

УДК 556.06:551.482.212

ТРАНСФОРМАЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОТ ИСТОКОВ К УСТЬЯМ РЕК

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Домаренко Виктор Алексеевич¹,
viktor_domarenko@mail.ru

Перегудина Елена Владимировна¹,
pere-elena@mail.ru

Лепокурова Олеся Евгеньевна^{2,1},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность. Эффективность поисков полезных ископаемых определяется глубиной понимания процессов аккумуляции и рассеяния вещества. Исследование этих процессов предполагает анализ минерального и химического состава коренных пород, продуктов их переработки в зоне гипергенеза и их переотложения водными потоками.

Цель работы: выявление закономерностей изменения минерального и химического состава донных отложений по длине рек.

Методы исследования: методы определения минерального и химического состава донных отложений, ландшафтно-геохимический и статистические методы, термодинамические расчеты, математическое моделирование.

Результаты и выводы. Проведено обобщение данных о минеральном составе донных отложений водотоков в бассейнах рек Обь (Российская Федерация: реки Томь, Актру, Правая Сарала, Киргизка, Омутная) и Хонг (Вьетнам: реки Бан Тхи, Ченгу, Дай, Намду, Фодай), полученных в 2000–2017 гг. Показано, что 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. Установлено, что участки с характерным минеральным составом донных отложений расположены ниже по течению от участков с условно однородным (или слабо меняющимся в многолетнем разрезе) химическим составом речных вод (смещение границ до 100 км). Сделан вывод о роли состава коренных пород и характера гипергенных геохимических процессов в формировании минерального состава донных отложений, определяющих условия разрушения частиц и аккумуляции продуктов взаимодействия в системе «вода–порода», устойчивых к химическому и физическому выветриванию.

Ключевые слова:

Донные отложения, минеральный и химический состав,
трансформация минерального состава, бассейн реки Обь, бассейн реки Хонг.

Введение

Реки представляют собой постоянно действующие каналы перемещения значительной части вещества и энергии в пределах бассейнов стока. Соответственно, возникает закономерный вопрос – возможно ли использовать характеристики состояния рек для оценки геохимических особенностей водосбора? Положительный ответ на этот вопрос в части изучения химического состава речных вод представляет собой методологическую основу экологического мониторинга и нормирования воздействий на поверхностные водные объекты. Позитивный опыт получен и при проведении гидрогеохимических поисков полезных ископаемых с использованием данных о химическом составе вод малых водотоков в меженный период, когда в речном стоке преобладает подземная составляющая. Кроме того, определенное внимание уделяется и изучению химического состава донных отло-

жений – нижней границы поверхностных водных объектов, одновременно являющихся верхней границей геологической среды, причем как в целях поисков полезных ископаемых, так и при решении геоэкологических задач [1, 2]. Все это нашло отражение в огромном количестве публикаций и серии методических и нормативно-методических документов в Российской Федерации и других странах [1–5].

Минеральный состав донных отложений рек рассматривается обычно в рамках поисков твердых полезных ископаемых в комплексе с другими методами [1, 2], в ряде случаев – при проведении геоэкологических исследований. Однако такой важный аспект изучения минерального состава донных отложений, как трансформация его по всей протяженности водотока, исследован с нашей точки зрения недостаточно полно, что и определило цель исследования.

Объекты и методика исследования

Объектами исследования выбраны реки горных районов и прилегающих к ним территорий в Северной и Юго-Восточной Азии, отличающиеся геотектоническими обстановками (табл. 1). Водосборы этих рек сложены различными по составу и возрасту горными породами, что предопределило формирование в их пределах разнообразных полезных ископаемых, в том числе:

1) в Северной Азии:

1.1) в водосборе реки Правая Сарала в восточной части Кузнецкого Алатау (элемент речной сети «Правая Сарала – Сарала – Черный Июс – Чулым – Обь – Карское море» разрабатываются россыпные месторождения золота [6–8]); в геологическом строении этой территории принимают участие отложения венда-кембрия и девона, представленные метаморфогенно-осадочными и вулканогенными образованиями и интрузивными массивами гранитоидов кембро-ордовика и щелочными интрузивами девона;

1.2) в водосборе реки Томь (речная сеть «Томь – Обь – Карское море») и ее некоторых притоков в верхнем течении (река Бискамжа – элемент речной сети «Бискамжа – Тузухсу – Томь – Обь – Карское море») расположен ряд крупных разрабатываемых месторождений угля, черных, цветных и благородных металлов; водосбор Томи охватывает части горно-складчатых сооружений Кузнецкого Алатау, Горной Шории, Колывань-Томской складчатой зоны и Кузнецкой котловины и характеризуется значительным разнообразием геологических условий;

1.3) в водосборах реки Киргизка (элементе речной сети «Киргизка – Томь – Обь – Карское море») и ее притока – реки Омутной (Мутная), расположенных в нижнем течении Томи, в северной части Колывань-Томской складчатой зоны, находится Туганское циркон-ильменитовое месторождение и ряд проявлений полиметаллической и благородно-металлической минерализации, в том числе россыпные месторождения золота [8, 9]); водосбор сложен палеоген-четвертичными отложениями, залегающими на каменноугольных осадках, представленными песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами;

1.4) в горно-ледниковом бассейне Актру на северном макросклоне Северо-Чуйского хребта Центрального Алтая (элемент речной сети «Актру (Ак-Туру) – Чуя – Катунь – Обь – Карское море» выявлены рудоперспективные участки, приуроченные к Актуринской магмо-рудно-метасоматической системе [10]); водосбор реки Актру сложен гранитоидами Актуринского массива пермо-триасового возраста;

2) в Юго-Восточной Азии – в северной низко- и среднегорной части Вьетнама, в пределах бассейна реки Хонг (Красной) – в водосборах рек Бан Тхи, Дай, Ченгу (приток реки Бан Тхи), Фодай, Намду (притоки реки Дай)), в пределах которых расположены ряд проявлений и мелких месторождений свин-

ца, цинка, железа, марганца, разрабатываемых в настоящее время или ранее; в геологическом строении бассейна рек Бан Тхи, Ченгу, Дай, Фодай, Намду принимают участие осадки ордовик-силурийского и девонского возрастов, прорванные разновозрастными интрузивами габбро-гранитной серии [11, 12].

По размеру площади водосбора (табл. 1) река Томь относится к категории «больших» (гиперзональная река, основная часть водного стока которой формируется в горных районах (южная и восточная части); северо-западная часть бассейна относится к лесостепной зоне, северная часть – к подтаежной зоне), а остальные изученные водотоки – к «малым» (река Дай – в пределах исследованного участка). При этом особенностью реки Актру является наличие в ее водосборе семи ледников общей площадью 16,7 км² (снеговая линия на высоте 3200 м и выше), водосбора реки Правая Сарала – снежников, сохраняющихся в ряде случаев и в теплый период года, а водосборов рек Дай (в пределах исследованной части), Бан Тхи, Ченгу, Фодай, Намду – расположением в субэкваториальном поясе, в зоне переменного-влажных лесов. Таким образом, водосборы изученных рек расположены в различных природно-климатических и геологических обстановках, что позволяет охарактеризовать широкий спектр вариантов формирования донных отложений.

Методика исследования включала сбор и анализ материалов исследований, выполненных при непосредственном участии авторов в 2000, 2013, 2016, 2017 гг., и других данных. В июле 2000 г. О.Г. Савичевым были отобраны три пробы донных отложений реки Томь в г. Междуреченск (преобладающий тип руслового процесса – островно-осередковый), пгт. Крапивинский (пойменная многорукавность) и с. Тахтамышшево (выше г. Томск; ограниченное меандрирование и русловая многорукавность) в 0,2–1,0 м от уреза воды из верхнего слоя 0,2 м. Вес каждой из проб составил около 1 кг. Лабораторные работы выполнены в Томском государственном университете (ТГУ) и Аналитическом центре Объединенного Института геологии, геофизики и минералогии (ОИГГиМ СО РАН). Высушенные пробы были истерты и разделены на 3 группы: 1) 0,25–1,00; 2) 0,10–0,25; 3) менее 0,10 мм. В третьей группе дополнительно была отмыта фракция диаметром менее 0,02 мм. Отсортированный материал был подвергнут минералогическому, химическому (ТГУ) и рентгенофлуоресцентному анализу (ОИГГиМ СО РАН). В последнем случае навески всех фракций проб массой 3 г предварительно истерались до состояния пудры в агатовой ступке. Кроме того, выполнен рентгеноструктурный анализ глинистой фракции (ОИГГиМ СО РАН). Более подробно методика изучения проб донных отложений реки Томь, сведения об их минеральном и химическом составе изложены в [13].

Отбор проб донных отложений реки Актру выполнен В.В. Паромовым в июле–августе 2013 г. также в 0,2–1,0 м от уреза воды из слоя

0,2 м. Определение химического состава фракции до 1 мм проводилось в Томском политехническом университете (ТПУ) с использованием следующих методов: рН водной вытяжки – потенциометрический; концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , углерода водорастворимых органических веществ $\text{C}_{\text{орг}}$ в водной вытяжке – фотометрический; SO_4^{2-} в водной вытяжке – турбидиметрический; Na^+ , K^+ в водной вытяжке – ионная хроматография; NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ в водной вытяжке – фотометрический; Li, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Sn, Ba, Pb – метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с извлечением кислоторастворимых форм элементов. Анализ проводился для фракции до 1 мм, полученной ситовым способом. Рентгенофазовый анализ подготовленных проб донных отложений выполнен в ТГУ. Информация о методике и результатах исследования приведена в [14].

Отбор проб донных отложений малых рек в северной части Вьетнама проведен в феврале 2016 г. Нгуен Ван Луеном из верхнего слоя 0,2 с последующим отсевом фракции менее 0,5 мм. Лабораторные работы по определению химического состава водных вытяжек из донных отложений выполнены в ТПУ с использованием потенциометрического (рН), титриметрического (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , Cl^- , перманганатная и бихроматная окисляемость), турбидиметрического (SO_4^{2-}), фотометрического (Si, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) методов, масс-спектрометрического метода с индуктивно-связанной плазмой (с использованием масс-спектрометра NexION 300D: Si, Li, Al, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Rb, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Au, Hg, Pb, Bi), ионной хроматографии (Na^+ , K^+). Кроме того, на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ТПУ был проведен количественный нейтронно-активационный анализ проб донных отложений на 28 химических элемента и электронная микроскопия с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Более подробные сведения о методике и результатах изучения донных отложений малых рек в бассейне реки Хонг представлены в [15].

Отбор проб донных отложений рек Киргизка, Омутная, Сарала, Бискамажа выполнен О.Г. Савичевым в июле 2017 г. из слоя 0,2 м. В реках Сарала и Бискамажа отбор проводился в 0,2–1,0 м от уреза, в реках Киргизка и Омутная – смешанная проба из трех одинаковых частей, отобранных в точках, соответствующих 0,25; 0,5; 0,75 от ширины реки в створе. Масса пробы – 6 кг. Определение химического состава донных отложений и водных вытяжек (фракция до 1 мм) проводилось в ТПУ с использованием тех же методов, что и в случае рек Вьетнама. Рентгенофазовый анализ проб донных отложений без разделения на фракции проводился в Институте геологии и минералогии СО РАН (Мирошниченко Л.В.) на автоматизированном порошковом дифрактометре ДРОН-4 (излучение $\text{CuK}\alpha$,

графитовый монохроматор). Дифракционные картины были отсканированы в интервале 2θ от 3° до 65° с шагом $0,05^\circ$, время сканирования в точке – 4 с, щель $0,5$ мм. Результаты изучения минерального и химического состава донных отложений рек Киргизка, Омутная, Правая Сарала, Бискамажа приведены в табл. 2.

Во всех случаях, помимо проб донных отложений, проводился отбор проб речных вод из слоя 0,3–0,5 м от поверхности. Лабораторные работы выполнены в ТПУ с использованием следующих методов: рН – потенциометрический; SO_4^{2-} – турбидиметрический; Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , бихроматная окисляемость – титриметрический; соединения азота, фосфаты, Si – фотометрический; Al – флуориметрический; Na^+ , K^+ , Fe – атомная абсорбция, ионная хроматография; Zn, Pb, Cu – инверсионно-вольтамперометрический; в 2013 г. – Li, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Sr, Cd, Ba – атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой; в 2016–2017 гг. – Si, Li, Al, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Ba, La, Ce, Sm, Au, Hg, Pb и ряд других микроэлементов – масс-спектрометрический метод с индуктивно-связанной плазмой. Результаты изучения химического состава водных вытяжек из донных отложений и речных вод приведены в табл. 3 (показатели выбраны с учетом специфики расположенных вблизи месторождений или рудопроявлений).

Анализ результатов рассматриваемого исследования включал: 1) корреляционный и регрессионный анализ с уровнем значимости 5 % с использованием условия $R^2 > 0,36$, где R^2 – квадрат корреляционного отношения [16]; 2) расчет индексов насыщения η речных вод и водных вытяжек из донных отложений относительно ряда минералов (1) методом констант с использованием уравнения Дэвиса для определения коэффициентов активности заряженных частиц:

$$\eta = \lg \text{ПА} - \lg K_{\text{неq}}, \quad (1)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ; $K_{\text{неq}}$ – константа неустойчивости, кроме ряда минералов; описание методики расчетов приведено в [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных о минеральном и химическом составе донных отложений изученных рек проводился с учетом следующих положений.

Во-первых, изменения гранулометрического состава донных отложений в целом описываются уравнением Штенберга (2), основанным на предположении пропорциональности изменения веса частицы произведению ее веса на протяженность участка перемещения [17–19].

$$d_{\text{sb},x} = d_{\text{sb},0} \exp(-k_d x), \quad (2)$$

где $d_{\text{sb},0}$ и $d_{\text{sb},x}$ – диаметр частицы донных отложений в начале и конце участка длиной x ; k_d – коэффициент, зависящий от прочности горной породы.

Таблица 1. Общая характеристика объектов исследования

Table 1. General characteristic of researched objects

Река/River	Пункт (широта; долгота, °) Points of water sampling (latitude, longitude, °)	Дата отбора Sampling date	Источник Information source	L , км (km)	F , км ² (km ²)	F_U , км ² (km ²)	Z , м/м (m/m)	Q_a , м ³ /с (m ³ /s)	Q_t , м ³ /с (m ³ /s)	Σ_i , мг/дм ³ (mg/dm ³)
Томь/Tom	г. Междуреченск Mejdurechensk town (53,40°; 88,06°)	11.07.00	[13]	169	5880	–	242	163	–	112,3
	пгт. Крапивинский Krapivinsky town (55,00°; 86,48°)	13.07.00		457	42600	–	128	804	–	204,3
	с. Тохтамышшево Tokhtamyshevo settlement (84,89°; 56,37°)	14.07.00		739	56050	–	72	1128	452	163,9
Актру/Aktru	исток/source	19.07.13	[14]	0,5	7,0	4,0	2487	0,19	1,70	63,4
	альплагерь/camp (50,08°; 87,82°)	18.07.13		5,0	33,4	15,7	2127	0,91	5,20	114,4
	нижняя часть поймы the bottom part of river plain	18.07.13		8,1	52,9	15,9	2056	1,44	5,30	125,6
	перевалка/crossing	18.07.13		12,6	76,5	16,1	1771	2,08	5,60	153,2
	устье р. Кorumду the mouth of the Korumdu river	18.07.13		17,6	96,0	16,3	1582	2,62	5,70	150,1
	устье р. Актру the mouth of the Aktru river	20.07.13		24,2	158,7	17,5	1487	4,32	5,80	141,8
Бискамжа Biskamzha	выше п. Бискамжа Biskamzha settlement (53,46°; 89,57°)	18.07.17	Табл. 2, 3	22	95,0	5,0	655	2,63	–	214,4
	выше п. Бискамжа Biskamzha settlement (53,46°; 89,54°)	18.07.17		23,5	100,0	5,0	621	1,89	–	199,7
Правая Сарала Pravaya Sarala	10 м от выхода из озера flow out the lake (54,68°; 88,60°)	20.07.17		0,01	3,1	1,9	1100	0,05	–	39,2
	выше п. Приисковый Priiskovy settlement (54,65°; 88,68°)	20.07.17		6,8	34,0	15,3	908	0,57	–	25,2
	ниже п. Приисковый Priiskovy settlement (54,65° 88,74°)	20.07.17		10,4	48,0	20,0	804	0,81	–	68,7
Приток Саралы Sarala tributary	устье/mouth (54,64°; 88,63°)	20.07.17		2,8	6,1	3,0	1009	0,10	–	28,7
Киргизка Kirgizka	с. Халдеево/Khaldeevo settlement (56,63 ; 85,61°)	24.07.17		4,4	14,0	6,2	180	0,09	0,01	585,3
	выше п. Семилужки Semiluzhki settlement (56,63°; 85,39°)	24.07.17		21,8	185	31	138	1,16	0,24	505,6
	п. Кузовлево/Kuzovlevo settlement (56,58°; 85,04°)	24.07.17		74,5	820	35	78	5,14	0,37	514,3
Омутная Omutnaya	с. Александровское Aleksandrovskoe settlment (56,38°; 85,38°)	24.07.17		14	65,0	16	151	0,41	0,01	378,3
Бантхи/Ban Thi	M1604 (105,51°; 22,24°)	19.02.16		3,68	16,1	4	291	0,74	0,23	309,6
	M1603 (105,49°; 22,22°)	19.02.16		7,84	71,4	20	264	3,30	0,42	315,9
	M1602 (105,49°; 22,21°)	19.02.16		8,99	75,4	27	228	3,48	0,42	333,3
	M1601 (105,46°; 22,21°)	19.02.16		13,14	134	27	147	6,19	0,71	318,4
Ченгу/Che Ngu	M1605 (105,48°; 22,20°)	19.02.16	7,98	48,0	7	173	2,22	0,29	290,0	
Дай/Day	M1611 (105,57°; 22,13°)	20.02.16	16,12	43,8	7,7	296	2,02	0,98	277,0	
	M1609 (105,54°; 22,07°)	20.02.16	29,57	110,5	12	238	5,11	1,24	231,0	
	M1608 (105,53°; 22,06°)	20.02.16	32,82	164,8	13	225	7,61	3,46	224,7	
	M1607 (105,55°; 22,01)	20.02.16	41,68	182,3	23	206	8,42	4,39	193,3	
Намду/Namdu	M1610 (105,52°; 22,09°)	20.02.16	11,32	40,8	6	254	1,88	1,11	264,5	
Фодай/Pho Day	M1606 (105,56°; 22,02°)	20.02.16	32,9	129	10	215	5,96	1,53	102,6	

Примечание: L – расстояние от истока реки до створа отбора пробы; F – площадь водосбора в створе отбора пробы; F_U – площадь верхней части водосбора без выраженной русловой сети; Z – высота пункта отбора пробы; Q_a и Q_t – расходы воды в среднем и на момент отбора пробы; Σ_i – сумма главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) на момент отбора пробы; символ «–» означает отсутствие сведений.

Note: L is the distance to source; F is the basin area; F_U is the area of the top part of a basin without channel networks; Z is the gauge altitude; Q_a and Q_t are the water discharges: annual and at the sampling moment; Σ_i is the sum of the main ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) at the sampling moment; the symbol «–» means absence of data.

Таблица 2. Гранулометрический, минеральный и химический состав донных отложений малых рек в бассейне р. Обь в июле 2017 г.

Table 2. Fractional, mineral and chemical composition of river sediments of the minor rivers in the Ob river basin in July, 2017

Показатель Index	Ед. изм. Units	Бискамжа the Biskamzha river		р. Правая Сарала the Pravaya Sarala river			Приток р. Сарала, 2,8 км от истока Tributary of Sarala	р. Киргизка the Kirgizka river			р. Омутная – выше с. Александровское Omutnaya river	
		23,5 км от истока 23,5 km to the source	22 км от истока 22 km to the source	10 м от озера 10 m out the lake	6,8 км от озера 6,8 km out the lake	0,4 км от озера 10,4 km out the lake		выше с. Халдево Khaldevo	выше п. Семилужки Semiluzhki	выше п. Кузовлево Kuzovlevo		
Гранулометрический состав / Fraction composition												
Фракция (мм) / Fraction (mm)	>10	%	66,9	0,0	54,0	59,7	66,8	74,4	63,2	65,8	0,0	0,0
	7–10		5,6	0,0	16,8	19,4	13,5	7,3	15,7	16,6	0,0	0,0
	5–7		7,9	0,0	13,5	3,7	4,4	5,1	4,7	9,0	0,0	9,7
	3–5		8,6	0,0	5,9	2,7	4,6	6,6	4,6	2,5	0,0	6,0
	2–3		3,1	8,7	1,9	5,0	3,7	2,3	3,6	1,4	0,0	20,3
	1–2		0,5	52,6	4,1	3,5	2,9	2,3	1,7	1,9	21,1	47,8
	0,25–1		7,1	3,9	3,4	3,7	2,5	1,3	2,5	1,4	48,9	12,6
	<0,25	0,4	34,9	0,4	2,5	1,6	0,7	4,1	1,3	30,0	3,6	
Средний диаметр Average diameter	мм mm	18,1	1,1	13,4	15,6	18,6	21,8	11,4	30,1	0,7	2,1	
Минеральный состав / Mineral composition												
Содержание / Content, %	>50	–	–	–	–	–	–	Qz	Qz	Qz	Qz	
	≈25–50	Pc	Pc, De	Pc, Cl	Pc, Cl	Pc, Cl	Pc, Cl	–	–	–	–	
	≈15–25	–	–	–	–	–	–	–	mc	–	–	
	≈5–15	Qz, K-Fs, Ap, Cl	Qz, Cl, K-Fs, Ap	Qz, Ap	Qz, Ap, mc	Qz, Ap, mc	Qz, Ap, De	Pc, mc, Cl, K-Fs	Pc, Cl, Ce	Pc, K-Fs	–	
	≈3–5	tc, mc	mc, Ce	mc	K-Fs	De	mc, K-Fs, Ae	Ce	K-Fs, De	Cl, mc	Pc, K-Fs	
	≈1–3	Ka	–	–	–	Ae	tc, Ka, Ge	Ka, Px	Px	Ap	Px	
	≤1	Px	Ka, Px	Ka, Px	De, Px	tc, Px	Px	Ap, Py	Ap	Mg-Ce	Ap, Px	
Химический состав / Chemical composition												
Na	%	0,92	0,71	0,83	0,92	–	0,80	0,97	0,90	1,01	0,97	
K		2,29	3,27	1,60	1,34	–	1,00	1,00	<1	1,00	<1	
Ca		1,36	1,97	1,26	1,57	–	1,50	1,57	1,37	1,44	1,20	
Fe		3,307	3,446	3,144	3,462	–	3,602	4,339	3,679	3,579	3,429	
Cr		93,25	92,36	94,15	98,75	–	100,58	105,15	92,57	105,49	97,91	
Zn		70,6	56,6	66,0	68,6	–	65,6	69,0	83,0	88,1	66,1	
Rb		99	92	86	108	–	102	91	96	89	90	
Sr		<60	219	<60	105	–	60	<60	105	<60	131	
Ba		360	388	330	421	–	429	434	398	363	337	
Au		0,024	0,020	0,027	0,012	–	0,010	0,021	0,048	0,032	0,024	
La		31,82	27,36	29,57	33,34	–	30,43	33,50	34,69	36,01	34,85	
Ce		72,56	64,07	68,93	78,87	–	71,70	69,96	72,00	73,98	71,12	
Sm		5,58	4,89	5,05	6,00	–	5,37	6,22	6,29	6,19	5,97	
Th		9,75	8,56	9,45	10,94	–	9,53	10,05	9,66	10,10	9,41	
U	2,49	2,45	1,85	2,85	–	2,27	2,86	3,36	2,82	2,81		

Примечание: Pc – плагиоклаз; K-Ps – калиевый полевой шпат; Ap – амфибол; Px – пироксены; Qz – кварц; Cl – хлорит; Ka – каолинит; Ce – кальцит (Mg-кальцит); Ae – арагонит; De – доломит; Ge – гетит; Py – пирит; mc – слюда; tc – тальк.

Note: Pc – plagioclase; K-Ps – Potassium feldspar; Ap – amphibole; Px – pyroxene; Qz – quartz; Cl – chlorite; Ka – kaolinite; Ce – calcite (Mg-calcite); Ae – aragonite; De – dolomite; Ge – Goethite; Py – pyrite; mc – mica; tc – talc.

Во-вторых, учитывалась зависимость между средней скоростью течения речных вод v_a и средним диаметром частиц донных отложений d_{sba} , выражаемая формулами Шези, Маннинга и Штриккера [17–19]:

$$v_a = C_\tau \sqrt{RJ},$$

$$C_\tau = n_\tau^{-1} h_a^{\frac{1}{6}},$$

$$n_\tau = k_\tau^{-1} d_{sba}^{\frac{1}{6}},$$

где C_τ – коэффициент Шези; R и h_a – гидравлический радиус и средняя глубина потока; J – уклон водной поверхности; k_τ – коэффициент, согласно [18], $k_\tau=33$, а по [19] $k_\tau=21,1$.

В-третьих, для многих рек наблюдается постоянство или незначительное изменение скорости течения с ростом площади водосбора и расхода воды [20]. С учетом того, что уклоны водной поверхности от истоков к устью в целом снижаются, следует ожидать и одновременное уменьшение среднего диаметра частиц донных отложений.

В-четвертых, при поисках полезных ископаемых обосновано использование показателя гипергенной устойчивости K_{HS} , предложенного Н.А. Шиловым при изучении россыпных месторождений и учитывающего твердость H_m и плотность минералов ρ_m [6]:

$$K_{HS} = \lg(H_m \rho_m).$$

С учетом указанных выше положений можно предположить, что коэффициент k_d в уравнении (2) является функцией твердости H_m минералов, а при отсутствии локальных источников вещества при перемещении твердых частиц от истоков к устью вероятно уменьшение доли содержащихся в них минералов с минимальной твердостью и увеличение доли более твердых минералов.

Результаты выполненного анализа в целом подтверждают эти предположения. Наиболее заметные изменения минерального состава проявляются при изучении рек протяженностью более 11–20 км и заключаются в общих чертах в последовательном снижении доли минералов с показателем гипергенной устойчивости менее 1,23 и твердостью менее 7 (для кварца $K_{HS} \approx 1,26–1,27$ и $H_m=7$) – олигоклаза, роговой обманки, мусковита, хлорита, каолинита и ряда других минералов (рис. 1). Доля кварца, напротив, увеличивается (рис. 2, 3).

Статистически значимая зависимость между твердостью минералов и коэффициентом k_d в ур. (2) по данным, полученным на реке Томь, выявлена только для фракции 0,06–0,10 мм (рис. 4). Причем критическое значение твердости минерала ($H_m=6,3$), при которой размеры частицы практически не меняются, несколько выше твердости кварца ($H_m=7$), являющегося, согласно [6], репером для определения группы россыпеобразующих минералов с $K_{HS} \geq 1,27$.

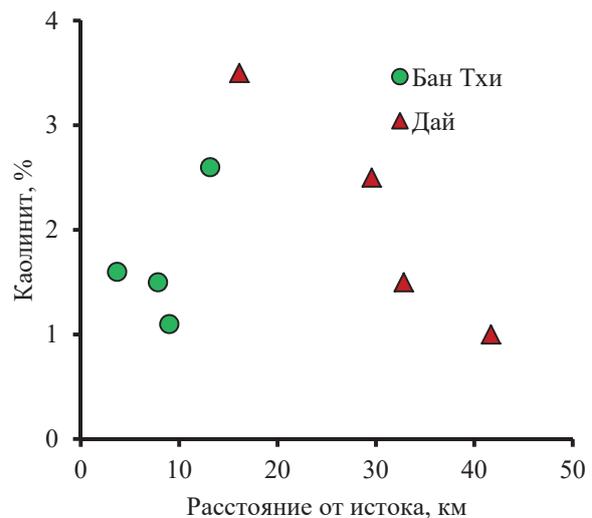


Рис. 1. Изменение доли каолинита во фракции донных отложений рек Бан Тхи и Дай (Вьетнам) менее 0,5 мм в 2016 г.

Fig. 1. Change of a part of kaolinite in the fraction of river sediments of the Ban Thi and Day rivers (Viet Nam) less than 0,5 mm in 2016

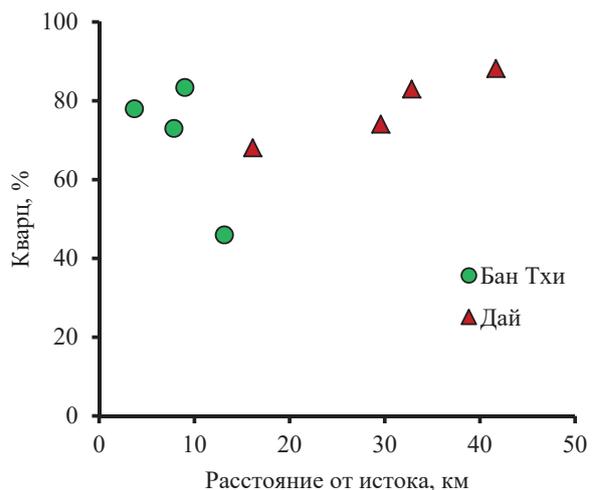


Рис. 2. Изменение доли кварца во фракции донных отложений рек Бан Тхи и Дай (Вьетнам) менее 0,5 мм в 2016 г.

Fig. 2. Change of a part of quartz in fraction of river sediments of the Ban Thi and Day rivers (Viet Nam) less than 0,5 mm in 2016

Обычно предполагается, что значения k_d характеризуют физическое воздействие на частицы донных отложений, максимум которого связан с истиранием мелкого гравия и дробления мелкой гальки [17]. В гидрогеохимии традиционно большое внимание уделяют растворению и выщелачиванию химических элементов из горных пород [21–23]. Общее представление о том, что значительная часть ионного состава вод (особенно катионного) формируется за счет растворения и выщелачивания водовмещающих и подстилающих горных пород является базовым постулатом в гео-

Таблица 3. Химический состав водных вытяжек донных отложений и воды малых рек в бассейне р. Обь в июле 2017 г.

Table 3. Chemical composition of water extracts of river sediments and river waters in the Ob river basin at July, 2017

Показатель Index	Ед. изм. Units	р. Бискамжа (выше п. Бискамжа) the Biskamzha river		р. Правая Сарала the Pravaya Sarala river			Приток р. Сарала, 2,8 км от истока Tributary of the Sarala, 2,8 km to source	р. Киргизка/the Kirgizka river			р. Омутная – выше с. Александровское the Omutnaya – Aleksandrovsle settlement
		23,5 км от истока 23.5 km to source	22 км от истока 22 km to source	10 м от истока (озера) 10 m out lake	6,8 км от озера 6,8 km out lake	10,4 км от озера 10,4 km out lake		выше с. Халдеево Khaldeevo settlement	выше п. Семилужки Semilujki settlement	выше п. Кузовлево Kuzovlevo settlement	
Химический состав водных вытяжек из донных отложений / Chemical compound of water extracts from ground adjournment											
pH	–	8,29	7,29	5,09	6,79	7,12	6,68	7,69	8,1	7,23	7,4
$\Sigma t_{(ws)}$	мг/дм ³ mg/dm ³	54,5	81,1	67,5	44,4	56,6	53,0	154,7	113,7	251,5	77,2
Na	мг/кг mg/kg	21,51	16,73	16,88	17,32	15,34	121,63	66,71	47,09	22,37	17,94
Mg		84,84	56,81	17,97	21,57	28,33	52,67	72,96	72,03	40,52	23,56
Al		177,32	45,47	61,32	41,27	38,80	96,06	43,17	91,39	38,63	12,30
Si		402,9	118,7	72,6	87,1	81,2	176,7	135,1	183,3	121,4	47,0
P		6,98	6,57	7,22	5,97	1,40	12,16	12,57	9,92	11,74	5,59
K		98,53	34,85	86,81	30,28	21,52	113,38	72,30	67,24	84,99	133,17
Ca		274,90	229,74	55,72	148,22	183,35	271,49	484,90	444,91	468,93	158,41
Ti		2,252	1,256	2,611	1,864	1,126	6,685	0,899	1,624	1,046	0,375
Cr		0,26902	0,07458	0,07887	0,04174	0,01795	3,49798	0,04257	0,13948	0,05499	<0,00125
Mn		2,96186	1,65268	5,06949	3,88262	3,23029	21,24060	11,28676	7,68351	5,36103	1,85538
Fe		155,893	70,549	51,299	64,462	51,629	133,256	88,170	120,012	154,789	29,859
Ni		0,30980	0,08679	0,11326	0,05290	0,04750	0,73436	0,16315	0,22485	0,11146	0,03993
Cu		0,43350	0,34649	0,15603	0,42334	0,28654	0,76533	0,33469	0,61997	0,24644	0,07795
Zn		0,42866	0,15338	0,24293	0,28257	0,37558	0,83505	0,26477	0,30783	0,23861	0,05675
Rb		0,14702	0,06465	0,14737	0,04414	0,02601	0,11470	0,08151	0,10340	0,08182	0,03451
Sr		1,35421	0,87506	0,29502	0,68332	1,01556	2,54314	2,71129	2,43164	2,20829	0,83579
Y		0,15595	0,13725	0,06099	0,04495	0,05048	0,09910	0,06877	0,16385	0,06956	0,01803
Zr		0,07744	0,02904	0,03322	0,02244	0,02521	0,02223	0,05918	0,14769	0,06311	0,01438
Cd		0,00231	0,00128	0,00370	0,00847	0,00449	0,02863	0,00118	0,00226	0,00123	0,00032
Ba		2,2980	0,9934	0,6562	0,4664	0,5839	1,6958	1,1516	2,3212	1,6006	0,3373
Au		<0,00012	<0,00012	<0,00012	0,00018	<0,00012	0,00013	<0,00012	<0,00012	<0,00012	<0,00012
Hg	0,00207	<0,00125	<0,00125	0,00399	<0,00125	0,01941	<0,00125	<0,00125	<0,00125	<0,00125	
Pb	0,11565	0,07044	0,11618	0,24274	0,10487	0,16854	0,08610	0,23116	0,14016	0,01836	
La	0,16495	0,13432	0,05000	0,03582	0,03745	0,08177	0,09317	0,19172	0,08137	0,01945	
Ce	0,34809	0,18927	0,08915	0,08951	0,09313	0,23001	0,19206	0,45566	0,19717	0,04020	
Sm	0,03719	0,02638	0,01534	0,00983	0,01027	0,02337	0,02014	0,04732	0,02034	0,00463	
Th	0,00494	0,00182	0,00360	0,00162	0,00113	0,00193	0,00305	0,01141	0,00452	0,00134	
U	0,01055	0,01176	0,00624	0,00779	0,00583	0,00739	0,00309	0,00739	0,00455	0,00070	
Химический состав речных вод/Chemical composition of river waters											
pH	–	8,35	8,30	7,75	7,46	7,83	7,31	8,18	8,20	8,11	8,02
CO ₂	мг/дм ³ mg/dm ³	1,5	1,5	4,4	3,5	3,5	3,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$\Sigma t_{(w)}$		214,4	199,7	39,2	25,2	68,7	28,7	585,3	505,6	514,3	378,3
PO ₄ ³⁻	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,144	0,121	0,201	0,092
Si	5,28	5,03	1,03	2,68	3,10	2,91	6,12	5,50	5,37	5,69	
Fe	0,0764	0,0876	0,0204	0,3157	0,1678	0,5844	0,5096	0,7570	0,6879	1,1249	
Al	14,4	13,1	10,8	226,9	125,7	56,3	60,2	65,8	49,0	35,0	
Ti	0,85	0,74	0,21	18,38	8,01	2,85	2,91	2,64	2,35	1,98	
Cr	0,73	0,65	0,26	1,83	0,03	109,98	1,83	1,67	2,83	1,28	
Mn	4,36	5,55	3,35	7,69	3,71	6,26	329,42	115,67	136,61	159,36	
Ni	0,19	0,21	0,11	0,55	0,03	18,91	1,54	1,53	1,57	2,15	
Cu	0,68	0,62	0,21	1,13	0,96	2,13	0,85	1,07	1,44	1,05	
Zn	0,20	0,18	0,15	1,77	1,67	3,69	0,76	0,59	1,43	1,19	
Rb	0,342	0,345	0,160	0,276	0,202	0,120	0,518	0,637	2,741	0,602	
Sr	161,5	142,5	17,2	24,9	52,4	16,7	529,4	494,4	413,1	330,0	
Y	0,120	0,118	0,008	0,165	0,090	0,078	0,191	0,201	0,184	0,163	
Zr	0,024	0,021	0,007	0,106	0,025	0,031	0,150	0,173	0,098	0,152	
Cd	0,003	0,001	0,002	0,015	0,024	0,014	0,009	0,005	0,010	0,009	

Окончание табл. 3

Table 3

Показатель Index	Ед. изм. Units	р. Бискамжа (выше п. Бискамжа) the Biskamzha river		р. Правая Сарала the Pravaya Sarala river			Приток р. Сарала, 2,8 км от истока Tributary of the Sarala, 2,8 km to source	р. Киргизка/the Kirgizka river			р. Омутная – выше с. Александровское the Omutnaya – Aleksandrovsle settlement
		23,5 км от истока 23,5 km to source	22 км от истока 22 km to source	10 м от истока (озера) 10 m out lake	6,8 км от озера 6,8 km out lake	10,4 км от озера 10,4 km out lake		выше с. Халдеево Khaldeevo settlement	выше п. Семилужки Semilujki settlement	выше п. Кузовлево Kuzovlevo settlement	
Ba	мкг/дм ³ mkg/dm ³	21,720	25,23	6,94	9,71	6,83	10,63	31,99	38,71	56,86	43,13
Au		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Hg		<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Pb		0,03	0,02	0,03	0,49	0,24	0,09	0,15	0,14	0,21	0,12
La		0,078	0,077	0,006	0,133	0,081	0,044	0,165	0,150	0,168	0,139
Ce		0,081	0,071	0,013	0,255	0,113	0,077	0,316	0,285	0,348	0,263
Sm		0,0238	0,0180	<0,0005	0,0310	0,0173	0,0139	0,0371	0,0299	0,0358	0,0318
Th		<0,005	<0,005	<0,005	0,013	<0,005	<0,005	0,013	0,014	0,018	0,017
U		0,542	0,490	0,009	0,025	0,084	0,004	2,198	0,910	1,042	0,619

Примечание: $\Sigma_{t(w)}$ и $\Sigma_{t(sw)}$ – сумма главных ионов (табл. 1) в речных водах и водных вытяжках из донных отложений.

Note: $\Sigma_{t(w)}$ is the sum of the main ions (table 1) in river waters and water extracts from river sediments.

химии природных вод [24, 25]. Однако непосредственно с уменьшением размера частиц донных отложений эти процессы, как правило, не связываются, либо их роль не считается определяющей в предположении того, что скорость переноса частиц, их истирания и дробления больше скорости геохимических процессов.

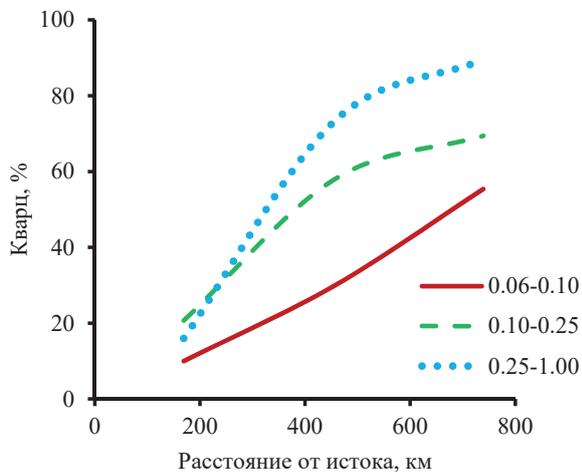


Рис. 3. Изменение доли кварца во фракциях 0,06–0,11, 0,10–0,25, 0,25–1,00 мм донных отложений реки Том в 2000 г.

Fig. 3. Change of a part of quartz in fractions of 0,06–0,11, 0,10–0,25, 0,25–1,00 mm of river sediments of the river Tom in 2000

Для проверки гипотезы о возможном влиянии растворения и выщелачивания на изменение размера и состава частиц донных отложений были выполнены расчеты индексов насыщения речных вод и водных вытяжек из донных отложений изученных рек (табл. 2, 3; данные [13–15]). Химический состав водных вытяжек в первом приближении ха-

рактеризует уровень содержания наиболее подвижных форм химических элементов в донных отложениях и может использоваться в качестве характеристики условий взаимодействия донных отложений, речных наносов и вод. Анализ результатов термодинамических расчетов показал, что и речные воды, и водные вытяжки из донных отложений неравновесны относительно минералов группы полевых шпатов на всем протяжении изученных участков водотоков. В то же время речные воды и водные вытяжки близки к равновесию с кварцем и глинистыми минералами, особенно каолинитом (рис. 5). Последний минерал обнаружен во многих пробах, но присутствует обычно в небольших количествах, что объясняется выносом глинистых частиц из русла в виде взвешенных наносов и осадением на плесах и в пойме на спаде половодья и паводков [26].

Относительно кальцита водные вытяжки более недонасыщены, чем речные воды. Так, диапазон изменения индексов насыщения $\eta(\text{CaCO}_3)$ для вытяжек изменяется в диапазоне от $-10,1$ до $-0,7$, а для речных вод – от $-9,5$ до $0,6$. Характерной особенностью является то, что, во-первых, отрицательные значения $\eta(\text{CaCO}_3)$ чаще всего наблюдаются на участках длиной до 42 км от истока при средней протяженности 16 км, что в общих чертах согласуется с указанными выше фактами о наиболее заметных изменениях минерального состава донных отложений на участках, удаленных от истоков на 11–20 км и более. Во-вторых, значения $\eta(\text{CaCO}_3)$ менее $-1,5$ с наибольшей вероятностью приурочены к участкам рек с отсутствием кальцита в минеральном составе донных частиц, а способность растворения кальцита в водных вытяжках из донных отложений сохраняется даже в случае насыщения речных вод.

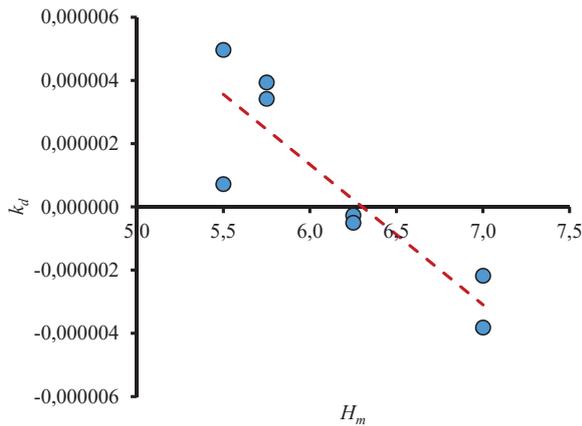


Рис. 4. Зависимость коэффициента k_d в ур. (2) от твердости H_m породообразующих минералов (олигоклаз, роговая обманка, пироксены, кварц) во фракции 0,06–0,10 мм донных отложениях реки Томь (2000 г.); $k_d=2,798 \cdot 10^{-5}-(4,440 \cdot 10^{-6})H_m$; $R^2=0,77$

Fig. 4. Dependence of k_d factor in equation (2) on hardness H_m of minerals (oligoclase; hornblende, pyroxene, quartz) in fraction of 0,06–0,10 mm of river sediments of the Tom river (in 2000); $k_d=2,798 \cdot 10^{-5}-(4,440 \cdot 10^{-6})H_m$; $R^2=0,77$

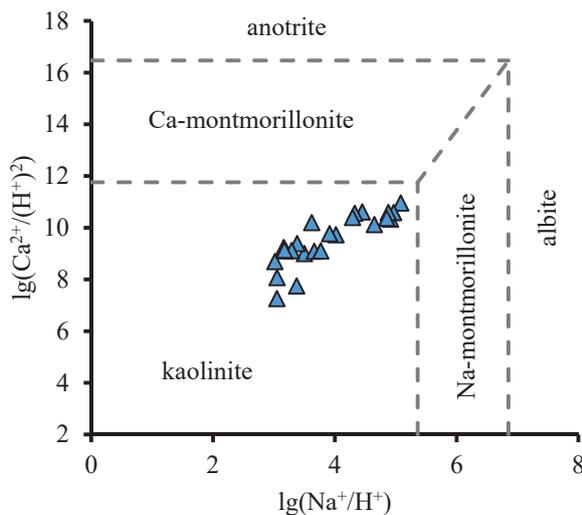


Рис. 5. Система $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2-Na_2O$ при 25 °C, $lg[H_4SiO_4]=-3,5$ и $P_{CO_2}=101,5$ Па с нанесением данных по составу вод изученных рек (табл. 1, 3)

Fig. 5. System $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2-Na_2O$ at 25 °C, $lg[H_4SiO_4]=-3,5$ и $P_{CO_2}=101,5$ Pa with drawing data of the researched river waters (table 1, 3)

Следовательно, уменьшение размеров донных частиц, в составе которых присутствует кальцит, может быть связано не только с физическими, но и химическими процессами. Такой же вывод можно сделать и применительно к другим минералам с показателем гипергенной устойчивости меньше, чем у кварца, содержание которого, напротив, возрастает. Одновременно с этим увеличивается и степень пересыщения речных вод относительно кварца. При содержании кварца в донных отложениях в диапазоне 5–15 % индекс насыщения относи-

тельно кварца $\eta(SiO_2)$ изменяется от $-0,37$ до $0,32$ при среднем значении $0,08$, а при содержании более 50 % – в интервале от $0,34$ до $0,39$ при среднем значении $0,36$. Аналогичные выводы можно сделать и на основе данных, приведенных в работах Г.П. Карнауховой, Н.А. Рослякова и соавторов [27, 28].

Общее представление о механизме совместного влияния физических и геохимических процессов на изменение размеров, минерального и химического состава частиц донных отложений может быть получено при анализе структуры модели выщелачивания минералов, описанной в [29]:

$$v_{MR} = k_0 A \exp\left(-\frac{E_a}{R_c T}\right) a^{n(H^+)} f_1(I) \Pi_j a_j^{n(j)} f_j,$$

где v_{MR} – скорость растворения (выщелачивания) минерала в водной среде; k_0 – константа скорости растворения минерала; E_a , R_c , T – энергия активации, газовая постоянная и температура среды; a – активность иона; $f_1(I)$ – функция связи v_{MR} с ионной силой раствора I ; f_j – функция, характеризующая отклонение от равновесия; $n(H^+)$ и $n(j)$ – параметры, по смыслу близкие к стехиометрическим коэффициентам иона водорода и других веществ, участвующих в реакции; A – площадь поверхности минерала, которая в пористой среде, согласно [30], обратно пропорциональна диаметру частиц породы, соприкасающихся с водой, и плотности минерала, в них содержащегося; по [31] величина A почв возрастает с увеличением доли глинистых частиц.

При этом следует иметь в виду, что частицы донных отложений разной формы должны существенно отличаться друг от друга по величине скорости растворения (выщелачивания) содержащихся в них минералов не только из-за разной площади взаимодействия воды и породы (площадь поверхности куба со стороной d примерно в 1,9 раза больше площади шара такого же диаметра), но и вследствие неравномерного выщелачивания их отдельных элементов с одной массой, но разной площадью соприкосновения с раствором. Очевидно, что сглаживание граней частицы вещества будет происходить тем быстрее, чем меньше твердость породообразующих минералов и больше транспортирующая способность потока (больше количество частиц, выше скорость их перемещения и частота столкновений). Следовательно, процессы растворения (выщелачивания) минералов, входящих в состав частиц донных отложений, на первом этапе могут ослабить механическую прочность частиц, что способствует их истиранию и/или растрескиванию. Затем, после растрескивания крупных частиц и увеличения суммарной поверхности взаимодействия их водным раствором, дополнительно усиливается процесс растворения (выщелачивания), ограничением которого является образование слоя из вторичных минералов, равновесных к водному раствору. В ряде случаев продукты растворения горных пород могут образовывать не

только геохимический, но и физический барьер, например, при кольматации поверхностного слоя донных отложений.

Уравнение (8) позволяет получить только самое общее описание скорости растворения минералов в статистическом смысле, поскольку исследуемые процессы в целом являются нестационарными и случайными, часто – дискретными. Поэтому получение универсальных количественных оценок взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных отложений, минеральным составом донных отложений, стоком наносов, речных вод и их химическим составом для всех природных зон и геологических условий сопряжено с многочисленными проблемами. Например, общая картина соотношения месторождений полезных ископаемых и рудопроявлений с содержаниями химических элементов в донных отложениях, водных вытяжках из них и, особенно, речных водах без учета геологического строения и преобладающих ландшафтов водосбора весьма неопределенная (табл. 2, 3).

Поэтому более продуктивным, по нашему мнению, является, с одной стороны, выявление общих региональных закономерностей для природных зон или крупных районов, а с другой – поиск эмпирических зависимостей на основе упрощения уравнения (8) для конкретных локальных условий. Исходя из этого, для малых водотоков в северной части Вьетнама были получены уравнения связи между концентрациями Pb и Zn в речных водах, водных вытяжках из донных отложений, значениями скорости течения, модуля водного стока, коэффициента дисперсии, а также уравнения связи между содержанием в донных отложениях урана и каолинита [15, 32].

На региональном уровне, судя по результатам анализа данных как по северной части Вьетнама, так и в Сибири, наиболее очевидным является отмеченное выше закономерное изменение содержания некоторых порообразующих минералов, например, увеличение вклада кварца от верховий к устьям рек и уменьшение доли минералов с меньшими, чем у кварца, значениями показателя гипергенной устойчивости. Тяжелые россыпеобразующие рудные минералы с $K_{HS} > 1,27$ накапливаются на локальных участках с линейными параметрами до 10–100 км, что в случае малых водотоков в целом совпадает с выводами, полученными в [33] для металлов платиновой группы. При этом необходимо отметить, что существенные изменения химического состава речных вод при наличии достаточно мощных источников загрязнения (сброс сточных вод предприятий гг. Новокузнецка, Кемерово, Томска в реку Томь [34], горно-обогатительных фабрик, связанных с добычей свинцово-цинковых руд во Вьетнаме, – в реки Дай и Бан Тхи [12]) обычно наблюдаются в пределах 10–11 км, что примерно соответствует пути осаж-

дения карбонатов в случае пересыщения ими речных вод [15].

С учетом этого можно предположить, что в случае длительного функционирования источника вещества при условно однородных условиях водного стока и водного режима, определяющих общие черты выноса и аккумуляции, размеры участков с характерным изменением химического состава речных вод, минерального и химического состава донных отложений взаимосвязаны (табл. 2, 3). Как правило, участки с характерным минеральным составом донных отложений расположены ниже по течению от участков с условно однородным (или слабо меняющимся в многолетнем разрезе) химическим составом речных вод, причем смещение границ таких участков достигает 100 км.

Заключение

В результате выполненного исследования получены следующие выводы:

- 1) основные закономерности изменения минерального состава донных отложений связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости менее 1,26–1,27; указанные закономерности проявляются на участках рек, удаленных от истоков на 11–20 км и более;
- 2) при длительном функционировании источников вещества и относительно неизменных условиях формирования гидрологического режима границы участков со сменой минерального состава донных отложений расположены в 1–100 км ниже по течению от границы участков с однородным химическим составом речных вод;
- 3) транспортировка и формирование россыпей тяжелых рудных минералов ограничены участками ориентировочно 10–100 км;
- 4) отмечена двойственная роль геохимических процессов при уменьшении размеров частиц донных отложений по длине рек: 4.1) вначале процессы растворения и выщелачивания ослабляют механическую прочность крупных частиц, причем тем сильнее, чем больше форма частиц отличается от шара; 4.2) затем, после механического разрушения частиц в результате столкновения с другими частицами, происходит резкое увеличение площади соприкосновения воды и породы; 4.3) это, в свою очередь, приводит к усилению растворения и/или выщелачивания вплоть до момента, когда в поверхностном слое донных отложений не накапливается достаточное количество продуктов выветривания, устойчивых и к химическому, и к физическому выветриванию, в частности кварца.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000. – М.: Институт минералогии, геохимии и кристаллографии редких элементов, 2002. – 92 с.
2. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 228 с.
3. Water Quality Assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd edition / Ed. by D. Chapman. – London: Chapman & Hall, 1996. – 651 p.
4. Guide to Hydrological Practices. V. I. Hydrology – from Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168. Sixth edition. – Geneva: World Meteorological Organization, 2008. – 296 p.
5. РД 52.24.309–2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Дата введения 2017–04–03. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2016. – 135 с.
6. Россыпные месторождения России и других стран СНГ (миражения, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы) / Н.Г. Патык-Кара, Б.И. Беневольский, Л.З. Быховский, Л.Б. Зубков, А.А. Кремянецкий, Е.В. Матвеева, В.А. Мелкий, В.Е. Минорин, А.Г. Мочалов, Н.М. Риндзюнская, Б.В. Рыжов, Л.В. Спорыхина, Е.А. Черемисина / отв. ред. Н.П. Лавёров, Н.Г. Патык-Кара. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.
7. Саралинский золоторудный узел Кузнецкого Алатау / И.Н. Широких, Н.А. Росляков, В.И., Сотников А.С. Васков / под ред. Г.В. Полякова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1998. – 236 с.
8. Недра России. В 2 т. Т. 1. Полезные ископаемые / А.А. Смыслов, Н.В. Межеловский, А.Ф. Морозов, Е.А. Басков, А.И. Бурдэ, К.Б. Ильин, А.В. Козлов, Л.В. Кулачков, В.С. Литвиненко, Ю.В. Лир, Д.В. Рундквист, И.Г. Савина, С.В. Сендек, Л.И. Тихомиров, М.Г. Харламов / под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смыслова. – СПб.; М.: Горный ин-т, Межрегион. Центр по геол. Картографии, 2001. – 547 с.
9. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л.П. Рихванов, С.С. Кропанин, С.А. Бабенко, А.И. Соловьев, В.М. Советов, Т.Ю. Усова, М.А. Полякова / под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровичака. – Кемерово: ООО «Сарс», 2001. – 214 с.
10. Магмо-рудно-метасоматическая система Актур в Горном Алтае / А.И. Гусев, А.Ф. Коробейников, А.Я. Пшеннички, В.А. Домаренко // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 7. – С. 75–79.
11. Nguyen Kinh Quoc. The Map of geological conditions and mineral resources in scale 1:200000 of Bac Kan province, sheet F48-XV. – Hanoi: General Department of Geology and Minerals of Vietnam, 2001. – 3 p.
12. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866–7187/39/2/9703.
13. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
14. Savichev O., Matveenko I., Paromov V. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation) // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 85. – P. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/20168501031.
15. Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау (Северный Вьетнам) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, Нгуен Ван Луен, М.В. Шалдыбин, А.В. Канаки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 102–113.
16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
17. Чалов П.С. Руслвые процессы (руслведение). – М.: ИНФРА-М, 2017. – 569 с.
18. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 416 с.
19. Chang H.H. Fluvial Processes in River Engineering. – Malabar, Florida: Krieger publishing, 2008. – 432 p.
20. Виноградов Ю.А., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – 304 с.
21. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. – М.: Недра, 1965. – 272 с.
22. Lerman A. Geochemical Processes of Water and Sediment Environments. – New York: Wiley – Interscience Public, 1979. – 481 p.
23. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
24. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
25. Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads // American Journal of Science. – 1987. – V. 287. – P. 401–428.
26. An integrated sedimentary systems analysis of the R'io Bermejo (Argentina): Megafan character in the overfilled southern Chaco foreland basin / M.M. McGlue, P.H. Smith, H. Zani, A. Silva, B. Carrapa, A.S. Cohen, M.B. Pepper // Journal of Sedimentary Research. – 2016. – V. 86. – P. 1359–1377. DOI: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2016.82>.
27. Катунь: экогеохимия ртути / Н.А. Росляков, В.С. Кусковский, Г.В. Нестеренко, С.Л. Шварцев, А.В. Геря, Ю.А. Калинин, Д.Ю. Крестовоздвиженский, А.А. Лукин, С.П. Осинцев, С.Т. Рыбакова, А.Ю. Туровинин / под ред. Н.А. Рослякова, А.Н. Дмитриева. – Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1992. – 180 с.
28. Карнаухова Г.А. Цикличность осадконакопления и физические свойства донных осадков в искусственных водоемах // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 471. – № 5. – С. 567–570.
29. Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. – 1995. – V. 31. – P. 23–86.
30. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. – 1995. – V. 31. – P. 405–462.
31. Coupled modeling of biospheric and chemical weathering processes at the continental scale / C. Roelandt, Y. Goddérís, M.-P. Bonnet, F. Sondag // Global Biogeochemical Cycles. – 2010. – V. 24. – № 2. – P. 6357–6374. DOI: 10.1029/2008GB003420.
32. Нгуен Ван Луен. Эколого-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
33. Минералы металлов платиновой группы из аллювия – индикаторы коренной минерализации (на примере россыпей юга Сибири) / С.М. Жмодик, Г.В. Нестеренко, Е.В. Айриянци, Д.К. Белянин, В.В. Колпаков, М.Ю. Подлипский, Н.С. Карманов // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 10. – С. 1828–1860. DOI: 10.15372/GiG20161005.
34. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 248 с.

Поступила 31.01.2018 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Домаренко В.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Перегудина Е.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лепокурова О.Е., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.06:551.482.212

TRANSFORMATION OF MINERAL COMPOSITION OF RIVER SEDIMENTS FROM SOURCES TO MOUTH OF RIVERS

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Viktor A. Domarenko¹,
viktor_domarenko@mail.ru

Elena V. Peregudina¹,
pere-elena@mail.ru

Olesya E. Lepokurova^{2,1},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk Branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics of SB RAS,
4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

Relevance. The efficiency of mineral exploration is determined by the depth of understanding a matter accumulation and scattering. The study of these processes involves an analysis of mineral and chemical composition of bedrock, the products of their processing in the zone of hypergenesis and their redeposition by water streams.

The aim of the research is to reveal the trends of change in mineral and chemical composition of river sediments along the length of rivers.

Methods: landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical and mineral composition of river bottom sediments, mathematical modelling.

Results and conclusions. The authors have generalized the data on mineral composition of river sediments in basins of the Ob river (in the Russian Federation: the Tom, Aktru, Pravaya Sarala, Kirgizka, Omutnaya rivers) and the Red river (Viet Nam: the Ban Thi, Che Ngu, Day, Namdu, Pho Day rivers), received in 2000–2017. It is shown that the main regularities of changes in the mineral composition of bottom sediments are associated with an increase in the share of quartz from the sources to the mouths of rivers with a length of more than 11–20 km, while reducing the contribution of minerals to the hypergenic resistance index (logarithm of factum of density and hardness) less than 1,26–1,27. It is established that the sites with a characteristic mineral composition of bottom sediments are located downstream from the sites with a conditionally uniform (or slightly variable in long-time period) chemical composition of river water (displacement of the boundaries to 100 km). A conclusion is drawn on the role of composition of bedrocks and the nature of hypergenic geochemical processes in formation of mineral composition of bottom sediments, which determine the conditions for destruction of particles and accumulation of products of interaction in the water–rock system resistant to chemical and physical weathering.

Key words:

River sediments, mineral and chemical composition, transformation of mineral composition, the Ob river basin, the Red river basin.

The research was financially supported by the RFBR grant no.17–05–00042.

REFERENCES

1. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimičeskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000 and its results]. Moscow, IMGRE Press, 2002. 92 p.
2. *Instruktsiya po geokhimičeskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 228 p.
3. *Water Quality Assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. 2nd ed. Ed. by D. Chapman. London, Chapman & Hall, 1996. 651 p.
4. *Guide to Hydrological Practices*. Vol. I. *Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*. WMO-No. 168. Sixth edition. Geneva, World Meteorological Organization, 2008. 296 p.
5. RD 52.24.309–2016. *Organizatsiya i provedeniye rezhimnykh nablyudeniy za sostoyaniem i zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushy. Data vvedeniya 2017–04–03* [Organization and regime observations of state and pollution of surface waters of the land. Introduction 2017–04–03]. Moscow, Rostov-on-Don, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Roshydromet. Roshydromet, FGBU «SCI», 2016. 135 p.
6. Patyk-Kara N.G., Benevol'skiy B.I., Byhlovskiy L.Z., Zubkov L.B., Kremenetskiy A.A., Matveev E.V., Melkiy V.A., Minorin B.E., Mochalov A.G., Ridzyunskaya N.M., Ryzhov B.V., Sporykhina L.V., Cheremisina E.A. *Rossyynnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG (mineraniya, promyshlennyye tipy, strategiya razvitiya mineralno-syrevoy bazy)* [Placer deposits of Russia and other CIS countries (Minerageny of places, geological and commercial types and development of raw materials base)]. Eds. N.P. Laverov, N.G. Patyk-Kara. Moscow, Nauchny mir Publ., 1997. 479 p.
7. Shirokikh I.N., Roslyakov N.A., Sotnikov V.I., Vaskov A.S. *Saralinskiy zolotorudny uzel Kuznetskogo Alatau* [Saralinsky gold ore cluster of the Kuznetsk Alatau]. Ed. by G.V. Polyakov. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1998. 236 p.
8. Smyslov A.A., Mezhelovskiy N.V., Morozov A.F., Baskov E.A., Burde A.I., Ilin K.B., Kozlov A.V., Kulachkov L.V., Litvinenko V.S., Lir Yu.V., Rundkvist D.V., Savina I.G., Sendek S.V.,

- Tikhomirov L.I., Kharlamov M.G. *Nedra Rossii. V 2 t. T. 1. Poleznye iskopayemye* [The bowels of Russia. In 2 vol. Vol. 1. Minerals]. Eds. N.V. Mezhelovsky, A.A. Smyslov. St-Petersburg, Moscow, Mining Institute, Center for geol. cartography, 2001. 547 p.
9. Rikhvanov L.P., Kropanin S.S., Babenko S.A., Solovyev A.I., Sovetov V.M., Usova T.Yu., Polyakova M.A. *Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya kak potentsialny istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zirkon-ilmenite placer deposits as a potential source of development of the West Siberian region]. Eds. E.N. Tribunsky, M.S. Parovinchak. Kemerovo, Sars LLC Publ., 2001. 214 p.
 10. Gusev A.I., Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. *Magmo-rudno-metasomaticheskaya sistema Akturu v Gornom Altaye* [Magmo-ore-metasomatic system of Akturu in the Gorny Altai]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya – Successes of modern natural science*, 2014, no. 7, pp. 75–79.
 11. Nguyen Kinh Quoc. *The Map of geological conditions and mineral resources in scale 1:200000 of Bac Kan province, sheet F48-XV*. Hanoi, General Department of Geology and Minerals of Vietnam, 2001. 3 p.
 12. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
 13. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologia – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 14. Savichev O., Matveenko I., Paromov V. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation). *MATEC Web of Conferences*, 2016, no. 85, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/20168501031.
 15. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Nguyen Van Luyen, Shaldybin M.V., Kanaki A.V. Mineral-geochemical features of the minor river sediments in the interfluvial area of the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 102–113. In Rus.
 16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
 17. Chalov R.S. *Ruslovye protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes (course study)]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 569 p.
 18. Karashev A.V. *Rechnaya gidravlika* [River hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 416 p.
 19. Chang H.H. *Fluvial Processes in River Engineering*. Malabar, Florida, Krieger publishing, 2008. 432 p.
 20. Vinogradov Yu.A., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii* [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 304 p.
 21. Perelman A.I. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov* [Geochemistry of epigenetic processes]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 272 p.
 22. Lerman A. *Geochemical Processes of Water and Sediment Environments*. New York, Wiley – Interscience Public, 1979. 481 p.
 23. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
 24. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
 25. Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 1987, vol. 287, pp. 401–428.
 26. McGlue M.M., Smith P.H., Zani H., Silva A., Carrapa B., Cohen A.S., Pepper M.B. An integrated sedimentary systems analysis of the Rio Bermejo (Argentina): Megafan character in the overfilled southern Chaco foreland basin. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, vol. 86, pp. 1359–1377. DOI: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2016.82>.
 27. Roslyakov N.A., Kuskovskiy V.S., Nesterenko G.V., Shvartsev S.L., Gerya A.V., Kalinin Yu.A., Krestovozdvizhenskii D.Yu., Lukin A.A., Osintsev S.R., Rybakova S.T., Turovin A.Yu. *Katun: ekogeokhimiya rtuti* [the Katun river: ecology geochemistry of mercury]. Eds. N.A. Roslyakov, A.N. Dmitriev. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1992. 180 p.
 28. Karnaukhova G.A. Cyclicity of sedimentation and physical properties of bottom sediments in artificial reservoirs. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471, no. 5, pp. 567–570.
 29. Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates. *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. Mineralogical Society of America*, 1995, vol. 31, pp. 23–86.
 30. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils. *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America*, 1995, vol. 31, pp. 405–462.
 31. Roelandt C., Goddérès Y., Bonnet M.-P., Sondag F. Coupled modeling of biospheric and chemical weathering processes at the continental scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 6357–6374. DOI: 10.1029/2008GB003420.
 32. Nguen Van Luen. *Ekologo-geokhicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheniy vodotokov v severnoy chasti Vetnama (na primere uezda Chodon, provintsiiya Bakkan)*. Dis. Kand. Nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Baccan province). Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 22 p.
 33. Zhmodik S.M., Nesterenko G.V., Ayriyants E.V., Belyanin D.K., Kolpakov V.V., Podlipskiy M.Yu., Karmanov N.S. Minerals of platinum group metals from alluvium are indicators of indigenous mineralization (on the example of placers of southern Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 10, pp. 1828–1860. DOI: 10.15372/GiG20161005.
 34. Savichev O.G. *Vodnye resursy Tomskoy oblasti* [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 248 p.

Received: 31 January 2018.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor A. Domarenko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Peregudina, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olesya E. Lepokurova, Cand. Sc., head of Laboratory, Tomsk Branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics of SB RAS; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.