уреза воды в верхнем слое толщиной 0.2 м, выполнены определение минерального состава донных отложений (рентгенофазовый анализ с выделением фракций: <0.01, 0.01–0.10 мм, 0.10–0.25 мм, 0.25–1.00, 1–5 мм) и кислоторастворимых форм ряда химических элементов во фракции менее 1 мм (методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой; микроволновый нагрев с ис-

пользованием «царской водки» и плавиковой кислоты) [10]. Эти данные (вследствие сложности отбора донных отложений горных рек с большими скоростями течения) можно считать ориентировочными. Их анализ показал, что, во-первых, во фракциях 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. Во-вторых, средние концентрации составляют: Ca — 2.77 ± 0.21 %; Mg — 1.19 ± 0.13 %; K — 0.27 ± 0.03 %; Fe — 1.91 ± 0.14 %; Al — 1.09 ± 0.07 %; Ti — 958 ± 113 г/т; Mn — 589 ± 113 г/т; Na — 284 ± 13 г/т; Cr — 19.4 ± 5.2 г/т; V — 30.4 ± 4.6 г/т; Ni — 17.3 ± 2.3 г/т; Li — 24.7 ± 2.7 г/т; Cu — 17.2 ± 2.7 г/т; Zn — 49.5 ± 7.0 г/т; Pb — 6.7 ± 1.4 г/т. Донные отложения в сравнении с кларком земной коры (по [13]) заметно обеднены (в 1.5 и более раз; исключение — Li), а относительно выборочных проб коренных отложений непосредственно в бассейне Актру содержат заметно меньшее количество меди и цинка.

Более полные данные были получены при изучении химического состава речных и талых ледниковых вод

в бассейне р. Актру, а также подземных вод в с. Курай с учетом материалов государственного мониторинга недр [8]. При этом общей тенденцией в территориальном изменении химического состава вод является увеличение суммарного содержания в речных водах растворенных веществ в направлении от ледников до устья в пределах Курайской котловины (табл. 1), сопровождающееся приближением к равновесию относительно кварца и карбонатов. Еще большее приближение к нему вплоть до незначительного пересыщения отмечено для подземных вод в с. Курай (табл. 2). На этом фоне имеются и некоторые особенности, например, отмечены повышенные концентрации ряда микроэлементов не только в истоках р. Актру, но и на выходе ее с горного участка в Курайскую котловину (горно-степной участок), причем там же зафиксированы повышенные (относительно истоков) концентрации Au, Ce, U, Cs, Sc (рис. 2,

Таблица 1
Среднегодовое показатели химического состава подземных и речных вод

| Показатель | Ледники Актру | | Истоки р. Актру | | р. Актру на участке 16.9–20 км от устья | | р. Актру на участке 12.4–0.2 км от устья | | Скважина в с. Курай (Q _{III} +R _{3ar}) | |
|--|---------------|---|-----------------|---|---|---|--|---|---|---|
| | A | N | A | N | A | N | A | N | A | N |
| Z, м | 2869 | 8 | 2487 | 4 | 2099 | 5 | 1636 | 7 | (1536) | – |
| $f_{\text{ледн}}, \%$ | 100 | 8 | 57 | 4 | 40 | 5 | 17 | 7 | – | – |
| pH, ед. pH | 5.44 | 7 | 8.26 | 4 | 7.88 | 5 | 8.20 | 7 | 7.96 | 6 |
| $\Sigma_{\text{гн}}, \text{мг/дм}^3$ | 21.4 | 8 | 54.2 | 4 | 96.9 | 5 | 153.3 | 7 | 230.0 | 6 |
| Ca ²⁺ , мг/дм ³ | 2.4 | 8 | 9.7 | 4 | 14.8 | 5 | 25.3 | 7 | 29.8 | 6 |
| Mg ²⁺ , мг/дм ³ | 0.5 | 8 | 1.2 | 4 | 2.6 | 5 | 4.4 | 7 | 15.2 | 6 |
| Na ⁺ , мг/дм ³ | 0.6 | 8 | 1.0 | 4 | 5.4 | 5 | 6.4 | 7 | 2.8 | 6 |
| K ⁺ , мг/дм ³ | 0.3 | 8 | 0.7 | 4 | 1.1 | 5 | 1.5 | 7 | 0.4 | 6 |
| HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³ | 14.0 | 8 | 31.7 | 4 | 46.6 | 5 | 83.3 | 7 | 157.6 | 6 |
| CO ₃ ²⁻ , мг/дм ³ | <1.0 | 8 | 2.7 | 4 | 6.7 | 5 | 6.0 | 7 | <1.0 | 1 |
| SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³ | 1.0 | 8 | 5.5 | 4 | 17.8 | 5 | 25.0 | 7 | 20.3 | 6 |
| Cl ⁻ , мг/дм ³ | 2.6 | 8 | 1.8 | 4 | 1.9 | 5 | 1.5 | 7 | 3.9 | 6 |
| F ⁻ , мг/дм ³ | 0.038 | 8 | 0.141 | 4 | 0.283 | 5 | 0.321 | 7 | 0.124 | 5 |
| Si, мг/дм ³ | 0.46 | 8 | 1.79 | 4 | 1.41 | 5 | 1.49 | 7 | 3.18 | 5 |
| Fe, мг/дм ³ | 0.329 | 7 | 4.263 | 4 | 3.950 | 5 | 2.050 | 7 | 0.052 | 6 |
| Li, мкг/дм ³ | 3.5 | 8 | 3.6 | 4 | 2.7 | 5 | 3.8 | 7 | – | – |
| Zn, мкг/дм ³ | 11.9 | 4 | 22.3 | 3 | 10.0 | 5 | 16.7 | 7 | 10.7 | 5 |
| Cd, мкг/дм ³ | 0.33 | 8 | 0.08 | 4 | 0.08 | 5 | 0.11 | 7 | – | – |
| Pb, мкг/дм ³ | 0.9 | 8 | 3.5 | 4 | 1.4 | 5 | 3.2 | 7 | 0.3 | 4 |
| Cu, мкг/дм ³ | 1.7 | 8 | 4.5 | 4 | 3.0 | 5 | 5.0 | 7 | 1.9 | 5 |
| Al, мкг/дм ³ | 135 | 4 | 2325 | 3 | 1410 | 5 | 442 | 7 | 198 | 5 |
| Bi, мкг/дм ³ | 0.010 | 6 | 0.006 | 3 | 0.024 | 3 | <0.001 | 3 | – | – |

Примечание: A и N — среднее арифметическое и количество проб; Z — высотная отметка поверхности; $f_{\text{ледн}}$ — доля ледников в площади водосбора; $\Sigma_{\text{гн}}$ — сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻ + CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻)

Таблица 2
Значения индекса насыщения S_I ледниковых и речных вод в горно-ледниковом бассейне Актру

| Формула | Ледники Актру | р. Актру | | | Скважина в с. Курай ($Q_{III}+R_{3ar}$) |
|--|---------------|----------|---------------------|----------------------|---|
| | | Истоки | 16.9–20 км от устья | 0.2–12.4 км от устья | |
| $CaCO_3^{calcite} = Ca^{2+} + CO_3^{2-}$ | -9.85 | -1.31 | -1.28 | -0.55 | -0.82 |
| $CaCO_3^{calcite} + CO_2 + H_2O = Ca^{2+} + 2 \cdot HCO_3^-$ | -3.54 | -0.62 | -0.77 | -0.39 | -0.02 |
| $CaMg(CO_3)_2^{dolomite} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2 \cdot CO_3^{2-}$ | -19.39 | -2.50 | -2.29 | -0.84 | -0.91 |
| $CaMg(CO_3)_2^{dolomite} + 2 \cdot CO_2 + 2 \cdot H_2O = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4 \cdot HCO_3^-$ | -6.75 | -1.13 | -1.27 | -0.51 | 0.70 |
| $SiO_2^{quartz} + 2 \cdot H_2O = H_4SiO_4^0$ | -0.71 | -0.14 | -0.24 | -0.22 | 0.11 |
| $CaAl_2Si_2O_8^{anorthite} + 3 \cdot H_2O + 2 \cdot CO_2 = Al_2Si_2O_7 \cdot 2 \cdot H_2O^{kaolinite} + Ca^{2+} + 2 \cdot HCO_3^-$ | -260.65 | -256.18 | -257.05 | -256.89 | -256.64 |
| $CaAl_2Si_2O_8^{anorthite} + 2 \cdot H^+ + 6 \cdot H_2O = Al_2O_3 \cdot 3 \cdot H_2O^{gibbsite} + 2 \cdot H_4SiO_4 + Ca^{2+}$ | -12.43 | -5.09 | -5.88 | -5.00 | -4.75 |
| $CaAl_2Si_2O_8^{anorthite} + 2 \cdot H^+ + H_2O = Al_2Si_2O_7 \cdot 2 \cdot H_2O^{kaolinite} + Ca^{2+}$ | -28.32 | -19.37 | -21.12 | -20.80 | -20.30 |
| $2 \cdot NaAlSi_3O_8^{albite} + 11 \cdot H_2O + 2 \cdot CO_2 = Al_2Si_2O_7 \cdot 2 \cdot H_2O^{kaolinite} + 2 \cdot Na^+ + 2 \cdot HCO_3^- + 4 \cdot H_4SiO_4^0$ | -18.88 | -12.30 | -12.23 | -12.10 | -11.28 |
| $NaAlSi_3O_8^{albite} + 7 \cdot H_2O + H^+ = Al_2O_3 \cdot 3 \cdot H_2O^{gibbsite} + Na^+ + 3 \cdot H_4SiO_4^0$ | -210.36 | -205.63 | -205.56 | -205.13 | -204.72 |
| $3 \cdot KAlSi_3O_8^{microcline} + 2 \cdot H^+ + 12 \cdot H_2O = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2^{muscovite} + 2 \cdot K^+ + 6 \cdot H_4SiO_4^0$ | -34.64 | -24.87 | -25.79 | -24.84 | -24.34 |
| $2 \cdot KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2^{muscovite} + 2 \cdot H^+ + 3 \cdot H_2O = Al_2Si_2O_7 \cdot 2 \cdot H_2O^{kaolinite} + 2 \cdot K^+$ | -5.94 | 0.42 | 0.05 | 0.92 | -0.61 |

Примечание: отрицательные значения индекса S_I указывают на потенциальное недосыщение, а положительные — на пересыщение раствора

табл. 3). Для объяснения указанных выше фактов был проведен статистический анализ данных наблюдений за 1997–2013 гг., разработана модель взаимодействия речных вод и донных отложений, выполнена апробация этой модели по данным, полученным в июле 2013 г., и получены следующие результаты.

Во-первых, уже на расстоянии 50–1000 м от конца ледников сумма главных ионов и концентрации ряда химических элементов существенно возрастают по сравнению с тальми ледниковыми водами. Можно было бы предположить, что талые воды почти моментально (в среднем — несколько минут) растворяют часть материала подстилающих пород. Но, видимо, более правдоподобное объяснение связано с выходом из-под ледников талых вод, поступающих в пограничный слой между ледником и горными породами и взаимодействующих с последними более длительное время, за ко-

торое минерализация воды увеличивается в среднем на 33 мг/дм³, а pH — на 2.8.

Во-вторых, по данным наблюдений в 2012–2013 гг. концентрации главных ионов возрастают от истоков примерно до участка 8–12 км от устья, а затем стабилизируются или несколько снижаются. Возможно, это связано с поступлением менее минерализованных вод притоков, например, р. Корумду. Но при этом нельзя не отметить, что указанный участок приурочен к смене горного рельефа на горно-степной и выходу реки в Курайскую котловину (рис. 3). Согласно [12], минерализация раствора в целом возрастает при росте времени взаимодействий в системе «вода — порода», которое, в свою очередь, зависит от скорости водообмена. Однако в случае многих рек, включая Актру, уменьшение уклонов поверхности, по мнению Ю.Б. Виноградова, не сопровождается пропорциональным уменьшением скорости течения.

Основываясь на исследованиях кинетики растворения силикатов [14], при изучении указанных взаимодействий необходимо учитывать площадь контакта между водой и твердыми частицами, которая, в свою очередь, зависит от стока и гранулометрического состава наносов. С учетом этого по данным, полученным в июле 2013 г., были расчи-

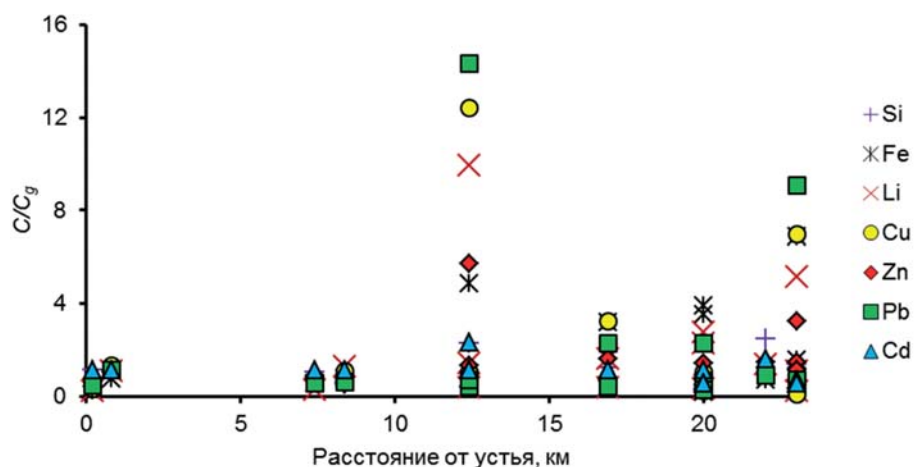


Рис. 2. Нормированные концентрации микроэлементов C в водах реки Актру (по среднему геометрическому для всех створов C_g за период наблюдений с 1997 по 2013 гг.)

Таблица 3

Результаты определения микроэлементного состава речных и подземных вод в августе 1998 г. с использованием нейтронно-активационного анализа, мкг/дм³

| Элемент | Истоки р. Актру, 23 км от устья | р. Актру в створе 12.4 км от устья (выход с горного участка) | Скважина в с. Курай (Q _{III} +R _{3ar}) |
|---------|---------------------------------|--|---|
| Sc | 0.02 | 0.17 | 0.100 |
| Cr | 1.7 | 4.7 | 5.9 |
| Br | 24.0 | 1.6 | 3.1 |
| Sm | 0.15 | 0.16 | 0.100 |
| Cs | <0.07 | 0.17 | 0.10 |
| Rb | 0.4 | 6.0 | 0.2 |
| Au | 0.016 | 0.019 | 0.008 |
| Th | <0.06 | <0.06 | <0.06 |
| U | <0.10 | 0.680 | 0.170 |
| Ce | 0.03 | 1.10 | 0.68 |
| Sb | <0.030 | 0.260 | 0.210 |
| Ba | <10 | 39 | 51 |
| La | 0.330 | 0.180 | 0.150 |

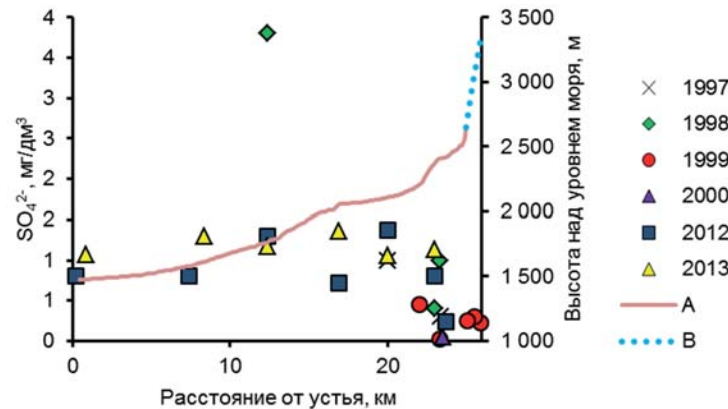


Рис. 3. Вариации концентраций SO_4^{2-} по длине р. Актру в речных и талых ледниковых водах: А — высотные отметки меженного уреза речных вод; В — высотные отметки поверхности ледника; общее изменение величины SO_4^{2-} приближенно описывается уравнением $[SO_4^{2-}] = 20.158 + 1.788 \cdot L - 0.106 \cdot L^2$, где L — расстояние створа от устья, км; $F_{NS} = 0.83$ (1997–2013 гг.)

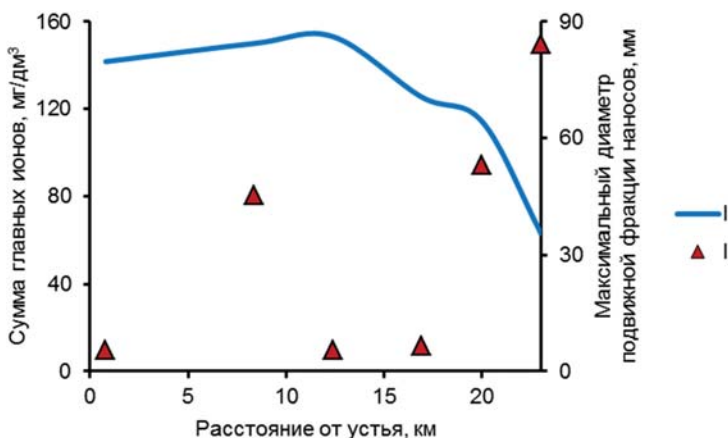


Рис. 4. Вариации суммы главных ионов (I) в водах р. Актру и расчетных значений верхнего предела неподвижной фракции донных отложений (II) в июле 2012 г.; $d_{sb,lim} \text{ (мм)} = 0.146 \cdot L^2 - 0.325 \cdot L$, где L — расстояние створа от устья, км; $F_{NS} = 0.50$

таны максимальный диаметр частиц подвижной фракции $d_{sb,lim}$ (м) по формуле Г.И. Шамова (8) и предельная мутность SC_{max} по формуле К.И. Россинского (9):

$$d_{sb,lim} = 0.012 \cdot \frac{v^3}{\sqrt{h}} \quad (8),$$

$$SC_{max} = 24 \cdot \frac{v^3}{u \cdot h} \quad (9),$$

где v и h — средние значения скорости течения (м/с) и глубины потока (м); u — гидравлическая крупность частиц, ориентировочно принятая для диаметра частиц при $u=w$, где w — среднее значение пульсационной скорости по формуле (9):

$$w = v \cdot \sqrt{\frac{g}{C_{sh} \cdot M_{sh}}} \quad (10),$$

где g — ускорение свободного падения; C_{sh} — коэффициент Шези; M_{sh} — функция коэффициента Шези по А.В. Караушеву: при $C_{sh} > 60$ $M_{sh} = 48$; при $10 \leq C_{sh} \leq 60$ $M_{sh} = 0.7 \cdot C_{sh} + 6$. Возможность применения подобного подхода к расчету предельной мутности подтверждается результатами сравнения расчетных (6.9 мм) и измеренных в 2012 г. [1] значений диаметра частиц взвешенных наносов (содержание частиц крупностью от 0.5 до 0.1 мм составляет от 30 до 60 %; содержание частиц с крупностью более 1 мм в ряде случаев превысило 10 %).

Сопоставление полученных значений $d_{sb,lim}$ с изменениями гидрохимических показателей показало, что возрастание суммарного содержания главных ионов в водах р. Актру на участках ее верхнего и среднего течения происходит на фоне общего уменьшения диаметра частиц влекомых наносов и предельной мутности с локальными колебаниями при изменении типа руслового процесса или впадении притока (рис. 4). На горно-степном участке нижнего течения, когда $d_{sb,lim} \approx 5$ мм, а предельная расчетная мутность может быть менее 100 г/м³, содержание растворенных веществ в целом стабилизируется. Следовательно, можно предположить, что гидрохимический вынос возрастает при динамическом воздействии потока на горные породы, определяющем площадь взаимодействий воды с твердыми частицами, и снижается при его уменьшении.

В-третьих, тенденции изменения по длине реки микроэлементного состава речных вод по сравнению с общей минерализацией и содержанием главных ионов менее выражены, хотя нельзя не отметить повышенные концентрации ряда элементов непосредственно у ледников и на границе горного и горно-степного участков (рис. 2, табл. 3). Анализ результатов моделирования концентраций Cu, Pb, Zn в водах и донных отложениях р. Актру в июле 2013 г. (табл. 4) подтвердил

Таблица 4
Параметры модели (1–11)

| Параметр (формула) | Исследуемый химический элемент | | |
|---|--------------------------------|----------|-----------------------------|
| | Cu | Pb | Zn |
| Влияющее вещество в речных водах C_F (11) | Fe | Fe | Перманганатная окисляемость |
| Эмпирический коэффициент $k(CF)$ (11) | -0.58221 | -1.19506 | -0.54384 |
| Эмпирический коэффициент $S_{m,0}$ (11) | 4.32052 | 0.01084 | 0.64537 |
| Эмпирический коэффициент $k(pH)$ (11) | 3.25706 | 9.07905 | 5.18298 |
| Эмпирический коэффициент $k(d)$ (11) | 0.09348 | 0.05458 | 0.18034 |
| Эмпирический коэффициент k_s (1) | 0.00074 | 0.03611 | 0.94447 |
| Эмпирический коэффициент k_m (2) | 2.10341 | 0.00376 | 0.26851 |
| Эмпирический коэффициент k_p (1) | 0.43525 | 18.59225 | 1.05389 |
| Эмпирический коэффициент k_o (6) | 0.32595 | 1.49171 | 0.98098 |
| Среднее геометрическое значений концентраций: | | | |
| в речных водах $C_{g,r}$ (6), мг/дм ³ | 0.00202 | 0.00124 | 0.01137 |
| в талых ледниковых водах C_0 (4), мг/дм ³ | 0.00095 | 0.00053 | 0.01914 |
| Критерий качества при расчете концентраций: | | | |
| в донных отложениях $F_{NS}(S)$ (7) | 0.993 | 0.989 | 0.445 |
| в речных водах по уравнению (4) $F_{NS}(C)$ (7) | 0.999 | 0.999 | 0.855 |
| в речных водах по уравнению (5) $F_{NS}(C_e)$ (7) | 0.999 | 0.999 | 0.855 |
| Доля сорбции $100 \cdot C_{e,sds} / (C_{e,sds} + C_{e,sp})$, % | 92.18 | 83.66 | 99.96 |

возможность использования рассматриваемой модели (1–6) для описания изменений химического состава речных вод. При этом максимальная сорбционная способность донных отложений S_m была определена как функция наибольшего диаметра влекаемых частиц, pH и химического состава речных вод:

$$S_m = S_{m,0} \cdot pH^{k(pH)} \cdot d_{sb,lim}^{k(d)} \cdot C_F^{k(CF)} \quad (11),$$

где C_F — концентрация вещества, оказывающего влияние на содержание исследуемого вещества; $S_{m,0}$, $k(pH)$, $k(d)$, $k(CF)$ — эмпирические коэффициенты. Кроме того, было показано, что: а) для Cu, Pb, Zn получено отношение $\frac{S}{S_m} = 6,442 \cdot S_m^{-0.884}$, $F_{NS}=0.63$; б) для концентраций Cu, Pb, Zn в речных водах отмечены противоположные, по сравнению с S_m тенденции — значения S_m от истоков к устью р. Актру в целом возрастают, а концентрации в речных водах — уменьшаются; в) компонента $e^{-k_r \cdot \tau}$ в уравнении (4) стремится к нулю, что позволяет достичь удовлетворительных результатов при использовании уравнения (5); г) влияние потока проявляется опосредованно через величину параметров уравнения (5).

В-четвертых, анализ результатов, полученных в июле 2013 г., соотношения вклада процессов сорбции — десорбции и растворения — осаждения с использованием допущений (1–6, 11), показал, что ключевым процессом, определяющим уровень содержания в водах р. Актру свинца, меди и, особенно, цинка, является сорбция (и соосаждение) на частицах наносов и донных отложений (табл. 4). Аналогичный вывод был получен и для дельты Меконга [5], что позволяет распространить его и на другие реки.

Обобщая указанные выше факты, можно сделать вывод о том, что наиболее существенные изменения химического состава речных вод происходят на участке от истоков (у ледников) до створа примерно в 12 км от устья. Это в определенной степени совпадает с выводом о значимом увеличении в составе донных отложений рек Сибири и Северного Вьетнама доли кварца от истоков к устьям рек при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости менее 1.26–1.27 (логарифм произведения плотности и твердости) на участках, удаленных от истоков на 11–20 км и более [6]. Вследствие высокой транспортирующей способности точное

соблюдение указанной закономерности непосредственно для р. Актру, судя по нескольким точечным пробам аллювиальных отложений, не наблюдается, хотя нельзя не отметить большее содержание в глинистой фракции калиевого полевого шпата в истоках [2, 10].

В таких условиях, как было показано в работе [6], участок с относительно установившимся минеральным составом донных отложений с большой вероятностью должен быть расположен в пределах 1–100 км ниже по течению от границы участков с однородным химическим составом речных вод. В случае р. Актру условно однородный химический состав речных вод наблюдается на выходе реки с горного участка на горно-степной, имеющий протяженность около 12 км. Следовательно, вероятность выноса твердого материала в р. Чуя и, особенно, отложения наносов в пойме р. Актру достаточно высока.

Заключение

Анализ геохимической информации, полученной в горно-ледником бассейне Актру в течение 1997–2013 гг., и результатов моделирования химического состава вод показал следующее: уровень содержания вещества в речных водах определяется наличием доступного для взаимодействия вещества (условно — параметр S в уравнении (5)), сорбционной способности донных отложений и наносов S_m (11), зависящей от pH водной среды, транспортирующей способности потока и гранулометрического состава отложений и наносов, содержания в растворе веществ, влияющих на соосаждение и сорбцию на взвешенных частицах (через площадь и время контакта воды и породы), условно равновесной концентрацией вещества в одной среде (C_p в уравнении (5)), определяемой химическим и минеральным составом горных пород в водосборном

бассейне и интенсивностью водообмена, а также удельными скоростями растворения — осаждения и сорбции — десорбции в условиях рассматриваемого природно-территориального комплекса (параметры k_s , k_p , k_m в уравнении (5)).

Наиболее интенсивное растворение и выщелачивание горных пород происходит в зоне абляции горных ледников непосредственно в истоках реки. Вследствие этого в талых ледниковых водах на запыленной поверхности ледника и в верхней части русловой сети наиболее вероятно обнаружение повышенных концентраций целого ряда химических элементов, не связанных непосредственно с антропогенным загрязнением. На участке от ледников до выхода в Курайскую котловину происходит механическое разрушение частиц речных наносов (как результат столкновения с другими частицами) одновременно или предварительно подвергшихся процессам растворения и выщелачивания, которые ослабляют механическую прочность неокатанных крупных частиц. После механического разрушения в целом (с учетом фаз водного режима и удаления от истоков) происходит увеличение площади соприкосновения воды и горных пород, что, в свою очередь, приводит к усилению выщелачивания и растворения минералов в составе частиц взвешенных и влекомых наносов, донных и пойменных (во время паводков и паводков) отложений [6].

Изменение по длине реки концентраций железа и микроэлементов, первоначально присутствующих в составе породобразующих и рудных минералов, не столь очевидно, поскольку определяется комплексом процессов, ключевую роль среди них (судя по результатам моделирования) играют сорбция и соосаждение на частицах речных наносов. Интенсивность указанных процессов зависит от многолетних и сезонных изменений водного и твердого стока р. Актру, в том числе от дождевых паводков, в результате которых значительная часть твердого материала осыпей выносятся в русловую сеть, а затем частично растворяется и выщелачивается. В качестве примера можно привести повышенные концентрации золота и РЗЭ в июле 1998 г. после выпадения интенсивных снегодождевых осадков.

После первоначального взвешивания в потоке и частичного растворения, особенно на участках с пониженной транспортирующей способностью потока (на излучинах, у островов, в расширениях русел и пойм) происходит осаждение наносов (и малорастворимых веществ из раствора) и соосаждение на них ряда веществ, что подтверждается материалами изучения химического состава почв бассейна Актру, в частности, данными о содержании в почвах железа в количестве 0.46–1.48 %, CaCO_3 — до 8.97 % [3]. Можно предположить, что будут осаждаться и такие элементы, как золото, содержание которого в воде р. Актру на выходе в Курайскую котловину в июле 1998 г. составило 19 мкг/дм³, а в подземных водах непосредственно в Курайской котловине — 8 мкг/дм³. Исходя из этого, можно сделать предположение о перспективности до-

полнительных поисков на золото на участке 12–1 км от устья р. Актру в пределах ее долины. Дополнительной целью такого исследования может быть оценка скорости современного формирования участков русла и долины р. Актру с повышенным содержанием цинка, свинца, благородных и редкоземельных элементов, поскольку относительно установившийся гидрологический режим горно-ледникового бассейна Актру и прилегающих территорий приурочен в основном к голени [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-55-80015, 17-05-00042.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин, Д.А. Сток взвешенных наносов р. Актру и особенности его режима за последние 50 лет / Д.А. Вершинин, В.А. Уйманова, С.А. Овсянников // Вестник Томского государственного университета. — 2014. — № 381. — С. 226–231.
2. Гусев, А.И. Магмо-рудно-метасоматическая система Актуру в Горном Алтае / А.И. Гусев, А.Ф. Коробейников, А.Я. Пшеничкин, В.А. Домаренко // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 7. — С. 75–79.
3. Давыдов, В.В. Почвы верхней части бассейна Актру // Природные ресурсы Сибири. Современное состояние и проблемы природопользования / В.В. Давыдов, С.Г. Копысов / Отв. ред. И.В. Космаков. — Новосибирск: Наука, 2010. — 223 с.
4. Зольников, И.Д. Четвертичные отложения и рельеф долин Чуи и Катунь / И.Д. Зольников, А.А. Мистрюков. — Новосибирск: Ин-т геологии и минералогии СО РАН, Изд-во «Параллель», 2008. — 182 с.
5. Савичев, О.Г. Взаимосвязи между химическим составом донных отложений и поверхностных вод в устьевой области реки Меконг (Вьетнам) / О.Г. Савичев, Н.В. Гусева // Геосферные исследования. — 2018. — № 2. — С. 72–82.
6. Савичев, О.Г. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, О.Е. Лепокурова // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329. — № 7. — С. 43–56.
7. Савичев, О.Г. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей / О.Г. Савичев, В.Л. Нгуен // Изв. Томского политехнического университета. — 2015. — Т. 326. — № 9. — С. 133–142.
8. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2011 г. / Гл. ред. В.А. Лыготин. — Томск: ООО «Стандарт», 2012. — 180 с.
9. Тимошок, Е.Е. Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая / Е.Е. Тимошок, Ю.К. Нарожный, М.Н. Диркс, С.Н. Скороходов, А.А. Березов. — Томск: Изд-во НТЛ, 2008. — 208 с.
10. Savichev, O. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation) / O. Savichev, I. Matveenko, V. Paromov // MATEC Web of Conferences. — 2016. — N 85. — P. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/20168501031.
11. Savichev, O.G. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gorniy Altai) / O.G. Savichev, V.V. Paromov // Geography and Natural Resources. — 2013. — Vol. 4. — P. 364–370.
12. Shvartsev, S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth / S.L. Shvartsev // Geochemistry International. — 2008. — V. 46. — № 13. — P. 1285–1398.
13. Taylor, S.R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table (англ.) / S.R. Taylor // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1964. — August (vol. 28, no. 8). — P. 1273–1285. — DOI: 10.1016/0016-7037(64)90129-2.
14. White, Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils / Ar.F. White // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. — 1995. — V. 31. — P. 405–462.

© Коллектив авторов, 2019

Савичев Олег Геннадьевич // osavichev@mail.ru
Домаренко Виктор Алексеевич // viktor_domarenko@mail.ru
Арбузов Сергей Иванович // siarbuзов@mail.ru
Пшеничкин Анатолий Яковлевич // paya@tpu.ru
Вильгельм Евгений Андреевич // wilgelmgekan@mail.ru