

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 504.058

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-73-85

ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РЕКУ ИРТЫШ И ЕЕ ПРИТОКИ
С ВОДОСБОРНОЙ ПЛОЩАДИСпартак Геннадьевич Яковченко¹, Ирина Владимировна Жерелина², Ирина Дмитриевна Рыбкина³,
Сергей Васильевич Краморенко⁴^{1,2} ООО «Центр инженерных технологий», г. Барнаул, Россия³ Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул, Россия⁴ Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Россия¹ spartak.cet@gmail.com, РИНЦ Author ID: 1250, Scopus Author ID: 55299965900² zherelina@mail.ru, РИНЦ Author ID: 158132, Scopus Author ID: 36500590700, ORCID: 0000-0003-1446-4087³ irina.rybkina@mail.ru, РИНЦ Author ID: 424585, Scopus Author ID: 55949918000, ORCID: 0000-0002-0081-9652⁴ selim-555@yandex.ru

Аннотация. Актуальность исследования определена необходимостью оценки вклада Республики Казахстан в поступление тяжелых металлов в р. Иртыш и ее притоки для урегулирования вопросов улучшения качества воды и укрепления добрососедских отношений в бассейне трансграничной р. Иртыш. Цель – количественная оценка поступления тяжелых металлов в реку Иртыш и ее притоки с территории металлогенических зон, включая участки, нарушенные горной добычей, для оценки вклада трансграничного переноса в формирование качества воды р. Иртыш на территории России. В результате проведенного исследования определено, что в бассейне р. Иртыш основной сток тяжелых металлов формируется на территории металлогенических зон Восточного Урала и Казахстана, в границах которых ведется добыча и переработка рудных полезных ископаемых. В трансграничных створах на формирование качества воды р. Иртыш и ее притоков прежде всего оказывает влияние водосборная площадь ниже каскадов водохранилищ, созданных на реках Иртыш, Тобол и Ишим на казахстанской части бассейна. Установлено, что диффузный сток тяжелых металлов в р. Тобол с нарушенных территорий рудоносной зоны Восточного Урала на несколько порядков выше их фонового поступления, при этом значительна роль процессов осаждения тяжелых металлов в донные осадки. Вклад Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш и ее притоков наиболее существенен для р. Ишим и р. Иртыш на участке до впадения р. Ишим, незначителен в загрязнение р. Тобол, а ниже впадения р. Тобол практически не прослеживается. Полученные выводы сделаны на основании достаточно ограниченного объема исходных данных, в связи с чем нуждаются в дополнительном обосновании на основе комплексных натурных исследований физико-химических процессов трансформации и миграции тяжелых металлов в почвах и техногенных образованиях металлогенических зон Восточного Урала и Северного Казахстана.

Ключевые слова: диффузное загрязнение водных объектов, металлогенические зоны, горнодобывающие предприятия, нарушенные территории, трансграничный перенос, тяжелые металлы, бассейн р. Иртыш

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (22–14–НИР/02).

Для цитирования: Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В. Оценка поступления тяжелых металлов в реку Иртыш и ее притоки с водосборной площади // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 73–85. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-73-85

HYDROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-73-85

ASSESSMENT OF HEAVY METAL INPUT INTO THE IRTYSH RIVER AND ITS TRIBUTARIES
FROM THE CATCHMENT AREASpartak G. Yakovchenko ¹, Irina V. Zherelina ², Irina D. Rybkina ³, Sergey V. Kramorenko ⁴^{1,2} Engineering Technologies Center, ООО (LLC), Barnaul, Russia³ Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, Russia

© 2025 Эта работа Яковченко С.Г., Жерелиной И.В., Рыбкиной И.Д., Краморенко С.В. лицензирована по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

⁴ Institute of Economics and Industrial Engineering, SB RAS, Novosibirsk, Russia¹ spartak.cet@gmail.com, RSCI Author ID: 1250, Scopus Author ID: 55299965900² zherelina@mail.ru, RSCI Author ID: 158132, Scopus Author ID: 36500590700, ORCID: 0000-0003-1446-4087³ irina.rybkina@mail.ru, RSCI Author ID: 424585, Scopus Author ID: 55949918000, ORCID: 0000-0002-0081-9652⁴ selim-555@yandex.ru

Abstract. It is essential to assess the contribution of the Republic of Kazakhstan to the flow of heavy metals into the Irtysh River and its tributaries through transboundary stations in order to resolve the issues of improving water quality and strengthening good neighborly relations in the basin of the transboundary Irtysh River. The paper aims to: quantitatively assess the influence that natural and anthropogenic geological and geochemical factors have on heavy metal pollution of the Irtysh River and its tributaries in the Russian and Kazakhstan parts of the catchment area; estimate the transboundary transfer of heavy metals with waters of the Irtysh, Ishim, and Tobol rivers. The study has shown that in the Irtysh River basin the main runoff of heavy metals is formed on the territory of the metallogenic zones of the Eastern Urals and Kazakhstan, within the boundaries of which ore minerals are mined and processed. At transboundary sites, the water quality of the Irtysh River and its tributaries is mainly influenced by the catchment area downstream of the cascades of reservoirs created on the Irtysh, Tobol, and Ishim rivers in the Kazakh part of the basin. It has been established that the diffuse runoff of heavy metals into the Tobol River from the disturbed territories of the ore-bearing zone in the Eastern Urals is several orders higher than their background inflow, with a significant role of heavy metal deposition in bottom sediments. The contribution of the Republic of Kazakhstan to the pollution of the Irtysh River and its tributaries is most significant for the Ishim River and the Irtysh River in the section up to the confluence of the Ishim River; Kazakhstan's contribution to the pollution of the Tobol River is insignificant; such contribution is practically not traceable below the confluence of the Tobol River. The conclusions obtained are made on the basis of a rather limited amount of initial data, and therefore require additional justification based on comprehensive field studies into physicochemical processes of heavy metals transformation and migration in soils and anthropogenic formations of metallogenic zones in the Eastern Urals and Northern Kazakhstan.

Keywords: diffuse pollution of water bodies, metallogenic zones, mining enterprises, disturbed territories, transboundary transfer, heavy metals, Irtysh River basin

Funding. The research was carried out as part of the state program 'Scientific and Technological Development of the Russian Federation' (22-14-NIR/02).

For citation: Yakovchenko, S.G., Zherelina, I.V., Rybkina, I.D., Kramorenko, S.V. (2025). Assessment of heavy metal input into the Irtysh River and its tributaries from the catchment area. *Geographical Bulletin*. 2025. No. 1(72). Pp. 73–85. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-73-85

Введение

Проблема загрязнения трансграничной р. Иртыш и ее притоков тяжелыми металлами актуальна как для России, так и для Казахстана, особенно остро стоит вопрос трансграничного переноса тяжелых металлов с территории Республики Казахстан на территорию Российской Федерации [2, 26, 27]. Однако доля вклада каждой из стран в загрязнение р. Иртыш и ее притоков тяжелыми металлами, оценка природной и антропогенной составляющих, участие локальных и диффузных источников загрязнения недостаточно изучены.

В первом приближении количественная оценка поступления тяжелых металлов (меди и цинка) в р. Иртыш с российской части водосборной площади выполнена с использованием модели ILLM, описанной в числе других в материалах Хельсинской комиссии как приемлемой для расчета внешней нагрузки на водные объекты и прошедшей верификацию на водных объектах Северо-Запада России [10, 12, 28]. Результаты моделирования показали, что вклад локальных источников в загрязнение р. Иртыш тяжелыми металлами составляет в среднем по меди – 0,6 %, по цинку – 4 %, при этом большая их часть поступает с водосборной площади Тобола. Основной вклад вносит рассредоточенный вынос металлов с водосбора, где доминирует природная (фоновая) составляющая, на которую приходится более 70 % как по меди, так и по цинку. Однако, как отмечают авторы, в связи с отсутствием и неполнотой необходимых исходных данных для проведения моделирования полученные результаты являются приближенными и нуждаются в дальнейшем уточнении [11]. Кроме того, формирование внешней нагрузки тяжелыми металлами на р. Иртыш на казахстанской части водосбора в работе не рассматривалось.

В то же время проблема трансграничного переноса тяжелых металлов стоит очень остро и является предметом обсуждения на заседаниях рабочих групп по Иртышу, Ишиму и Тоболу в составе Совместной Российско-Казахстанской комиссии по использованию и охране трансграничных водных объектов. Одним из важнейших вопросов международного сотрудничества Казахстана и России является предотвращение трансграничного воздействия [23].

Цель работы – получение приближенной количественной оценки поступления тяжелых металлов в р. Иртыш и ее притоки с территории металлогенических зон, включая участки, нарушенные горной добычей, для оценки вклада трансграничного переноса в формирование качества воды р. Иртыш на территории России. Оценка проводится по опубликованным экспериментальным данным и открытым данным мониторинга недропользователей. В связи с тем, что при приближенной оценке по модели ILLM и в расчетах, базирующихся на данных мониторинга недропользователей, используются разные исходные данные и методы, представляет интерес сравнение полученных результатов.

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Материалы и методика

Бассейн р. Иртыш расположен на территории четырех государств: России, Казахстана, Китая и Монголии. Часть водосбора, занятая Монголией, практически не освоена, очень мала по площади, составляющей 0,1 % (1,4 тыс. км²) от общей площади бассейна. Территория Китая в бассейне Иртыша также невелика (51,3 км², или 4,5 %), расположена выше оз. Зайсан на водосборе р. Черный Иртыш; трансграничный створ Китая и Казахстана удален от российской-казахстанской границы более чем на 1,5 тыс. км. В связи с этим можно предположить, что влияние Монголии и Китая на формирование качества воды р. Иртыш на российской части водосбора будет ничтожно мало и может не учитываться.

На территории России и Казахстана в границах бассейна р. Иртыш расположены металлогенические зоны, активно ведется добыча и переработка рудных полезных ископаемых. Геологическая среда, включающая породы с повышенной концентрацией соединений тяжелых металлов, является одним из важнейших факторов, определяющих их вынос с водосборной площади. Поступление тяжелых металлов этого генезиса делится на природную составляющую, представленную стоком с территорий ненарушенных горной добычей, и техногенную составляющую – сток с территорий добычи и переработки полезных ископаемых. Местоположение нарушенных территорий на участках добычи полезных ископаемых тесно связано с местами концентрации соединений тяжелых металлов в геологической среде (рис. 1). Соединения железа, меди, цинка и марганца являются основными в разрабатываемых месторождениях, прочие тяжелые металлы (кадмий, свинец, ртуть, никель, хром), как правило, сопутствуют им. Местоположение месторождений тяжелых металлов находится в зависимости не только от металлогенических зон, но и от гидрогеологических регионов [17]. В этой связи для оценки влияния геолого-геохимических факторов на загрязнение тяжелыми металлами водных объектов ареал распространения рудоносной полосы принят приближенно совпадающим с территорией соответствующего ему гидрогеологического региона.

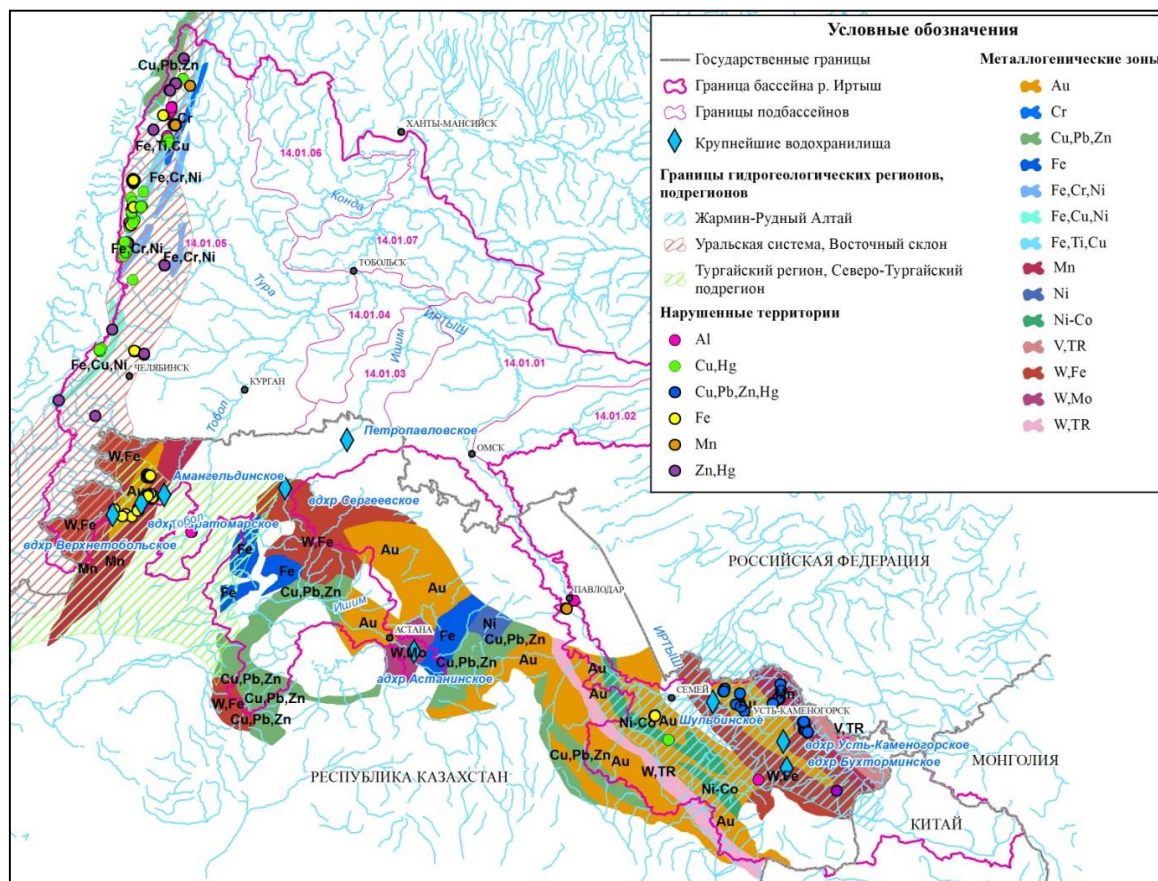


Рис. 1. Металлогенические зоны и гидрогеологические регионы в границах бассейна р. Иртыш, составлено авторами по: [1, 3, 4, 6, 8, 13, 14, 16, 20]

Fig. 1. Metallogenic zones and hydrogeological regions within the boundaries of the Irtysh River basin, compiled by the authors from: [1, 3, 4, 6, 8, 13, 14, 16, 20]

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Сток реки Иртыш и ее крупнейших притоков – Ишима и Тобола – на территории Казахстана зарегулирован каскадами водохранилищ (рис. 1). В водохранилищах при снижении скорости течения происходит осаждение тяжелых металлов и их накопление в донных отложениях. М.С. Паниным на основе анализа большого объема натурных данных по водосборам 10 правых притоков р. Иртыш (суммарная площадь 35 275 км²), водосборам 15 левых притоков р. Иртыш (суммарная площадь 45 901 км²) и водосбору собственно р. Иртыш (площадь 173 190 км²) выполнена оценка поступления тяжелых металлов в речную систему Иртыша в границах Семипалатинского Прииртышья [18]. В табл. 1 приведены результаты расчетов М.С. Панина и объем тяжелых металлов в трансграничном створе р. Иртыш – с. Татарка по данным наблюдений Росгидромета за период 1987–2020 гг.

В результате анализа данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что с левобережной части Семипалатинского Прииртышья в р. Иртыш тяжелых металлов поступает на несколько порядков меньше, чем с водосборной площади правобережных притоков и собственно р. Иртыш, где ведется активная добыча и переработка металлических руд. К трансграничному створу в с. Татарка содержание тяжелых металлов в воде существенно снижается, что свидетельствует о значительной роли процессов осаждения тяжелых металлов в водохранилищах и на транзитном участке Иртыша ниже Шульбинского водохранилища.

Таблица 1

Сравнительная оценка поступления тяжелых металлов с водосборной площади р. Иртыш в Республике Казахстан и наблюдения Росгидромета в трансграничном створе

Comparative assessment of heavy metal inputs from the Irtysh River catchment area in the Republic of Kazakhstan and according to observations of the Roshydromet (Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring) at the transboundary gauging station

Створ/участок	Тяжелые металлы, тонн/год						Всего
	Zn	Cu	Mn	Pb	Cd	Cr	
Трансграничный створ р. Иртыш – с. Татарка, т/год	557	243	1 080	10,6	0,19	25,9	1916,69
Суммарная нагрузка на водосборе собственно р. Иртыш, т/год [18, табл. 159]	33 700	19 100	30 300	13 400	589	6 600	103689
Суммарная нагрузка на водосборе 10 правых притоков р. Иртыш, т/год [18, табл. 159]	99 400	27 000	32 200	9 050	6000	2 160	175810
Суммарная нагрузка на водосборе 15 левых притоков р. Иртыш, т/год [18, табл. 159]	307	236	283	145	13,8	50,9	1035,7

Таким образом, следует предположить, что основное влияние на загрязнение р. Иртыш тяжелыми металлами оказывают территории, расположенные ниже каскадов водохранилищ, роль гидрогеологического региона Жармин-Рудный Алтай менее значима для формирования химического стока р. Иртыш на границе с Российской Федерацией. Следовательно, оценку поступления тяжелых металлов в р. Иртыш и ее притоки с казахстанской части бассейна целесообразно проводить только для водосборной площади ниже каскадов водохранилищ. Влияние Усть-Каменогорского промышленного узла на качество воды р. Иртыш не рассматривается, так как оно на границе с Российской Федерацией с большой долей вероятности не прослеживается.

Ввиду различной степени изученности водосборной площади Иртыша в Казахстане и России, обеспеченности данными по выносу тяжелых металлов, использованы различные методики оценки. Общим методическим подходом является количественный и пространственный анализ величин среднегодовых потоков тяжелых металлов через заданные створы, рассчитанных на основе данных по концентрациям тяжелых металлов и водному стоку.

На российской части водосбора р. Иртыш слой стока поверхностных вод рассчитан по данным среднегодовых значений наблюдений Росгидромета за период 1987–2020 гг. Источники диффузного загрязнения на территориях, нарушенных горными работами, определены по опубликованным [9, 17, 19, 21, 22, 25], картографическим и спутниковым данным открытого доступа. Фоновое поступление тяжелых металлов – по фоновым концентрациям тяжелых металлов в поверхностных и трещинно-грунтовых водах [1]. Для оценки концентраций тяжелых металлов в поверхностном стоке с территорий, нарушенных горными работами, применен метод аналогии. В качестве модельных объектов использованы горные предприятия, расположенные в бассейне р. Урал [1, 6], по причине отсутствия подобных исследований в бассейне р. Иртыш.

Оценка вклада Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш тяжелыми металлами выполнена по данным среднегодовых значений наблюдений Росгидромета за период 1987–2020 гг. в трансграничных створах, в связи с отсутствием достоверной информации о характеристиках стока тяжелых металлов потенциальных источников диффузного загрязнения р. Иртыш на территории Казахстана. Доля вклада Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш и ее притоков по длине гидрографической сети оценена методом математического моделирования на основе уравнения баланса годового потока тяжелых металлов на участках речной сети.

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Результаты

Оценка поступления тяжелых металлов с восточного склона Урала
(водосборная площадь р. Тобол)

В поверхностных и трещинно-грунтовых водах рудоносной полосы Восточного Урала среднее значение фоновых концентраций составляет для меди – 0,001 мг/л, для цинка – 0,005 мг/л [1]. Концентрации других микроэлементов оценены исходя из предположения о близости соотношения между концентрациями микроэлементов в околорудных водах и их концентрациями в поверхностных и трещинно-грунтовых водах, так как процессы трансформации тяжелых металлов в целом подобны. Таким образом, фоновые концентрации свинца, марганца, никеля и хрома в поверхностных и трещинно-грунтовых водах оценены с использованием среднего по муниципальным районам Республики Башкирии (Учалинский, Баймакский, Бурибай-Гайский районы) отношения концентраций микроэлементов к концентрации меди и цинка в околорудных водах этих же районов (табл. 2). Фоновое (природное) поступление тяжелых металлов с площади гидрогеологических регионов рассчитано как произведение слоя стока поверхностных вод (табл. 3) на концентрацию тяжелых металлов (табл. 2) и приведено в табл. 4.

Таблица 2

Фоновые концентрации микроэлементов в поверхностных и трещинно-грунтовых водах
Background concentrations of trace elements in surface and fracture-soil waters

Тяжелые металлы	Концентрация в околорудных водах, мг/л [1, табл. 7, 8]			Средний коэффициент к концентрации меди в околорудных водах	Средний коэффициент к концентрации цинка в околорудных водах	Пересчет в фоновые значения для поверхностных и трещинно-грунтовых вод, мг/л
	Учалинский район	Баймакский район	Бурибай-Гайский район			
Медь	0,1	0,5	0,5	1,0000	0,5970	0,001*
Цинк	0,8	0,4	1,2	3,7300	1,0000	0,005*
Свинец	0,02	0,01	0,08	0,1270	0,0389	0,0001610
Марганец	0,1	0,2	0,5	0,8000	0,3472	0,0012700
Никель	0,001	0,001	0,01	0,0107	0,0040	0,0000154
Хром	0	0,001	0,001	0,0013	0,0011	0,0000034

Примечание: * – измеренные средние значения [1, 15]

Note: * - measured mean values [1, 15]

Таблица 3

Рассчитанный слой стока поверхностных вод с территории гидрогеологических регионов бассейна р. Иртыш
Calculated layer of surface water runoff from the territory of hydrogeological regions in the Irtysh River basin

Гидрогеологический регион, подрегион	Площадь, км ²	Слой стока, мм/год	Источник
Уральская система, Восточный склон Урала	139000	127	Среднее значение по водосборной площади 83 водотоков
Жармин-Рудный Алтай (правый берег р. Иртыш)	70300	1010	Среднее значение по водосборной площади 5 правых притоков Иртыша
Жармин-Рудный Алтай (левый берег р. Иртыш)	126000	410	Водосборная площадь р. Таинты (гидрологический пост р. Таинты – с. Таинты)
Тургайский регион, Северо-Тургайский подрегион (водосбор Тобола и Ишим на территории Казахстана)	52700	434	Водосборная площадь р. Тобол (гидрологический пост р. Тобол – с. Звериноголовское)

Таблица 4

Оценка фоновой (природной) поступления тяжелых металлов с восточного склона Уральских гор, тонн
Estimated background (natural) input of heavy metals from the eastern slope of the Ural Mountains, tons

Тяжелые металлы	Фоновое (природное) поступление, тонн
Цинк	88,4
Медь	17,7
Никель	0,272
Марганец	22,4
Свинец	2,84
Хром	0,061

Приближенная оценка поступления тяжелых металлов в водные объекты Иртыша с техногенных территорий (диффузный сток) проведена методом аналогии, при котором характеристики модельного объекта распространяются на прочие объекты этого типа. В связи с тем, что для рудоносной зоны Восточного Урала наиболее распространенными потенциальными источниками диффузного загрязнения являются предприятия по добыче меди и цинка (табл. 5), в качестве модельного объекта принято Учалинское медно-цинковое месторождение (Республика Башкортостан) [1]. Дополнительно в качестве модельных объектов использованы Карпушихинское, Левихинское, Дегтярское, Пышминско-Ключевское медноколчедановые месторождения (Свердловская область) [6].

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Таблица 5

Объекты горнодобывающей промышленности – источники диффузного загрязнения
Mining facilities being sources of diffuse pollution

Тип объекта	Число объектов / в т.ч. отрабо- танных и закон- сервированных	Площадь объектов, специализирующихся на добыче руд определенного типа, км ²					Общая пло- щадь, км ²
		Cu	Cu, Ni	Fe	Mn	Ni	
Шахты	30 / 17	не определена					
Карьер	54 / 29	1,4	5,7	17,7	0,8	1,8	27,4
Отвал	68 / 27	20,8	11,4	8,9	0,3	10,4	51,9
Хвостохранилище / шламохранилище	23 / 10	17,3	0,9	20,5	5,1	–	43,8
Зона влияния ГОК, ИФ	39 / 20	6,8	0,5	1,1	0,2	0,5	9,0
Итого	214/103	46,3	18,5	48,2	6,3	12,7	132,1

Примечание: ГОК – горно-обогатительный комбинат, ИФ – извлекательная фабрика

Note: ГОК - mining and processing plant, ИФ - extraction plant

На первом этапе выполнена схематизация источников диффузного загрязнения, расположенных на территориях, нарушенных предприятий горнодобывающей отрасли, по особенностям их взаимодействия с грунтовыми и поверхностными водами. В результате анализа выделено 6 типов источников: шахты, карьеры, отвалы, шламохранилища, хвостохранилища, зоны влияния (производственная и селитебная территории, загрязненные выбросами ГОК, ИФ). В силу близости генезиса, спектра и концентраций тяжелых металлов загрязненные воды объединены в 4 группы: а) шахтные и карьерные, б) подотвальные, в) фильтрат хвостохранилищ и шламохранилищ, г) сточные воды с территории зоны влияния ГОК и ИФ. Концентрации тяжелых металлов в диффузном стоке приняты по данным измерений модельных объектов (табл. 6).

Диффузный сток с нарушенных территорий рассчитан как произведение годового поверхностного и грунтового стока с площади источника загрязнения и концентрации тяжелых металлов в стоке. Для Восточного Урала ввиду высокой проницаемости поверхностного слоя почвогрунтов [1] и небольшой величины осадков слой грунтового стока принят близким к слою суммарного стока. Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Таблица 6

Концентрации тяжелых металлов в загрязненных водах поверхностных водных объектов на территориях,
нарушенных горной добычей [1, 6]

Concentrations of heavy metals in polluted waters of surface water bodies in areas disturbed by mining operations [1, 6]

Группа загрязненных вод	Концентрация, мкг/литр					
	Zn	Cu	Ni	Mn	Pb	Cr
Шахтные и карьерные воды [6]	68,4	7,13	–	7,40	–	–
Подотвальные воды [1, 6]	1500	830	0,008	0,005	0,008	0,030
Фильтрат хвостохранилищ и шламохранилищ [6]	0,185	–	18,2	69,6	0,170	0,185
Сточные воды с территории зоны влияния ГОК и ИФ [6]	326	1030	–	2050	109	–

Таблица 7

Диффузный сток тяжелых металлов с территории горнодобывающих предприятий Восточного Урала

Diffuse runoff of heavy metals from the territory of mining enterprises in the Eastern Urals

Тип объекта	Диффузный сток, тонн/год					
	Zn	Cu	Ni	Mn	Pb	Cr
Шахты*	5130	535	0	555	0	0
Карьеры**	238	24,8	0	25,8	0	0
Отвалы	9870	5470	0,05	0,03	0,05	0,2
Шламохранилища/ хвостохранилища	1,03	0	101	387	0,95	1,03
Зоны влияния ГОК, ИФ	373	1170	0	2350	124	0
Итого	15612,03	7199,8	101,05	3317,83	125,0	1,23

Примечание: * – все шахтные поля рассматривались как действующие, водопиток для одного поля принят 285 м³/час (средний по годам водопиток/излив по Дегтярскому и Гумешевскому месторождениям по [6]); ** – все карьеры рассматривались как отработанные

Note: * – all mine fields were considered as operating, water inflow for one field was assumed to be 285 m³/hour (annual average water inflow/outflow for Degtyarskoye and Gumeshevskoye fields according to [6]); ** – all quarries were considered as worked-out

При отсутствии гидрохимических пунктов Росгидромета на территории исследуемого района для верификации результатов расчетов использованы суммарные значения тяжелых металлов в поверхностном стоке притоков р. Тобол, исток которых находится в рассматриваемом районе (приняты верхние по течению рек створы наблюдений). Расчеты выполнены по среднегодовым концентрациям тяжелых металлов, среднесуточному модулю стока или модулю стока для года 50 % обеспеченности по данным [5]. Результаты расчетов представлены в табл. 8.

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Таблица 8

Среднегодовое гидрохимическое стока тяжелых металлов в отдельных створах рек, имеющих исток в рудоносной зоне Восточного Урала по [5]

Average annual hydrochemical runoff of heavy metals in some river cross-sections for rivers having their source in the ore-bearing zone of the Eastern Urals according to [5]

Река	Номер створа [5]	Среднегодовое гидрохимическое стока тяжелых металлов, тонн/год				
		Zn	Cu	Ni	Mn	Cr
Тура (устье)	130-12	56,2	204	21,1	1760	—
Исеть (устье)	129-12	203	51,3	11,2	178	—
Синара	129-3	3,46	2,09	1,37	20,9	0
Теча	129-4	8,23	1,90	0,00	16,8	0
Миасс	128-1	2,14	1,55	0,27	5,04	0
Уй	132-3	11,9	5,71	20,2	130	0

Оценка вклада Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш тяжелыми металлами

В Республике Казахстан основные отрасли промышленности представлены добычей рудных полезных ископаемых и металлургией. Предприятия этих отраслей, являющиеся потенциальными источниками загрязнения территории и водных объектов тяжелыми металлами, расположены преимущественно в бассейне р. Иртыш, в границах бессточных областей Иртыш-Ишимского и Ишим-Тобольского междуречий. В результате анализа опубликованных данных, а также доступной технической документации недропользователей [9, 17, 19, 21, 22, 25] выявлено 10 предприятий, на территории которых расположены потенциальные источники диффузного загрязнения (рис. 2).

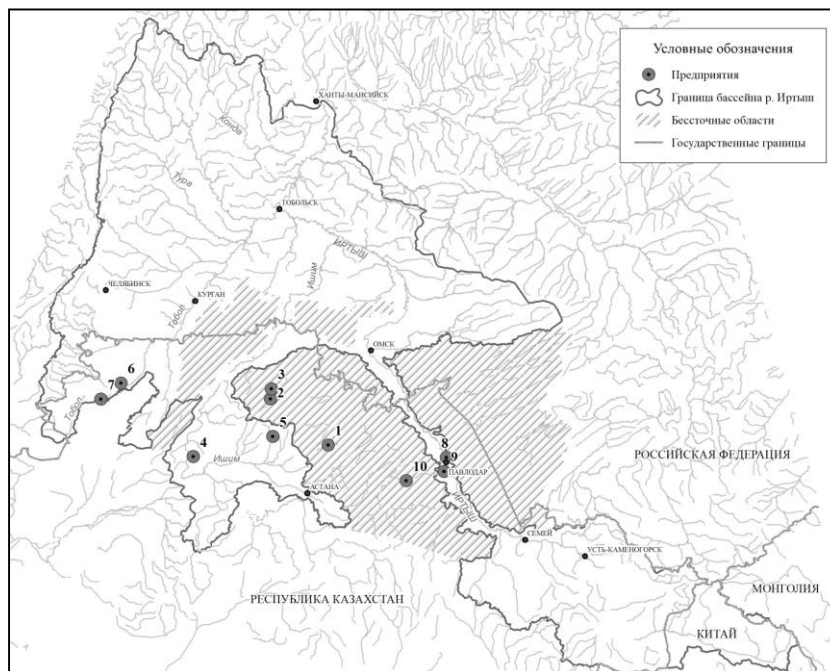


Рис. 2. Местоположение основных потенциальных источников загрязнения р. Иртыш и ее притоков тяжелыми металлами на территории Северного Казахстана: 1 – ТОО «Степногорский горно-химический комбинат»;

2 – ТОО «AltyntauKokshetau» (бывший Васильковский ГОК); 3 – ТОО «Тиолайн», Обуховский ГОК; 4 – ТОО «Масальский ГОК»; 5 – ТОО «RGGOLD», ЗИФ ГОК «Райгородок»; 6 – Соколовско-Сарбайское горное производственное объединение; 7 – ТОО «Лисаковский ГОК»; 8 – ПО «Химпром»; 9 – АО «Транснациональная компания «Казхром», Аксусская ГРЭС; 10 – ТОО «Бозшакольский ГОК», KAZMinerals

Fig. 2. Main potential sources of heavy metal pollution of the Irtysh River and its tributaries located on the territory of Northern Kazakhstan: 1 – Stepnogorsk Mining and Chemical Combine, TOO (LLP); 2 – AltyntauKokshetau, TOO (LLP) (former Vasilkovsky GOK); 3 – Tioline, , TOO (LLP), Obukhovskiy GOK, TOO (LLP); 5 – RGGOLD, TOO (LLP), ZIF GOK Raigorodok Mill; 6 – Sokolovsko-Sarbayskoye Mining Production Association; 7 – Lisakovskiy GOK, TOO (LLP); 8 – PO Khimprom; 9 – Transnational Company Kazchrome, AO (JSC), Aksusskaya SDPP; 10 – Bozshakolskiy GOK, TOO (LLP), KAZMinerals

Количественная оценка их влияния на загрязнение водных объектов тяжелыми металлами затруднена в связи с тем, что на большинстве из них мониторинг проводится только локальными скважинами по основному направлению стока. Исключение составляет ТОО «Степногорский горно-химический комбинат», на котором в советские годы была создана многоуровневая система мониторинга подземных вод. На всех горнорудных предприятиях не ведется мониторинг поверхностных водных объектов, в которые разгружаются грунтовые воды. Наибольшее внимание уделяется мониторингу подземных вод на объектах с высоким фоновым содержанием радиоактивных элементов, контроль тяжелых металлов и их миграция не проводятся.

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Особую опасность представляют загрязненные территории и отходы ликвидированных предприятий горнодобывающей и перерабатывающей отраслей, признанные бесхозяйными. Правительством Республики Казахстан и региональными органами власти ведутся работы по управлению этими опасными отходами, например ликвидированы источники ртутного загрязнения на территории бывшего ПО «Химпром» в г. Павлодаре, в Костанайской области принято решение о ликвидации ртутьсодержащих отходов, а в Актыбинской области – бесхозяйных шламонакопителей бывшего Алгинского химического завода. Бесхозяйным опасным объектом могут стать и отвалы Торгайского бокситового рудоуправления АО «Алюминий Казахстана» (г. Аркалык, Костанайская область), так как за 65 лет работы этого предприятия запасы в карьерах отработаны полностью, и дальнейшие работы связаны с большими горнотехническими рисками [9]. Несмотря на проводимые работы по локализации и ликвидации бесхозяйных источников загрязнения, вопрос об их опасности поднимается постоянно, в том числе на международном уровне.

Приближенная оценка вклада Республики Казахстан выполнена по данным среднегодовых значений наблюдений сети Росгидромета в контрольных створах, назначенных на границе с Республикой Казахстан и в устье крупных притоков Иртыша, а также по длине р. Иртыш ниже их впадения. Установлено, что массоперенос тяжелых металлов в устье р. Тобол превосходит их поступление с территории Республики Казахстан в трансграничном створе в с. Звериноголовское по цинку в 18 раз, меди в 11 раз, никелю в 6 раз, марганцу в 8 раз, что свидетельствует о значительном вкладе Восточного Урала в загрязнение р. Тобол тяжелыми металлами. При этом в створе р. Иртыш – г. Тобольск половина стока меди, никеля и марганца, третья часть цинка и четвертая часть свинца поступает с водами р. Тобол (табл. 9).

В целях более строгой оценки вклада Республики Казахстан в поступление тяжелых металлов в систему Иртыша, годовые объемы тяжелых металлов, проходящие через трансграничные створы, сопоставлены с их годовыми объемами в замыкающих створах (для Ишима и Тобола в устье, для Иртыша – в створе выше впадения р. Ишим) с учетом поступления рассматриваемых тяжелых металлов с территории России.

Таблица 9

Массоперенос тяжелых металлов по длине р. Иртыш и ее притоков
Mass transfer of heavy metals along the length of the Irtysh River and its tributaries

Створ	Массоперенос, тонн/год					
	Zn	Cu	Ni	Mn	Pb	Cr
р. Тобол – с. Звериноголовское	26,2	16,9	13,1	525	–	–
р. Ишим – с. Ильинка	30,1	10,2	36,9	133	1,40	–
р. Иртыш – с. Татарка	557	243	54,8	1080	10,6	25,9
Суммарный сток с территории Республики Казахстан	613,3	270,1	104,8	1738	12	25,9
р. Тобол – с. Тобольск	459	189	83,1	4280	39,4	121
р. Ишим – с. Усть-Ишим	41,2	25,9	6,44	345	0,00	5,56
р. Иртыш – с. Усть-Ишим	438	275	69,7	2120	85,7	99,7
р. Иртыш – г. Тобольск	1220	431	191	7190	148	–
р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск	2660	879	311	10000	163	0

В расчете использовано простое уравнение баланса годового потока тяжелых металлов по длине участка ($I=0...L$) реки при наличии осаждения:

$$d\Gamma/dI = -k \cdot \Gamma + P/L, \quad (1)$$

где Γ – годовой поток тяжелых металлов; k – коэффициент осаждения тяжелых металлов, L – длина участка, P – поступление тяжелых металлов на участке ниже границы с Казахстаном (считается равномерно распределенным по участку) за конкретный год. На границе с Республикой Казахстан ($I=0$) $\Gamma=\Gamma_k$, где Γ_k – поступление тяжелых металлов с территории Казахстана. В границах каждого участка поступление тяжелых металлов (P) может быть выражено:

$$P = P_0 \cdot \lambda, \quad (2)$$

где P_0 – характерная для данного участка и постоянная за весь период по годам величина, равная поступлению тяжелых металлов в 1987 г., тонн; λ – коэффициент, характеризующий относительное изменение поступления тяжелых металлов по годам, принят равным отношению добычи металлических руд в расчетный год к добыче руды в 1987 г. (год начала моделирования), для периода СССР индекс принят равным 1 (рис. 3).

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

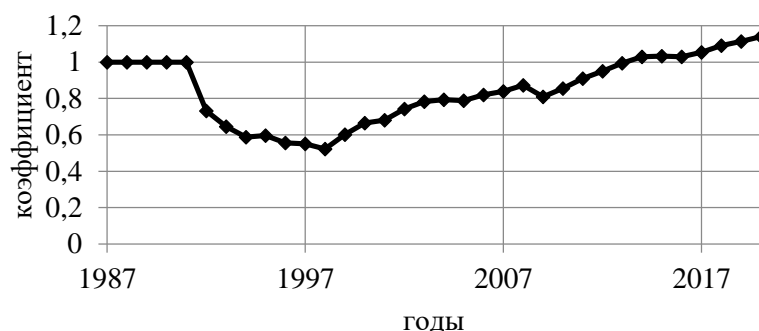


Рис. 3. Изменение коэффициента λ , характеризующего относительное изменение поступления тяжелых металлов по годам по: [7, 24]

Fig. 3. Change in λ coefficient characterizing the relative change of heavy metal input by years according to: [7, 24]

Решение уравнения (1) по длине рассматриваемого участка реки позволяет выразить поток тяжелых металлов в замыкающем створе соответствующего участка (Гз) через их поток с территории Казахстана (Гк), параметры k и P :

$$Гз = Гк \cdot \exp(-kL) + (P/kL) \cdot (1 - \exp(-kL)). \quad (3)$$

При моделировании для каждого участка подбирались параметры P_0 и k , минимизирующие сумму по годам квадратов разностей измеренных и модельных потоков тяжелых металлов в замыкающем створе Гз, при условии совпадения значений среднегодового (рассчитанного на основе измерений) и модельного потоков. Моделирование проводилось только по годам, обеспеченным данными наблюдений как во входящем, так и в замыкающем створах участка, вследствие чего расчетные значения могут отличаться от представленных в табл. 10.

По рассчитанным P_0 и k определено среднеегодовое поступление тяжелых металлов на каждый из участков с территории России $Рср = P_0 \cdot \lambda_{ср}$ ($\lambda_{ср}$ – среднее значение λ за годы моделирования для рассматриваемых тяжелых металла и участка моделирования) и доля тяжелых металлов, поступающих с территории Казахстана на участке в целом. Последняя определялась как $Гк_{ср} / (Рср + Гк_{ср})$, где $Гк_{ср}$ – среднее за годы моделирования поступление рассматриваемого тяжелого металла из Казахстана. Средние значения коэффициента k по всем наблюдаемым тяжелым металлам отличаются для Иртыша и его основных притоков: р. Иртыш – 0,0012, р. Тобол – 0, р. Ишим – 0,0028.

Таблица 10

Результаты приближенной оценки поступления тяжелых металлов в р. Иртыш и ее основные трансграничные притоки
Results of approximate assessment of heavy metals input into the Irtysh River and its main transboundary tributaries

Потоки тяжелых металлов	Тяжелые металлы					
	Zn	Cu	Ni	Mn	Pb	Cr
Участок р. Иртыш от границы с Республикой Казахстаном до впадения р. Ишим						
Поступление с территории Казахстана, т/год	548	240	53,7	1070	16,0	30,6
Поступление на территории России, т/год	188	198	16,3	1220	74,3	67,4
Осаждение на территории России, т/год	301	164	0,006	170	0,005	0,006
Поступление к замыкающему створу, т/год	434	274	70,0	2120	90,3	97,9
Доля Казахстана в поступлении металлов на участке, %	74,4	54,8	76,8	46,8	17,8	31,2
Число лет, обеспеченных данными	28	34	34	33	10	10
Участок р. Ишим от границы с Республикой Казахстаном до устья						
Поступление с территории Казахстана, тонн/год	26,1	11,0	43,8	153	3,31	–
Поступление на территории России, тонн/год	8,21	8,55	6,90	223	0	–
Осаждение на территории России, тонн/год	5,14	0,002	46,4	48,7	3,31	–
Поступление к замыкающему створу, тонн/год	29,2	19,5	4,32	327	0	–
Доля Казахстана в поступлении металлов на участке, %	76,1	56,2	86,4	40,7	1	–
Число лет, обеспеченных данными	21	28	26	28	3	–
Участок р. Тобол от границы с Республикой Казахстаном до устья						
Поступление с территории Казахстана, тонн/год	26,2	16,8	10,5	416	–	–
Поступление на территории России, тонн/год	465	167	64,9	3930	–	–
Осаждение на территории России, тонн/год	0,026	0,010	0,004	0,238	–	–
Поступление к замыкающему створу, тонн/год	491	183	75,4	4350	–	–
Доля Казахстана в поступлении металлов на участке, %	5,3	9,2	13,9	9,6	–	–
Число лет, обеспеченных данными	29	33	4	33	–	–

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Обсуждение

Сопоставление результатов расчетов диффузного стока тяжелых металлов с территории горнодобывающих предприятий Восточного Урала (табл. 7) и данных по гидрохимическому стоку тяжелых металлов в отдельных створах рек, имеющих исток в рудоносной зоне Восточного Урала (табл. 8), свидетельствует о значительной роли процессов осаждения тяжелых металлов, приводящих к их накоплению в донных отложениях притоков р. Иртыш. При среднем расстоянии от истоков рек до створов гидрохимических наблюдений, равном около 500 км, снижение потоков тяжелых металлов на порядок возможно при величине коэффициента осаждения $k \approx 1/250 \text{ км}^{-1} = 0,004 \text{ км}^{-1}$, что согласуется с оценкой, которую можно увидеть в монографии [5] – $k \approx 0,006 \text{ км}^{-1}$. Согласно работам других авторов, значительное снижение концентрации и потока тяжелых металлов может наблюдаться на расстоянии до нескольких десятков километров от места загрязнения реки горнодобывающим предприятием [29, 30]. В этой связи необходимы дополнительные исследования процессов трансформации тяжелых металлов, поступающих в р. Иртыш с водосборной площади.

Выполненная оценка поступления тяжелых металлов в водные объекты с водосборной площади Восточного Урала показала, что величина диффузного стока цинка, меди, никеля и марганца на три порядка больше их фоновых (природного) поступления, а хрома больше на два порядка (табл. 4, 8). Проведенные расчеты выявили значительно больший вклад диффузного стока в загрязнение водных объектов, чем при его оценке с использованием модели ILLM [11]. Следует отметить, что выводы, полученные на основе как моделирования, так и выполненных нами расчетов, нуждаются в серьезной проверке, основанной на детальном, прежде всего натурном, исследовании физико-химических процессов трансформации и миграции тяжелых металлов в почвах и техногенных образованиях рудоносной зоны Восточного Урала.

Результаты приближенной оценки вклада Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш и ее притоков показали, что с казахстанской части водосбора через трансграничный створ поступает более 70 % цинка и никеля, более 50 % меди и марганца. Вклад Казахстана в поступление тяжелых металлов в р. Тобол незначителен – около 3 %. Основная часть тяжелых металлов в р. Тобол поступает с территории Восточного Урала. В р. Ишим с территории Казахстана попадает основная доля никеля и свинца (табл. 10).

В результате проведенных расчетов можно сделать вывод, что вклад Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш и ее притоков наиболее существенен для р. Ишим и р. Иртыш на участке до впадения р. Ишим, незначителен в загрязнение р. Тобол, а ниже впадения р. Тобол практически не прослеживается. Необходимо отметить, что в связи с ограниченным объемом исходных данных, приведенная информация и предварительные выводы нуждаются в дополнительном обосновании на основе комплексных натурных исследований депонирующей роли водохранилищ, природного поступления тяжелых металлов с территорий металлогенических зон и их диффузного поступления от объектов горной промышленности.

Выводы

1. Основные источники поступления тяжелых металлов в речную систему Иртыша приурочены к трем рудоносным металлогеническим зонам: Восточный склон Урала, казахстанская часть бассейна р. Тобол и часть бассейна р. Иртыш в границах Рудного Алтая.

2. На территории российской части бассейна р. Иртыш значительная доля тяжелых металлов поступает с Восточного склона Урала с притоками р. Тобол, при этом величина диффузного стока на несколько порядков выше фоновых (природного) поступления тяжелых металлов, что свидетельствует о высокой роли техногенного изменения поверхности водосбора горнодобывающими предприятиями в формировании химического стока р. Тобол и ее притоков.

3. На территории казахстанской части бассейна на загрязнение р. Иртыш тяжелыми металлами основное влияние оказывают территории Северного Казахстана, расположенные ниже каскадов водохранилищ в Костанайской, Северо-Казахстанской, Акмолинской и Павлодарской областях, влияние Усть-Каменогорского промузла практически не прослеживается в трансграничном створе р. Иртыш.

4. В границах Республики Казахстан потенциальными источниками загрязнения поверхностных водных объектов тяжелыми металлами являются действующие и ликвидированные объекты горной промышленности (карьеры, шахты, отвалы отработанной породы, шламохранилища, хвостохранилища и другие).

5. Большая роль в распределении и накоплении тяжелых металлов принадлежит процессам осаждения: значительная часть фракций взвешенных веществ, являющихся носителями тяжелых металлов, оседает на первых десятках-сотнях километров от источника загрязнения или депонируется в водохранилищах.

6. Вклад Республики Казахстан в загрязнение р. Иртыш и ее притоков наиболее существенен для р. Ишим и р. Иртыш на участке до впадения р. Ишим, незначителен – в загрязнение р. Тобол, а ниже впадения р. Тобол – практически не прослеживается.

Полученные выводы нуждаются в дополнительном обосновании на основе натурных данных, характеризующих природное и диффузное поступление тяжелых металлов от объектов горной промышленности, а также достоверных данных о потенциальных источниках загрязнения, расположенных на территории Республики Казахстан.

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

Библиографический список

1. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала. Уфа: Изд-во Гилем, 2010. 421 с. ISBN: 978-5-7501-1165-7
2. Алимова Г.С., Земцова Е.С., Токарева А.Ю. Распределение металлов в донных отложениях и макрозообентосе нижнего течения р. Иртыш // Вода: химия и экология. 2016. № 9 (99). С. 20–26.
3. Амралинова Б.Б. Закономерности формирования и оценка перспектив никель-кобальтовых кор выветривания Восточного Казахстана: диссер. на соискание учен. степени д-ра философии (PhD). Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева. Усть-Каменогорск, 2017. 145 с.
4. Атлас гидрогеологических и инженерно-геологических карт СССР. Схема гидрогеологического районирования СССР, масштаб 1:15 000 000. М., 1983. 70 с. URL: https://hgepro.ru/mapgis/subekt/obzorniye/ig_atlas/rayon_gd.pdf (дата обращения: 19.05.2023)
5. Вершинская М.Е., Шабанов В.В., Маркин В.Н. Эколого-водохозяйственная оценка водных систем. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 150 с. ISBN: 978-5-9675-1329-9
6. Елохина С.Н. Техногенез затопленных рудников Урала: диссер. на соискание учен. степени д-р геол.-минерал. наук. ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». Екатеринбург, 2014. 352 с.
7. ЕМИСС. Государственная статистика Индексы производства. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43047/> (дата обращения: 18.06.2023)
8. Карта полезных ископаемых России, масштаб 1:10 000 000 / Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского. URL: <https://www.vsegei.ru/ru/info/prog-met5000/> (дата обращения 19.05.2023)
9. Киселик А.А. Экологическая ситуация в моногородах крупного бизнеса Республики Казахстан // Эколого-географические проблемы развития регионов и городов Республики Казахстан: сборник статей. Москва-Астана: Изд-во Географического факультета МГУ, 2017. С. 272–294.
10. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб: Наука. 2007. 253 с. ISBN: 978-5-02-025171-7
11. Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Поздняков Ш.Р., Пузанов А.В., Жерелина И.В., Шмакова М.В., Васильев Э.В., Расулова А.М., Бабошкина С.В., Обломкова Н.С. Оценка нагрузки биогенными и загрязняющими веществами на российскую часть р. Иртыш // География и природные ресурсы. 2024. № 1. С. 41–53. DOI: 10.15372/GIPR20240104
12. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб: Нестор-История. 2019. 246 с.
13. Логунова А.А. Картирование хвостохранилищ в центральной Азии: Казахстан, Кыргызстан и Таджикистан в центре внимания: материалы субрегионального семинара по укреплению безопасности хвостохранилищ в Центральной Азии. Алматы, 2019. 19 с. URL: https://unece.org/DAM/env/documents/2019/TEIA/Workshop_Nov_2019/Session_2_RUS/2_Ms_Oleksandra_Lohunova_TMF_mapping_RUS (дата обращения 28.05.2023)
14. Макаров А.Б. Техногенно-минеральные месторождения Урала: автореферат диссер. на соискание учен. степени д-р геол.-минерал. наук. ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». Екатеринбург, 2007. 41 с.
15. Макунина А.А., Глазовская М.А., Павленко И.А. Геохимия ландшафтов и поиски полезных ископаемых на Южном Урале. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1961. 182 с.
16. Национальный атлас Республики Казахстан. Природные условия и ресурсы. Алматы, 2006. Т. 1. 125 с.
17. Отчет о возможных воздействиях к «Плану горных работ по добыче руды Васильковского месторождения открытым способом до глубины карьера 540 метров». ТОО «КазТехПроект». Кокшетау, 2023. 269 с.
18. Панин М.С. Эколого-биогеохимическая оценка естественных и техногенных ландшафтов Семипалатинского Прииртышья (Республика Казахстан): диссер. на соискание учен. степени д-ра биол. наук. Семипалатинск, 1999. 397 с.
19. План горных работ по добыче руды и металлов Северного участка Кара-Агашской титан-циркониевой россыпи в Тайыншинском районе Северо-Казахстанской области. ТОО «Минералы Северного Казахстана», ТОО «AS-Project». Кокшетау. 2021. 106 с.
20. Прогнозно-металлогеническая карта России, масштаб 1:5 000 000 / Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского. URL: <https://www.vsegei.ru/ru/info/prog-met5000/> (дата обращения 19.05.2023)
21. Проект расширения хвостохранилища до 80 млн. м³ хвостового хозяйства ЗИФ ГОК на месторождении «Райгородок» Акмолинской области. Отчет о возможных воздействиях (ООВВ). ТОО «Лаборатория-Атмосфера». Усть-Каменогорск, 2022. Т. 7. 500 с.
22. Промышленная разработка железорудного месторождения «Масальское». План горных работ. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС). ТОО «Казгипроцветмет». Усть-Каменогорск, 2018. 274 с.
23. Соглашение между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов, подписано 07.09.2010. URL: https://cawater-info.net/bk/water_law/pdf/kazakhstan_russia_2010_r.pdf (дата обращения 20.06.2023)
24. Федеральная служба государственной статистики: Промышленное производство в России. Статистический сборник. М., 2021. 307 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prom_proiz-vo_2021.pdf (дата обращения: 18.06.2023)
25. Хусанов А.Т., Софронова Л.И. Влияние урановых хвостохранилищ Степногорского гидрометаллургического завода на загрязнение поверхностных и подземных вод // Вестник науки КазАТУ им. С. Сейфуллина. 2011. № 4 (71). С. 1–9.
26. Чемагин А.А. Потенциальные источники загрязнения Нижнего Иртыша // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-8. С. 1456–1459.
27. Чистякова Н.Ф., Кочуров Б.И., Овчинникова А.В. Качество воды р. Иртыш в условиях трансграничного водопользования // Проблемы региональной экологии. 2022. № 6. С. 60–67. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-6-60-67
28. Applied methodology for the PLC-7 assessment / Ed. L.M. Svendsen. Helsinki: HELCOM Publ., 2021. 82 p.
29. Osenyeng O., Ishiyama D., Đordjević D., Adamović D., Ogawa Y., Environmental risk assessment of the contamination of river water and sediments from the Bor mining area, East Serbia-Secondary Cu enrichment at the reservoir site // Resource Geology. 2023. Vol. 73, Iss. 1. 19 p. DOI: 10.1111/rge.12314

Гидрология

Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.

30. Van Luyen N., Savichev O.G. Assessing the Influence of the Mining Operations on the State of Streams in the Northern Part of the Red River Basin (Viet Nam). // *Geogr. Nat. Resour.* 2018. No. 39. P. 182–188. DOI: 10.1134/S1875372818020129

References

1. Abdrakhmanov R.F., Popov V.G. *Geochemistry and formation of groundwater in the Southern Urals*. Ufa, Gilem Publ., 2010. 421p.
2. Alimova G.S., Zemtsova E.S., Tokareva A.Yu. Distribution of metals in bottom sediments and macrozoobenthos in the lower Irtysh River cross-sections. *Water: chemistry and ecology*. 2016. no. 9 (99), pp. 20–26.
3. Amralinova B.B. Laws of formation and assessment of nickel-cobalt weathering crust prospects in East Kazakhstan. *Doct. Dis. Ust-Kamenogorsk*, 2017. 145 p.
4. *Atlas of hydrogeological and engineering-geological maps of the USSR*. Scheme of hydrogeological zoning of the USSR. Scale 1:15 000 000. Moscow, 1983, 70 p. URL: https://hgepro.ru/mapgis/subekt/obzorniye/ig_atlas/rayon_gd.pdf (accessed: 19.05.2023)
5. Vershinskaya M.E., Shabanov V.V., Markin V.N. *Ecological and water management assessment of water systems*. Moscow, RASU-MAHA Publ., 2016. 150 p.
6. Elokhina S.N. Technogenesis of flooded mines in the Urals. *Doct. Dis. Ekaterinburg*, 2014. 352 p.
7. *Unified Interdepartmental Information and Statistical System*. State Statistics Indices of Production. URL: <https://www.fed-stat.ru/indicator/43047/> (accessed: 18.06.2023)
8. *Map of Mineral Resources of Russia*. Scale 1:10 000 000. All-Russian Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky. A.P. Karpinsky. URL: <https://www.vsegei.ru/ru/info/prog-met5000/> (accessed: 19.05.2023)
9. Kiselik A.A. Ecological situation in single-industry towns in the Republic of Kazakhstan. *Ecological and geographical problems of development of regions and cities of the Republic of Kazakhstan. Collection of articles edited by V. R. Bityukova. R. Bityukova*. Moscow-Astana, Geographical Faculty of Moscow State University Publ., 2017. pp. 272–294.
10. Kondratyev S.A. *Formation of external load on water bodies: modeling problems*. SPb., Nauka Publ., 2007, 253 p.
11. Kondratyev S.A., Brukhanov A.Yu., Pozdnyakov Sh.R., Puzanov A.V., Zherelina I.V., Shmakova M.V., Vasiliev E.V., Rasulova A.M., Baboshkina S.V., Oblomkova N.S. Assessing the load of nutrients and pollutants on the Russian part of the Irtysh River. *Geography and Natural Resources*, 2024, no. 1, pp. 41–53.
12. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. *Mathematical modeling of mass transfer in the system watershed – watercourse – water body*. SPb, Nestor-History Publ., 2019, 246 p.
13. Logunova A.A. Mapping of Tailings Management Facilities in Central Asia: Kazakhstan, Kyrgyzstan and Tajikistan in the Spotlight. *Proceedings of the Subregional Workshop on Strengthening Tailings Management Facility Security in Central Asia*, Almaty, 2019. 19 p. URL: https://unece.org/DAM/env/documents/2019/TEIA/Workshop__Nov_2019/Session_2_RUS/2_Ms._Oleksandra_Lohunova_TMF_mapping_RUS (accessed: 28.05.2023).
14. Makarov A.B. Technogenic-mineral deposits of the Urals. *Doct. Dis. Ekaterinburg*, 2007. 41 p.
15. Makunina A.A., Glazovskaya M.A., Pavlenko I.A. *Geochemistry of landscapes and prospecting for minerals in the Southern Urals*. Ed. A.I. Perelman, Moscow Univ. Publ., 1961. 182 p.
16. *National Atlas of the Republic of Kazakhstan*, 2006, Vol. I. 125 p.
17. *Report on possible impacts to the «Mining Plan for ore mining of Vasilkovskoye field by open-pit method up to the pit depth of 540 meters»*, KazTechProject LLP Publ., Kokshetau, 2023. 269 p.
18. Panin M.S. Ecological and biogeochemical assessment of natural and anthropogenic landscapes of Semipalatinsk Priirtyshye (Republic of Kazakhstan). *Doct. Dis. Semipalatinsk*, 1999. 397 p.
19. *Ore and metal mining plan for the Northern section of the Kara-Agash titanium-zirconium placer in the Taiynshinsky district, the North Kazakhstan region*, Minerals of Northern Kazakhstan LLP Publ., AS-Project LLP Publ., Kokshetau, 2021. 106 p.
20. *Prognostic-metallogenic map of Russia. Scale 1:5 000 000*. All-Russian Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky. A.P. Karpinsky. URL: <https://www.vsegei.ru/ru/info/prog-met5000/> (accessed: 19.05.2023).
21. *Project for expansion of tailings storage facility up to 80 mln m³ in the tailings processing plant of the mine at the field «Raigorodok», Aknola region*. Vol. 7. Report on Possible Impacts (RAP), Laboratory-Atmosphere LLP Publ., Ust-Kamenogorsk, 2022. 550p.
22. *Industrial development of the Masalskoe iron ore field. Mining Plan. Environmental Impact Assessment (EIA)*, Kazgiprotsvetmet LLP Publ., 2018. 274 p.
23. *Agreement between the Government of the Republic of Kazakhstan and the Government of the Russian Federation on the Joint Use and Protection of Transboundary Water Bodies*, signed on 07.09.2010. URL: http://cawater-info.net/bk/water_law/pdf/kazakhstan_russia_2010_r.pdf (дата обращения 20.06.2023)
24. *Federal State Statistics Service: Industrial production in Russia. Statistical Collection*. Moscow, 2021. 307 p. Электронный ресурс. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prom_proiz-vo_2021.pdf (дата обращения: 18.06.2023)
25. Khusainov A.T., Sofronova L.I. Impact of uranium tailings of Stepnogorsk hydrometallurgical plant on the pollution of surface and groundwaters. *Bulletin of Science KazATU named after S. Seifullin Publ*, 2011, no. 4 (71).
26. Chemagin A.A. Potential pollution sources of the Lower Irtysh. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 12-8, pp. 1456–1459.
27. Chistyakova N.F., Kochurov B.I., Ovchinnikova A.V. Water quality of the Irtysh River under conditions of transboundary water use. *Regional ecology problems*, 2022, no. 6, pp. 60–67.
28. *Applied methodology for the PLC-7 assessment* / Ed. L.M. Svendsen. – Helsinki, HELCOM Publ., 2021, 82 p.
29. Osenyeng O., Ishiyama D., Đordieviski D., Adamović D., Ogawa Y., Environmental risk assessment of the contamination of river water and sediments from the Bor mining area, East Serbia–Secondary Cu enrichment at the reservoir site. *Resource Geology*, 2023, vol.73, is. 1. DOI:10.1111/rge.12314.
30. Van Luyen N., Savichev O.G. Assessing the Influence of the Mining Operations on the State of Streams in the Northern Part of the Red River Basin (Viet Nam). *Geogr. Nat. Resour.*, 2018, № 39, pp. 182–188. DOI: 10.1134/S1875372818020129.

*Гидрология**Яковченко С.Г., Жерелина И.В., Рыбкина И.Д., Краморенко С.В.*

Статья поступила в редакцию: 01.07.24, одобрена после рецензирования: 20.07.24, принята к опубликованию: 12.03.25.

The article was submitted: 1 July 2024; approved after review: 20 July 2024; accepted for publication: 12 March 2025.

Информация об авторах

Спартак Геннадьевич Яковченко

доктор технических наук, заместитель директора по науке, ООО «Центр инженерных технологий»; 656031, Россия, г. Барнаул, ул. Папанинцев, 129

e-mail: spartak.cet@gmail.com

Ирина Владимировна Жерелина

кандидат географических наук, доцент, начальник отдела водного хозяйства и охраны окружающей среды, ООО «Центр инженерных технологий»; 656031, Россия, Барнаул, ул. Папанинцев, 129

e-mail: zherelina@mail.ru

Ирина Дмитриевна Рыбкина

доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией водных ресурсов и водопользования, Институт водных и экологических проблем СО РАН; 656038, Россия, ул. Молодежная, 1

e-mail: irina.rybkina@mail.ru

Сергей Васильевич Краморенко

аспирант, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН; 630090, Россия, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 17

Information about the authors

Spartak G. Yakovchenko

Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director for Science, Engineering Technologies Center, ООО (LLC);

129, Papanintsev st., Barnaul, 656031, Russia

Irina V. Zherelina

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department for Water Management and Environmental Protection, Engineering Technologies Center, ООО (LLC);

129, Papanintsev st., Barnaul, 656031, Russia

Irina D. Rybkina

Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Water Management Laboratory, Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Molodezhnaya st., Barnaul, 656038, Russia

Sergey V. Kramorenko,

Postgraduate Student, Institute of Economics and Industrial Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

17, prospekt akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, Russia

e-mail: selim-555@yandex.ru

Вклад авторов

Яковченко С.Г. – проведение расчетов, моделирование, написание статьи.

Жерелина И.В. – идея, организация работ, анализ результатов, написание статьи.

Рыбкина И.Д. – консультирование, научное редактирование текста статьи.

Краморенко С.В. – сбор, обработка и систематизация исходных данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Spartak G. Yakovchenko – numerical simulations; modeling; writing of the article.

Irina V. Zherelina – the idea; organization of the work; analysis of the results; writing of the article.

Irina D. Rybkina – consulting; scientific editing of the text.

Sergey V. Kramorenko – collection, processing, and systematization of source data.

The authors declare no conflict of interest.