ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 5, с. 715–727

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 550.461:551.311.2

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И РЕЧНЫХ ВОД ТУГАНСКОГО РОССЫПНОГО УЗЛА (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2020 г. О. Г. Савичев[a], *, В. А. Домаренко[a], О. Е. Лепокурова[a, b], **

[a] *Томский политехнический университет, Томск, Россия*

[b] *Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Томск, Россия*

**e-mail: OSavichev@mail.ru*

***e-mail: LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru*

Поступила в редакцию 02.10.2019 г.
После доработки 15.05.2020 г.
Принята к публикации 06.06.2020 г.

Представлены результаты исследований изменений химического и минерального состава донных отложений и вод реки Омутной (элемент речной системы Омутная–Киргизка–Томь–Обь) в основные фазы водного режима в 2018–2019 гг. в пределах Туганского россыпного узла (рудные минералы – ильменит и циркон). Геохимические показатели оценены с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что пространственно-временные изменения валовых содержаний химических элементов в целом взаимосвязаны с формами их миграции: в весеннее половодье отмечается общее увеличение концентраций веществ с преобладающей взвешенной формой, в зимнюю межень – с растворенной. Изменения химического состава донных отложений (фракция до 1 мм) в течение года и по направлению от истока к устью реки вследствие влияния локальных геологических и гидрологических факторов проявляются слабее, чем соответствующие изменения состава речных вод. Показано, что максимальные концентрации рудных элементов в пределах ореолов россыпных месторождений наиболее вероятны в условиях относительно устойчивого (в геологическом отношении) снижения интенсивности водообмена.

Ключевые слова: пространственно-временные изменения, химический состав, донные отложения, речные воды, Туганский узел, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S2587556620050143

ВВЕДЕНИЕ

Понимание процессов и условий формирования геохимических ореолов – областей со статистически значимым повышенным (относительно средних значений для изучаемого геологического пространства) содержанием химических элементов, генетически связанных с процессами формирования и преобразования рудных объектов [7], имеет большое научное и практическое значение. Их исследованию посвящены многие публикации, но ряд вопросов остается до сих пор недостаточно раскрытым [16, 17, 27]. В частности, не достаточно понятны палеогидрологические условия формирования первичных и вторичных геохимических ореолов месторождений полезных ископаемых и механизмы фракционирования и переноса определенных фракций речных наносов, содержащих рудные минералы. Это снижает эффективность геохимических и геоэкологических исследований на разных этапах недропользования [2, 25].

В связи с существованием указанной проблемы нами проведено исследование пространственно-временных изменений химического и минерального состава донных отложений и химического состава вод малого водотока – р. Омутной – элемента речной системы “Омутная–Киргизка–Томь–Обь” в районе Южно-Александровского участка Туганского россыпного узла. Площадь ее водосбора F_b составляет 180 км^2, общая протяженность L_r – 28 км, среднемноголетний модуль водного стока $M_{Q,\ a}$ – 6.27 л/(с · км^2) (расчет выполнен по реке-аналогу Киргизке у п. Кузовлево за период наблюдений Росгидромета с 1982 по 1996 г., пункт *4* на рис. 1).

Река Омутная пересекает Южно-Александровский участок с северо-востока на юго-запад в районе с. Александровское (Томский административный район Томской области). Химический состав ее вод и донных отложений изучен слабее, чем других участков Туганского узла, что определяет, во-первых, необходимость организа-

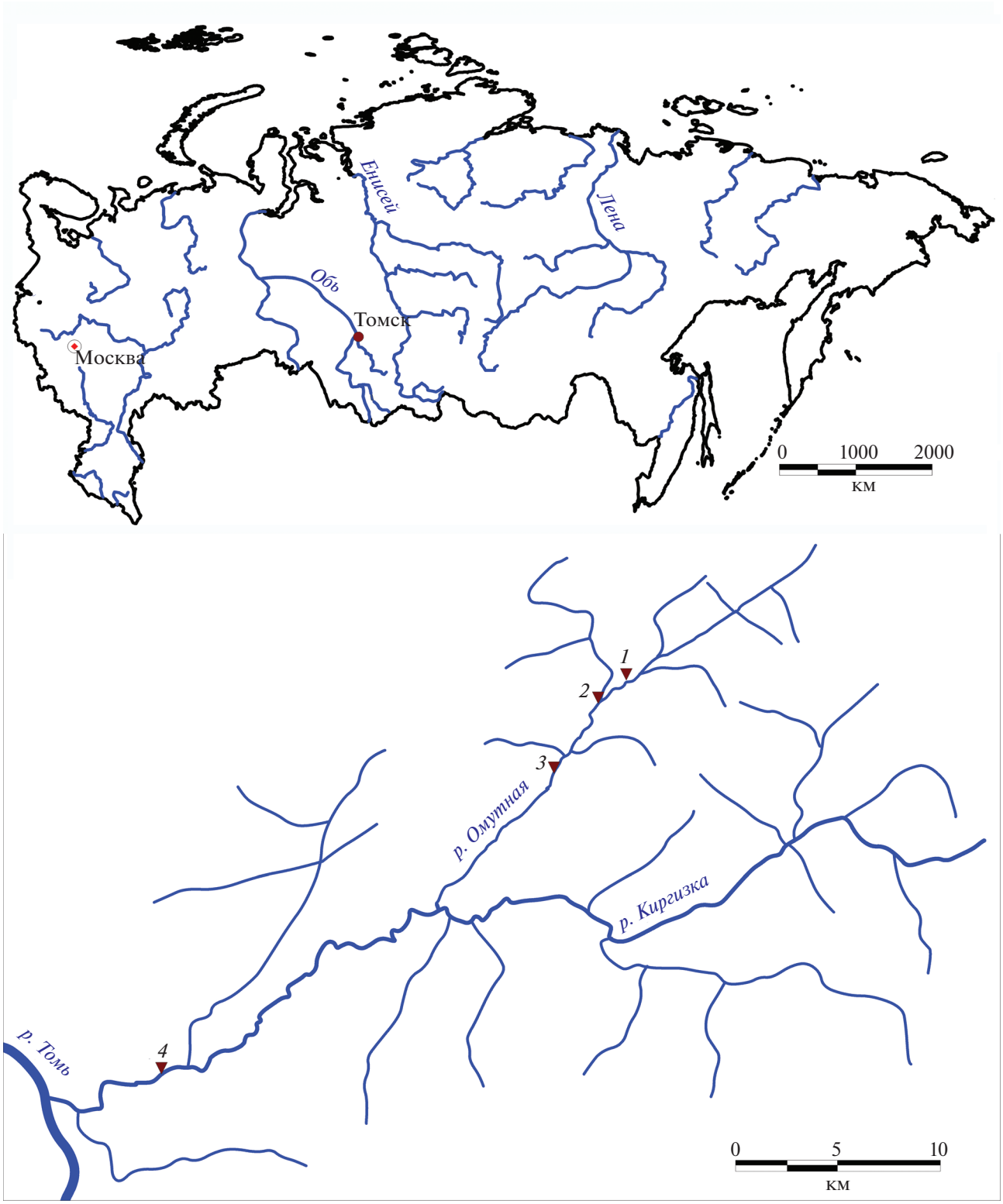

Рис. 1. Схема размещения пунктов отбора (*1–3*) проб воды и донных отложений р. Омутная в 2018–2019 гг. и расчетный створ (*4*).

ции мониторинга водного объекта до начала промышленной эксплуатации Южно-Александровского участка, намеченной на период после 2019 г. Во-вторых, синхронное сопоставление данных о химическом составе речных вод, донных отложений и рудных песков, одновременно являю-

щихся водовмещающими отложениями, потенциально позволяет оценить направление и масштаб выноса различных форм миграции некоторых химических элементов. Все это и определило цель, содержание и методику исследования, направленного на выявление пространственно-временных изменений химического состава речных вод и донных отложений реки Омутной в районе ожидаемой разработки Южно-Александровского участка с учетом задач эффективности природопользования и важности изучения донных отложений для решения экологических и геологических задач [9, 21, 25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На водосборной и прилегающей к ней территориях расположены Северный, Малиновский, Южно-Александровский, Кусковско-Ширяевский и Чернореченский участки Туганского россыпного узла комплексных руд (ильменит, циркон, рутил, кварцевые пески, каолин), формирование которых генетически связано со становлением шельфовой части эоцен-олигоценового водного бассейна, расположенного в юго-восточной части Западной Сибири. Наиболее перспективным для отработки является Южно-Александровский участок, в пределах которого рудный пласт мощностью 5 м залегает на глубине около 7 м с содержанием в песках ильменита 30 кг/м^3, циркона – 11 кг/м^3, рутила и лейкоксена – 4.6 кг/м^3. Спорадически встречаются монацит и алмазы [13, 17]. Кроме оксидов титана, циркония, кварцевой и каолиновой составляющих песков рассматривается возможность получения и других продуктов, включая благородные металлы и редкоземельные элементы [23].

Методика исследования включала отбор и анализ проб воды и донных отложений р. Омутной в трех створах, расположенных в 11.6 (окраина с. Александровское, створ I в табл. 1, см. рис. 1), 13.5 (ниже по течению от с. Александровское, створ II), 18.4 км (с. Малиновка, створ III) от истока в основные фазы водного режима – в начале летне-осенней (23 июня) и зимней (3 ноября) межени 2018 г. и в весеннее половодье (10 мая) 2019 г. Подобное расположение створов позволяет оценить вынос вещества из центральной части Южно-Александровского участка (створ I) и по мере удаления от него вниз по течению, изменение химического состава донных отложений и речных вод в разные гидрологические сезоны, а в перспективе – влияние разработки участка на состояние реки. Карьер пробной эксплуатации расположен между селами Александровское и Малиновка (между створами II и III).

Отбор проб проводился одновременно с измерением расходов воды с учетом требований [4, 12, 22]: 1) отбор проб воды – на стрежне из верхнего слоя глубиной до 0.5 м от поверхности (в зависимости от глубины); 2) отбор проб донных отложений – интегральная проба из трех точек по створу (0.25, 0.50, 0.75 ширины в створе) из верхнего слоя толщиной до 0.2 м общим весом около 6 кг. По результатам гранулометрического анализа, включавшего построение кумулятивной кривой (гранулометрического состава) согласно [6], определены значения диаметра частиц донных отложений средневзвешенные ($D_{sb,\ a}$) и соответствующие вероятности 10% ($D_{sb,\ 10\%}$). При проведении полевых работ использовались гидрометрическая вертушка ГМЦМ-1, батометр-бутылка ГР-16М и дночерпатель ГР-91.

Лабораторные работы по определению гранулометрического и химического состава донных отложений и речных вод проводились в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета. Из донных отложений отбиралась фракция с диаметром частиц менее 1 мм, в кислотных вытяжках из которой (навеска пробы 0.2–0.5 г помещалась в полиэтиленовую пробирку с добавлением 3 мл азотной кислоты, а затем в микроволновую печь и прогревалась на мощности 100–300 W в течение 10 мин без закипания раствора, затем объем полученного раствора доводился деионизованной водой до 50 мл), а также в речной воде выполнялось определение содержаний ряда химических элементов с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой (масс-спектрометр NexION 300D). Кроме того, в речной воде при определении гидрогеохимических показателей использовались следующие методы: pH – потенциометрический; SO_4^{2-} – турбидиметрический; Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^-, перманганатной окисляемости (ПО), CO_2 – титриметрический; Na^+, K^+, NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-} – метод ионной хроматографии.

Основное внимание было уделено уровням содержания в донных отложениях и речной воде Ca, Mg, Na, K, Cl, S (Cl, S в воде – в виде ионов Cl^- и SO_4^{2-}), P, Si, Fe, Al, Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Y, Zr, Cd, Ba, Au, Hg, Pb, La, Ce, Sm, Th, U с учетом геохимической специализации района исследования и наличия соответствующих ранее выполненных исследований в пределах Туганского месторождения, позволяющих сопоставить материалы разных лет [18, 23]. Более подробно методика пробоподготовки, анализа химического состава речных вод и донных отложений изложена в [18, 20].

Дополнительно выполнено изучение: 1) форм миграции химических элементов в речных водах 26.06.18 г.; 2) геохимических показателей пойменных и долинных отложений 03.11.18 г. В пер-

Таблица 1. Гидрологические, гидрохимические и геохимические показатели вод и донных отложений р. Омутная (Томский район, Западная Сибирь)

Показатель	Створ (широта, °; долгота, °; расстояние от истока, км)								
	I (56.739; 85.393; 11.6)			II (56.732; 85.373; 13.5)			III (56.697; 83.329; 18.4)		
Дата отбора	23.06	03.11	10.05	23.06	03.11	10.05	23.06	03.11	10.05
Расход воды, $м^3/с$	0.14	0.03	1.05	0.20	0.05	1.49	0.35	0.07	4.97
Средняя скорость течения, м/с	0.34	0.15	0.31	0.31	0.13	0.74	0.23	0.17	0.36
Расход взвешенных наносов, г/с	3.14	0.76	87.81	10.92	1.23	94.30	16.04	1.96	381.99
pH, единицы pH	8.04	7.04	6.92	8.06	7.87	6.86	7.84	7.67	6.98
ПО, $мгО/дм^3$	3.8	4.7	8.4	5.5	6.2	9.2	7.2	2.9	10.3
					$мг/дм^3$				
Взвешенные вещества	22.80	24.28	83.30	55.90	26.78	63.30	46.50	29.53	76.90
$\Sigma_{ги}$	287.5	375.8	96.1	272.3	346.6	89.6	339.1	354.9	106.6
Ca^{2+}	51.7	70.0	15.4	50.9	64.0	15.2	63.5	64.0	17.4
Mg^{2+}	7.8	9.8	2.6	7.6	9.8	2.4	8.8	12.2	2.3
Na^{+}	6.2	9.5	2.2	6.6	9.7	2.3	8.8	9.6	2.5
K^{+}	1.3	1.6	1.0	1.5	1.7	1.1	1.8	1.6	1.1
HCO_3^-	209.8	268.0	68.3	194.0	237.0	61.0	242.0	251.0	77.5
Cl^-	2.7	4.7	0.6	3.6	9.4	0.5	6.1	5.7	0.7
SO_4^{2-}	8.0	10.7	6.1	8.1	15.0	7.1	8.1	10.8	5.1
NO_3^-	0.55	0.73	0.52	0.32	0.68	0.69	0.40	1.38	0.57
NO_2^-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NH_4^+	0.14	0.09	0.15	0.14	0.01	0.15	0.22	0.09	0.07
P	0.075	0.035	0.080	0.103	0.041	0.100	0.131	0.042	0.150
Si	4.46	4.95	6.26	4.89	5.23	6.64	4.62	5.14	6.46
Fe	0.876	0.587	1.700	1.671	0.872	2.000	1.462	1.071	2.830
					$мкг/дм^3$				
Al	83.61	20.99	1660.00	199.05	12.51	1710.00	53.35	21.79	1890.00
Ti	3.31	0.95	59.00	8.75	0.90	59.40	1.75	1.00	69.40
Cr	1.05	1.64	3.50	1.39	1.56	3.60	1.12	1.62	4.40
Mn	83.36	68.56	110.00	161.66	174.86	140.00	302.53	324.92	260.00
Ni	2.27	1.27	4.30	2.54	1.42	4.40	2.16	1.22	4.80
Cu	1.37	0.51	3.40	1.86	0.44	3.80	1.13	0.35	4.10
Zn	0.99	0.47	4.00	1.89	0.47	5.10	0.70	0.46	6.60
As	2.53	1.27	1.60	2.94	1.07	1.80	2.94	1.14	2.50
Y	0.29	0.10	1.30	0.61	0.09	1.50	0.24	0.10	1.70
Zr	0.23	0.11	2.27	0.36	0.10	2.31	0.19	0.10	2.46
Cd	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03
Ba	42.63	26.41	23.00	44.63	20.01	23.00	51.95	28.01	26.00
Au	0.003	0.003	0.003	0.003	0.000	0.003	0.002	0.003	0.003
Hg	0.001	0.025	0.013	0.018	0.025	0.039	0.001	0.025	0.003
Pb	0.23	0.08	0.80	0.55	0.03	1.20	0.15	0.06	1.60
La	0.292	0.090	1.200	0.708	0.060	1.500	0.215	0.080	1.800
Ce	0.532	0.141	2.500	1.501	0.110	3.200	0.400	0.162	4.200
Sm	0.060	0.017	0.260	0.157	0.013	0.340	0.040	0.015	0.450
Th	0.018	0.010	0.240	0.040	0.008	0.300	0.022	0.009	0.320
U	0.581	0.447	0.140	0.588	0.412	0.150	0.490	0.277	0.160
					мг/кг				
Ca	111.7	390.4	693.5	131.9	663.0	930.2	129.0	884.4	996.7
Mg	202.3	226.8	648.8	255.5	244.8	816.2	237.0	369.2	901.3
Na	12.1	14.0	144.1	19.3	13.1	220.4	14.1	19.7	182.9
K	53.2	87.3	251.8	67.3	79.7	395.8	53.9	96.9	336.4
Cl	121.1	17.6	415.5	77.9	10.0	305.8	127.7	73.4	148.5
S	0.0	406.6	204.8	0.0	311.3	153.2	0.0	369.9	60.3
P	158.3	134.4	97.6	144.7	115.3	191.1	106.0	174.5	167.6
Si	81.9	190.3	2000.3	93.1	128.1	2422.6	56.0	226.7	2370.5
Fe	1876.3	2404.5	3177.9	2046.2	2128.6	5140.2	1624.3	2192.7	4008.6

Таблица 1. Окончание

Показатель	Створ (широта, °; долгота, °; расстояние от истока, км)								
	I (56.739; 85.393; 11.6)			II (56.732; 85.373; 13.5)			III (56.697; 83.329; 18.4)		
Al	569.4	536.1	1623.5	654.6	514.8	2226.9	555.3	806.9	2148.2
Ti	3.211	8.105	25.800	4.360	7.361	33.230	1.735	14.830	40.210
Cr	1.495	1.462	3.510	1.918	1.446	4.950	1.438	2.685	4.810
Mn	30.5	35.1	66.1	37.4	150.7	86.3	25.9	74.0	78.9
Ni	1.80	1.95	4.55	2.10	2.03	5.25	1.87	2.62	5.20
Cu	1.46	1.45	2.85	1.53	1.85	3.71	1.16	3.92	2.63
Zn	4.05	4.57	8.15	5.04	8.08	10.36	7.43	8.87	8.67
As	0.99	1.35	1.01	0.68	0.87	1.88	0.65	0.87	0.97
Y	1.53	1.33	2.41	1.60	1.37	3.56	1.34	1.93	2.90
Zr	0.63	0.71	0.47	0.67	0.66	0.98	0.60	1.28	0.79
Cd	0.020	0.001	0.030	0.020	0.000	0.032	0.020	0.010	0.030
Ba	2.69	7.27	24.78	3.44	7.50	45.53	3.16	12.02	26.86
Au	$<5 \times 10^{-5}$	$<5 \times 10^{-5}$	0.00240	$<5 \times 10^{-5}$	$<5 \times 10^{-5}$	0.00376	$<5 \times 10^{-5}$	$<5 \times 10^{-5}$	$<5 \times 10^{-5}$
Hg	0.002	0.051	0.045	0.001	0.008	0.124	0.000	0.047	0.040
Pb	2.67	1.64	2.65	2.41	1.86	3.70	1.67	3.44	3.10
La	3.47	3.24	5.65	3.24	2.89	6.93	3.28	4.35	5.87
Ce	6.40	6.35	12.05	6.18	5.78	14.81	6.02	8.81	12.33
Sm	0.61	0.59	1.08	0.61	0.58	1.33	0.55	0.80	1.11
Th	0.80	0.58	1.01	1.34	0.57	1.11	0.67	1.37	1.02
U	0.07	0.06	0.15	0.09	0.07	0.18	0.05	0.16	0.16
Средневзвешенный диаметр донных частиц $D_{sb,a}$, мм	5.779	1.236	0.394	5.689	8.162	0.368	5.239	4.243	0.292
Диаметр донных частиц с вероятностью 10% $D_{sb,10\%}$, мм	0.089	0.069	0.027	0.084	0.120	0.024	0.023	0.044	0.019
	Содержание минерала, %								
Кварц	>50	>50	>50	>50	>50	>50	25–50	25–50	>50
Плагиоклазы	1–3	1–3	3–5	1–3	1–3	3–5	1–3	1–3	3–5
Калиевые полевые шпаты	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3	1–3
Слюда	5–15	3–5	3–5	5–15	3–5	3–5	5–15	3–5	3–5
Каолинит	1–3	1–3	–	<1	–	–	<1	–	–
	Индексы насыщения *SI*								
$CaCO_{3\,calcite} + CO_2 + H_2O = Ca^{2+} + 2HCO_3^-$	0.40	1.05	−1.14	0.38	0.35	−1.32	0.33	0.17	−0.98
$Ca(ГК) = Ca^{2+} + ГК$	0.93	1.04	0.46	0.93	1.01	0.46	1.01	1.01	0.51
$SiO_{2\,quartz} + 2H_2O = H_4SiO_4^0$	0.26	0.32	0.42	0.30	0.33	0.44	0.28	0.33	0.43
$2NaAlSi_3O_{8\,albite} + 11H_2O + 2CO_2 = Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O_{\,kaolinite} + 2Na^+ + 2HCO_3^- + 4H_4SiO_4^0$	−9.86	−8.40	−11.31	−9.60	−9.53	−11.42	−9.89	−9.97	−11.04
$3KAlSi_3O_{8\,microcline} + 2H^+ + 12H_2O = KAl_3Si_3O_{10}OH_{2\,muscovite} + 2K^+ + 6H_4SiO_4^0$	−22.36	−23.86	−23.88	−22.00	−22.08	−23.78	−22.38	−22.54	−23.57
$2KAl_3Si_3O_{10}OH_{2\,muscovite} + 2H^+ + 3H_2O = 3Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O_{kaolinite} + 2K^+$	0.50	−1.34	−1.96	0.62	0.34	−2.02	0.37	−0.09	−1.73
$CaAl_2Si_2O_{8\,anortite} + 2H^+ + H_2O = Al_2Si_2O_7 \cdot 2H_2O_{\,kaolinite} + Ca^{2+}$	−19.54	−17.60	−22.86	−19.47	−20.09	−23.41	−20.22	−20.91	−22.56

Примечание: "–" – не обнаружено или отмечены отдельные кристаллы (кроме указанных в табл. 1 отмечены монтмориллонит, барит, кальцит, ильменит, циркон, магнетит, лимонит, апатит и ряд других минералов).

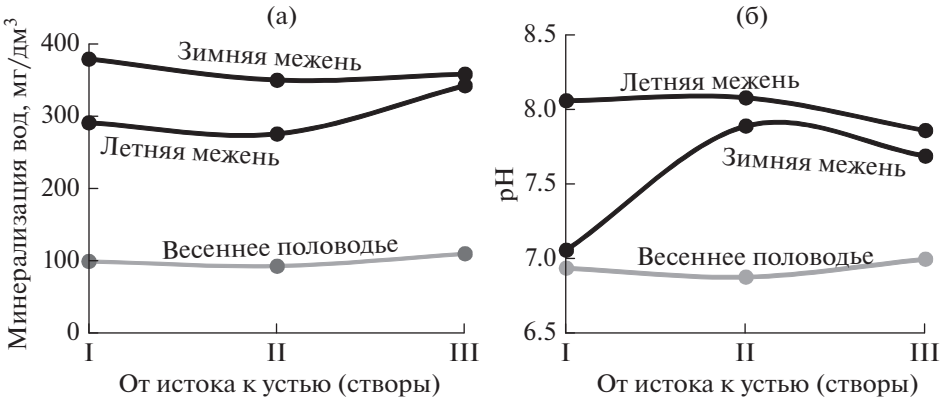

Рис. 2. Изменение суммы главных ионов (минерализации) (а) и pH вод (б) в 2018–2019 гг. по длине р. Омутная.

вом случае химический состав определялся в нефильтрованной воде и после фильтрации через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм. При этом было сделано допущение, что вещества в фильтрате представлены растворенной и коллоидной формами, а разница между валовым содержанием и фильтратом соответствует коллоидной и взвешенной формам. Во втором случае выполнен отбор проб твердого материала согласно [5] в пойме примерно в 5 м от бровки меженного русла и долине – в 20–30 м (в створе I – в левобережной части, в створах II и III – в правобережной). Пробы – интегральные (из трех точечных отобранных по вершинам равнобедренного треугольника стороной 1 м из слоя 0.0–0.2 м от поверхности) общим весом около 6 кг.

При анализе данных проводились расчеты коэффициентов корреляции r, погрешностей их определения δ_r и индекса насыщения SI с использованием программного комплекса Solution+ [19]:

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

$$SI = \lg \text{ПА} - \lg K_{ns}, \quad (2)$$

где N – объем выборки; ПА – произведение активностей группы веществ; K_{ns} – константа неустойчивости. Связь между исследуемыми величинами принимается статистически значимой, если выполняется условие $|r| > 2\delta_r$. Отрицательные значения SI свидетельствуют о возможном недосыщении, а положительные – о пересыщении водного раствора относительно рассматриваемых минералов.

Для контроля термодинамических расчетов для фракции донных отложений с диаметром частиц до 1 мм выполнено определение минерального состава: рентгенофазовый анализ – в Институте геологии и минералогии СО РАН (Л.В. Мирошниченко) на автоматизированном порошковом дифрактометре ДРОН-4; электронная микроскопия с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N – в ТПУ (С.С. Ильенок). Методика анализа минерального состава донных отложений изложена в [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воды р. Омутной в 2018–2019 гг. оцениваются как слабощелочные и нейтральные, по классификациям О.А. Алекина [1] – пресные со средней (в межень) и малой (в половодье) минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые первого и второго типов, по [3] – мезо- (в межень) и олигосапробные (в половодье). Содержание главных ионов в речных водах в целом увеличивается от весеннего половодья до зимней межени (рис. 2а) и по мере уменьшения расходов воды, однако содержание взвешенных веществ, концентрации Fe, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Pb, La, Ce, Sm, Eu, Th, напротив, снижаются. Величина pH достигает минимальных значений весной, а максимальных – в летне-осеннюю межень (см. табл. 1, рис. 2б).

В течение всех гидрологических сезонов сумма отношения фактических и предельно-допустимых концентраций ($ПДК_{хп}$) веществ первого и второго классов опасности, нормируемых для хозяйственно-питьевого водопользования, больше единицы (1.20–1.84), хотя концентрации соответствующих отдельных веществ нормативы не превышали. По состоянию на 23.06.18 г. основные формы миграции: Ca, Mg, Na, K, Cl, S, Si, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Au, Th, U – растворенная и коллоидная (тонкодисперсная); P, Fe, Al, As, Y, Hg, La, Ce – коллоидная и взвешенная; Ti, Zr, Pb, Sm представлены разными формами без явного преобладания какой-либо из них (табл. 2).

Таблица 2. Формы миграции химических элементов в водах р. Омутной 23.06.2019 г., %

Показатель	Створ					
	I		II		III	
Диаметр пор фильтра, мкм	>0.45	≤0.45	>0.45	≤0.45	>0.45	≤0.45
Ca	9.6	90.4	13.0	87.0	12.6	87.4
Mg	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
Na	4.5	95.5	7.1	92.9	7.3	92.7
K	5.8	94.2	5.0	95.0	1.1	98.9
Cl	0.5	99.5	0.0	100.0	1.2	98.8
S	29.4	70.6	2.6	97.4	<0.1	>99.9
P	53.3	46.7	65.0	35.0	73.1	26.9
Si	3.8	96.2	10.7	89.3	5.6	94.4
Fe	79.3	20.7	88.0	12.0	85.1	14.9
Al	89.4	10.6	94.5	5.5	84.0	16.0
Ti	69.7	30.3	88.5	11.5	<0.1	>99.9
Cr	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
Mn	25.3	74.7	38.1	61.9	30.0	70.0
Ni	36.4	63.6	43.3	56.7	9.1	90.9
Cu	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
Zn	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
As	60.0	40.0	65.5	34.5	65.5	34.5
Y	82.8	17.2	91.8	8.2	79.2	20.8
Zr	56.5	43.5	72.2	27.8	<0.1	>99.9
Cd	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
Ba	36.8	63.2	28.8	71.2	17.3	82.7
Au	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
Hg	75.4	24.6	71.2	28.8	>99.9	<0.1
Pb	56.5	43.5	81.8	18.2	<0.1	>99.9
La	91.4	8.6	96.5	3.5	88.6	11.4
Ce	87.7	12.3	95.9	4.1	93.7	6.3
Sm	58.3	41.7	84.4	15.6	<0.1	>99.9
Th	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9	<0.1	>99.9
U	28.2	71.8	36.5	63.5	33.8	66.2

По длине реки валовое содержание большинства изученных элементов в речных водах изменяется без ярко выраженных тенденций, хотя нельзя не отметить, что от истока к устью в среднем наблюдается некоторое увеличение концентраций Na, K, P, Fe, Al, Ti, Cr, Mn, Zn, As, Cd, Pb, Th, уменьшение – U и максимум в створе II – Cl^-, SO_4^{2-}, NO_2^-, Si, Ni, Cu, Y, Zr, Hg, La, Ce, Sm, а также перманганатной окисляемости (см. табл. 1). При этом по мере движения водных масс доли взвешенных и коллоидных форм миграции сульфатов и калия снижаются, а доли растворенных и коллоидных форм – возрастают.

Доля взвешенной и коллоидной форм миграции фосфора, напротив, увеличивается вниз по течению. Тенденции изменения по длине реки форм миграции прочих изученных элементов ли-

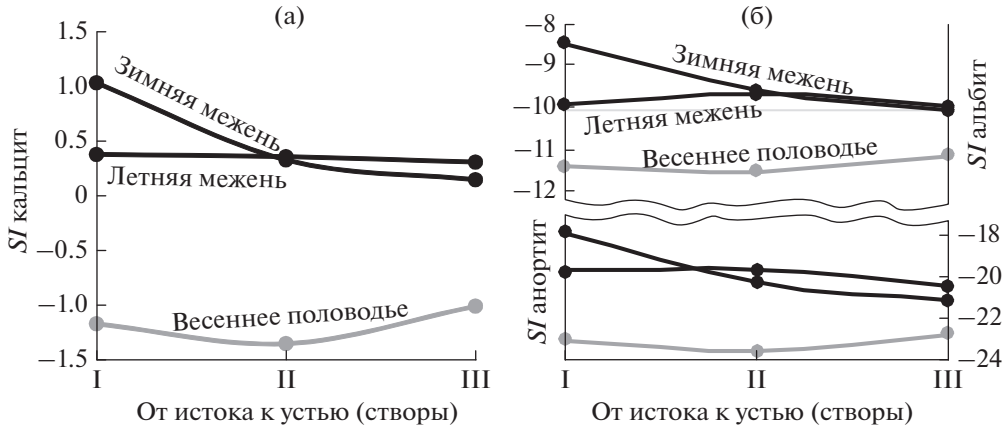

Рис. 3. Изменение индекса насыщения (*SI*) относительно кальцита (а), альбита и анортита (б) в 2018–2019 гг. по длине р. Омутной.

бо не выявлены, либо отмечено определенное увеличение доли взвешенной формы в створе II (Ca, Si, Fe, Al, Ti, Mn, Ni, Y, Zr, La, Ce, Sm, U), где наблюдались наибольшие значения средней по сечению скорости течения и характерных диаметров донных частиц (скорость течения, м/с: I – 0.27; II – 0.39; III – 0.26; средневзвешенный диаметр донных частиц $D_{sb,\ a}$, мм: I – 2.47; II – 4.74; III – 3.26; диаметр донных частиц по кумулятивной кривой гранулометрического состава с вероятностью 10% $D_{sb,\ 10\%}$, мм: I – 0.06; II – 0.08; III – 0.03).

Корреляционный анализ позволил в первом приближении (вследствие малого количества проб) выявить статистически значимую связь между расходами воды и содержаниями взвешенных веществ, с одной стороны, и валовыми концентрациями ряда веществ: 1) обратную – с главными ионами; 2) прямую – с P, Si, Fe, Al, Ti, Cr и рядом других элементов. С учетом этого и принимая во внимание указанные выше данные о пространственно-временных изменениях химического состава речных вод, можно предположить, что вероятность увеличения валовых концентраций веществ с высокой долей миграции во взвешенной и коллоидной формах возрастает с увеличением содержаний и стока взвешенных веществ. Это может быть связано с увеличением общего выноса взвешенных частиц и сорбции на них ряда элементов вследствие роста площади взаимодействия твердого вещества и воды.

Для веществ с преобладанием растворенной формы миграции, судя по данным о химическом составе подземных вод рассматриваемой территории [10, 26], пространственно-временные изменения в значительной мере связаны с соответствующими изменениями соотношений поверхностной и подземной составляющих водного стока и химическим составом последней. Для малых рек данной территории химический состав часто повторяет состав подземных вод [10], особенно у истоков, где воды питаются родниками. Наблюдается небольшое превышение суммы главных ионов вод в створе I относительно створа II, где воды уже более разбавлены, а далее по движению от створа II к III увеличение минерализации связано уже с большим временем взаимодействия вод с подстилающими и вмещающими отложениями (см. рис. 2), поскольку влияние подземных вод здесь уже ослаблено в результате их разбавления и реакций растворения – осаждения. В частности, в летне-осеннюю и зимнюю межень возрастает насыщенность речных вод относительно кальцита (рис. 3а) при том, что остается общая недонасыщенность относительно первичных алюмосиликатов, например, альбита и, особенно, анортита (рис. 3б). Это потенциально может привести к ограничению роста главных ионов [11, 24, 26]. Определенное влияние, видимо, оказывает и увеличение площади взаимодействия в системе “вода–порода” при одновременном увеличении концентрации взвешенных веществ и скорости течения (см. табл. 1).

Сопоставление средних (по 9 пробам) содержаний химических элементов в речных водах и кислотных вытяжках из донных отложений (фракция с диаметром частиц меньше 1 мм) показало, что между ними существует определенная связь, которая для 29 элементов (Ca, Mg, Na, K, Cl, S, P, Si, Fe, Al, Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Y, Zr, Cd, Ba, Au, Hg, Pb, La, Ce, Sm, Th, U) имеет вид:

$$\ln(C_{s,a}) = (0.700 \pm 0.051)\ln(C_{w,a}) + (5.211 \pm 0.322), \quad (3)$$

где $C_{w,\,a}$ и $C_{s,\,a}$ – средние содержания в речных водах и кислотной вытяжке из донных отложений; квадрат корреляционного отношения R^2 составляет 0.87.

В течение года и по длине реки химический состав кислотных вытяжек из донных отложений изменяется значительно слабее, чем в речных водах. Наиболее заметные тенденции – увеличение концентраций Ca, Mg, Na, K, Fe, Ti, Ba от спада половодья 2018 г. до пика половодья 2019 г. Хорошо выраженные тенденции для всех створов – снижение концентраций от весеннего половодья к зимней межени – отмечены для Cl.

Нельзя не отметить и достаточно резкое увеличение содержаний серы в кислотных вытяжках в начале зимней межени и их снижение в начале летне-осенней межени. Причем в зимнюю межень одновременно возрастают и содержания сульфатов в речной воде. Можно предположить, что это связано как с увеличением доли подземной составляющей водного стока с более высокими концентрациями SO_4^{2-}, так и с растворением сульфидов металлов и биогеохимическими процессами в донных отложениях (время и общая площадь взаимодействия воды с частицами донных отложений возрастают по мере размыва отложений, которые аккумулируются на спаде весеннего половодья).

Это предположение подтверждается и материалами других авторов [15, 23], и результатами изучения минерального состава донных отложений, позволившего выявить 23.06.19 г. зерна халькопирита в створе II (фракция 0.1 мм) и пирита – в створе III (фракции 0.1 и 0.04 мм). Для прочих изученных элементов состав подстилающих и водовмещающих пород (их основных источников поступления в водный поток и донные отложения) меняется от истоков к устью р. Омутной не столь выраженно (см. табл. 1).

В целом, данные о химическом составе кислотных вытяжек из донных отложений р. Омутной соответствуют ранее полученным следующим выводам [18]. *Во-первых*, основные закономерности, связанные с постепенным снижением содержания минералов с показателем гипергенной устойчивости (по [17], логарифмом произведения плотности и твердости) менее 1.26–1.27, характерны для рек с протяженностью более 11–20 км.

Во-вторых, относительно однородный минеральный и условно постоянный химический состав донных отложений обычно формируется в 1–100 км ниже по течению от границы участков с однородным химическим составом речных вод.

В-третьих, обе вышеуказанные закономерности обусловлены тем, что требуются определенные время и энергия для последовательного разрушения частиц горных пород за счет последовательно повторяющихся и взаимно обусловливающих процессов их растворения и выщелачивания, сорбции и десорбции и механического разрушения до момента, когда будут достигнуты максимальная сорбционная способность донных отложений и их химическое и динамическое равновесие с потоком [18]. Для рассматриваемого участка р. Омутной (11.6–18.4 км от истока) указанные условия соблюдаются не в полной мере, что и определяет изменения состава донных отложений по длине реки.

В сравнении с долиной в русловых отложениях уровень содержания изученных химических элементов заметно меньше (табл. 3). Пойменные отложения в целом занимают промежуточное положение между русловыми и долинными и в целом соответствуют промежуточным (между руслом и долиной) значениям интенсивности водообмена. Хотя в створе II концентрации ряда элементов в пойменных и долинных отложениях примерно равны или близки друг к другу, а минимальные содержания Cl и S в среднем приурочены к пойме. Это объясняется дополнительным усилением разрушения хлор- и серосодержащих соединений при чередовании затопления поймы весной и контакта твердого материала с атмосферным воздухом и растительностью в летне-осеннюю межень (см. табл. 3).

Анализ химического состава фракций пойменных и долинных отложений не проводился. Но были выявлены степенные обратные зависимости между диаметрами частиц вероятностью 10% и содержанием железа и титана (R^2 = 0.42 и 0.67, соответственно) во фракции до 1 мм с максимумами для частиц с диаметром 0.02 мм и менее, что согласуется с выводами о распределении химического состава почв овражной сети [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внутригодовые изменения химического состава вод р. Омутной в пределах Южно-Александровского участка Туганского россыпного узла в целом характеризуются увеличением от весеннего половодья до зимней межени содержаний веществ, для которых характерна, прежде всего, растворенная форма миграции – Ca, Mg, Na, K, Cl, S. Напротив, для веществ с преобладанием взвешенной формы миграции (Fe, Y, La, Ce) от-

Таблица 3. Химический состав фракции донных отложений менее 1 мм 03.11.2018, мг/кг

Элемент	Русло			Пойма			Долина		
	Створ			Створ			Створ		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Ca	390.4	663.0	884.4	685.2	1944.6	496.4	1719.1	1660.2	2434.8
Mg	226.8	244.8	369.2	467.1	1056.1	309.4	1153.8	959.3	1315.5
Na	14.0	13.1	19.7	12.5	49.8	4.3	29.0	55.9	34.5
K	87.3	79.7	96.9	141.1	323.8	106.5	368.8	392.9	254.9
Cl	17.6	10.0	73.4	13.3	34.3	10.0	23.5	52.2	54.6
S	406.6	311.3	369.9	0.0	279.1	0.0	539.9	1278.0	725.2
P	134.4	115.3	174.5	137.6	362.9	92.9	341.4	306.9	395.7
Si	190.3	128.1	226.7	299.0	358.8	172.9	435.2	316.3	473.6
Fe	2404.5	2128.6	2192.7	2224.6	5581.8	1759.2	6152.5	4038.1	6637.9
Al	536.1	514.8	806.9	1156.0	2720.7	683.2	2872.9	2289.7	3066.3
Ti	8.10	7.36	14.83	11.51	14.72	10.42	17.05	15.73	18.99
Cr	1.462	1.446	2.685	2.562	6.307	1.702	6.899	5.621	7.398
Mn	35.1	150.7	74.0	60.7	381.5	43.2	278.3	161.8	282.9
Ni	1.95	2.03	2.62	3.17	6.87	2.26	7.57	6.02	8.36
Cu	1.45	1.85	3.92	4.86	8.74	4.03	8.51	7.49	9.74
Zn	4.57	8.08	8.87	8.32	23.70	7.30	19.91	18.46	44.68
As	1.35	0.87	0.87	0.95	3.53	0.82	2.71	1.78	2.81
Y	1.33	1.37	1.93	2.11	4.16	1.72	5.28	4.17	5.01
Zr	0.71	0.66	1.28	0.99	2.05	0.92	2.21	1.93	2.67
Cd	0.001	0.000	0.010	0.000	0.065	0.004	0.061	0.034	0.065
Ba	7.27	7.50	12.02	10.76	35.67	8.64	34.34	21.87	37.13
Au	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	0.00005	0.00005	0.00011	<0.00005
Hg	0.051	0.008	0.047	0.061	0.087	0.070	0.185	0.015	0.776
Pb	1.64	1.86	3.44	2.38	5.35	1.59	5.44	4.41	5.74
La	3.24	2.89	4.35	4.25	6.56	3.68	7.90	6.75	6.92
Ce	6.35	5.78	8.81	8.44	14.37	7.82	17.66	14.44	14.77
Sm	0.59	0.58	0.80	0.80	1.37	0.64	1.66	1.47	1.60
Th	0.58	0.57	1.37	0.90	1.67	0.67	1.67	1.43	1.62
U	0.06	0.07	0.16	0.10	0.27	0.08	0.28	0.22	0.28

мечены максимумы валового содержания весной и минимумы – в зимний период. Уровень содержания прочих веществ, миграция которых осуществляется в виде коллоидов, либо существенно зависит от геохимической среды и влияния биоты (P, Si, Ni, Cu, Zn, Pb и ряд других элементов), изменяется в течение года менее заметно.

В изменении химического состава вод в пределах рассмотренного участка 11.6–18.4 км от истока сначала заметна роль подземных вод, заключающаяся в увеличении суммы главных ионов и подкислении среды. Затем, по мере продвижения по руслу, большую роль оказывают процессы взаимодействия в системе “вода–порода”, проявля-

ющиеся в увеличении минерализации, подщелачивании среды, при увеличении и органических веществ. Также от истока к устью прослеживается рост взвешенной формы миграции веществ при увеличении содержания взвешенных частиц и твердого стока.

Пространственно-временные изменения химического состава кислотных вытяжек из донных отложений (фракция с диаметром менее 1 мм) в целом проявляются слабее, чем соответствующие изменения химического состава речных вод. Это объясняется нелинейной связью геохимических показателей речных вод и донных отложений [14]. Для относительно заметного проявления этих связей для рек Сибири требуется время, примерно соответствующее движению водных масс на участке не менее 11–20 км [18].

Для малых рек протяженностью менее 20 км, как в случае р. Омутной, химический и минеральный состав донных отложений часто изменяется в зависимости от сочетания локальных гидрологических и геологических условий – увеличения размыва дна и берегов в сужениях русла, выщелачивания подстилающих коренных пород в результате речной эрозии, поступления в русло подземных вод с повышенным (или пониженным) содержанием тех или иных химических элементов и так далее.

Все эти факторы определяют специфические для малых рек конкретных геохимических провинций площадь и время взаимодействий в системе “вода–порода”. В рассматриваемом случае (р. Омутной) они способствуют: 1) аккумуляции многих химических элементов на участках с наименьшей интенсивностью водообмена (участки долины, в настоящее время практически не затапливаемые, но подверженные затоплению ранее); 2) максимальной изменчивости концентраций целого ряда веществ в пойменных отложениях. С учетом этого можно предположить, что наибольшие концентрации рудных элементов в пределах ореолов россыпных месторождений будут формироваться при относительно устойчивом (в геологическом отношении) снижении интенсивности водообмена.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

FUNDING

The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 18-55-80015 and 17-05-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
2. *Виноградова О.В., Хмелева Н.В.* Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. 171 с.
3. ГОСТ 17.1.2.04-77. Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 22 с.
4. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Издательство стандартов, 1984. 5 с.
5. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2018. 5 с.
6. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2018. 52 с.
7. ГОСТ 28492-90. Геохимические методы поисков твердых полезных ископаемых. Термины и определения. М.: Министерство геологии СССР, 1990. 6 с.
8. *Касимов Н.С., Корляков И.Д., Кошелева Н.Е.* Распределение и факторы аккумуляции тяжелых металлов и металлоидов в речных донных отложениях на территории г. Улан-Удэ // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 3. С. 380–395.
9. *Клюев Н.Н.* Природно-ресурсная сфера России и тенденции ее изменения // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. С. 303–315.
10. *Колубаева Ю.В.* Гидрогеохимия северо-восточной части Колывань-Томской складчатой зоны: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2015. 22 с.
11. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
12. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. № 2. Ч. II. 264 с.
13. Недра России. В 2-х т. Т. 1. Полезные ископаемые / Под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смыслова. СПб.–М.: Горный ин-т, Межрегион. центр по геол. картографии, 2001. 547 с.
14. *Никаноров А.М.* Об избирательной реакции водных экосистем на антропогенное воздействие // Докл. Академии наук. 2014. Т. 459. № 4. С. 1573–1575.
15. *Парначев В.П., Архипов А.Л.* Минералы Томской области. Томск: Изд-во “Печатная мануфактура”, 2012. 84 с.
16. *Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.

17. Россыпные месторождения России и других стран СНГ. Минерагения, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы / Отв. ред. Н.П. Лаверов, Н.Г. Патык-Кара. М.: Научный мир, 1997. 479 с.
18. *Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Лепокурова О.Е.* Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 7. С. 43–56.
19. *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.
20. *Савичев О.Г., Мазуров А.К., Рудмин М.А., Хващевская А.А., Даулетова А.Б.* Изменения химического состава кислотных вытяжек по глубине торфяной залежи внутриболотных экосистем Васюганского болота (Западная Сибирь) // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 101–116.
21. *Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н.* Металлы в гранулометрических фракциях почв овражной системы (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 18–28.
22. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1 : 200000. М.: ИМГРЭ (Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов РАН), 2002. 92 с.
23. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровинчака. Кемерово: ООО “Сарс”, 2001. 214 с.
24. *Шилькрот Г.С.* Механизмы, управляющие химическим составом речных и озерных вод // Изв. РАН. Сер. географ. 1998. № 4. С. 42–59.
25. *Янин Е.П.* Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). М.: Изд-во НП “АРСО”, 2018. 415 с.
26. *Shvartsev S.L.* Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry Int. 2008. V. 46. № 13. P. 1285–1398.
27. *White W.M.* Geochemistry. NY, USA: A John Wiley&Sons, Ltd., 2013. 660 p.

Spatiotemporal Changes in River Waters and Bottom Sediments Composition Within the Tugan Placer Deposit (Tomsk Oblast)

O. G. Savichev[1, *], V. A. Domarenko[1], and O. L. Lepokurova[1, 2, **]

[1]*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

[2]*Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russia*

**e-mail: OSavichev@mail.ru*

***e-mail: LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru*

The changes in the chemical and mineral composition of bottom sediments and waters of the Omutnaya River (the element of the Omutnaya–Kirghizka–Tom–Ob river system) during the main phases of the water regime in 2018–2019 within the planned Tugan placer deposit (ore minerals—ilmenite and zircon) have been studied. Geochemical parameters were estimated using an inductively coupled plasma mass spectrometry method. It was obtained that the spatiotemporal changes in the gross contents of chemical elements are generally interrelated with their migration forms. General increase in the concentrations of substances in suspended form is predominant and noted in spring floods, with dissolved—in the winter low-water period. Changes in the chemical composition of bottom sediments (fraction up to 1 mm) during the year and from the source to the mouth of the river due to the influence of local geological and hydrological factors are weaker than the corresponding changes in the chemical composition of river waters. Based on the studies, it was shown that the maximum concentrations of ore elements within the halos of placer deposits are most likely under conditions of a relatively stable (geologically) decrease in the intensity of water exchange.

Keywords: spatiotemporal changes, chemical composition, bottom sediments, river waters, Tugan deposit, Western Siberia

REFERENCES

1. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
2. Vinogradova O.V., Khmeleva N.V. *Ruslovye protsessy i formirovanie allyuvial’nykh rossypei zolota* [Channel Processes and the Formation of Alluvial Gold Placers]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2009. 171 p.
3. GOST 17.1.2.04-77. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsii rybokhozyaistvennykh vodnykh ob’ektov* [Nature Protection. Hydrosphere. Idices of State and Regulations for Valuation Survey of

Fishery Waters]. Moscow: Izd. Standartov Publ., 2000. 22 p.

4. GOST 17.1.5.01-80. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznennost'* [Nature Protection. Hydrosphere. General Requirements for Sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis]. Moscow: Izd. Standartov Publ., 1984. 5 p.
5. GOST 17.4.3.01-2017. *Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [Nature Protection. Soils. General Requirement for Sampling]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 5 p.
6. GOST 25100-2011. *Grunty. Klassifikatsiya* [Soils. Classification]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 52 p.
7. GOST 28492-90. *Geokhimicheskie metody poiskov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Terminy i opredeleniya* [Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits. Terms and Definitions]. Moscow: Ministerstvo Geologii SSSR, 1990. 6 p.
8. Kasimov N.S., Korlyakov I.D., Kosheleva N.E. Distribution and accumulation factors of heavy metals and metalloids in river bottom sediments in the city of Ulan-Ude. *Vestn. RUDN, Ser. Ekol. i Bezopasnost' Zhiznedeyatel'nosti*, 2017, vol. 25, no. 3, pp. 380–395. (In Russ.).
9. Klyuev N.N. Russia's natural-resource sphere and trends in its development. *Her. Russ. Acad. Sci*, 2015, vol. 85, pp. 303–315.
10. Kolubaeva Yu.V. Hydrogeochemistry of the northeastern part of the Kolyvan-Tomsk folded zone. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation*. Tomsk: Tomsk Polytech. Univ, 2015. 22 p.
11. Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Groundwater Geochemistry. Theoretical, Applied and Environmental Aspects]. Moscow: Nauka Publ., 2004. 677 p.
12. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam* [Manual for Hydrometeorological Stations and Posts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975, no. 2, part 2. 264 p.
13. *Nedra Rossii* [Bowels of Russia]. Vol. 1: *Poleznye iskopaemye* [Minerals]. Mezhelovskii N.V., Smyslov A.A., Eds. St. Petersburg, M.: Gornyi Inst., Mezhreg. Tsentr po Geol. Kartografii, 2001. 547 p.
14. Nikanorov A.M. Selective response of water ecosystems to the anthropogenic effect. *Dokl. Earth Sci.*, 2014, vol. 459, pp. 1573–1575.
15. Parnachev V.P., Arkhipov A.L. *Mineraly Tomskoi oblasti* [Minerals of the Tomsk Region]. Tomsk: Pechatnaya Manufaktura Publ., 2012. 84 p.
16. Perel'man A.I. *Geokhimiya elementov v zone gipergeneza* [Geochemistry of Elements in the Zone of Hypergenesis]. Moscow: Nedra Publ., 1972. 288 p.
17. *Rossypnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG. Minerageniya, promyshlennye tipy, strategiya razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy* [Alluvial Deposits of Russia and Other CIS Countries. Minerageny, Industrial Types, the Development Strategy of the Mineral Resource Base]. Laverov N.P., Patyk-Kara N.G., Eds. Moscow: Nauchnyi Mir Publ., 1997. 479 p.
18. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Lepokurova O.E. Transformation of mineral composition of river sediments from sources to mouth of rivers. *Izv. Tomsk. Polytech. Univ. Inzhinir. Georesur.*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 43–56. (In Russ.).
19. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Composition of the Tom' River bottom sediments and their equilibrium with river water. *Geoekol.*, 2003, no. 2, pp. 108–119. (In Russ.).
20. Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Khvashchevskaya A.A., Dauletova A.B. Changes in chemical composition of acid extracts on depth of peat deposit of the Vasyugan mire ecological systems (Western Siberia). *Izv. Tomsk Polytech. Univ. Inzhinir. Geores.*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 101–116. (In Russ.).
21. Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseeva E.N. Grain size distribution of metals in soils of a gully system (southeastern Smolensk-Moscow Upland). *Vest. Mosk. Gos. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 18–28. (In Russ.).
22. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1 : 200000* [Requirements for the production and results of multipurpose geochemical mapping at a scale of 1 : 200000]. Moscow: Inst. Mineral., Geokhim. Kristallokhim. Redkikh Metallov RAN, 2002. 92 p.
23. *Tsirkon-il'menitovye rossypnye mestorozhdeniya kak potentsial'nyi istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zircon-ilmenite Placer Deposits as a Potential Source of Development for the West Siberian Region]. Tribunskii E.N., Parovinchak M.S., Eds. Kemerovo: Sars Publ., 2001. 214 p.
24. Shil'krot G.S. Mechanisms that control the chemical composition of river and lake waters. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1998, no. 4, pp. 42–59. (In Russ.).
25. Yanin E.P. *Tekhnogennye rechnye ily (usloviya formirovaniya, veshchestvennyi sostav, geokhimicheskie osobennosti)* [Man-made River Silts (Formation Conditions, Material Composition, Geochemical Features)]. Moscow: ARSO Publ., 2018. 415 p.
26. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochem. Intern.*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
27. White W.M. *Geochemistry.* N.Y.: John Wiley&Sons, 2013. 660 p. FUNDING The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects no. 18-55-80015 and 17-05-00042.