

УДК 504.45:504.054

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой

Е.А. Цветкова[✉], В.И. Полетаева, М.В. Пастухов

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, г. Иркутск

[✉]e.tsvetkova@igc.irk.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена напряженной экологической ситуацией в зоне воздействия крупного промышленного комплекса г. Усо́лья-Сибирского на р. Ангаре, поиском источников и путей поступления загрязняющих веществ в разные по техногенной нагрузке периоды, необходимым для оценки и прогноза происходящих изменений в водной экосистеме. *Цель:* изучить химический состав сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского в разные по техногенной нагрузке периоды и оценить их воздействие на гидрохимические показатели воды р. Ангары. *Объекты:* сточные воды промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского и воды р. Ангары в импактном районе в период с высокой техногенной нагрузкой (2010 г.) и в период ее снижения (2020 г.). *Методы.* Химический состав сточных и природных вод определен в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» Института Геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск, Россия). Измерение концентраций главных ионов в водах проведено с использованием комплекса общепринятых в гидрохимии методов (атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная пламенная спектрометрия, спектрофотометрия, потенциометрия, титриметрия), концентрации Hg – с помощью метода атомно-абсорбционной спектрометрии, концентрации других микроэлементов – с помощью метода масс-спектрометрии (ISP MS). *Результаты.* Обнаружены значительные изменения химического состава сточных вод промышленной зоны в разные по техногенной нагрузке периоды, отражающие преобразования источников загрязнения в ходе работ по ликвидации техногенных объектов территории. За десятилетний период особо значимые изменения выражены в существенном снижении концентраций Hg, Al, Cs, Ti, Cr, Cl⁻ и Na⁺ и увеличении концентраций Mn в сточных водах промышленной зоны, что, в свою очередь, находит отражение в динамике гидрохимического состава вод р. Ангары в импактном районе. В 2010 г. наблюдалось закономерное последовательное снижение концентраций большинства элементов по мере удаления вод р. Ангары от техногенных источников. В то время как в 2020 г. их пространственное распределение противоположно: при значительном снижении концентраций большинства исследуемых элементов на участке реки в 50 м ниже промышленных сбросов обнаружено их увеличение на более удаленных мониторинговых станциях (1,5 и 5 км), где концентрации Mn, Cu, Cd и Tl достигают наибольших величин. Несмотря на значительные изменения химического состава сточных вод в разные по техногенной нагрузке периоды, воды р. Ангары на всех мониторинговых станциях в зоне воздействия промышленного комплекса г. Усо́лья-Сибирского относятся к загрязненным.

Ключевые слова: загрязнение, главные ионы, микроэлементы, река Ангара, сточные воды

Благодарности: Исследование проведено по государственному заданию в рамках проекта № 0284-2021-0003.

Для цитирования: Цветкова Е.А., Полетаева В.И., Пастухов М.В. Характеристика сточных вод промышленной зоны г. Усо́лья-Сибирского и их влияние на гидрохимический состав р. Ангары в периоды с разной техногенной нагрузкой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 39–58. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

UDC 504.45:504.054

DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

Characteristics of wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe and its impact on hydrochemical composition of the Angara river during periods with different technogenic load

E.A. Tsvetkova[✉], V.I. Poletaeva, M.V. Pastukhov

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

[✉]e.tsvetkova@igc.irk.ru

Abstract. Relevance. Tense ecological situation in the impact zone of the large industrial complex of Usolye-Sibirskoe on the Angara river, search for sources and ways of pollutants inflow during different periods of technogenic load, necessary to assess and forecast the current changes in the aquatic ecosystem. **Aim.** To study chemical composition of wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe during different periods of technogenic load and assess their impact on hydrochemical parameters of the Angara river water. **Objects.** Wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe and Angara river waters in the impact area during the period of high technogenic load (2010) and the period of its reduction (2020). **Methods.** Chemical composition of wastewater and natural water was determined in the Center of Collective Use «Isotope-Geochemical Investigations» of Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk, Russia). Concentrations of major ions in waters were measured using a set of methods generally accepted in hydrochemistry (atomic absorption and atomic emission flame spectrometry, spectrophotometry, potentiometry, titrimetry), Hg concentration was measured using atomic absorption spectrometry, concentrations of other trace elements – using mass spectrometry method (ISP MS). **Results.** The authors have revealed significant changes in chemical composition of wastewater of the industrial zone in different periods of technogenic load, reflecting the transformation of pollution sources during the liquidation of technogenic objects of the area. Over the ten-year period particularly important changes are expressed in a significant decrease of Hg, Al, Cs, Ti, Cr, Cl⁻ and Na⁺ concentrations and increase of Mn concentrations in the wastewater of the industrial zone. This is reflected, in its turn, in the dynamics of hydrochemical composition of Angara river water in the impact area. In 2010 a regular consecutive decrease of most of elements concentrations was observed with distance of Angara river waters from technogenic sources. In 2020 their spatial distribution is opposite: with a significant decrease in concentrations of most of the studied elements at the river site 50 m downstream of industrial discharges, their increase was detected at more distant monitoring stations (1.5 and 5 km) where Mn, Cu, Cd and Tl concentrations were the highest. Despite significant changes in wastewater chemical composition in different periods of technogenic load, the Angara river waters at all monitoring stations in the impact zone of the industrial complex of Usolye-Sibirskoe are polluted.

Keywords: pollution, major ions, trace elements, Angara river, wastewater

Acknowledgements: The study was carried out under the state assignment within the framework of project no. 0284-2021-0003.

For citation: Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Characteristics of wastewater from the industrial zone of Usolye-Sibirskoe and its impact on hydrochemical composition of the Angara river during periods with different technogenic load. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 39–58. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4314

Введение

Сточные воды являются одним из основных источников загрязнения водных экосистем. Поступление со сточными водами загрязняющих веществ в водоемы в значительной мере ухудшает качество водных ресурсов, создавая проблему общемирового масштаба [1–3]. Наибольшую опасность представляют промышленные сточные воды, характеризующиеся высокими концентрациями потенциально токсичных элементов [4]. В первую очередь, поступление сточных вод изменяет гидрохимический состав водоемов, который является главным детерминантом условий существования всей био-

тической составляющей [5, 6]. Увеличение концентраций элементов техногенного происхождения в водной среде может привести к токсикологическому воздействию на гидробионтов различных трофических уровней, а в итоге и к нарушению гомеостаза всей водной экосистемы [7–9].

Река Ангара, вытекающая из оз. Байкал, имеет большое значение для населения Иркутской области. Её водные ресурсы используются в питьевых, рекреационных, гидроэнергетических и рыбохозяйственных целях. Вместе с этим в границах ее водосборного бассейна расположены крупные промышленные комплексы, представленные ме-

таллургическими, нефтеперерабатывающими, лесозаготовительными и химическими производствами и оказывающие непосредственное влияние на химический состав всех компонентов экосистемы водоема. Поступление в р. Ангару загрязненных вод различного генезиса – хозяйственно-бытовых, производственных, сельскохозяйственных, а также поверхностного стока во многом определяет гидрохимический режим реки. Наиболее масштабная промышленная зона расположена в г. Усоля-Сибирском, в междуречье р. Ангары и ее притока – р. Белой (рис. 1). Промышленная зона включает в себя производства химической, фармацевтической и энергетической отраслей, предприятия которых обеспечивают поступление широкого круга органических и неорганических загрязнителей в окружающую среду Приангарья на протяжении нескольких десятков лет. Самым крупным предприятием промышленной зоны г. Усоля-Сибирского являлось организованное в 1936 г. предприятие «Усольехимпром» (УХП), производившее разнообразную химическую продукцию (кремнийорганических полимеры, карбид кальция, метилцеллюлозы, каустической соды, металлического натрия, эпихлоргидрина и т. д.). Крупномасштабной экологической проблемой, вызванной деятельностью этого предприятия, является широко известное ртутное загрязнение геосистем Иркутской области, связанное с производством хлора и каустической соды методом ртутного электролиза. Результаты эколого-геохимических исследований импактного района показали чрезвычайно высокие концентрации Hg в почве в районе предприятия УХП, водах и донных осадках р. Ангары и созданного на ней Братского водохранилища [10, 11]. Закрытие цеха ртутного электролиза (1998 г.) и полная остановка предприятия (2012 г.) предопределяли снижение техногенной нагрузки на прилегающие к промышленной зоне г. Усоля-Сибирского экосистемы, в том числе и р. Ангары. Однако техногенное воздействие на окружающую среду Приангарья продолжается с функционирующими до сих пор предприятиями промышленной зоны. Помимо этого, в настоящее время проводятся работы по демеркуризации цеха ртутного электролиза и других высокотоксичных технологических объектов предприятия УХП, а значит, вероятность поступления веществ техногенного генезиса в окружающую среду существенно возрастает. В таких условиях принципиально важным становится изучение химического состава сточных вод и вод р. Ангары в зоне их влияния, а также проведение мониторинговых исследований, позволивших бы определить уровень загрязнения реки с учетом ретроспективной составляющей. В связи с этим целью работы стало: а) инвентаризация поступающих в р. Ангару сточных вод промышленной зоны г. Усоля-Сибирского; б) оценка воздействия сточных вод на гидрохимический состав р. Ангары.

Материалы и методы

Объекты исследования

Для изучения динамики химического состава сточных вод промышленной зоны г. Усоля-Сибирского и вод р. Ангары проведены исследования в разные по техногенной нагрузке периоды:

- 2010 г. – период с высокой техногенной нагрузкой. В пределах промышленной зоны г. Усоля-Сибирского функционируют градообразующее предприятие – «Усольехимпром», а также ряд крупных производств химической, фармацевтической, энергетической (ТЭЦ–11) и пищевой отраслей с соответствующими вспомогательными инженерными структурами, городские канализационно-очистные сооружения (КОС);
- 2020 г. – период снижения техногенной нагрузки. Цеха предприятия УХП остановлены, крупные производства промышленной зоны функционируют.

В 2010 и 2020 гг. пробы сточных вод организованных выпусков промышленной зоны г. Усоля-Сибирского отобраны из коллекторных сбросов предприятия УХП (выпуск 1 (точка отбора В1) и выпуск 2 (точка отбора В2), дренажной канавы (точка отбора ДК)) и канавы системы гидрозолоудаления от золоотвалных сооружений ТЭЦ-11 (точка отбора ГЗУ) (рис. 1). В 2020 г. дополнительно проведен отбор сточных вод из коллекторного сброса городских канализационно-очистных сооружений (точка отбора ПК). Помимо этого, для инвентаризации сточных вод территории промышленной зоны г. Усоля-Сибирского выполнено рекогносцировочное обследование, позволившее охарактеризовать сточные воды в соответствии с их территориальной принадлежностью. Выявлено, что канава гидрозолоудаления вмещает в себя два смешивающихся водотока: левый (точка отбора С1) и правый (точка отбора С2) (рис. 1). Сточные воды канавы гидрозолоудаления отобраны в месте слияния этих водотоков (точка отбора С3) и ниже по течению вблизи р. Ангары (точка отбора ГЗУ). Ниже точки отбора ГЗУ в канаву гидрозолоудаления впадает малобитный водоток (МВ), который разгружается на склоне оврага и через 20 м поступает в канаву гидрозолоудаления. Для уточнения генезиса сточных вод отобраны образцы воды в надшламмовых водах золоотвалных сооружений ТЭЦ-11 (точка отбора НВ).

Образцы воды р. Ангары в районе промышленной зоны г. Усоля-Сибирского отобраны в 2010 и 2020 гг. на условно фоновом участке (около 10 км выше по течению от промышленной зоны) (точка отбора А1) и на удаленности 50 м ниже от канавы системы гидрозолоудаления (точка отбора А2), 1,5 км (точка отбора А3) и 5 км (точка отбора А4) ниже от всех промышленных сбросов.

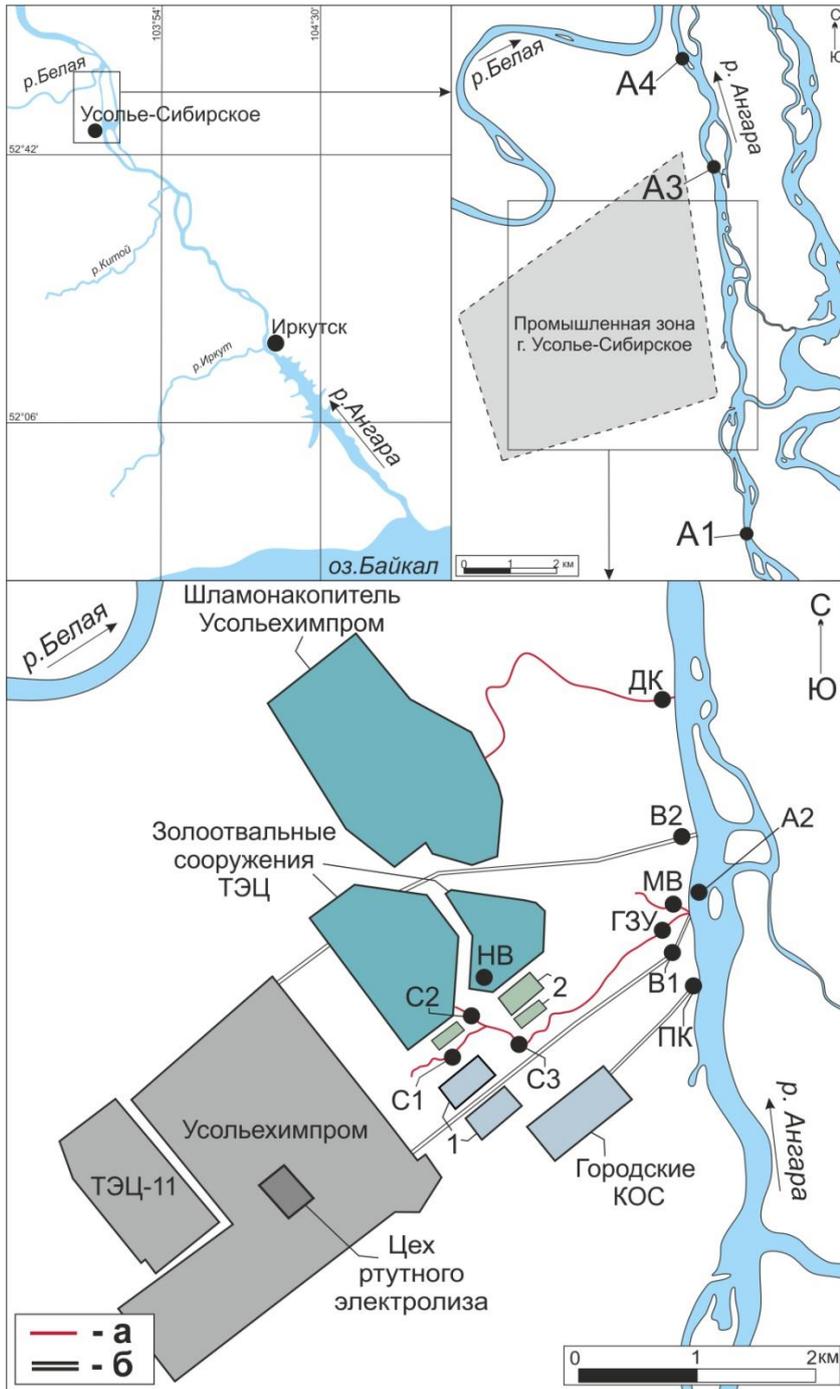


Рис. 1. Карта-схема района работ и точки отбора проб: а) сточные воды, поступающие в р. Ангару по поверхности; б) коллекторные выпуски сточных вод; 1 – канализационно-очистные сооружения Усольехимпром; 2 – станции нейтрализации жидких стоков Усольехимпром; точки отбора: сточные воды: ПК – приемная камера городских стоков, В1, В2, ДК – организованные выпуски Усольехимпром; С1, С2, МВ – водотоки, наполняющие канаву гидрозолоудаления; С3 и ГЗУ – канавы гидрозолоудаления; НВ – надшламовые воды золоотвальных сооружений ТЭЦ-11; р. Ангара: А1 – фоновый участок р. Ангары; А2 – участок р. Ангары на удаленности 50 м от выпуска канавы гидрозолоудаления; А3 – участок на удаленности 1,5 км от всех промышленных выпусков; А4 – участок на удаленности 5 км от всех промышленных выпусков

Fig. 1. Map-counter of study area and location of sampling sites: а) wastewater flowing into the Angara river by the surface; б) collector wastewater effluents; 1 – wastewater treatment facilities of Usoliekhimprom; 2 – liquid effluent neutralization plants of Usoliekhimprom; sampling sites: wastewater: ПК – intake chamber of town effluents; В1, В2, ДК – regulated effluents of Usoliekhimprom; С1, С2, МВ – watercourses filling the ash removal ditch; С3, ГЗУ – ash removal ditch; НВ – ash pond top water of the thermal power plant-11; the Angara river: А1 – background site of the Angara river; А2 – the Angara river site 50 m away from outlet of ash removal ditch; А3 – 1.5 km away from all industrial outlets; А4 – 5 km away from all industrial outlets

Химический анализ образцов и методы экологической оценки загрязнения

Определение концентраций элементов в образцах воды осуществлено в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института Геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия). Концентрации HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ определены по стандартным методикам, принятым для общего гидрохимического анализа: атомно-абсорбционная и атомно-эмиссионная пламенная спектрометрия, спектрофотометрия, потенциометрия, титриметрия. Концентрации 23 микроэлементов (Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Tl, Pb, U, Ga и Ge) определены методом масс-спектрометрии с индуктивной связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре высокого разрешения с двойной фокусировкой ELEMENT-2. Определение концентраций Hg в воде проведено атомно-абсорбционной спектрометрией на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой РП-91.

Для определения степени воздействия сточных вод на р. Ангару применены однофакторный индекс загрязнения (pollution factor index CF) [12] и индекс нагрузки загрязнения (pollution load index PLI) [13], которые используются для оценки экологического состояния водной среды [14, 15]. Индексы рассчитаны для участков реки на удаленности 50 м, 1,5 и 5 км от промышленных сбросов.

CF используется для учета загрязнения отдельного элемента в каждом образце:

$$CF = \frac{C_i}{C_0},$$

где C_i – тестируемая концентрация элемента; C_0 – концентрация элемента в воде условно фонового участка.

PLI используется для расчета суммарного загрязнения каждого образца:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \cdot CF_2 \cdot \dots \cdot CF_n},$$

где CF – однофакторный индекс загрязнения для определенного элемента. По полученным значениям PLI образцы воды относятся к следующим категориям: $PLI < 0$ – незагрязненные, $0 < PLI \leq 1$ – содержащие базовые уровни загрязняющих веществ, $1 < PLI \leq 10$ – загрязненные, $10 < PLI \leq 100$ – сильно загрязненные, $PLI > 100$ – прогрессивное ухудшение окружающей среды.

Результаты и обсуждение

Сточные воды

Канализационные очистные сооружения
 г. Усо́лья-Сибирского

Наряду с промышленными сточными водами постоянным источником поступления элементов-загрязнителей в р. Ангару в г. Усо́лье-Сибирском являются хозяйственно-бытовые сточные воды го-

родских очистных сооружений. После механической и биологической очистки сточные воды накапливаются в приемной камере (ПК), из которой поступают непосредственно в реку по проложенному по ее дну трубопроводу. Воды ПК HCO_3^- – Cl – Ca – Na с самой низкой величиной минерализации (604 мг/л) из всех стоков промышленной зоны характеризуются окислительными условиями ($E_h=228$ мВ) и около-нейтральной реакцией среды ($pH=7,28$).

Микроэлементный состав городских сточных вод КОС не выделяется аномально высокими концентрациями относительно промышленных выпусков (табл. 1). Все концентрации микроэлементов ниже предельно-допустимых значений.

Таблица 1. Концентрации микроэлементов в сточных водах промышленной зоны, мкг/л

Table 1. Trace elements concentrations in wastewater from an industrial zone, µg/l

Микроэлементы Trace elements	ПДК/МРС		ПК	С1	С2	С3	МВ
	пв.*	рбх.**					
Li	30	80	11	16	10	14	173
B	500	100	22	342	760	299	244
Al	200	40	9,2	9,3	57,0	4,8	3,0
Ti	100	60	0,204	3,03	12,40	0,57	1,70
V	100	1	0,59	9,70	58,00	6,20	0,45
Cr	50	20	0,71	1,50	3,81	0,67	<ПО
Mn	100	10	5,4	159	225	111	2351
Fe	300	100	26,7	166	419	84	241
Co	100	10	0,08	0,26	0,73	0,32	2,30
Ni	20	10	6,7	9,1	35,0	6,5	26,6
Cu	1000	1	0,7	0,69	3,99	0,90	5,20
Zn	5000	10	9,4	1,7	1,9	7,0	26,8
As	10	50	1,5	22,0	41,1	13,5	136,1
Sr	7000	400	385	1092	514	982	7885
Mo	70	1	0,9	5,4	39,0	6,7	4,2
Cd	1	5	0,01	0,05	0,28	0,06	3,98
Sb	0,5	-	0,17	0,50	0,65	0,28	-
Cs	-	1000	0,121	0,006	0,017	0,011	0,778
Tl	0,1	-	0,002	0,008	0,007	0,008	3,264
Pb	10	6	0,15	2,34	1,55	3,44	39,29
U	15	-	0,68	1,31	2,11	1,62	16,69
Hg	0,5	0,01	0,006	0,840	2,360	0,131	0,004
Ga	-	-	0,115	0,09	0,44	0,13	4,08
Ge	-	-	0,071	0,45	1,24	0,27	3,91

Примечание: ПК – приемная камера городских КОС, С1 – правый водоток канавы гидрозолаудаления, С2 – левый водоток канавы гидрозолаудаления, С3 – канава гидрозолаудаления в месте слияния С1 и С2, МВ – малодобитный водоток, поступающий в канаву гидрозолаудаления ниже точки отбора ГЗУ; пв.* – предельно допустимая концентрация (ПДК) веществ для водных объектов питьевого значения [16], рбх.** – для водных объектов рыбохозяйственного значения [17].

Notes: ПК – intake chamber of municipal wastewater treatment plants, С1 – right-hand watercourse of the ash removal ditch, С2 – left-hand watercourse of the ash removal ditch, С3 – ash removal ditch at the confluence of С1 and С2, МВ – marginal watercourse, entering the ash removal ditch below the sampling point of ГЗУ (ARD); пв.* – maximum permissible concentration (MPC) of substances for water bodies of drinking significance [16], рбх.** – for water bodies of fishery significance [17].

Коллекторные сбросы предприятия «Усольехимпром» (В1и В2)

В период работы предприятия УХП промышленный коллекторный выпуск 1 осуществлял сброс сточных вод (расход 132384 м³/сут) непосредственно в р. Ангару. Основной вклад в него вносили стоки станции нейтрализации и системы промливневой канализации предприятия [18]. В 2020 г., несмотря на закрытие предприятия, сточные воды выпуска со значительно меньшим расходом поступают через поврежденную трубу выпуска в канаву гидрозолоудаления. Гидрохимические характеристики В1 демонстрируют значительную вариабельность в межгодовом аспекте (рис. 2). В 2010 г. сточные воды Cl–Na с высокой величиной минерализации (16322 мг/л), слабо окислительными условиями (Eh=32 мВ) и слабокислой реакцией среды (pH=6,3). В 2020 г. для сточных вод В1 характерны слабоокислительные условия (Eh=47 мВ) и слабощелочная реакция среды (pH=7,8). Величина минерализации вод В1 (1404 мг/л) снизилась в 11,6 раз, основной ионный состав сменился на Cl–Mg–Na–Ca.

В разные по техногенной нагрузке периоды, наряду с изменением соотношения концентраций

главных ионов в водах В1, происходит трансформация его микроэлементного состава. В 2010 г. сточные воды характеризуются максимальными для всех промышленных выпусков концентрациями Li, B, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Sr, Cd, Sb, Cs, Tl, Pb, Ga и Ge (рис. 3). Сравнение с ПДК, установленными для водных объектов питьевого водоснабжения (ПДКпв) и рыбохозяйственного (ПДКрбх) значения, показало, что концентрации микроэлементов, за исключением Cr, Co, As, Cd, Cs, Pb и U, превышают величины нормативных показателей. В большей степени это относится к Hg (5ПДКпв и 239 ПДКрбх), Mn (2 ПДКпв и 20 ПДКрбх), Al (3 ПДКпв и 15 ПДКрбх), B (3 ПДКпв и 14 ПДКрбх), Mo (7 ПДКрбх), Sb (6 ПДКпв), V (5 ПДКрбх), Cu (4 ПДКрбх) и Ni (2 ПДКпв и 3 ПДКрбх). В период спада техногенной нагрузки (2020 г.) концентрации большинства микроэлементов (рис. 3) ниже уровня ПДК. Вместе с этим выделяются концентрации Mn (5 ПДКпв и 50 ПДКрбх), Sr (6 ПДКрбх), As (1 ПДКпв) и U (увеличение в 17 раз, по сравнению с 2010 г.), которые, напротив, значительно возросли.

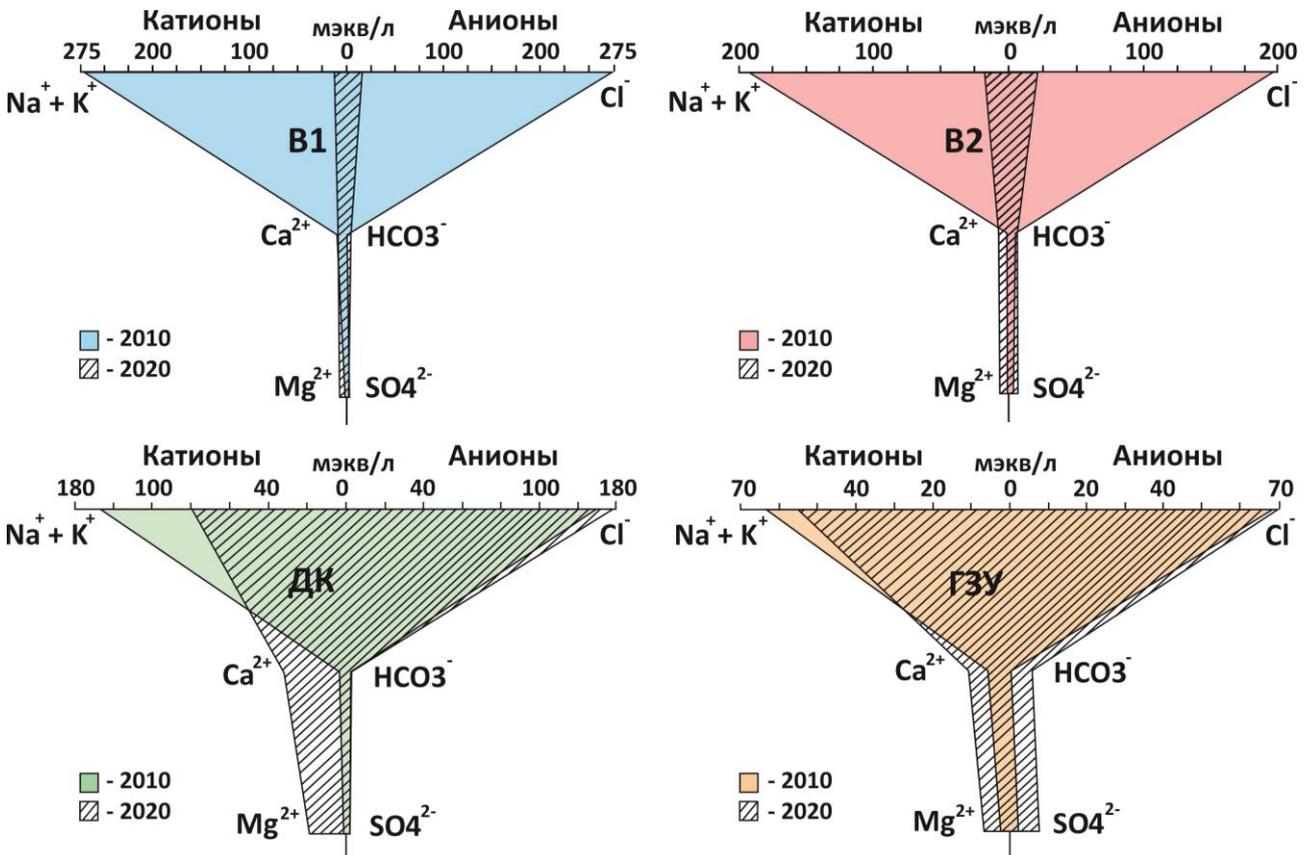


Рис. 2. Диаграммы Стиффа для сточных вод выпуска 1 (В1), выпуска 2 (В2), канавы ГЗУ и дренажной канавы (ДК) в 2010–2020 гг.

Fig. 2. Stiff diagram of the wastewater from effluent 1 (В1), effluent 2 (В2), ash removal ditch (ГЗУ) and drainage ditch (ДК) in 2010–2020

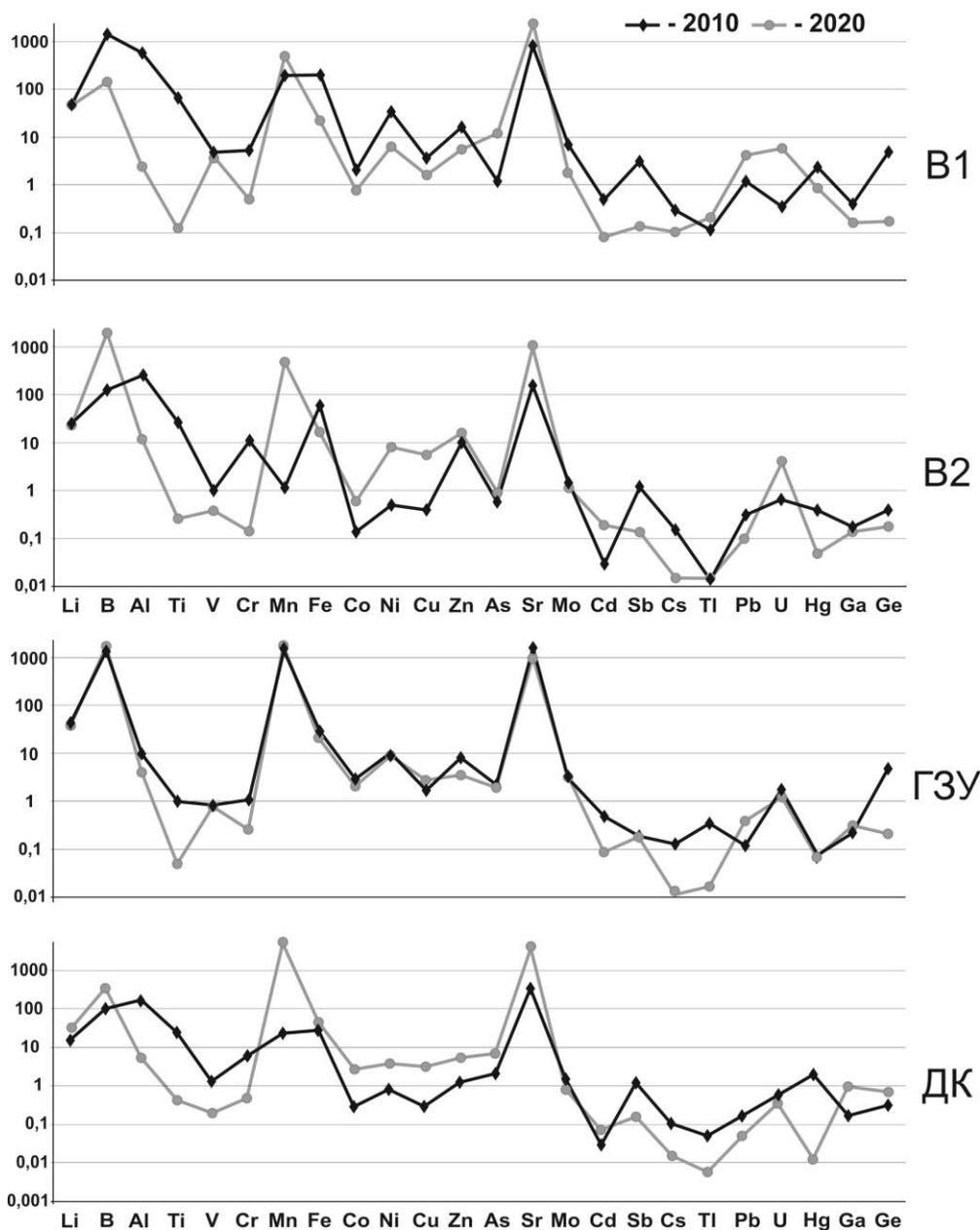


Рис. 3. Динамика концентраций микроэлементов в сточных водах выпуска 1 (B1), выпуска 2 (B2), канавы ГЗУ и ДК в 2010–2020 гг., мкг/л

Fig. 3. Dynamics of trace elements concentrations in wastewater from effluent 1 (B1), effluent 2 (B2), ash removal ditch (ГЗУ) and drainage ditch (ДК) in 2010–2020, µg/l

В 2010 г. в стоках B1 после станции нейтрализации была определена и максимальная для всех промышленных выпусков концентрация основного загрязнителя – Hg, составляющая 2,39 мкг/л (239 ПДКрбх и 5 ПДКпв). Следует отметить, что это значение находится в интервале концентраций (от 0,01 до 9,0 мкг/л), определенных в сточных водах B1 в течение ежемесячного трехлетнего мониторинга 2006–2008 гг. [19]. Высокие концентрации Hg в B1 в 2006–2008 и 2010 гг., несмотря на закрытие цеха ртутного электролиза, отражали специфику производства хлора и его производных методом

электролиза соляного раствора. В процессе электролиза водного раствора поваренной соли для получения газообразного хлора и едкого натра в качестве катода использовалась металлическая Hg. Помимо Hg, сточные воды обогащены Na⁺ и Cl⁻, а также рядом микроэлементов, в первую очередь, B, Mn, Fe и Al, характерных для подземных вод.

В 2020 г. концентрация Hg в B1 снижается (0,88 мкг/л), но остается повышенной, по сравнению с другими выпусками и ПДК. В работе [18] вариабельность концентраций Hg в сточных водах в период работы предприятия связывали не только

с производственными процессами, активизирующими эмиссию Hg из технологических объектов, но и со смывом соединений Hg поверхностными водами с высокозагрязненной промплощадки и прилегающей к ней территории. Спустя 22 года после остановки цеха ртутного электролиза на промплощадке УХП крупные очаги ртутного загрязнения обусловлены локализацией техногенной ртути под цехом ртутного электролиза, строительными конструкциями зданий, шламами, производственными отходами и т. д. За годы деятельности УХП суммарное поступление Hg в окружающую среду достигло 1327 т, из них 345 т накоплено в грунте под цехом ртутного электролиза, 620 т – в шламонакопителе УХП [20]. Поверхностный слой почв и грунтов (до 25 см) промплощадки УХП и прилегающих территории содержит порядка 24 т Hg [18].

Значительное уменьшение количества растворенных веществ и изменение основного гидрохимического состава В1 в 2020 г., с одной стороны, указывают на спад техногенной нагрузки от закрытого предприятия. С другой стороны, по-прежнему высокие концентрации Hg, V, Cu, Cs, Tl и Pb, а также увеличение концентраций Mn, As, U и Sr определяют вклад загрязненной системы промышленно-ливневой канализации, очагов крупных локализаций элементов техногенного происхождения на территории УХП и поверхностного стока с высокозагрязненных территорий.

Промышленный выпуск 2, как и выпуск 1, – часть организованной коллекторной водоотводной системы предприятия УХП. В период работы предприятия формирование сточных вод выпуска (расход 65904 м³/сут) происходило в основном из осветленных вод шламонакопителя предприятия и стоков системы промышленно-ливневой канализации [18]. В 2010 г. воды В2 Cl–Na с величиной минерализации, составляющей 11926 мг/л, обладают щелочной реакцией среды (рН=8,9) и окислительными условиями (Eh=72 мВ). После закрытия предприятия (2012 г.) сброс сточных вод В2 в р. Ангара прекратился [21], однако в 2020 г. поток со значительно меньшим, по сравнению с 2010 г., расходом воды возобновился. В 2020 г. гидрохимический состав В2 характеризуется также окислительными условиями (Eh=110 мВ) и слабощелочной реакцией среды (рН=8,1). Величина минерализации снизилась в 6 раз (2130 мг/л). Соотношение главных ионов изменилось в сторону уменьшения относительного содержания Cl⁻ и Na⁺ и увеличения HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ и Mg²⁺ (рис. 2).

В 2010 г. микроэлементный состав вод В2 (рис. 3) характеризуется высокими уровнями Hg (40 ПДКрбх), Al (1 ПДКпв и 7 ПДКрбх), Mo (2 ПДКрбх) и Sb (2 ПДКпв). В 2020 г. концентра-

ции Cs, Al, Cr и Ti значительно снижаются, Mn, V, Ni, Cu и Sr, напротив, повышаются до 46 ПДКрбх и 5 ПДКпв для Mn, 20 ПДКрбх и 4 ПДКпв для V, 6 ПДКрбх для Cu, 2 ПДКрбх для Sr. Кроме того, несмотря на отсутствие превышения ПДК, как и в В1, отмечен рост концентрации U (в 6 раз). Концентрация Hg в 2020 г. (0,05 мкг/л) значительно меньше, чем в 2010 г. (0,395 мкг/л), но все еще превышает нормативы. Тенденция, связанная с закрытием цеха ртутного электролиза, к снижению концентраций ртути была выявлена уже в 2000 г. [22]. Вместе с этим определено, что главным фактором, влияющим на содержание токсиканта в сточных водах выпуска, являлся плоскостной смыв ее адсорбированных форм с частицами грунта территории предприятия УХП.

Возобновление поступления сточных вод В2 в р. Ангара в 2020 г. совпало с началом работ по демеркуризации цеха ртутного электролиза. С целью уменьшения поступления атомарной Hg в атмосферу в ходе демонтажа конструкций цеха была создана водяная завеса, на которую было использовано 900 т воды. Таким образом, появление стока выпуска 2 в 2020 г. может быть связано с излишками воды, поступившими в коллекторную сеть предприятия во время проведения работ по ликвидации накопленного экологического ущерба. Повышение концентраций Hg в водах, используемых для завесы, в большей степени, определяется поступлением токсиканта из высокозагрязненной коллекторной сети предприятия. Изучение отложений коллекторной сети УХП определило их как потенциальный источник поступления Hg [19]. Установлено, что в пробах отложений коллекторной сети доля нерастворимого HgS в среднем составляет 30 %, а 70 % техногенной Hg способны переходить в водный раствор.

Дренажная канава (ДК)

На территории промышленной зоны г. Усолье-Сибирское расположен крупный шламонакопитель УХП площадью около 130 га. Спроектированное для хлорно-щелочного комбината сооружение было предназначено для хранения и отстаивания шлама и жидких отходов производства, в том числе для отделения и очистки рассола и станции нейтрализации. В период работы УХП дренажная канава (длина около 2000 м) использовалась для отвода излишков воды из шламонакопителя. По данным [23] в период интенсивной работы предприятия (2006–2008 гг.) основной ионный состав ее вод был HCO₃-Cl-Na или HCO₃-Na с высоким содержанием Ca²⁺. Минерализация изменялась от 2082 до 7921 мг/л. Такой состав сточных вод отражал технологические особенности предприятия, а также состав и свойства отходов шламонакопителя.

В 2010 г. основной ионный состав вод дренажной канавы $\text{Cl}-\text{Na}$ с минерализацией 7858 мг/л. Относительное содержание HCO_3^- уменьшилось, доминирующим стал Cl . Поступление сточных вод от шламонакопителя практически прекратилось в 2013 г. В 2020 г. дренажная канава представляет собой временный водоток, наполняемость которого обеспечивается поверхностным стоком с прилегающей территории и зависит от дождевых осадков и талых вод в период снеготаяния. Величина минерализации в водах ДК после закрытия предприятия, в отличие от В1 и В2, осталась в прежних пределах (7885 мг/л). Сточные воды ДК характеризуются окислительными условиями ($E_h=165$ мВ) и околонейтральной реакцией среды ($\text{pH}=7,31$). Трансформация основного ионного состава вод выражена в смене на $\text{Cl}-\text{Ca}-\text{Na}$ с увеличением относительного содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} (рис. 2).

Особенностью микроэлементного состава вод ДК в 2010 г. были максимальные, относительно всех стоков промышленной зоны (рис. 3), концентрации As (2,1 мкг/л), который, так же как Hg, относится к элементам первого класса опасности. Также в высоких пределах находятся концентрации Hg (4 ПДК_{пв} и 199 ПДК_{рбх}), Al (4 ПДК_{рбх}), Mn (2 ПДК_{рбх}), Mo (2 ПДК_{рбх}), Sb (2 ПДК_{пв}), V (1 ПДК_{рбх}) и В (1 ПДК). За период работы цеха ртутного электролиза в шламонакопитель поступило более 620 т ртути [24]. Дренажное вод высокочагрязненных отходов предприятия определяло и высокие концентрации этого токсиканта в сточных водах ДК: в 2006–2008 гг. (до 1,1 мкг/л) [22] и в 2010 г. (1,99 мкг/л). В 2020 г. концентрация Hg значительно снизилась, что отражает уменьшение техногенной нагрузки. Из других рассматриваемых микроэлементов в этот период в стоках ДК определено снижение концентраций Ti, Al и Cr и, напротив, увеличение Mn (51 ПДК_{пв} и 505 ПДК_{рбх}), Sr (9 ПДК_{рбх}), В (4 ПДК_{рбх}), Cu (3 ПДК_{рбх}), Co, Ga, Ni, Zn, As, и Ge (рис. 3). Отметим, что такая динамика для Hg, Ti, Al, Cr и Mn характерна для всех стоков УХП. Механизм формирования сточных вод ДК в 2020 г. определяет влияние поверхностного стока на состав ее вод. Водные массы, поступающие в дренажную канаву в период снеготаяния или в период дождевых осадков, обогащаются растворенными веществами за счет их выщелачивания из почво-грунтов техногенной территории. Еще одним важным фактором, влияющим на повышение концентраций элементов в наполняющих дренажную канаву водах, является их взаимодействие с высокочагрязненными отложениями (наилками) водотока, в которых за время работы предприятия накоплено значительное количество загрязняющих веществ.

Канава гидрозолоудаления (ГЗУ)

Канава ГЗУ на территории промышленной зоны г. Усоля-Сибирского является частью ирригационной производственной системы ТЭЦ-11, которая в качестве ресурсного обеспечения использует твердое угольное топливо. Образовавшаяся в процессе сжигания топлива минеральная составляющая переходит в аэрозольную и шлаковую фазы в определенных соотношениях [25]. Дымовые газы, содержащие летучую мелкодисперсную золу, обеспечивают аэроперенос техногенных элементов, состав и свойства которых зависят от характеристик угля, условий сжигания и используемой технологии [26].

Атмосферный перенос пылевых частиц как с зольными компонентами при сжигании топлива, так и при естественном пылении золоотвальных сооружений приводит к аккумуляции веществ антропогенного происхождения в различных компонентах природной среды: снеге, почве, поверхностных и подземных водах района размещения техногенных объектов [27, 28]. Поступление в атмосферу с зольными компонентами в процессе сжигания топлива ТЭЦ-11 и последующее осаждение V, Hg, As и U и их соединений в снеговой покров обсуждается в работе [29]. Жидкая (шлаковая) фаза ТЭЦ-11 представлена шлако-зольной пульпой, транспортируемой на два золоотвальных сооружения – специально оборудованные котлованы для хранения и фильтрации отходов. Состав надшламовых вод (НВ), который, как известно [30], зависит от исходного состава золошлаковых отложений, характеризуется SO_4-Ca составом с величиной минерализации 1033 мг/л.

Концентрации большинства микроэлементов в НВ (табл. 2) выше, чем в сточных водах, поступающих в р. Ангара. В большей степени это относится к В, V, Cr, Mo, Cd, Ga и Ge. Источником высоких концентраций ряда элементов в НВ золоотвальных сооружений ТЭЦ-11 являются минеральные зольные компоненты бурых углей Азейского и Мугунского месторождений Восточной Сибири. Зола Мугунских углей характеризуется высоким содержанием Mn, Pb, Ni, V, Cr и As [31], Азейских углей, в свою очередь, обладает высоким содержанием ряда элементов-примесей, в том числе В и Mo [32]. Об обогащении Восточносибирских углей радиоактивными элементами, в частности U, известно из работ [33, 34]. Из выделенных элементов при сжигании топлива As и Pb преимущественно концентрируются в газообразной фазе [35–37]. V и Mn, напротив, поступают в шлаковую фазу, концентрируясь в толще шламового материала в золоотвальных сооружениях [35, 38].

Таблица 2. Концентрации микроэлементов в надшламовых водах золоотвала ТЭЦ-11, мкг/л

Table 2. Trace elements concentrations in the ash pond top water of the thermal power plant-11, µg/l

Элемент Element	Li	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Концентрация Concentration	181	5081	137	2,3	36	44	56	50	0,337	4,6	2,2	1,8
Элемент Element	As	Sr	Mo	Cd	Sb	Cs	Tl	Pb	U	Hg	Ga	Ge
Концентрация Concentration	6,6	2712	390	2,9	5,1	0,215	0,018	1,4	3,057	0,013	2,7	3,9

В 2010 г. (до перехода золоотвальных сооружений ТЭЦ-11 на замкнутый цикл водоснабжения) прошедшая через фильтрационные колодцы золоотвала вода по трубопроводу поступала в канаву гидрозолоудаления, затем в р. Ангару. Достигая места сброса в реку сточные воды ГЗУ обладали окислительными условиями ($E_h=221$ мВ), кислотной реакцией среды ($pH=3,7$) и имели Cl–Na состав с величиной минерализации 4119 мг/л (рис. 2). Микроэлементный состав вод ГЗУ в 2010 г. характеризовался высокими концентрациями В, Мп, Ni, Cu, Sr, Мо, Tl, Ge и Hg (рис. 3), из которых наибольшими превышениями нормативных показателей отличались Mn (146 ПДКрбх и 15 ПДКпв), Hg (8 ПДКрбх), Sr (4 ПДКрбх), Tl (4 ПДКпв) и Mo (3 ПДКрбх).

Сравнение основного гидрохимического состава НВ (SO_4 –Ca) и ГЗУ (Cl–Na) показывает, что по течению сточных вод канавы гидрозолоудаления по территории промплощадки их состав значительно изменяется. Проведенное в 2020 г. обследование территории промышленной зоны обнаружило, что сточные воды канавы сформированы двумя водотоками: левый (С2) выходит на поверхность вблизи золоотвальных сооружений ТЭЦ и протекает между полями нейтрализации промышленных отходов УХП, правый (С1) протекает в понижении рельефа между заброшенным комплексом канализационно-очистных сооружений для отходов УХП и полям нейтрализации (рис. 1). Эти два водотока соединяются в общий поток (С3), течение которого направлено к р. Ангаре.

Воды водотоков, формирующих канаву гидрозолоудаления, обладают различным гидрохимическим составом (рис. 4). Несмотря на близость выхода С2 к золоотвальным сооружениям ТЭЦ, основной ионный состав его вод отличается от состава надшламовых вод. Воды С2 Cl–Na с величиной минерализации 5996 мг/л характеризуются окислительными условиями ($E_h=86$ мВ) и щелочной реакцией среды ($pH=9,12$). Для вод С1 определены восстановительные условия ($E_h= -80$ мВ) и слабощелочная реакция среды ($pH=7,73$). Относительное содержание Cl^- и Na^+ значительно ниже, чем в С2. Основной ионный состав HCO_3^- –Cl–Ca–Na, минерализация составляет 4933 мг/л. При смешении

водотоков (С3) создаются слабовосстановительные условия ($E_h= -17$ мВ) и слабощелочная реакция среды ($pH=7,87$). Гидрохимический состав С3 преобразуется в Cl–Ca–Na с величиной минерализации 2852 мг/л.

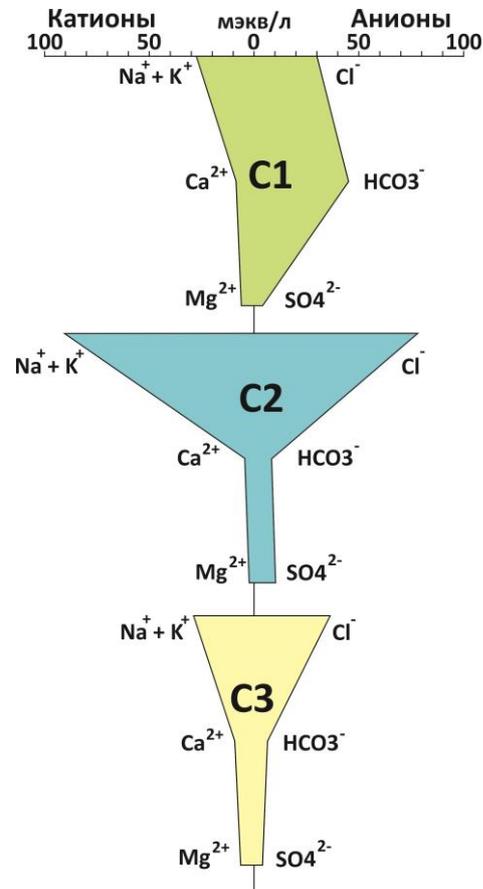


Рис. 4. Диаграмма Стиффа для вод, формирующих канаву гидрозолоудаления

Fig. 4. Stiff diagram of the waters forming the ash removal ditch

Воды С2 отличаются более высокими, чем С1, концентрациями большинства элементов. Несмотря на различия в основном ионном составе, в микроэлементном составе С2 прослеживается взаимосвязь с надшламовыми водами. Так же как в НВ, в нем определены высокие концентрации В, V, Cr,

Mo, Cd, Ga и Ge. Источником микроэлементов для вод С2 являются и поля нейтрализации стоков УХП, дренируя которые они обогащаются элементами, присущими технологическим отходам предприятия. В первую очередь, показателем этого являются высокие концентрации Hg (2,36 мкг/л). В водах С3 концентрации микроэлементов, за исключением Zn и Pb, так же как и компоненты основного ионного состава, уменьшаются относительно формирующих поток водотоков. В большей степени это относится к Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Ge и Hg. Смена окислительно-восстановительных условий может оказывать влияние на поведение этих элементов. Так, например, происходит выпадение гидроксидов железа, марганца, алюминия и других элементов.

Изменение основного ионного состава сточных вод канавы гидрозолаудаления происходит и по мере их течения от точки наблюдений С3 к точке наблюдений ГЗУ, что определяется увеличением концентраций Cl^- , Na^+ и величиной минерализации (от 2852 до 4788 мг/л). В разные по техногенной нагрузке периоды воды ГЗУ Cl–Na. Вместе с этим по сравнению с 2010 г., в 2020 г. относительное содержание Na^+ , Cl^- в них уменьшается, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} увеличивается (рис. 2).

В межгодовом аспекте в водах ГЗУ отмечается значительное снижение концентраций Ge, Tl, Ti и Cs, и несколько меньшее Cd, Sr и Cr (рис. 3). Обращает на себя внимание значительное увеличение объема сточных вод по мере течения канавы гидрозолаудаления к р. Ангаре. Изменяется и пространственная динамика в составе главных ионов и микроэлементов. Определено, что концентрации большинства микроэлементов перед поступлением сточных вод канавы в р. Ангару как в 2010 г., так и в 2020 г. значительно выше, чем в формирующих ее сток водотоках. Выделенные особенности указывают на существование дополнительных источников формирования стока канавы. Выявить точные источники поступления растворенных веществ в сточные воды канавы гидрозолаудаления от С3 до ГЗУ в настоящее время невозможно в связи с отсутствием публичной информации о водоотводных коллекторных сетях закрытого предприятия УХП. Однако полученные результаты позволяют выделить наиболее вероятные из них.

В первую очередь, это подземные коммуникации заброшенного предприятия, которые, так же как коллекторный выпуск 1, находятся в критическом состоянии. На это указывают полученные данные по концентрациям Cl^- и Na^+ , которые в сточных водах ГЗУ становятся близкими к организованным выпускам предприятия УХП (В1, В2, ДК). Наряду с утечками из коллекторной сети, источником поступления растворенных веществ является поверхностный сток с прилегающей терри-

тории, так как, подобно дренажной канаве, наполняемость канавы гидрозолаудаления обуславливается поступающими в нее водами сезонного характера. Привнесение загрязняющих веществ происходит с дождевыми и тальными водами от комплекса заброшенных очистных сооружений и станций нейтрализации УХП, а также с размывом отложений (наилков) канавы.

Существование третьего источника определено рекогносцировочным исследованием территории промышленной площадки, выявившим поступление в канаву гидрозолаудаления малобитного водотока (МВ), просачивающегося из-под земли. Воды МВ обладают самой высокой величиной минерализации (59783 мг/л) из всех опробованных сточных вод, слабовосстановительными условиями ($E_h = -34$ мВ) и околонеutralной реакцией среды ($pH = 7,07$) и имеют, так же как все выпуски промышленной зоны, Cl–Na состав вод. Гидрохимический состав МВ выделяется высокими и колоссально высокими концентрациями как главных ионов, так и микроэлементов, превышающими ПДК (табл. 1). Вместе с этим концентрации Cl^- (38600 мг/л) и Na^+ (18750 мг/л) в водах МВ близки к их концентрациям (37396 и 22260 мг/л, соответственно [23]) в воде, отобранной из скважины Бродовича (глубина 190 м), находящейся в г. Усоля-Сибирском в 100 м от уреза воды р. Ангары. Ранее определено, что на участках расположения техногенных объектов УХП (шламонакопителей, полигонов хранения токсичных отходов, трубопроводов и т. д.) химический состав природных подземных вод верхней гидродинамической зоны кардинально изменен [39]. В естественном состоянии грунтовые воды до участка промплощадки имеют $\text{HCO}_3\text{--Ca--Mg}$ состав, а в районе расположения объектов предприятия выделено 15 гидрохимических типов вод ($\text{HCO}_3\text{--Cl--Ca--Mg}$, $\text{HCO}_3\text{--Ca--Na}$, Cl–Na, Cl– $\text{SO}_4\text{--Ca}$ и т. д.). Вышесказанное позволяет предположить, что в канаву гидрозолаудаления на всем ее протяжении происходит подток грунтовых вод, разгрузка которых происходит в виде малобитных рассредоточенных выходов. На это указывают и восстановительные условия, определенные в воде канавы.

Воды р. Ангары

Условно фоновый участок: 10 км выше промышленной зоны г. Усоля-Сибирского (А1)

На формирование гидрохимического состава р. Ангары большое влияние оказывает оз. Байкал, которое является крупнейшим природным резервуаром чистой пресной воды (минерализация ~96 мг/л [40]). В воде истока реки минерализация и концентрации главных ионов сопоставимы с этими показателями в воде озера [41]. За счет влияния природных (литология, притоки) [42] и антропо-

генных факторов в 10 км выше промышленной зоны г. Усолья-Сибирского (160 км ниже истока р. Ангары) минерализация увеличивается, составляя 119 мг/л (2010 г.) и 125 мг/л (2020 г.). Это связано с повышением концентраций HCO_3^- (от 60,8 мг/л в воде истока реки [43] до 78 мг/л в воде А1), Ca^{2+} (от 15,2 до 20 мг/л, соответственно), SO_4^{2-} (от 5,7 до 10 мг/л, соответственно), Cl^- (от 0,6 до 5,6 мг/л, соответственно). По гидрохимическому составу р. Ангара в истоке и на условно фоновом участке, как и оз. Байкал, HCO_3^- -Ca.

Так же как основной ионный состав, микроэлементный состав вод истока р. Ангары слабо отличается от вод оз. Байкал [44]. По сравнению с исто-

ком реки, в воде условно фонового участка концентрации Al, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Tl и Ga повышены, Zn, Pb и Ge, напротив, ниже (рис. 5). Zn в истоке реки характеризуется повышенным содержанием, наследуя геохимические особенности бассейна оз. Байкал, в частности, его поступление с эоловым переносом с западного побережья озера, коренные породы и почвы которого обогащены элементом [45]. В 2010 и 2020 гг. в воде А1 концентрации Li, B, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sb, Cs, Pb, U, Hg и Ge сопоставимы между собой (рис. 5). Наибольшие различия определены для концентраций Al, Ti, Fe и Ga, которые в 2010 г. выше, чем в 2020 г., концентрации Tl, напротив, ниже.

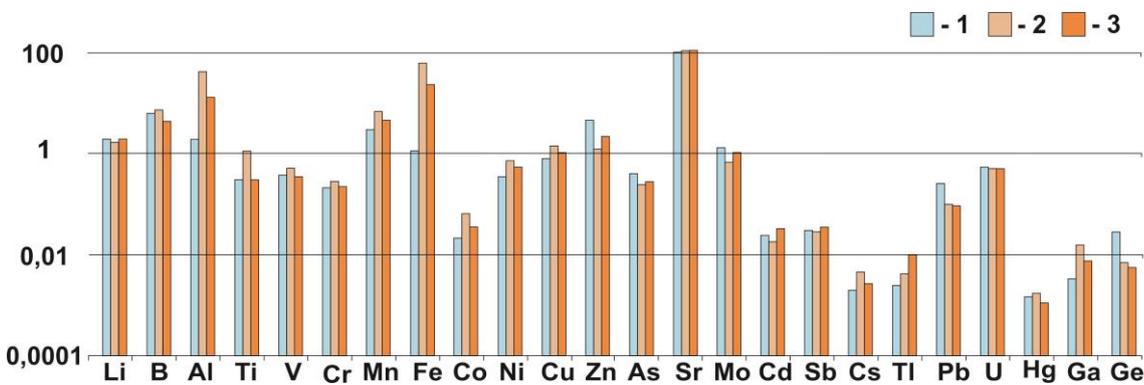


Рис. 5. Концентрации микроэлементов в воде р. Ангары, мкг/л: исток (1), фоновый участок 2010 г. (2) и 2020 г. (3)
 Fig. 5. Trace elements concentrations in Angara river water, µg/l: source (1), background site 2010 (2) and 2020 (3)

Таблица 3. Группы микроэлементов в сточных водах, сформированные по однофакторному индексу загрязнения (CFcm.в.)

Table 3. Groups of trace elements in wastewater formed by the one-factor pollution index (CFcm.v.)

Сточные воды Wastewater	CFcm.в. CFcm.v.	2010	2020
Выпуск 1 Effluent 1	>1000	Hg	-
	100-1000	Ge, B, Sb	Hg, Mn
	50-99	Cs, Ti	-
	10-49	Ni, Li, Co, Mn, Tl, Cd, Ga, Cr, Al, Zn, Pb	Pb, As, Cs, B, Ge, Li, Co, Ga, Sr, Tl, U, V, Ni
2-9	V, Sr, As, Cu, Fe	Sb, Zn, Cr, Cu, Mo, Cd	
Выпуск 2 Effluent 2	>1000	-	B, Mn
	100-1000	Hg	-
	50-99	Ge	-
	10-49	Sb, Cr, Cs, Ti, B, Li, Ga	Hg, Ge, Ga, Co, Ni, Li
2-9	Zn, Al, Tl, Pb, V, Co, As, Mo, Cd	Sr, U, Zn, Cd, Cs, Cu, Sb, As	
Дренажная канава Drainage ditch	>1000	Hg	Mn
	100-1000	-	Ge, Ga,
	50-99	-	B, Co
	10-49	Sb, Ge, Cs, Ti, Cr, B, Tl, Ga	Sr, As, Li, Hg
2-9	As, Al, Co, Mn, Sr, V, Mo, Cd, Pb	Ni, Cs, Sb, Cu, Cr, Fe, Zn, Cd	
Канавы ГЗУ Ash removal ditch	>1000	-	-
	100-1000	Ge, Mn, B	B, Mn
	50-99	Tl	Hg, Co
	10-49	Hg, Co, Li, Cs, Cd, Ga, Ni, Sr	Ga, Ge, Li, Ni
2-9	As, Zn, Mo, Sb, Cr, U, V	Sr, As, Sb, Cs, Pb, U, Cu, Mo, Cd, V, Zn, Tl	
Приемная камера Intake chamber	>1000	-	-
	100-1000	-	-
	50-99	н/д	-
	10-49	-	Cs, Ga, Ge, Ni
2-9	-	Li, B, As, Sb, Hg, Zn, Sr, Cr, V, Co, Pb	

Примечание: жирным выделены микроэлементы, CFcm.в. которых превышает 100.
 Notes: trace elements with CFcm.v. exceeding 100 are marked in bold.

Для оценки вклада каждого микроэлемента, поступающего со стоками промышленной зоны, в загрязнение р. Ангары использован однофакторный индекс загрязнения (СФст.в), рассчитанный через нормирование концентраций микроэлементов в сточных водах к их концентрациям в воде условно фонового участка (табл. 3). Элементы, СФст.в. которых превышает значение 100 и более, отнесены к приоритетным элементам-загрязнителям.

Как и ожидалось, в 2010 г. во всех сточных водах еще работающего предприятия УХП к таким элементам относится Hg (табл. 3). В 2020 г. СФст.в. Hg в В2 и ДК значительно уменьшается, составляя 45 и 12, соответственно. В В1 СФст.в. Hg остается высоким (800), а в ГЗУ переходит в категорию выше, чем в 2010 г. Рассчитанные значения СФст.в. показывают, что в 2010 г. в сточных водах всей промышленной зоны, помимо Hg, к приоритетным элементам-загрязнителям р. Ангары относятся Ge и В, частично – Sb и Mn. В 2020 г. возрастает вклад в загрязнение реки Mn (В1, В2, ДК, ГЗУ), а также В (В2, ГЗУ), Ga и Ge (ДК). Наименьший для всех микроэлементов СФст.в. (не превышающий 49) определен для сточных вод ПК. Однако, так же как для других выпусков, выделяются Ga и Ge, для которых определен самый высокий СФст.в.

Участок в 50 м ниже сбросов сточных вод (A2)

Во все периоды исследования наиболее значимая трансформация гидрохимического состава р. Ангары определена на близком к впадению промышленных сбросов участке. Поступление сточных вод изменяет $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ состав вод реки и увеличивает их минерализацию. В 2010 г. воды A2 Cl-Na с минерализацией 1280 мг/л. В 2020 г., за счет значительного снижения относительного содержания Cl^- и Na^+ (рис. 6), состав вод $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na-Ca}$ с минерализацией 147 мг/л.

В 2010 г. на этом участке концентрации большинства изучаемых микроэлементов выше фоновых значений. Наиболее значимые превышения определены для Hg, Ge и В (рис. 7), СФст.в. которых превышает 100. Концентрации В, Al, Mn, Cu и Mo находятся в пределах от 1 до 3 ПДКрбх, для Hg составляют 24 ПДКрбх. В 2020 г. концентрации микроэлементов, за исключением Tl, в воде A2 значительно уменьшаются относительно величин 2010 г. (рис. 7). Такая тенденция отражает снижение количества растворенных веществ в промышленных стоках (рис. 3, табл. 3) и объема поступающих в р. Ангару сточных вод. Превышения установленных нормативов все еще обнаруживаются для Mn (2 ПДКрбх), Cu (1 ПДКрбх) и Mo (1 ПДКрбх).

Качество вод р. Ангары определено с помощью СФ, рассчитанного через нормирование concentra-

ций микроэлементов в водах участка A2, а также A3 и A4, к их концентрациям в воде условно фонового участка (A1) (табл. 4). По классификации, предложенной [12] для оценки экологического состояния водной среды, СФ выше 6, определенный в 2010 г. для Hg, Ge, В, Cs и Sb, позволяет отнести воды участка A2 к категории очень высокого загрязнения. Воды A2 по концентрациям большинства микроэлементов умеренного (от 1 до 3) и значительного (от 3 до 6) загрязнений, низкого загрязнения – только по Fe и Cu. В 2020 г. показатели качества вод р. Ангары на близком к месту сбросов участке улучшаются: полученные значения СФ классифицируют воды как умеренно загрязненные и низко загрязненные (табл. 4). Исключением является СФ для Tl, который демонстрирует смену уровня загрязнения со значительного на очень высокий. Для Hg во все периоды определено очень высокое загрязнение вод, для Mn – значительное.

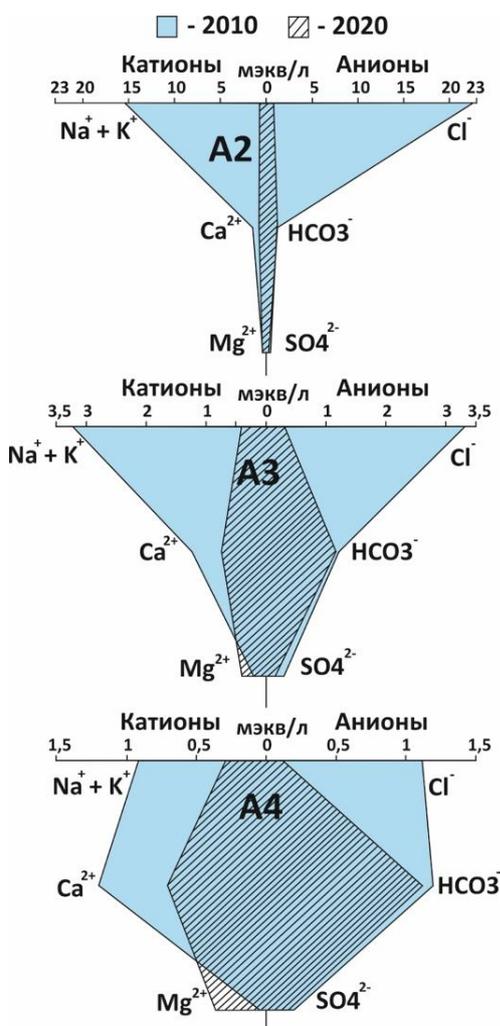


Рис. 6. Диаграмма Стиффа для вод реки Ангары в точках A2, A3 и A4

Fig. 6. Stiff diagram of the Angara river waters at points A2, A3 and A4

Таблица 4. CF микроэлементов в воде р. Ангары

Table 4. CF of trace elements in Angara river water

Водный участок р. Ангары The Angara river water site	CF значение* CF value*	Микроэлементы (2010) Trace elements (2010)	Микроэлементы (2020) Trace elements (2020)
50 м от выпуска канавы гидрозолоудаления (A2) 50 m away from outlet of ash removal ditch (A2)	CF<1	Fe, Cu	Zn, Mo, Cd, Pb, U
	1≤CF≤3	Al, V, Cr, As, Sr, Mo, Pb, U	Li, B, Al, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Sr, Sb, Cs
	3≤CF≤6	Li, Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Cd, Tl	Mn
	6≤CF	B, Ge, Sb, Cs, Hg	Tl, Hg
1,5 км от всех сбросов сточных вод (A3) 1.5 km away from all industrial outlets (A3)	CF<1	Mo, As, U	Zn, Mo, Cd, Tl, U, Hg
	1≤CF≤3	Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Sr, Cd, Sb, Cs, Tl, Pb	Li, B, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Ge, As, Sr, Sb, Pb
	3≤CF≤6	–	Co, Ga, Cs
	6≤CF	Hg	Al, Ti, Fe
5 км от всех сбросов сточных вод (A4) 5 km away from all industrial outlets (A4)	CF<1	Mo, U	Li, B, Mo, U, Hg
	1≤CF≤3	Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sr, Cd, Sb, Cs, Tl, Hg	V, Cu, Zn, Ge, As, Sr, Cd, Sb
	3≤CF≤6	Pb	Cr, Mn, Ni, Pb
	6≤CF	–	Al, Ti, Fe, Co, Ga, Cs, Tl

Примечание: категории качества вод в соответствии с [12]: CF<1 – низкое загрязнение, 1≤CF≤3 – умеренное загрязнение, 3≤CF≤6 – значительное загрязнение, 6≤CF – очень высокое загрязнение.

Notes: water quality categories according to [12]: CF<1 – low contamination, 1≤CF≤3 – moderate contamination, 3≤CF≤6 – significant contamination, 6≤CF – very high contamination.

Участки в 1,5 и 5 км ниже сбросов сточных вод (A3 и A4)

В 2010 г. воды A3 и A4 характеризовались $\text{HCO}_3\text{--Cl--Ca--Na}$ и $\text{Cl--HCO}_3\text{--Na--Ca}$ составом, соответственно, с повышенными относительного Al величинами минерализации (309 и 169 мг/л, соответственно). В 2020 г. количество растворенных веществ в водах A3 (121 мг/л) и A4 (107 мг/л) ниже, основной ионный состав изменился на $\text{HCO}_3\text{--Mg--Ca}$ (рис. 6).

В период с высокой техногенной нагрузкой (2010 г.) в воде A3 концентрации Hg составляют 3 ПДКрбх, Al – 2 ПДКрбх, Cu – 2 ПДКрбх, Mn – 1 ПДКрбх и Fe – 1 ПДКрбх, в воде A4 – Al (3 ПДКрбх), Mn (2 ПДКрбх), Cu (2 ПДКрбх) и Fe (2 ПДКрбх). По мере удаления речных вод от техногенных источников только концентрации Mo в воде A4 достигают фоновых значений. Содержание Li, V, Ti, Ni, Ga, Mo, Cs, Tl и Hg характеризуется закономерным последовательным уменьшением по течению реки (рис. 7), что обуславливается, в первую очередь, сильным разбавлением сточных вод большим объемом низкоминерализованных вод р. Ангары. Одновременно выведению из водной среды потенциально токсичных элементов способствуют процессы их сорбции взвешенными частицами. Как было определено ранее для процессов перераспределения техногенной ртути [19], часть поступающей в составе сточных вод взвеси выводится из водной среды в результате осаждения на ближних к источнику загрязнения участках реки. В пространственном распределении концентраций элементов выделяются Pb и Fe, для которых,

напротив, характерно постепенное увеличение содержания по мере удаления вод от источников загрязнения, а также Mn, Co, Zn, Cd и Sb, которые, снижаясь в воде A3, далее повышаются в воде A4.

В 2020 г. превышения нормативов определены в воде A3 и A4 для Al (2 и 4 ПДКрбх, соответственно), Fe (2 и 3 ПДКрбх, соответственно), Mn (1 и 3 ПДКрбх, соответственно), Cu (1 и 3 ПДКрбх, соответственно), в A4 – Tl (5 ПДКрбх). Результаты исследования этого периода не повторяют выделенных в 2010 г. трендов. Основной особенностью 2020 г. является уменьшение концентрации основного элемента-загрязнителя промышленной зоны – Hg – в A3 и A4 до фоновых значений и соответствия ПДК. Концентрации As и U близки между собой на всех станциях наблюдений. Наиболее высокие, по сравнению с A2 и A3, концентрации Al, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Cs и Pb зафиксированы в воде A4, концентрации Mn, Cd, Sb и Tl, уменьшаясь в воде A3, по сравнению с A2, вновь увеличиваются в A4 (рис. 7). С одной стороны, выделенное пространственное распределение микроэлементов в воде р. Ангары в период снижения техногенной нагрузки может определять накопленный за годы интенсивной работы предприятия экологический вред. В частности, аккумуляцию элементов техногенного происхождения в береговых донных отложениях и их вторичное поступление в водную среду. Одним из факторов, провоцирующих взмучивание загрязненных осадков и высвобождение элементов из депонирующей среды в водную, является изменение уровня режима водоема в межсезонном и межгодовом аспектах. С другой стороны,

можно предположить наличие еще одного источника, влияющего на увеличение концентраций микроэлементов: подземные воды, поступающие по зонам повышенной трещиноватости в долине

реки. Повышение хлорид-ионов и ионов натрия, основных показателей рассолов, в водной среде участка реки в 5 км ниже сточных вод определено как в настоящем исследовании, так и ранее [46].

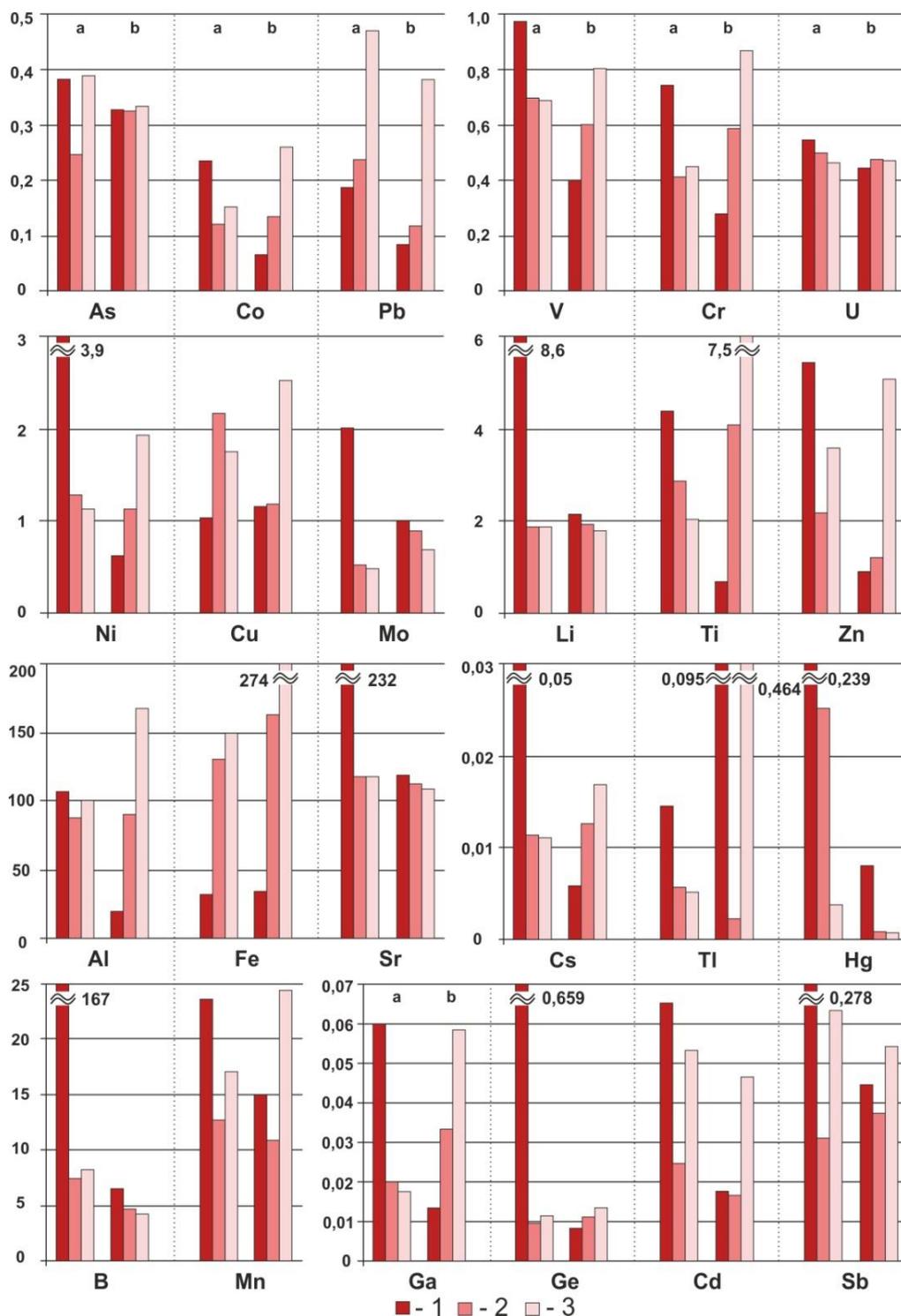


Рис. 7. Концентрации микроэлементов в воде р. Ангары (мкг/л) на участках в 50 м ниже выпуска канавы гидрозолоудаления (1), 1,5 км (2) и 5 км (3) ниже всех выпусков промышленной зоны г. Усолья-Сибирского. а - 2010 г., б - 2020 г.

Fig. 7. Trace element concentrations in the Angara river water (µg/l) at sites 50 m below outlet of ash removal ditch (1), 1.5 km (2) and 5 km (3) below the discharge of the Usole-Sibirskoe industrial zone. a - 2010, b - 2020

В 2010 г. показатель CF на участках А3 и А4 по большинству микроэлементов определяет умеренный уровень загрязнения (табл. 4). Исключением является CF для Hg в воде А3 и для Pb в воде А4, определяющий очень высокое и значительное загрязнение, соответственно. Качество вод в 2020 г. на этих участках р. Ангары ухудшилось (табл. 4). В водах А3 уровень загрязнения Co, Ga, Cs сменился с умеренного на значительный, Al, Fe и Ti – с умеренного на очень высокий, в водах А4 – Cr, Mn и Ni с умеренного на значительный, Al, Ti, Fe, Co, Ga, Cs и Tl – с умеренного на очень высокий.

Индекс нагрузки загрязнения PLI, суммирующий моноэлементные показатели качества вод, в 2010 г. составил для А2 – 4,1, А3 – 1,6 и А4 – 1,7, в 2020 г. 1,4, 1,6 и 3,0, соответственно. Сравнение качественных характеристик воды р. Ангары на разных мониторинговых участках по полученным значениям PLI показывает, что во все периоды исследований воды р. Ангары «загрязненные».

Заключение

Изучение химического состава сточных вод промышленной зоны г. Усоля-Сибирского в разные по техногенной нагрузке периоды показало, что, несмотря на остановку предприятия УХП, в р. Ангару по-прежнему поступают сточные воды, содержащие значительное количество элементов техногенного происхождения. Cl–Na состав организованных выпусков предприятия УХП (В1, В2, ДК) в период с высокой техногенной нагрузкой (2010 г.) полностью отражал специфику действующего производства. В период снижения техногенной нагрузки (2020 г.) в В1 и В2 значительно уменьшается величина минерализации, основной ионный состав изменяется на Cl–Mg–Na–Ca и Cl–Ca–Na. При изменении основного ионного состава ДК на Cl–Ca–Na величина минерализации (7885 мг/л) ее сточных вод остается высокой. Несмотря на то, что канава гидрозолоудаления является производственным объектом ТЭЦ-11, состав надшламовых вод которой SO₄–Ca, гидрохимический состав сточных вод ГЗУ перед поступлением в р. Ангару Cl–Na. Трансформацию химического состава сточных вод по мере течения определяют формирующие ее сток водные потоки.

Наибольшим изменениям в сточных водах подвержены концентрации приоритетного элемента-

загрязнителя территории исследования – Hg, динамика снижения которого в сточных водах, безусловно, является показателем снижения уровня техногенной нагрузки на окружающую среду от предприятия УХП. Однако временной тренд концентраций других микроэлементов в сточных водах не указывает на значительное улучшение экологической ситуации: установлено увеличение концентрации Mn, V, Ge и Ga. В связи с этим говорить об устойчивой тенденции к прекращению и (или) уменьшению поступления элементов техногенного генезиса в окружающую среду преждевременно. На гидрохимический состав сточных вод, поступающих в р. Ангару, значительно влияют инфраструктура и инженерные коммуникации УХП, которые находятся в катастрофическом состоянии: практически все производственные объекты заброшены и полуразрушены, водоотводные системы промплощадки не демонтированы. В условиях закрытия предприятия наиболее значимым фактором, негативно влияющим на экологическую ситуацию р. Ангары, становится поступление поверхностного стока с высокозагрязненных территорий как непосредственно в реку, так и через коллекторную сеть промплощадки.

В период снижения техногенной нагрузки поступление сточных вод и большие объемы накопленных за годы работы предприятия УХП техногенных отходов продолжают оказывать влияние на гидрохимический состав р. Ангары. По результатам исследования установлено, что воды р. Ангары в районе промышленной зоны сохраняют статус загрязненных. Кроме того, наблюдается ухудшение качественных характеристик на удаленных от сбросов сточных вод участках, создавая потенциальную угрозу для всей водной экосистемы. В настоящее время изучение биогеохимических циклов загрязняющих веществ природно-техногенной системы (промышленная зона – р. Ангара) становится важным для установления объективной оценки и прогноза вектора преобразования экологической ситуации. Проведенное исследование, как ожидается, внесет вклад в политику природопользования Иркутской области при проведении мероприятий по ликвидации накопленного экологического ущерба на территории промышленной зоны г. Усоля-Сибирского.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mokarram M., Saber A., Sheykhi V. Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 227. – 123380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123380> (дата обращения 03.07.2023).
2. China's industrial gray water footprint assessment and implications for investment in industrial wastewater treatment / Y. Huang, Z. Beihai, H. Ruru, L. Xiaohui, L. Shuo, L. Nan // *Environmental science and pollution research*. – 2019. – Vol. 27. – P. 7188–7198. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07405-y> (дата обращения 03.07.2023).
3. Hydrochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area / Y. Gao, H. Quin, W. Ren, H. Wang, F. Liu, F. Yang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 260. – 121006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006> (дата обращения 03.07.2023).

4. Okereke J.N., Ogidi O.I., Obasi K.O. Environmental and health impact of industrial wastewater effluents in Nigeria – a review // *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*. – 2016. – Vol. 3. – № 6. – P. 55–67.
5. Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review / M. Ilyas, W. Ahmad, H. Khan, S. Yousaf, M. Yasir, A. Khan // *Reviews on Environmental Health*. – 2019. – Vol. 34. – № 2. – P. 171–186. URL: <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0078> (дата обращения 03.07.2023).
6. Physico-chemical analysis of industrial wastewater pollution from Kigali special economic zone (KSEZ) and the potential impacts in the downstream regions of Kigali City in Rwanda / B. Manirakiza, L.A. Gbadegesin, E.S. Okeke, R. Bagaragaza, G.A. Felix // *Sustainable Water Resources Management*. – 2022. – Vol. 8 – № 95. URL: <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00693-2> (дата обращения 03.07.2023).
7. Exposure to wastewater effluent disrupts hypoxia responses in killifish (*Fundulus heteroclitus*) / S.C. Lau, H. Mehdi, L.M. Bragg, M.R., Servos S. Balshine, G.R. Scott // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 284. – 117373. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117373> (дата обращения 03.07.2023).
8. Impacts of wastewater treatment plants on benthic macroinvertebrate communities in summer and winter / C. Aristone, H. Mehdi, J. Hamilton, K.L. Bowen, W.J.S. Currie, K.A. Kidd, S. Balshine // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 820. – 153224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153224> (дата обращения 03.07.2023).
9. Millar E.N., Surette M.G., Kidd K.A. Altered microbiomes of aquatic macroinvertebrates and riparian spiders downstream of municipal wastewater effluents // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 809. – 151156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151156> (дата обращения 03.07.2023).
10. Оценка воздействия источника ртутного загрязнения на компоненты природной среды Приангарья / П.В. Коваль, Е.А. Руш, Г.П. Королева, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис // *Экологический вестник Северного Кавказа*. – 2006. – Т. 2. – № 1. – С. 60–65.
11. Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region Russia // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2019. – 321 – 012041. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012041> (дата обращения 03.07.2023).
12. Hakanson L. Ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach // *Water Research*. – 1980. – Vol. 14. – № 8. – P. 975–1001.
13. Problem in the assessment of heavy metals level in estuaries and the formation of a pollution index / D.L. Tomlinson, J.G. Wilson, C.R. Harris, D.W. Jeffrey // *Helgolander Meeresunters.* – 1980. – Vol. 33. – P. 566–575.
14. Assessment of metal pollution in surface sediments of coastal Tasaul Lake (Romania) / D. Vasiliu, A. Bucse, N. Lupascu, B. Ispas, C. Gheablaui, I. Stanescu // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – Vol. 192. – 749. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08698-0> (дата обращения 03.07.2023).
15. Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: the role of groundwater discharge / M. Luo, Y. Zhang, H. Li, W. Hu, K. Xiao, S. Yu, C. Zheng, X. Wang // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 807. – 151070. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070> (дата обращения 03.07.2023).
16. СанПин 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28.01.2021 № 2. URL: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf> (дата обращения 03.07.2023).
17. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» от 13.12.2016 № 552. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения 03.07.2023).
18. Руш Е.А., Хицкий Я.В. Поверхностных стоков как основной фактор ртутного загрязнения Ангары // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2003. – № 4. – С. 80–84.
19. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртути в Братском водохранилище / В.И. Алиева, Е.В. Бутаков, М.В. Пастухов, Л.Д. Андрулайтис // *Геоэкология. Инженерная геология, Гидрогеология, Геокриология*. – 2011. – № 5. – С. 431–438.
20. Коваль П.В., Бутаков Е.В., Виноградова Т.П. Ртуть в биогеохимическом цикле Братского водохранилища. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы: 8 т. / пред. ред. кол. Н.П. Лавров. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – Т. 4. – С. 97–103.
21. Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Dynamics of mercury concentrations in wastewater from the Usolye–Sibirskoye industrial zone in periods with different technogenic loads // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – № 3. – С. 1346–1348. URL: <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1346> (дата обращения 03.07.2023).
22. Хицкий Я.В. Исследование и разработка технологии локальной очистки ртутьсодержащих вод: авторефер. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2004. – 18 с.
23. Алиева В.И., Пастухов М.В. Гидрохимическая характеристика реки Ангары в районе влияния Усольского промышленного узла // *География и природные ресурсы*. – 2012. – № 1. – С. 68–73.
24. Геоэкология: воздействие сосредоточенного источника ртутного загрязнения на компоненты природной среды Приангарья / П.В. Коваль, Е.А. Руш, Г.П. Королева, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис, Р.Х. Зарипов // *Инженерная экология*. – 2004. – № 6. – С. 18–24.
25. Сидорова Г.П., Крылов Д.А., Якимов А.А. Экологическое воздействие угольных ТЭС на окружающую среду // *Вестник ЗабГУ*. – 2015. – № 9. – С. 28–38.
26. Vassilev S.V., Vassileva C.G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86. – P. 1490–1512.
27. Воздействия золоотвалов теплостанций на окружающую среду в черте пригородных зон / Е.В. Ковалева, Т.И. Матвеевко, И.Ю. Вагулин, О.С. Кузмина // *Polish Journal of Science*. – 2020. – № 28. – С. 11–21.

28. Шумилова Л.П. Оценка техногенного загрязнения почв Благовещенска // География и природные ресурсы. – 2016. – № 2. – С. 36–45.
29. Минерально-вещественный состав твердого осадка снегового покрова в различных функциональных зонах г. Усолье-Сибирское / М.С. Холодова, М.В. Пастухов, В.А. Бычинский, С.Н. Просекин, О.Ю. Белозерова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 219–230. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/73212> (дата обращения 03.07.2023).
30. Усманова Л.И., Замана Л.В. Сравнительная эколого-гидрохимическая характеристика гидрозолошлакоотвалов теплоэлектростанций топливно-энергетического комплекса Восточного Забайкалья // Геосферные исследования. – 2021. – № 2. – С. 87–100. URL: <https://doi.org/10.17223/25421379/19/8> (дата обращения 03.07.2023).
31. Джумаев Н.Р., Наставкин А.В. Мацеральный и химический состав бурых углей Мугунского месторождения // Химия твердого топлива. – 2019. – Т. 53. – № 4. – С. 3–8.
32. Ильенок С.С., Арбузов С.И. Металлоносные угли Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 132–144. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/50263> (дата обращения 03.07.2023).
33. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbuзов, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Penok // International Journal of Coal Geology. – 2011. – Vol. 86. – P. 318–328. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.005> (дата обращения 03.07.2023).
34. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири: авторефер. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2005. – 48 с.
35. Кизильштейн Л.Я. Геохимия тяжелых металлов в углях: экологический аспект // Геохимия. – 1998. – № 8. – С. 848–853.
36. A critical review on lead migration, transformation and emission control in Chinese coal-fired power plants / Y. Wang, H. Hu, X. Wang, H. Liu, L. Dong, G. Luo, Y. Zhao, H. Yao // Journal of Environmental sciences. – 2022. – Vol. 124. – P. 397–413. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.039> (дата обращения 03.07.2023).
37. Migration and emission behavior of arsenic and selenium in a circulating fluidized bed power plant burning arsenic/selenium-enriched coal / Y. Huang, H. Gong, H. Hu, B. Fu, B. Yuan, S. Li, G. Luo, H. Yao // Chemosphere. – 2021. – Vol. 263. – P. 127920. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127920> (дата обращения 03.07.2023).
38. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 650 с.
39. Паутов Д.В. Роль природных и техногенных факторов в формировании режима подземных вод (на примере ОАО «Усольехимпром») // Материалы всероссийского совещания по подземным водам Востока России. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – С. 174–176.
40. Current chemical composition of Lake Baikal / T.V. Khodzher, V.M. Domysheva, L.M. Sorokovikova, M.V. Sakirko, I.V. Tomberg // Inland waters. – 2017. – Vol. 7. – № 3. – P. 250–258. URL: <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982> (дата обращения 03.07.2023).
41. Многолетний геохимический мониторинг истока р. Ангара (сток оз. Байкал) / В.И. Гребенщикова, М.И. Кузьмин, О.А. Пройдакова, О.В. Зарубина // Доклады академии наук. – 2018. – Т. 480. – № 4. – С. 449–454. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060028> (дата обращения 03.07.2023).
42. Карнаухова Г.А. Литологический состав донных осадков в барьерной зоне «река–водохранилище» (на примере Братского водохранилища) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2015. – Т. 13. – С. 78–87.
43. Гребенщикова В.И., Загорулько В.А. Многолетние мониторинговые исследования макро- и микрокомпонентного состава истока реки Ангары // Вестник ИрГЦХА. – 2013. – № 57-2. – С. 88–95.
44. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace element compositions and water quality assessment in the Angara river source (Baikal Region, Russia) // Water. – 2022. – Vol. 14. – P. 3564. URL: <https://doi.org/10.3390/w14213564> (дата обращения 03.07.2023).
45. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В.И. Гребенщикова, Е.Е. Лаутсберг, Н.А. Китаев, И.С. Ломоносов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 234 с.
46. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржицкий Ю.Б. Изменение геологической среды в зоне влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 254 с.

Информация об авторах

Евгения Андреевна Цветкова, аспирант, инженер-исследователь Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. e.tsvetkova@igc.irk.ru

Вера Игоревна Полетаева, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А; доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. al-ieva@igc.irk.ru

Михаил Владимирович Пастухов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А. mpast@igc.irk.ru

Поступила в редакцию: 04.07.2023

Поступила после рецензирования: 24.08.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Mokarram M., Saber A., Sheykhi V. Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 227, 123380. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123380> (accessed 3 July 2023).
2. Huang Y., Beihai Z., Ruru H., Xiaohui L., Shuo L., Nan L. China's industrial gray water footprint assessment and implications for investment in industrial wastewater treatment. *Environmental science and pollution research*, 2019, vol. 27, pp. 7188–7198. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07405-y> (accessed 3 July 2023).
3. Gao Y., Quin H., Ren W., Wang H., Liu F., Yang F. Hydrochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 260, 121006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006> (accessed 3 July 2023).
4. Okereke J.N., Ogidi O.I., Obasi K.O. Environmental and health impact of industrial wastewater effluents in Nigeria – a review. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 55–67.
5. Iyas M., Ahmad W., Khan H., Yousaf S., Yasir M., Khan A. Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review. *Reviews on Environmental Health*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 171–186. Available at: <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0078> (accessed 3 July 2023).
6. Manirakiza B., Gbadegesin L.A., Okeke E.S., Bagaragaza R., Felix G.A. Physico-chemical analysis of industrial wastewater pollution from Kigali special economic zone (KSEZ) and the potential impacts in the downstream regions of Kigali City in Rwanda. *Sustainable Water Resources Management*, 2022, vol. 8, no. 95. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00693-2> (accessed 3 July 2023).
7. Lau S.C., Mehdi H., Bragg L.M., Servos M.R., Balshine S., Scott G.R. Exposure to wastewater effluent disrupts hypoxia responses in killifish (*Fundulusheteroclitus*). *Environmental Pollution*, 2021, vol. 284, 117373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117373> (accessed 3 July 2023).
8. Aristone C., Mehdi H., Hamilton J., Bowen K.L., Currie W.J.S., Kidd K.A., Balshine S. Impacts of wastewater treatment plants on benthic macroinvertebrate communities in summer and winter. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 820, 153224. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153224> (accessed 3 July 2023).
9. Millar E.N., Surette M.G., Kidd K.A. Altered microbiomes of aquatic macroinvertebrates and riparian spiders downstream of municipal wastewater effluents. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 809, 151156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151156> (accessed 3 July 2023).
10. Koval P.V., Rush E.A., Koroleva G.P., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D. Assessment of the impact of a source of mercury pollution on the natural environment components of the Angara region. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)
11. Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsskikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, 321, 012041. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012041> (accessed 3 July 2023).
12. Hakanson L. Ecological Risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, no. 8, pp. 975–1001.
13. Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problem in the assessment of heavy metals level in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, 1980, vol. 33, pp. 566–575.
14. Vasiliu D., Bucse A., Lupascu N., Ispas B., Gheabla C., Stanescu I. Assessment of metal pollution in surface sediments of coastal Tasaul Lake (Romania). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, no. 749. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08698-0> (accessed 3 July 2023).
15. Luo M., Zhang Y., Li H., Hu W., Xiao K., Yu S., Zheng C., Wang X. Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: the role of groundwater discharge. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 807, 151070. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070> (accessed 3 July 2023).
16. SanPiN 1.2.3685-21 «Hy-gienic standards and requirements to ensure safety and (or) harm-lessness for humans of environmental factors» of January 28, 2021 No 2. (In Russ.) Available at: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf> (accessed 3 July 2023).
17. «On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum allowable concentrations of hazardous substances in the waters of water bodies of fishery significance» of 13 December, 2016 No 552. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (accessed 3 July 2023).
18. Rush E.A., Khitsky Ya.V. Surface runoff as a major factor of mercury pollution in the Angara. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*, 2003, no. 4, pp. 80–84. (In Russ.)
19. Alieva V.I., Butakov E.V., Pastukhov M.V., Andrulaitis L.D. Specific features of anthropogenic pollution and forms of mercury transport in the Bratsk Reservoir. *Inzhenernaya geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*, 2011, no. 5, pp. 431–438. (In Russ.)
20. Koval P.V., Butakov E.V., Vinogradova T.P. Mercury in the biogeochemical cycle of the Bratsk Reservoir] and the environmental consequences of mercury pollution. *Changes of natural environment and climate. Natural and possible consequent human-induced catastrophes*. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, IFZ RAN Publ., 2008. Vol. 4, pp. 97–103. (In Russ.)
21. Tsvetkova E.A., Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Dynamics of mercury concentrations in wastewater from the Usolye–Sibirskoye industrial zone in periods with different technogenic loads, *Limnology and Freshwater Biology*, 2022, no. 3, pp. 1346–1348. Available at: <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1346> (accessed 3 July 2023).
22. Khitsky Ya.V. *Research and development of technology for local treatment of mercury-containing water*. Cand. Diss. Abstract. Irkutsk, 2004. 18 p. (In Russ.)
23. Alieva V.I., Pastukhov M.V. Hydrochemical characteristics of the Angara River in the impact area of the Usolskiy Industrial Hub. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.)
24. Koval P.V., Rush E.A., Koroleva G.P., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D., Zaripov R.H. Geo-ecology: the impact of a concentrated source of mercury pollution on the natural environment components of the Angara region. *Inzhenernaya ekologiya*, 2004, no. 6, pp. 18–24. (In Russ.)

25. Sidorova G.P., Krylov D.A., Yakimov A.A. Environmental impact of coal plants on the environment. *Vestnik ZabGU*, 2015, no. 9, pp. 28–38. (In Russ.)
26. Vassilev S.V., Vassileva C.G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel*, 2007, vol. 86, pp. 1490–1512.
27. Kovaleva E., Matveenko T., Vagurin I., Kuzmina O. Impact of ash and slag landfills of thermal power plants on atmospheric air, soils and plants. *Polish Journal of Science*, 2020, no. 28, pp. 11–21. (In Russ.)
28. Shumilova L.P. Assessing technogenic pollution of soils in Blagoveshchensk. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2016, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.)
29. Kholodova M.S., Pastukhov M.V., Bychinsky V.A., Prosekin S.N., Belozerova O.Yu. Mineral and material composition of solid sediment of snow cover in various functional zones of Usolye–Sibirskoe. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 219–230. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/73212> (accessed 3 July 2023).
30. Usmanova L.I., Zamana L.V. Comparative ecological and hydrochemical characteristics of hydraulic ash and slag dumps of heat power stations of the fuel and energy complex of the Eastern Transbaikalia. *Geosphere Research*, 2021, no. 2, pp. 87–100. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.17223/25421379/19/8> (accessed 03 July 2023).
31. Dzhumanyan N.R., Nastavkin A.V. Maceral and chemical compositions of brown coals from the Mugunsk deposit. *Himiya tverdogo topliva*, 2019, vol. 53, no. 4, pp. 197–201. (In Russ.)
32. Ilenok S.S., Arbuzov S.S. Metalliferous coals of Azeyskoe deposit of Irkutsk coal basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 132–144. (In Russ.) Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/50263> (accessed 3 July 2023).
33. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *International Journal of Coal Geology*, 2011, vol. 86, pp. 318–328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.005> (accessed 3 July 2023).
34. Arbuzov S.I. *Geochemistry of rare elements in Central Siberian coals*. Dr. Diss. Abstract. Tomsk, 2005. 48 p. (In Russ.)
35. Kizilshstein L.Ya. Geochemistry of heavy metals in coal: an environmental perspective. *Geohimiya*, 1998, no. 8, pp. 848–853. (In Russ.)
36. Wang Y., Hu H., Wang X., Liu H., Dong L., Luo G., Zhao Y., Yao H. A critical review on lead migration, transformation and emission control in Chinese coal-fired power plants. *Journal of Environmental sciences*, 2022, vol. 124, pp. 397–413. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.039> (accessed 3 July 2023).
37. Huang Y., Gong H., Hu H., Fu B., Yuan B., Li S., Luo G., Yao H. Migration and emission behavior of arsenic and selenium in a circulating fluidized bed power plant burning arsenic/selenium-enriched coal. *Chemosphere*, 2021, vol. 263, 127920. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127920> (accessed 3 July 2023).
38. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Toxic elements impurities in fossil coals*. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2005. 650 p. (In Russ.)
39. Pautov D.V. Role of natural and anthropogenic factors in the formation of the groundwater regime (using the example of Usoliekhimprom). *Proc. of the All-Russian conference on groundwater in Eastern Russia*. Irkutsk, IGTU Publ., 2003. pp. 174–176. (In Russ.)
40. Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V. Current chemical composition of Lake Baikal. *Inland waters*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 250–258. Available at: <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1329982> (accessed 3 July 2023).
41. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Proydakova O.A., Zarubina O.V. Long-term geochemical monitoring of the source of the Angara River (runoff from Lake Baikal). *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 480, no. 2, pp. 735–740. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060028> (accessed 3 July 2023).
42. Karnaukhova G.A. Lithological composition of bottom sediments in the river-reservoir barrier zone (case study of Bratsk Reservoir). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2015, vol. 13, pp. 78–87. (In Russ.)
43. Grebenshchikova V.I., Zagoruljko N.A. Long-term monitoring of macro- and trace element composition of the Angara River runoff. *Vestnik IRGSHA*, 2013, vol. 57-2, pp. 88–95. (In Russ.)
44. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V., Dolgikh P.G. Trace element compositions and water quality assessment in the Angara river source (Baikal Region, Russia). *Water*, 2022, vol. 14, 3564. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14213564> (accessed 3 July 2023).
45. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A., Lomonosov I.S. *Environmental Geochemistry of Pribaikalye (Baikal Ecological Test Site)*. Novosibirsk, Academic Publ. «Geo», 2008. 234 p.
46. Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhitsinsky Yu.B. *Changes in the geological environment in the zone of influence of the Angara-Yenisei reservoirs*. Novosibirsk, Siberian Publ. Company of the Russian Academy of Sciences, 1999. 254 p.

Information about the authors

Evgeniia A. Tsvetkova, Postgraduate Student, Research Engineer, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation. e.tsvetkova@igc.irk.ru

Vera I. Poletaeva, Cand. Sc., Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation; Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. alieva@igc.irk.ru

Mikhail V. Pastukhov, Cand. Sc., Senior Researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russian Federation. mpast@igc.irk.ru

Received: 04.07.2023

Revised: 24.08.2023

Accepted: 10.04.2024