

УДК 550.461:556.314(235.222)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАСЕЙНА р. АККЕМ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)¹

© 2024 г. Е. В. Бородина*

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

**e-mail: borev@igm.nsc.ru*

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Получены результаты по количественному определению методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) 54 элементов в воде малых рек, озер, в талых водах ледника и снежников, а также 49 элементов в донных илах бассейна р. Аккем. Изучены физико-химические характеристики водных объектов. Состав природных вод и донных илов отражает металлогенические особенности состава подстилающих рудовмещающих пород. Несмотря на наличие природных источников тяжелых металлов в верхнем течении р. Аккем и ее притоках, концентрации токсичных веществ в большинстве исследованных объектов \leq ПДК в питьевой воде.

Ключевые слова: ICP-MS, тяжелые металлы, Аккем, Горный Алтай.

DOI: 10.31857/S0321059624010054 **EDN:** EEEAGQ

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн р. Аккем занимает восточную часть природного парка “Белуха” и расположен в Катунском физико-географическом районе Центрально-Алтайской провинции (рис. 1). Административно относится к Усть-Коксинскому району Республики Алтай, с юга граничит с Республикой Казахстан. Здесь расположена наиболее высокогорная и труднодоступная часть парка. В орографическом отношении основная часть бассейна расположена на северном макросклоне восточного фланга Катунского хребта [9]. Рельеф территории бассейна р. Аккем типично горный, в южной его части – альпийский. Климат резко континентальный (особенно суровый в верхней части долины, у подножья г. Белухи – 4509 м) с низкой среднегодовой температурой и высококонтрастным тепловым режимом на разных высотах. Аккемская озерная экосистема представлена проточными озерами с крутосклонными скалисто-осыпными и заболоченными ландшафтами [9, 19].

В верхнем течении Аккема выше Аккемского озера территория водосбора сложена среднекембрийскими метаморфическими породами каимской свиты, прорванными силурийскими гранитоидами каледонского интрузивного цикла. В окрестностях Аккемского озера – верхнекембрийские осадочные породы катунской свиты. Ниже по течению Аккема залегают осадочные нижнеордовикские породы текелинской свиты, средне-верхнекембрийские породы катунской свиты, нижне-среднекембрийские породы кучерлинской свиты, прорванные герцинскими средне-верхнедевонскими гранитоидами [3, 4].

Почвообразующие породы в долине Аккема – песчаники и сланцы. Каменистые россыпи в верховье сменяются подбурами таежными и бурными лесными кислыми почвами в нижнем течении реки [18]. В районе Аккемского озера преобладают горно-тундровые дерновые и торфянисто-перегнойные почвы, в меньшей степени распространены горно-луговые дерновые грубогумусные почвы [9].

Под северным склоном Белухи в районе Аккемского ледника отмечены площадные шлиховые ореолы рассеяния Cu (халькопирит), выше

¹ Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

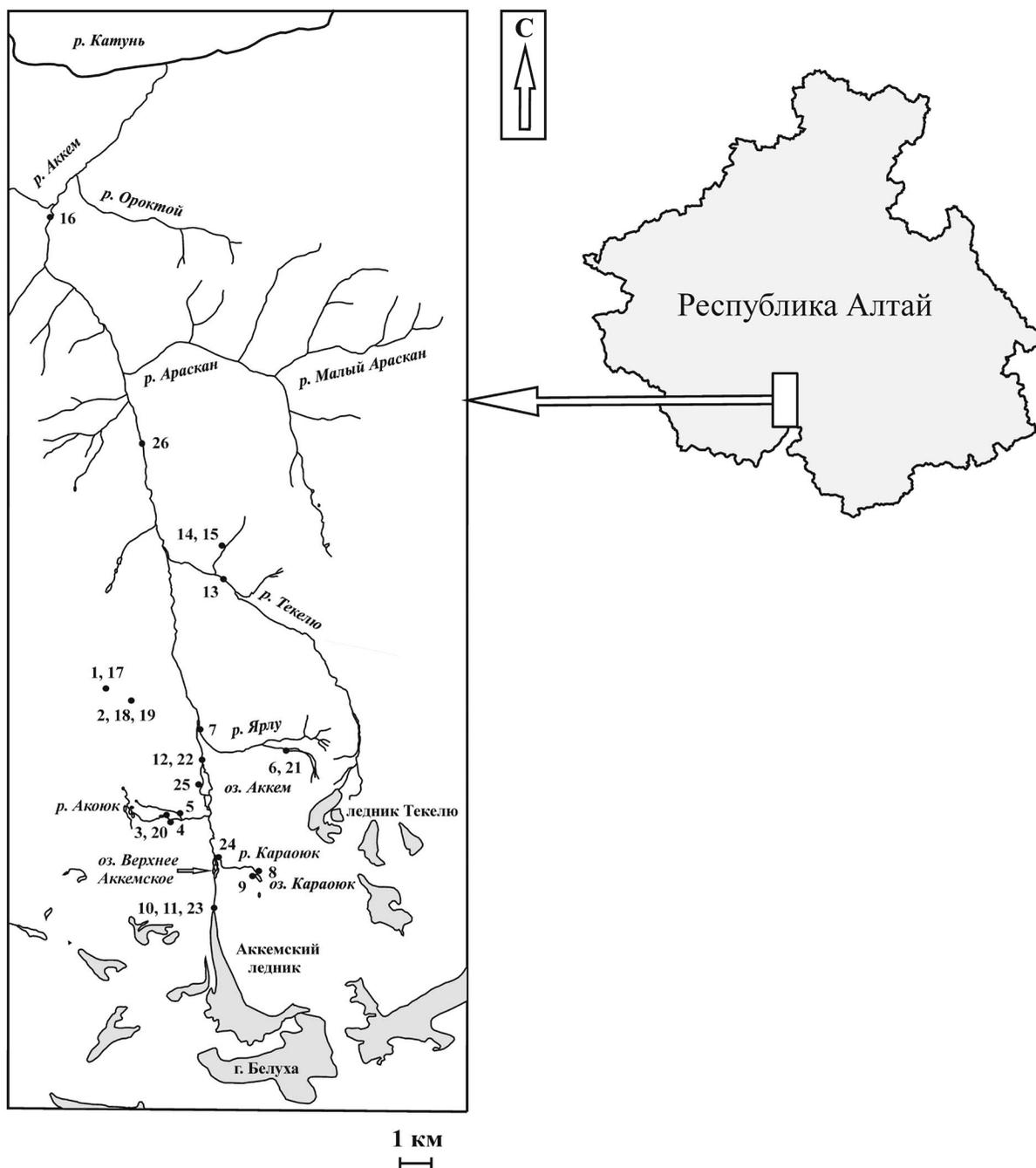


Рис. 1. Картограмма бассейна р. Аккем с притоками, использованы данные [3, 4]. Точками отмечены места отбора проб воды и исследования физико-химических параметров. Цифры на схеме соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

Верхнего Аккемского озера – W (шеелит) и Pb (галенит, церуссит), в долине р. Акоюк – рудопроявления Cu и Mo, в районе Аккемского озера – W (шеелит) и Cu. У истоков р. Ярлу находится мелкое месторождение (Аккемское) Mo. В долине р. Ярлу, а также на всем протяжении р. Аккем зафиксированы площадные шлиховые ореолы рассеяния Pb (галенит) и Cu (халькопи-

рит, халькозин), в долине р. Текелю – Pb (галенит, церуссит) [10–12].

Река Аккем берет начало из Аккемского ледника (ледника Родзевича). Ее длина 36 км, средняя высота водосбора – 3000 м. Наиболее крупные притоки: левый – Акоюк, правые – Караюк, Ярлу, Текелю, Араскан, Ороктой. По

Таблица 1. Физико-химические показатели водных объектов (в заголовках столбцов: 1, 17 – снег, фирн, водораздельный хребет между долинами рек Аккема и Кучерлы; 2, 18 – снег, фирн, перевал Кара-Тюрек; 3, 20 – долина Семи озер, нижнее озеро, исток р. Акоюк; 4 – водопад на р. Акоюк (долина Семи озер); 5 – левый приток р. Акоюк (долина Семи озер); 6, 21 – р. Ярлу, верхнее течение; 7 – р. Ярлу, 350 м выше устья; 8 – оз. Караюк (Горных духов), исток р. Караюк; 9 – оз. Караюк, северный берег; 10 – лед, ледник Аккемский; 11, 23 – р. Аккем, исток из грота ледника Аккемского; 12, 22 – оз. Аккем, исток р. Аккем, метеостанция; 13 – р. Текелю, нижнее течение; 14 – выход грунтовых вод в долине правого притока р. Текелю; 15 – дождь, долина правого притока р. Текелю; 16 – р. Аккем, нижнее течение; 19 – перевал Кара-Тюрек, ручей, талые воды снежника; 24 – р. Караюк, устье; 25 – оз. Аккем, западный берег; 26 – р. Аккем, среднее течение). Здесь и в табл. 2 под номерами – даты отбора пробы воды; б/Обр-1–21, б/Обр-2–21 – физико-химические показатели водных объектов исследованы без отбора проб; минер., мг/л – минерализация; эл. пров., мкСм – электропроводность)

Показатель	1	2	3	4	5	6
	16.08.2021 В-29–21	16.08.2021 В-30–21	17.08.2021 В-32–21	17.08.2021 В-33–21	17.08.2021 В-34–21	17.08.2021 В-35–21
Координаты	49°56'21" с.ш. 86°29'32.6" в.д.	49°56'05.1" с.ш. 86°30'23.6" в.д.	49°53'49.4" с.ш. 86°31'26.7" в.д.	49°53'45.2" с.ш. 86°31'42.3" в.д.	49°53'51.1" с.ш. 86°32'00" в.д.	49°55'13.8" с.ш. 86°35'07.2" в.д.
Высота, м	2860	3090	2450	2360	2300	2270
$t_{\text{возд}}^{\circ}\text{C}$	–	–	16.1	18.2	21.6	18.3
$t_{\text{воды}}^{\circ}\text{C}$	–	–	6.5	8.4	10.5	13.6
минер., ppm	4.1	4.9	43.4	43.0	28.4	256
pH	8.2	8.3	7.3	6.8	7.5	7.8
ОВП (Eh), мВ	95	185	170	111	115	103
Показатель	7	8	9	10	11	12
	17.08.2021 В-36–21	18.08.2021 В-37–21	18.08.2021 В-38–21	18.08.2021 В-39–21	18.08.2021 В-40–21	18.08.2021 В-41–21
Координаты	49°55'40.4" с.ш. 86°32'33" в.д.	49°52'40.9" с.ш. 86°34'23.7" в.д.	49°52'40.4" с.ш. 86°34'21.6" в.д.	49°51'41" с.ш. 86°33'02.9" в.д.	49°51'41" с.ш. 86°33'02.9" в.д.	49°54'50.7" с.ш. 86°32'41.9" в.д.
Высота, м	1970	2500	2500	2320	2320	2040
$t_{\text{возд}}^{\circ}\text{C}$	18.0	13.8	16.2	16.0	16.0	11.4
$t_{\text{воды}}^{\circ}\text{C}$	8.6	11.5	9.5	–	0.9	4.7
минер., ppm	174	17.7	17.8	9.3	8.0	22.5
pH	7.7	8.0	7.6	8.2	9.3	8.8
ОВП (Eh), мВ	110	138	128	170	100	106
Показатель	13	14	15	16	17	18
	19.08.2021 В-42–21	19.08.2021 б/Обр-1–21	19.08.2021 б/Обр-2–21	22.08.2021 В-49–21	29.07.2017 В-26–17	29.07.2017 В-27–17
Координаты	49°58'38.3" с.ш. 86°33'10.7" в.д.	49°59'13.8" с.ш. 86°33'13.9" в.д.	49°59'13.8" с.ш. 86°33'13.9" в.д.	50°05'50.2" с.ш. 86°27'41.9" в.д.	49°56'21" с.ш. 86°29'32.6" в.д.	49°56'05.1" с.ш. 86°30'23.6" в.д.
Высота, м	1860	2190	2190	980	2860	3090
$t_{\text{возд}}^{\circ}\text{C}$	16.5	16.8	–	16.5	18.0	–
$t_{\text{воды}}^{\circ}\text{C}$	8.0	0.8	–	6.6	–	–
минер., ppm	47.7	22.9	–	42.0	4.2	2.3
эл. пров., мкСм	–	–	–	–	9.3	3.5
pH	7.2	7.3	8.3	7.4	8.4	8.5
ОВП (Eh), мВ	190	192	170	185	116	124

Показатель	19	20	21	22	23	24
	29.07.2017 В-28–17	30.07.2017 В-29–17	30.07.2017 В-30–17	30.07.2017 В-31–17	31.07.2017 В-32–17	31.07.2017 В-33–17
Координаты	49°56'05.1" с.ш. 86°30'23.6" в.д.	49°53'49.4" с.ш. 86°31'26.7" в.д.	49°55'13.8" с.ш. 86°35'07.2" в.д.	49°54'50.7" с.ш. 86°32'41.9" в.д.	49°51'41" с.ш. 86°33'02.9" в.д.	49°53'02.3" с.ш. 86°33'06.3" в.д.
Высота, м	3090	2450	2270	2040	2320	2095
$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	11.0	17.0	21.4	15.6	14.4	14.0
$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	10.3	11.4	19.4	8.8	4.7	7.6
минер., ppm	3.2	35.9	280	16.2	8.4	27.1
эл.пров., мкСм	5.1	56.0	417	25.8	13.1	42.3
pH	8.9	7.2	8.0	7.4	7.5	7.4
ОВП (Eh), мВ	54	45	50	70	92	141
Показатель	25	26				
	31.07.2017 В-34–17	01.08.2017 В-35–17				
Координаты	49°54'31.4" с.ш. 86°32'42.3" в.д.	50°01'15.9" с.ш. 86°30'47.4" в.д.				
Высота, м	2040	1390				
$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	17.4	15.1				
$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	9.2	10.5				
минер., ppm	25.5	30.4				
эл.пров., мкСм	40.2	47.2				
pH	7.1	7.0				
ОВП (Eh), мВ	121	82				

долине Аккема проходит один из самых популярных туристских маршрутов к уникальным памятникам природы республиканского значения: горе Белухе, Аккемскому озеру, водопаду Текелю и множеству других активно посещаемых рекреационных объектов. Природные комплексы вдоль туристических троп в долине р. Аккем и в окрестностях Аккемского озера испытывают наибольшее антропогенное воздействие [19].

Актуальность экологических исследований в бассейне р. Аккем связана с высокой уязвимостью высокогорных экосистем перед антропогенным и трансграничным загрязнением. При этом для большинства изученных объектов физико-химические, гидрохимические и геохимические исследования проведены впервые. Необходимость контроля экологического состояния уникальных природных объектов возрастает в связи с высокой рекреационно-туристской на-

грузкой, а также с присутствием на их территории месторождений и рудопроявлений тяжелых металлов.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены результаты по количественному определению 54 элементов в воде малых рек, озер, в талых водах ледника и снежников, а также 49 элементов в донных илах бассейна р. Аккем. Концентрации растворенных форм металлов в воде и элементный состав донных осадков определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), относительная погрешность $\leq 10\%$. В 2021 г. анализы водных проб (В-29–21–В-49–21) и донных осадков (В-35–21–В-42–21) выполнены на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (фирма “Finnigan MAT”, Германия) в Центре коллективного пользования

Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск); ниже предела обнаружения в воде – Be, W (<0.05 мкг/л). Исследования в 2017 г. (В-26–17–В-35–17) выполнены на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой “Agilent 7500a” (США) и атомно-абсорбционном спектрофотометре “AA280FS” (США) в ИХТТМ СО РАН (Новосибирск). Отбор проб воды проводился в период с 16 по 22 августа 2021 г. и с 29 июля по 1 августа 2017 г. Пробы отбирались в соответствии с нормативными документами [1, 15, 22] в местах максимального водообмена. Не допускалось взмучивание донных отложений. Пробы отбирали в стерильные одноразовые полипропиленовые пробирки объемом 50 мл (фирмы “Corning”, США). Емкости и крышки предварительно ополаскивали не менее трех раз отбираемой для анализа водой [1, 16].

Для масс-спектрального анализа использовались профильтрованные и законсервированные кислотой пробы. На месте отбора пробы фильтровали через мембранные фильтры и консервировали очищенной азотной кислотой, которая использовалась в дальнейшем при выполнении масс-спектрального анализа этих проб. Для фильтрации применялись одноразовые шприцевые фильтрующие насадки “Minisart NML” (фирма “Sartorius”, Германия) с размером пор 0.45 мкм. Фильтрат подкислялся до pH < 2 из расчета 3–5 мл концентрированной азотной кислоты на 1 л пробы [5, 6, 15].

Пробы снега и фирна объемом 150–200 мл отбирали в стерильные одноразовые полипропиленовые пробирки на глубине ≥ 10 см для минимизации поверхностного загрязнения частицами пород и влияния дождевых осадков. Затем они были растоплены при комнатной температуре, профильтрованы через мембранные фильтры, законсервированы очищенной азотной кислотой и помещены в такие же стерильные одноразовые полипропиленовые пробирки, как и пробы воды. Пробы транспортировали в темных контейнерах, хранили в прохладном месте, анализировали не позже 1 мес. с момента отбора [5, 6, 22]. Донные отложения отбирались в точках отбора водных проб одноразовой полипропиленовой пробиркой с глубины до 10 см, высушива-

лись при комнатной температуре, измельчались в агатовой ступке.

В ходе полевых работ непосредственно в водных объектах и в нефильтрованных пробах талого снега и льда были исследованы физико-химические характеристики – температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, Eh), электропроводность и общая минерализация. Измерения проводились в точках отбора проб с помощью приборов: “PH-200”, “ORP-200” и “COM-100” (“HM Digital”, Южная Корея). Высокая точность полученных данных гарантирована техническими характеристиками приборов [17]. Географические координаты определялись с помощью GPS-навигатора (“Garmin Ltd”, США).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования физико-химических характеристик водных объектов проводились в августе 2021 г. и в июле–августе 2017 г. В 2021 г. температура воздуха была 22–11°C, температура воды 14–1°C. В 2017 г. температура воздуха была 21–11°C, температура воды 19–5°C. Минерализация (и электропроводность) воды в реках и озерах широко варьировали: 256–8.0 мг/л в 2021 г.; 280–3.2 мг/л (417–5.1 мкСм) в 2017 г. pH – 9.3–6.8 в 2021 г., 8.9–7.0 в 2017 г. ОВП – 192–100 мВ в 2021 г., 141–45 мВ в 2017 г. Талые снеговые и ледниковые воды имели следующие физико-химические показатели: минерализация (и электропроводность) – 9.3–4.1 мг/л в 2021 г.; 4.2–2.3 мг/л (9.3–3.5 мкСм) в 2017 г. pH и ОВП в 2021 г. – 8.3–8.2 и 185–95 мВ, в 2017 г. – 8.5–8.4 и 124–116 мВ соответственно. Показатели дождевых осадков в 2021 г. следующие: pH – 8.3, ОВП – 170 (табл. 1).

Долина Аккема – типично альпийского типа, дренируется озерно-речной системой, представленной р. Аккем с притоками и двумя проточными моренно-подпрудными озерами. В районе истока долина реки узкая с крутыми склонами, покрытыми крупновалунными осыпями (курумами). Водный поток размывает мощные ледниковые отложения, большое количество взвеси ледниковых илов делает воду

Таблица 2. Результаты ICP-MS-определения содержания растворенных форм элементов в водных пробах, мкг/л (1 – ПО-21 – пределы обнаружения для анализов, выполненных в 2021 г.; 2, 18 – снег, фирн, водораздельный хребет между долинами рек Аккема и Кучерлы; 3, 19 – снег, фирн, перевал Кара-Тюрек; 4, 20 – перевал Кара-Тюрек, ручей, талые воды снежника; 5, 21 – долина Семи озер, нижнее озеро, исток р. Акоюк; 6 – водопад на р. Акоюк (долина Семи озер); 7 – левый приток р. Акоюк (долина Семи озер); 8, 22 – р. Ярлу, верхнее течение; 9 – р. Ярлу, 350 м выше устья; 10 – оз. Караюк, исток р. Караюк; 11 – оз. Караюк, северный берег; 12 – лед, ледник Аккемский; 13, 24 – р. Аккем, исток из грота ледника Аккемского; 14, 23 – оз. Аккем, исток р. Аккем, метеостанция; 15 – р. Текелю, нижнее течение; 16 – р. Аккем, нижнее течение; 17 – ПО-17 – пределы обнаружения для анализов, выполненных в 2017 г.; 25 – р. Караюк, устье; 26 – оз. Аккем, западный берег; 27 – р. Аккем, среднее течение; 28 – нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения [20]; 29 – ПДК питьевой воды согласно СанПиН 1.2.3685–21 [23]; 30 – СанПиН 2.1.4.1116–02: нормативы качества расфасованных питьевых вод, первая категория [24]; 31 – СанПиН 2.1.4.1116–02: нормативы качества расфасованных питьевых вод, высшая категория [24]; подчеркнуты показатели > ПДК)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
	ПО-21	16.08.2021 В-29–21	16.08.2021 В-30–21	16.08.2021 В-31–21	17.08.2021 В-32–21	17.08.2021 В-33–21	17.08.2021 В-34–21	17.08.2021 В-35–21
Na	5	114	127	23	367	383	812	2787
Mg	3	22	11	26	2819	2761	509	<u>19503</u>
Al	2	10	<u>108</u>	5	8	7	13	<u>84</u>
Si	30	<30	<30	<30	346	358	726	780
P	1	9.3	4.7	6.3	1.4*	1.3*	1.9*	2.3
K	20	284	272	36*	191	215	137	<u>3904</u>
Ca	30	91	124	97	6694	6908	6597	<u>32555</u>
Sc	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.005*
Ti	0.15	0.18*	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
V	0.015	0.03*	0.02*	0.02*	0.07	0.07	0.05	0.08
Cr	0.02	0.06	0.10	0.02*	0.14	0.14	0.08	0.18
Mn	0.07	7.9	0.96	5.6	0.58	0.15	0.29	<u>595</u>
Fe	1	10.4	8.1	3.0	3.2	2.5	10.9	33.1
Co	0.002	0.023	0.014	0.027	0.006	0.006	0.014	1.10
Ni	0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	3.6
Cu	0.08	0.24	0.21	0.16	0.37	0.70	<u>1.58</u>	<u>1.97</u>
Zn	0.1	1.06	<u>35.0</u>	0.77	0.28	0.75	0.89	1.13
Rb	0.02	0.12	0.09	0.03*	0.05	0.07	0.06	2.06
Sr	0.18	0.56	0.26*	0.60	80.7	82.1	25.4	<u>1249</u>
Mo	0.005	0.005*	0.01*	0.01*	0.37	0.36	0.05	<u>7.8</u>
Ag	0.002	0.088	0.165	<0.002	<0.002	0.005	0.002*	0.004*
Cd	0.005	0.008*	<0.005	0.007*	<0.005	<0.005	<0.005	0.037
Sn	0.01	<0.01	0.01*	<0.01	<0.01	0.01*	<0.01	0.29
Sb	0.005	0.01*	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.11
Te	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Ba	0.1	0.57	0.22	0.35	1.7	1.8	1.6	14.6
Pb	0.007	0.287	0.492	0.069	0.010*	0.015	0.015	0.063
Bi	0.001	0.010	0.021	0.001*	0.001*	0.005	0.002	0.004
U	0.001	0.003	0.001*	0.002*	0.234	0.207	0.012	7.38
Сумма	–	551	692	169	10513	10722	8835	61532
Компонент	9	10	11	12	13	14	15	16
	17.08.2021 В-36–21	18.08.2021 В-37–21	18.08.2021 В-38–21	18.08.2021 В-39–21	18.08.2021 В-40–21	18.08.2021 В-41–21	19.08.2021 В-42–21	22.08.2021 В-49–21
Na	1880	238	242	107	169	339	808	785
Mg	<u>7961</u>	557	565	30	261	703	1451	1269
Al	<u>76</u>	<u>41</u>	37	<u>72</u>	<u>129</u>	<u>87</u>	<u>47</u>	<u>93</u>
Si	1111	264	288	45*	273	419	911	1007
P	1.8*	1.5*	1.6*	7.5	4.3	2.4	2.5	3.4
K	1755	713	702	170	975	1223	961	1104
Ca	<u>32992</u>	3115	3150	47*	1160	4071	9489	8171
Sc	0.005*	<0.005	<0.005	<0.005	0.012	0.008*	<0.005	0.008*
Ti	<0.15	<0.15	<0.15	2.10	6.74	3.73	<0.15	3.81
V	0.08	0.05	0.04	0.08	0.32	0.23	0.13	0.24
Cr	0.19	0.06	0.06	0.10	0.32	0.25	0.17	0.31
Mn	<u>49.4</u>	0.45	0.38	3.7	5.8	7.5	1.3	6.0

Fe	4.7	1.4*	2.8	46.6	<u>121</u>	72.1	10.7	71.4
Co	0.130	0.004	0.004	0.042	0.084	0.054	0.010	0.049
Ni	0.5*	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Cu	<u>1.46</u>	0.52	0.49	0.42	0.62	0.60	0.77	<u>1.05</u>
Zn	0.62	0.69	1.24	1.65	2.13	0.93	0.97	1.49
Rb	0.70	0.63	0.64	0.33	0.92	1.10	0.47	0.91
Sr	<u>536</u>	16.8	16.2	0.43	5.6	24.5	89.8	65.2
Mo	<u>4.2</u>	0.15	0.15	0.01	0.21	0.46	<u>1.2</u>	0.72
Ag	<0.002	0.004*	<0.002	0.171	0.002*	<0.002	<0.002	0.005
Cd	0.016	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.008*	0.008*
Sn	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	0.01*	0.02*	0.01*	0.02*
Sb	0.07	0.03	0.03	<0.005	0.02	0.03	0.04	0.04
Te	<0.01	<0.01	<0.01	0.02*	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Ba	12.4	1.9	1.9	0.49	1.1	1.3	2.5	2.5
Pb	0.024	0.011*	0.012*	0.079	0.058	0.036	0.019	0.048
Bi	0.002	0.004	0.001*	0.005	0.005	0.002	0.016	0.002
U	2.69	0.137	0.135	0.033	0.140	0.436	0.367	0.483
Сумма	46388	4950	5008	443	3117	6957	13778	12586
Компонент	17	18	19	20	21	22	23	24
	ПО-17	29.07.2017 В-26-17	29.07.2017 В-27-17	29.07.2017 В-28-17	30.07.2017 В-29-17	30.07.2017 В-30-17	30.07.2017 В-31-17	31.07.2017 В-32-17
Li	0.001	—	—	—	—	4	0.13	0.023
Al	1	<u>68</u>	3.8	—	—	<u>54</u>	<u>41</u>	<u>40</u>
Sc	0.001	0.022	0.033	—	0.056	—	0.065	—
Ti	0.001	1.1	1	0.2	0.55	1.8	5.5	4
V	0.01	0.055	—	0.025	0.032	0.088	0.15	0.14
Mn	0.001	3.5	1.1	6.2	1.2	<u>29</u>	7.5	4.3
Fe	0.1	81	38	29	34	<u>140</u>	87	73
Ga	0.001	—	—	—	0.12	0.77	0.13	—
Ge	0.001	—	—	—	—	0.17	—	—
As	0.001	—	—	—	—	0.63	—	—
Se	0.001	—	<u>4.6</u>	1.5	—	<u>3.6</u>	—	<u>2.4</u>
Rb	0.001	0.61	0.027	0.054	—	1.7	0.92	0.75
Sr	1	0.035	—	1.2	73	12	15	6.5
Y	0.001	0.032	0.076	—	0.031	0.22	—	—
Zr	0.001	—	—	—	—	—	—	0.066
Mo	0.01	—	—	—	—	<u>6.1</u>	—	—
Ru	0.001	—	—	—	—	—	0.053	—
Pd	0.001	—	—	—	—	0.44	—	—
Ag	0.01	—	0.27	—	0.087	0.1	0.54	0.23
Cd	0.005	0.12	—	—	—	—	—	—
Sn	0.005	—	—	—	—	—	0.078	0.12
Sb	0.005	—	—	—	—	—	—	—
Cs	0.001	—	—	—	—	2.8	—	—
Ba	0.1	—	—	—	0.71	12	2.2	—
Ce	0.001	0.83	0.93	0.88	0.91	1.5	0.92	0.76
Pr	0.001	0.1	0.095	0.067	0.094	0.13	0.062	0.076
Nd	0.001	0.51	0.51	0.54	0.41	0.54	0.27	0.25
Sm	0.001	—	—	—	—	0.065	—	—
Eu	0.001	0.03	—	—	0.024	0.037	—	—
Gd	0.001	0.098	—	—	0.059	0.078	0.078	0.059
Dy	0.001	—	—	—	—	0.074	—	—
Ho	0.001	0.01	0.017	—	—	0.01	—	—
Er	0.001	—	—	—	—	0.056	—	—
Yb	0.001	—	—	—	—	—	—	—
Re	0.001	—	—	—	—	—	0.22	0.35
Tl	0.001	—	—	—	—	—	0.093	—
Pb	0.01	2.8	1.6	—	0.071	0.12	—	0.028
Bi	0.0005	1.2	1.2	0.95	2.1	—	0.29	0.41

Th	0.001	—	—	0.017	—	—	0.03	—
U	0.001	0.049	—	—	0.14	7.1	0.34	0.19
Компонент	25 31.07.2017 В-33–17	26 31.07.2017 В-34–17	27 01.08.2017 В-35–17	28	29	30	31	
					ПДК	Первая	Высшая	
Li	—	0.094	—	80	30	30	30	
Na	—	—	—	120 000	200 000	200 000	20 000	
Mg	—	—	—	40 000	50 000	65 000	5000–50 000	
Al	—	31	31	40	200	200	100	
Si	—	—	—	—	25 000	10 000	10 000	
P	—	—	—	50**	3500	—	—	
K	—	—	—	10 000***	12 000****	20 000	2000–20 000	
Ca	—	—	—	180 000	100 000****	130 000	25 000–80 000	
Sc	0.069	0.02	0.085	—	—	—	—	
Ti	0.69	3.4	4.4	60	100	—	—	
V	—	0.065	0.17	1	100	—	—	
Cr	—	—	—	20	50	50	30	
Mn	—	10	5.1	10	100	50	50	
Fe	28	62	61	100	300	300	300	
Co	—	—	—	10	100	100	100	
Ni	—	—	—	10	20	20	20	
Cu	—	—	—	1	1000	1000	1000	
Zn	—	—	—	10	5000	5000	3000	
As	—	1.7	—	50	10	10	6	
Se	—	—	—	2	10	10	10	
Rb	0.56	0.78	0.96	100	—	—	—	
Sr	27	28	50	400	7000	7000	7000	
Zr	—	—	0.036	70	—	—	—	
Mo	—	—	—	1	70	70	70	
Ag	2.6	0.33	0.44	—	50	25	25	
Cd	—	—	—	5	1	1	1	
Sn	0.17	—	—	112	2000	—	—	
Sb	—	0.047	—	—	5	5	5	
Te	—	—	—	3	10	—	—	
Cs	—	—	—	1000	—	—	—	
Ba	—	—	—	740	700	700	100	
Ce	0.81	0.75	1	—	—	—	—	
Pr	0.067	0.084	0.1	—	—	—	—	
Nd	0.3	0.16	0.33	—	—	—	—	
Sm	—	0.054	—	—	—	—	—	
Gd	—	—	0.088	—	—	—	—	
Yb	0.038	—	0.053	—	—	—	—	
Re	0.25	0.13	0.17	—	—	—	—	
Tl	—	0.02	—	—	0.1	—	—	
Pb	—	—	6.9	6	10	10	5	
Bi	0.1	0.078	0.37	—	100	—	—	
Th	0.02	0.023	0.025	—	—	—	—	
U	0.27	0.35	0.4	—	15	—	—	

* Концентрации элементов близки к пределу обнаружения, погрешность до 100% (данные по содержанию этих элементов следует считать оценочными).

** Фосфат-ион (олиготрофные водоемы).

*** Для водоемов с минерализацией до 100 мг/л.

**** Согласно Директиве 80/778/ЕС, 1980 [7] и Директиве 98/83/ЕС, 1998 [8].

мутной и придает ей белый цвет (от алтайского Ак-кем – “белая вода”). Река впадает в Верхнее Аккемское озеро и вытекает из него, а ниже по течению – из Аккемского озера, расположенных на разных уровнях глубокой троговой долины, разработанной четвертичным ледником (Аккемским). Конечная морена, которая запруживала Верхнее Аккемское озеро, значительно размывта, поэтому оно наполняется водой только в период половодья, в остальное время его котловину прорезают многочисленные протоки и рукава р. Аккем. Южная оконечность Аккемского озера заболочена, ее граница непостоянна, а котловина заполнена ледниковым илом с сетью рукавов р. Аккем. С севера озеро ограничено конечной мореной, берега заболочены. В средней части озеро достигает максимальной глубины 15 м, берега представлены крутыми склонами гор [9, 19].

В воде р. Аккем от истока к нижнему течению минерализация возрастает в 5 раз (от 8 до 42 мг/л), суммарное содержание растворенных форм элементов, в том числе Na, Mg, Si, Ca, Cu, Sr, Mo, Ag, Sb, Ba, U, – в 4 раза (от 3.1 до 12.6 мг/л). Содержание Al, Ti, Fe, Co, Zn, Bi, напротив, в истоке реки выше, чем на нижних участках. Содержания Al, Ti, V, Cr, Fe в истоке Аккема из грота ледника – максимальные из всех исследованных объектов (табл. 1, 2).

Крупные притоки Аккема реки Акоюк (левый) и Караюк (правый) имеют всякие троговые долины по бортам долины р. Аккем вблизи ее истока из Аккемского ледника. Верхняя часть долины р. Караюк сложена скальными выходами и курумами, сменяющимися мохово-лишайниковыми, ерниковыми тундрами и низкотравными альпийскими лугами на маломощных каменистых почвах. Долина р. Акоюк более обширная и заболоченная, с повышенным водообменом за счет талых вод снежников г. Акоюк, промывающих более мощный почвенно-грунтовый слой. Вероятно, поэтому минерализация и суммарное содержание элементов в воде р. Акоюк в 2.0–2.5 раза выше, чем в р. Караюк. Истоки р. Акоюк и многочисленные ручьи формируются вблизи снеговой линии в зоне каменистых тундр и связывают разноуровневую систему небольших ледниковых озер, ниже по течению дренируют

высокогорные морены и почвы в зоне альпийских и субальпийских лугов. В воде р. Акоюк содержания Mg, Ca, Cr, Sr, Mo в 2–5 раз выше, чем в р. Караюк. Напротив, в р. Караюк выше, чем в р. Акоюк, содержание Rb – в 12 раз; Al, K – в 4–5 раз. Левый приток р. Акоюк собирает воду с заболоченного высокогорного плато вдали от основного русла р. Акоюк, и элементный состав этой воды несколько отличается от преобладающего состава поверхностных вод долины. В воде притока по сравнению с водой р. Акоюк содержание Na, Si, Fe, Co, Cu в 2–4 раза выше; Mg, Sr, Mo, Bi – в 3–7 раз ниже, а U – в 18 раз ниже (табл. 1, 2).

Минимальная среди изученных водных объектов минерализация (3.2 мг/л) зафиксирована в ручье, стекающем со снежника на перевале Кара-Тюрек и в истоке р. Аккем из грота Аккемского ледника (8.0 мг/л), а максимальная (256–280 мг/л) – в верхнем течении р. Ярлу. Даже в нижнем течении после впадения множества ручьев минерализация воды в реке остается высокой – 174 мг/л. Русло реки размывает тонкодисперсные песчано-глинистые отложения, которые в большом количестве переходят во взвесь, в результате чего вода в реке мутная и имеет насыщенный зеленовато-белый цвет. Часть компонентов этих взвесей переходит в раствор, повышая содержание в нем как макро-, так и микроэлементов. Таким образом, р. Ярлу выделяется среди других водных объектов бассейна р. Аккем максимальной концентрацией в воде растворенных форм элементов – 62 мг/л, что значительно выше, чем в истоке р. Аккем в районе метеостанции – 7.0 мг/л. Из всех изученных объектов в воде Ярлу отмечены наибольшие содержания Na, Mg, Si, K, Ca, Mn, Co, Ni, Cu, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, U.

Реки Ярлу и Текелю протекают по смежным долинам, представленным среднегорьем с альпийскими лугами, вниз по течению сменяющимися кедрово-лиственничным лесом. Однако воды этих рек значительно различаются по составу. Проба воды была взята на правом берегу р. Текелю у подножья 600-метрового обрыва Скинчак в 1 км от водопада Текелю ниже по течению. Минерализация воды р. Текелю (48 мг/л) и суммарное содержание элементов (14 мг/л) –

в 5 раз ниже, чем в Ярлу. В воде р. Текелю содержание Mn в 455 раз; Co – в 110; Mg, Sr, U – в 13–20; Ni, Mo, Ba – в 6–9; Na, K, Ca, Fe, Cu, Rb, Sb, Pb – в 3–4 раза меньше, чем в Ярлу. И только содержание Bi в р. Текелю в 4 раза выше, чем в р. Ярлу, – максимальное среди исследованных рек и озер. По сравнению с р. Аккем в районе метеостанции в р. Текелю минерализация и суммарное содержание растворенных форм элементов в 2 раза выше за счет более высокого содержания макроэлементов (Na, Mg, Si, Ca). Содержание Bi в Текелю – в 8, Sr, Mo – в 3–4 раза выше, чем в Аккеме. При этом содержание Mn, Fe, Co в Аккеме в 5–7 раз выше, чем в Текелю (табл. 1, 2).

В гляциально-нивальном ландшафтно-климатическом поясе были взяты пробы льда Аккемского ледника, снега и фирна снежников на перевале Кара-Тюрек и на водораздельном хребте рек Аккем и Кучерлы на высотах 2320–3090 м н.у.м. Суммарное содержание растворенных форм элементов в леднике и снежниках (0.7–0.4 мг/л) в среднем в 27 раз ниже, чем в реках. Однако количество некоторых элементов в талых водах выше, чем в реках и озерах. Например, максимальное в исследованных пробах содержание P (9.3 мкг/л) – в пробах снега и фирна на водораздельном хребте между долинами рек Аккем и Кучерлы, максимальное содержание Ag (0.17 мкг/л) – в Аккемском леднике и в снежнике на перевале Кара-Тюрек, максимальное содержание Zn (35 мкг/л), Pb (0.49 мкг/л) и Bi (0.021 мкг/л) – в пробах снега и фирна на перевале Кара-Тюрек.

Проба массивного льда (В-39–21) была взята из внутренней зоны Аккемского ледника, вскрывшейся в результате обрушения крупных глыб ледникового грота, дающего начало р. Аккем. Минерализация талых ледниковых вод – 9.3 мг/л, воды в истоке Аккема из грота ледника – 8.0 мг/л. Суммарное содержание растворенных форм элементов в истоке Аккема – 3.1 мг/л, что в 7 раз выше, чем в ледниковых водах – 0.4 мг/л. Минерализация талых вод снежника на перевале Кара-Тюрек – 2.3–4.9 мг/л, воды в ручье, стекающем с этого снежника, – 3.2 мг/л. В снежнике общее содержание элементов (0.7 мг/л) в 4 раза выше, чем в ручье (0.17 мг/л).

Большинство химических элементов мигрирует в ионных, молекулярных или коллоидных растворах в сочетании с суспензиями. Характерна также миграция тонкой мути и более крупных взвешенных частиц. Кроме ионной формы растворенные неорганические соединения находятся в форме молекул и коллоидных частиц [27]. Поэтому минерализация нефитрованных вод будет выше суммарного содержания в них элементов в растворенной форме. В данном случае эта разница гораздо больше для ледника и ручья, стекающего со снежника. Это значит, что большая часть элементов в ледниковых водах и ручье находится не в ионной форме, а в виде молекулярных или коллоидных растворов.

Во льду выше, чем в воде истока Аккема, содержание Ag, а в Аккеме выше содержание большинства элементов: Ca (в 25 раз); Mo (в 16); Sr (в 13); Mg (в 9); Si, K, Ti, V, Cr, Fe, Rb, Sb, U (в 3–6 раз). В снежнике на перевале Кара-Тюрек выше, чем в стекающем с него ручье, содержание: Ag (в >80 раз); Zn (в 46); Al, Bi (в 21); Na, K, Cr, Fe, Rb, Pb (в 3–8 раз). В ручье содержание Mg, Mn, Sr в 2–6 раз выше, чем в снежнике (табл. 1, 2).

В табл. 3 и на рис. 2 представлены результаты ICP-MS-определения элементного состава донных илов рек Аккем, Ярлу, Текелю в сравнении с составом эталонного образца байкальского ила (BIL-1) и континентальной коры. Нормированные по примитивной мантии PM [29] тренды распределения редких и редкоземельных элементов в донных илах имеют сходные с трендами BIL-1 и континентальной коры уровни содержания и геохимические характеристики. Для них характерны обогащение легкими лантаноидами $((La/Yb)_{PM} - 9.6-6.2)$ и крупноионными литофильными элементами LILE $((Rb/Sr)_{PM} - 8.3-4.3)$, слабо фракционированный тренд распределения средних и тяжелых лантаноидов $((Sm/Yb)_{PM} - 2.6-2.1, (Gd/Yb)_{PM} - 2.0-1.3)$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состав поверхностных вод обусловлен ландшафтно-геоморфологическими, климатическими, литолого-геохимическими особенностями

водосборных территорий, составом и свойствами почв и почвообразующих пород [21]. В условиях резко континентального климата с длительным морозным периодом, значительной долей снежно-ледникового питания горных рек, промывающих маломощный почвенно-грунтовый слой на скальном фундаменте, формируются низкоминерализованные кальциевые поверхностные воды, характерные для горных регионов: в долине р. Аккем ультрапресные (<48 мг/л), в верховье р. Ярлу – пресные (<256 мг/л). рН рек и озер соответствует нейтральной и слабощелочной среде до щелочной, талые воды ледника и снежников и дождевые воды – слабощелочные. ОВП изученных объектов соответствует окислительной

(195–100 мВ) и переходной (45–95 мВ) геохимической обстановке.

Исходный химический состав поверхностных вод определяется составом атмосферных осадков, талых снеговых и ледниковых вод с последующим обогащением в результате поверхностного и подземного стока, фильтрации осадков через почвенный покров, поступления в них трещинных вод из пород геологического основания [13]. Металлогенические особенности состава коренных пород на водосборной площади влияют на элементный состав донных илов русел рек, но в меньшей степени, чем на состав поверхностных вод.

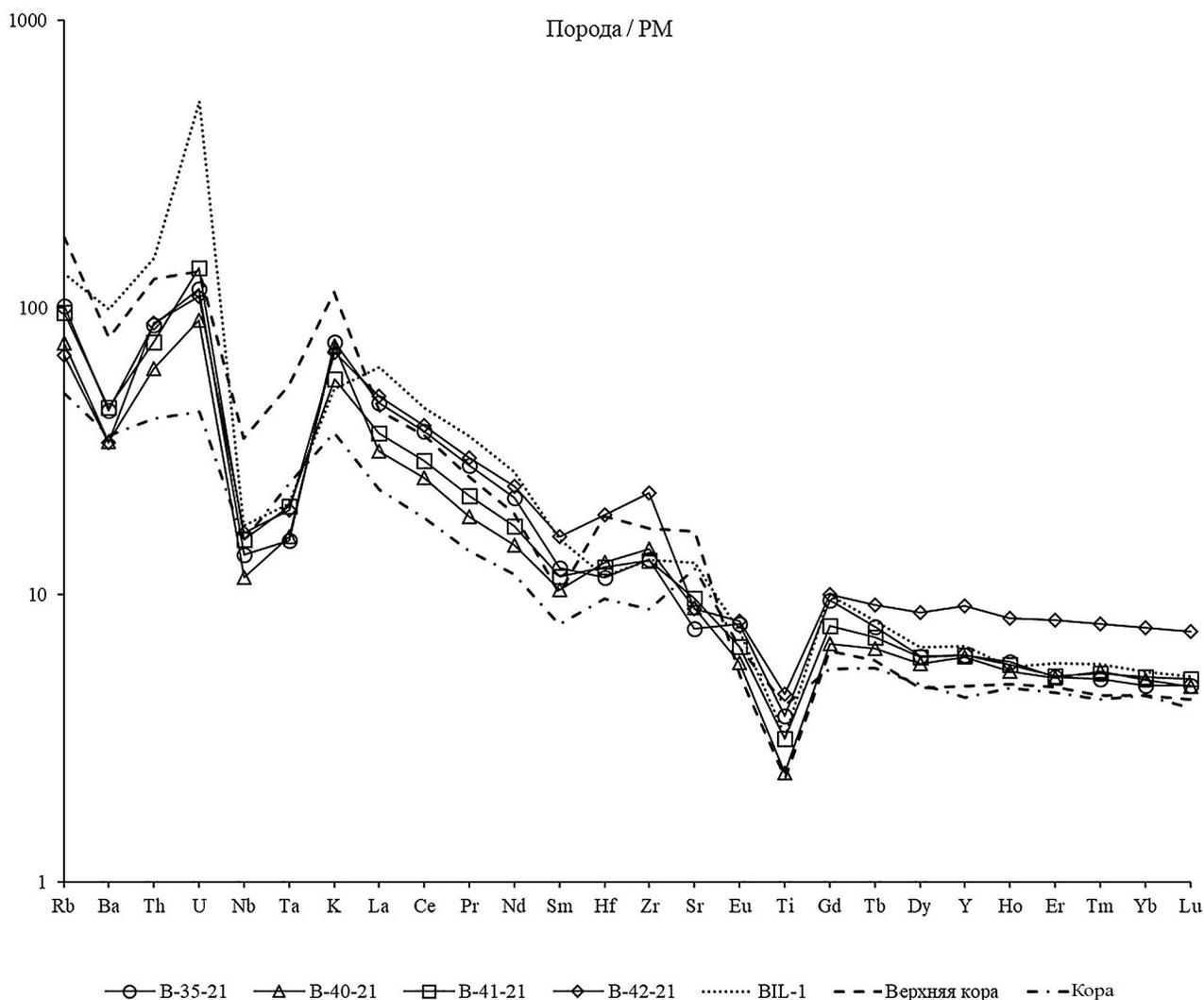


Рис. 2. Распределение редких и редкоземельных элементов в донных илах. В построении диаграммы использованы данные, нормированные по примитивной мантии [29]. В-35–21 – р. Ярлу, верхнее течение; В-40–21 – р. Аккем, исток из грота ледника Аккемского; В-41–21 – оз. Аккем, исток р. Аккем, метеостанция; В-42–21 – р. Текелю, нижнее течение; ВIL-1 – байкальский ил (эталонный образец); верхняя кора – верхняя континентальная кора [25]; кора – континентальная кора в целом [25].

Таблица 3. Результаты ICP-MS-определения элементного состава донных илов, г/т (ppm) (1 – пределы обнаружения; 2 – байкальский ил (эталонный образец); 3 – р. Ярлу, верхнее течение; 4 – р. Аккем, исток из грота ледника Аккемского; 5 – оз. Аккем, исток р. Аккем, метеостанция; 6 – р. Текелю, нижнее течение; 7 – состав верхней континентальной коры [25]; 8 – состав континентальной коры в целом [25])

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
	ПО	BIL-1	B-35–21	B-40–21	B-41–21	B-42–21	верхняя кора	кора
Be	1	2.0	1.96*	<1	1.2*	<1	–	–
Na	200	16246	16737	20220	22958	18060	28933	22998
Mg	50	12947	20897	10614	14100	16195	13266	31958
Al	30	75582	78914	64895	77171	66872	80428	84132
Si	400	303014	349981	370561	342685	372027	308527	267858
P	4	1584	1220	702	928	1379	–	–
K	80	18859	18253	14067	17422	12953	28225	9132
Ca	100	14260	7359	15168	14857	9300	30017	52887
Sc	0.1	13.8	15.1	11.0	14.4	14.5	–	–
Ti	10	4191	4947	3117	4110	5854	2996	5393
V	0.3	114	112	78	86	102	60	230
Cr	3	72	107	90	89	146	35	185
Mn	2	3003	848	697	858	1596	–	–
Fe	20	52896	49131	34251	33326	51622	34979	70736
Co	0.1	16.7	21.5	9.6	13.5	16.6	10.0	29.0
Ni	3	59	81	94	73	60	20	105
Cu	5	50	38	184	93	38	–	–
Zn	5	102	89	49	58	80	–	–
Ga	1	18	16	12	14	13	–	–
As	3	18	10	<3	<3	11	–	–
Rb	0.5	84	64	48	61	43	112	32
Sr	3	273	161	190	206	189	350	260
Y	0.1	30.1	28.0	27.6	28.0	41.7	22.0	20.0
Zr	0.1	148	149	162	148	254	190	100
Nb	0.09	12.4	9.8	8.2	11.1	11.7	25.0	11.0
Mo	0.5	3.2	2.8	0.9*	1.0*	1.5	–	–
Cs	0.1	6.3	4.8	3.8	4.8	3.3	–	–
Ba	3	691	307	238	315	236	550	250
La	0.06	42.6	32.0	21.8	25.1	33.9	30.0	16.0
Ce	0.06	79.6	66.0	45.4	52.3	68.9	64.0	33.0
Pr	0.03	9.8	7.8	5.2	6.1	8.3	7.1	3.9
Nd	0.03	36.3	29.4	20.0	23.5	32.1	26.0	16.0
Sm	0.01	7.0	5.5	4.6	5.1	7.1	4.5	3.5
Eu	0.005	1.2	1.3	1.0	1.1	1.4	0.9	1.1
Gd	0.02	5.9	5.7	4.0	4.7	6.0	3.8	3.3
Tb	0.005	0.9	0.8	0.7	0.8	1.0	0.6	0.6
Dy	0.01	4.9	4.5	4.3	4.5	6.4	3.5	3.6
Ho	0.005	0.9	1.0	0.9	0.9	1.4	0.8	0.8
Er	0.02	2.8	2.5	2.5	2.5	3.9	2.3	2.2

Таблица 3. Окончание

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
	ПО	ВІІ-1	В-35–21	В-40–21	В-41–21	В-42–21	верхняя кора	кора
Tm	0.005	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.3	0.3
Yb	0.02	2.7	2.4	2.5	2.5	3.8	2.2	2.2
Lu	0.005	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.3	0.3
Hf	0.05	3.6	3.6	4.0	3.9	5.9	5.8	3.0
Ta	0.05	0.9	0.6	0.7	0.8	0.8	2.2	1.0
W	0.1	3.6	3.2	1.2	1.6	2.3	–	–
Ti	0.05	0.2	0.1	0.098*	0.1	0.1	–	–
Pb	1	20.3	12.5	14.2	16.7	13.8	20.0	8.0
Th	0.03	12.6	7.4	5.2	6.5	7.5	10.7	3.5
U	0.02	10.9	2.4	1.9	2.9	2.3	2.8	0.9

* Концентрации элементов близки к пределу обнаружения, погрешность до 100% (данные по содержанию этих элементов следует считать оценочными).

С наличием Мо-оруденения в долине р. Ярлу могут быть связаны в 2–3 раза большие содержания Мо и сопутствующих металлов (Co, Zn, As, W) в донных илах р. Ярлу по сравнению с илами р. Аккем. Однако содержания этих элементов в илах р. Ярлу близки к их содержанию в эталонном образце ВІІ-1. О присутствии Си-минерализации у истоков р. Аккем свидетельствует содержание Си в илах Аккема в 5 раз большее, чем в Ярлу и Текелю, и в 4 раза большее, чем в ВІІ-1. В донных илах р. Текелю отмечены повышенные содержания Ti, Cr, Y, Zr, Hf и тяжелых лантаноидов (Dy–Lu) по сравнению с илами р. Аккем и ВІІ-1. Обрыв Скинчак в долине р. Текелю представляет собой выход верхнедевонских гранитоидов, прорывающих нижнеордовикские осадочные породы текелинской свиты [3]. Проба донного ила взята в том месте, где русло реки размывает зону роговиков на контакте гранитоидного массива со вмещающими породами. В составе роговиков присутствует гранат – концентратор тяжелых лантаноидов [14], с чем, вероятно, связано более высокое по сравнению с другими пробами содержание тяжелых лантаноидов в пробе донного ила р. Текелю (В-42–21).

Особенность распределения элементов в изученных донных илах – выраженные минимумы по Nb, Ta и Ti. Такие геохимические характеристики могли быть унаследованы от разрушенных в результате выветривания коренных пород, в частности – среднедевонских гранитоидов,

представленных в долине Аккема крупными массивами в верхнем и среднем течении реки. Эти породы относятся к типу а-гранитоидов, сформировавшихся в геодинамической обстановке активной континентальной окраины, характеризующейся интенсивным островодужным вулканизмом [26]. Островодужные гранитоиды обогащены LILE и обнаруживают отрицательные аномалии Nb–Ta и Ti [28], что впоследствии может проследиваться в донных осадках, образованных при участии таких пород (табл. 3; рис. 2).

На микроэлементный состав природных вод оказывают влияние подстилающие горные породы и почвы, а также донные осадки и взвеси рек и озер. По сравнению с водотоками на смежных территориях в реках с водосборами, включающими месторождения и рудопроявления, в результате последовательного выщелачивания многократно возрастает концентрация соответствующих рудных компонентов. Так, в воде р. Ярлу по сравнению с р. Аккем в районе метеостанции наблюдаются более высокие содержания: Mn (в 80 раз); Sr (в 50); Co (в 20); Mo, U (в 17); Sn (в 15); Ni, Cd, Sb (в 4–9 раз). В воде р. Аккем по сравнению с р. Ярлу выше содержания: Ti (в > 45 раз), V (в 3–4), Fe (в 2–4 раза), причем наибольшие концентрации наблюдаются в истоке р. Аккем из грота ледника Аккемского. В р. Текелю содержание Mo в 2–6, а Bi – в 3–8 раз выше, чем в р. Аккем. В верхнем течении малых горных рек

время контакта с подстилающим субстратом минимально, а климатические условия не способствуют переходу элементов в водный раствор. Тем не менее содержания рудных компонентов в воде р. Ярлу на участке с рудовмещающими коренными породами возрастают в большей степени, чем концентрация тех же элементов (Mo, Co) в донных илах (табл. 2, 3).

В долине Ярлу подстилающие породы – тонкозернистые рыхлые осадочные отложения, вмещающие месторождение Mo и насыщенные сопутствующими ему элементами. Питающие истоки реки ультрапресные снеговые воды с высокой растворяющей способностью промывают рыхлые отложения в зоне окисления рудного месторождения, выщелачивают рудные и нерудные компоненты, в том числе карбонаты Ca и Mg, из вмещающих осадочных пород, а также захватывают их в виде тонкой мути и взвесей, которые в процессе миграции продолжают участвовать в выщелачивании. Этим объясняется высокая минерализация вод Ярлу и наибольшие среди всех изученных объектов содержания Na, Mg, Si, K, Ca, Mn, Co, Ni, Cu, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, U.

Долины рек Аккем и Кучерлы [2] разделены горным хребтом, но удалены друг от друга на < 10 км. Сходство ландшафтно-климатической обстановки, состава подстилающих пород и почв водосборов этих рек определяет сходство состава их вод. Общая минерализация и содержание растворенных элементов в нижнем течении Аккема в 1.6–2.0 раза выше, чем в среднем течении Кучерлы, за счет более высокого содержания Mg, Al, K, а в истоке Аккема (в районе метеостанции) и истоке Кучерлы (из оз. Кучерлинского) эти показатели практически равны. На всем протяжении рек наблюдаются лишь небольшие вариации содержания большинства микроэлементов. Содержание Mn, Sr, U в водах Аккема в 2–3 раза выше, чем в водах Кучерлы, при этом содержания Zn и Sb в воде Кучерлы могут в >10 раз превышать их содержания в Аккеме. Содержание W в воде Кучерлинского озера и в верхнем течении Кучерлы (0.08 мкг/л) [2] – максимальное из исследованных проб, что может быть связано с наличием в верховьях реки площадных шлиховых ореолов рассеяния шеелита [12].

По сравнению с Аккемским ледником в снежниках на водораздельном хребте между долинами рек Аккем и Кучерлы и на перевале Кара-Тюрек содержание Zn в среднем в 11, Pb – в 5, Bi – в 3 раза выше, вероятно, за счет трансграничного атмосферного загрязнения. Проба льда внутренней части ледника, в отличие от снежников, не подвержена современным атмосферным загрязнениям. Поэтому, вероятно, ее состав отражает состав осадков в период, предшествующий антропогенному влиянию на экологическое состояние территории. В то же время во льду обнаружено высокое содержание рудных элементов: U – в 17; Ti – в 13; V, Fe, Co, Rb – в 2–5 раз выше, чем в снежниках. Такое возможно за счет аккумуляции в леднике рудных компонентов, поступающих при выветривании подстилающих рудовмещающих пород.

В леднике Иолдо-Айры в долине р. Кучерлы [2] общее содержание элементов (35.1 мг/л) в ~80 раз выше, чем в Аккемском леднике, за счет в основном более высокого содержания Na, Mg, P, K, Ca. Этому способствует более мягкий климат в долине р. Кучерлы, значит, происходит более интенсивная трансформация снега и фирна в процессе испарения, таяния и повторного замерзания, что увеличивает его минерализацию. Содержание ряда микроэлементов в леднике Иолдо-Айры также значительно выше, чем в Аккемском леднике: Co, Pb, Cu, Cr, Rb – в 6–8; Ba, Sr, Mn, Mo, Cd, Co – в 13–33; Zn и Sb – в >40 раз. Возможно, содержание некоторых тяжелых металлов в Аккемском леднике меньше вследствие того, что горный массив г. Белухи препятствует их трансграничному переносу в верхнюю часть долины р. Аккем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ландшафтно-геоморфологические, климатические и литолого-геохимические особенности бассейна р. Аккем способствуют формированию характерных для горных регионов низкоминерализованных кальциевых поверхностных вод, ультрапресных до пресных, нейтральных до щелочных в окислительной и переходной геохимической обстановке.

Донные илы русел рек наследуют геохимические особенности разрушенных в результате

выветривания коренных пород и воспроизводят тип геодинамической обстановки, в которой они сформировались. Донные осадки исследованных рек бассейна р. Аккем имеют сходные геохимические характеристики, такие как обогащение легкими лантаноидами и LILE, слабо фракционированный тренд распределения средних и тяжелых лантаноидов, выраженная деплетированность Ta, Nb и Ti. Субдукционная компонента (обедненность Nb–Ta относительно LILE) в илах выражена в большей степени, чем в среднем в континентальной коре, что, вероятно, обусловлено участием в их формировании субдукционно-связанных гранитоидов.

Химический состав природных вод и донных илов отражает особенности состава и металлогенической специализации коренных пород водосбора. В случае наличия в подстилающих породах рудных месторождений и рудопроявлений содержание металлов в воде даже у истоков малых горных рек возрастает в большей степени, чем содержание тех же элементов в илах, что подтверждает эффективность гидрохимических методов поиска рудных месторождений.

Состав льда глубоких горизонтов Аккемского ледника отличается от состава современных снежников более низким содержанием Zn, Pb, Bi, что свидетельствует об увеличении со временем содержания токсичных металлов в атмосферных осадках района исследований. Содержание рудных компонентов Ti, V, Fe, Co, Rb, U, напротив, в леднике выше, чем в снежниках, вероятно, за счет их поступления из подстилающих рудовмещающих пород.

В леднике и снежниках, в отличие от речных вод, происходит накопление P, Zn, Ag, Pb, Bi. В реках и озерах содержание большинства элементов значительно выше, чем в леднике и снежниках, в результате выщелачивания из подстилающих пород и почв Na, Mg, Si, K, Ca, Mn, Co, Cu, Rb, Sr, Mo, Sb, Ba, U.

Сходство ландшафтно-климатической обстановки, состава подстилающих пород и почв территорий водосборов рек Аккем и Кучерлы определяет сходство состава их вод. Мощный массив г. Белухи защищает верховья р. Аккем и Аккем-

ский ледник от трансграничного загрязнения тяжелыми металлами, в отличие от ледника Иолдо-Айры в бассейне р. Кучерлы.

Несмотря на наличие природных источников тяжелых металлов в верхнем течении р. Аккем и ее притоках, концентрации токсичных веществ в большинстве исследованных объектов \leq ПДК в питьевой воде. Установленные нормативы превышены в р. Аккем – по Al (1.3 ПДК [24], Pb (1.4 ПДК [24]) и в пробах снега и фирна перевала Кара-Тюрек – по Al (1.1 ПДК [24]).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность А. А. Князеву, Е. Н. Прямоносной, Ю. Н. Шихову (ИГМ СО РАН) за помощь в проведении экспедиционных работ, С. В. Палесскому, И. В. Николаевой (ИГМ СО РАН) за помощь в аналитических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисова Е.А. Анализ воды: методическое пособие. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2013. 30 с.
2. Бородин Е.В., Бородин У.О. Особенности состава поверхностных вод бассейна р. Кучерлы (Горный Алтай) // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 368–379.
3. Геологическая карта М-45-XXI. Геологическая карта СССР. Серия Горно-Алтайская. Масштаб: 1:200000 / Под ред. И.Ф. Пожарского. М.: Аэрогеол. трест, 1958.
4. Геологическая карта Российской Федерации: М-45-XV. Карта дочетвертичных образований. Сер. Горно-Алтайская. Масштаб 1:200000 / Под ред. В.И. Зиновьева. Елань: Запсибгеолсъемка, 2001.
5. ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартиформ, 2013. 36 с.
6. ГОСТ 31870–2012. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартиформ, 2013. 18 с.
7. Директива 80/778/ЕЕС от 15.07.1980 о качестве питьевой воды, предназначенной для употребления человеком // Журн. Европейского сообщества. 1980. L229. С. 11–29.
8. Директива 98/83/ЕС от 03.11.1998 о качестве воды, предназначенной для употребления человеком //

- Журн. Европейского сообщества. Официал. бюл. 1998. OJ L 330. 23 с.
9. Кадастр особо охраняемых природных территорий Республики Алтай / Под ред. *А.М. Маринина*. Барнаул: Азбука, 2014. 456 с.
 10. Карта полезных ископаемых. Геологическая карта Российской Федерации М-45-ХV. Сер. Алтайская. Масштаб 1:200000 / Под ред. *В.И. Зиновьева*. Елань: Запсибгеолсъемка, 2001.
 11. Карта полезных ископаемых Республики Алтай. Масштаб 1:1000 000. СПб.: Горно-Алтайская ПСЭ, ВСЕГЕИ, 2006.
 12. Карта полезных ископаемых СССР: М-45-ХV. Серия Алтайская. Масштаб 1:200000 / Под ред. *М.К. Винкмана*. Новокузнецк: Западно-Сибирское геологическое управление, 1959.
 13. *Литвиненко Ю.С., Захарихина Л.В.* Гидрогеохимическое районирование речной сети Камчатки // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 182–195.
 14. *Михайлов В.А.* Редкоземельные руды мира: Геология, ресурсы, экономика. К.: Киевский ун-т, 2010. 223 с.
 15. МУ 1.2. 2743–10 Порядок отбора проб для выявления и идентификации наноматериалов в водных объектах. Методические указания // Экол. ведомости. 2010. № 11.
 16. МУ 4.1. 1469–03. Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в питьевой, природных и сточных водах. Сб. методических указаний. М.: ФЦ госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 59 с.
 17. Набор профессиональных приборов для измерения рН, ОВП, TDS жидких сред // ЭкоЮнит. Измерительное оборудование. https://www.ecounit.ru/goods_2812.html (дата обращения: 11.06.2022)
 18. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под ред. *С.А. Шобы*. М.: Астрель, 2011. 632 с.
 19. Особо охраняемые природные территории Республики Алтай. Современное состояние и перспективы развития / Под ред. *Ю.В. Робертуса*. Красноярск: WWF России, Регион. ин-т экологии, ГПБЗ “Катунский”, 2012. 118 с.
 20. Приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 г. № 552. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 10 марта 2020 года). М.: Минсельхоз РФ, 2020. 113 с.
 21. *Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачёв И.В.* Содержание и распределение основных макро- и микроэлементов в поверхностных водах Алтая // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 298–310.
 22. Р 52.24.353–2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Рекомендации. Ростов-на-Дону: ГУ ГХИ, Росгидромет, 2012. 35 с.
 23. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М.: Минздрав России, 2021. 469 с.
 24. СанПиН 2.1.4.1116–02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества. М.: Минздрав России, 2002. 40 с.
 25. *Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 380 с.
 26. Тектоническая схема 1:500000. Карта полезных ископаемых. Геологическая карта Российской Федерации: М-45-ХV. Второе изд. Сер. Алтайская. Масштаб 1:200000 / Под ред. *В.И. Зиновьева*. Елань: Запсибгеолсъемка, 2001.
 27. Экологическая геохимия: словарь-справочник / Под ред. *Т.А. Трифоновой, Л.А. Ширкина*. Владимир: ВлГУ, 2005. 140 с.
 28. *Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D.* A Geochemical Classification for Granitic Rocks // *J. Petrol.* 2001. V. 42. № 11. P. 2033–2048.
 29. *Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* / Eds *A.D. Saunders, M.J. Norry*. London: Geol. Soc. London Special Publ., 1989. V. 42. P. 313–345.