

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РТУТИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ УРСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА (КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

М. А. Густайтис^{1,2}, И. Н. Мягкая¹, Б. Ю. Сарыг-оол^{1,2}, Е. В. Лазарева¹

¹Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск

Поступила в редакцию 26 сентября 2017 г.

Аннотация: изучено распределение ртути по глубине в донных отложениях р. Ур, на различном удалении от складированных высокосульфидных отходов переработки руд. Ново-Урское месторождение полиметаллических золотосодержащих Cu-Zn серноколчеданных руд разрабатывалось в 30-ых годах XX в. Среднее содержание ртути в отходах – 120 г/т. В течение последующих 80 лет отходы обогащения сносились из хвостохранилища в результате ветровой эрозии, дождевыми и паводковыми водами. В результате чего сформировался ореол рассеяния. Кислый дренажный ручей из хвостохранилища впадает в реку Ур. Донные отложения в верхнем течении р. Ур относятся к не загрязнённым, невзирая на близость рудного поля. Донные отложения из техногенного пруда (территория хвостохранилища), а также ниже по течению (1, 3, 5 км) от впадения дренажного ручья в реку Ур относятся к сильно загрязненным. Среднее содержание ртути в донных отложениях снижается с удалением от хвостохранилища, однако в донных отложениях пруда эти значения выше, чем в отложениях проточных участков реки.

Ключевые слова: поверхностные воды, донные отложения, сульфидные хвостохранилища, загрязнение ртутью.

DISTRIBUTION OF MERCURY IN SEDIMENTS OF WATER OBJECTS IN THE ZONE OF INFLUENCE OF URSK TAILING (KEMEROVO REGION).

Abstract: the distribution of mercury in depth in Ur river sediments at various distances from the stockpiled highly sulfide wastes of ore processing was studied. Gold-bearing polymetallic Cu-Zn deposits of sulphur-pyrite ores were discovered in the Novo-Ursk region in the 1x30s. The average Mercury (Hg) content was approximately 120 g/t at the time. For nearly 80 years, loose enrichment waste, with mineral suspension, was spreading into the adjacent residential quarters of the Ursk village and the environment while under the influence of an aeolian processes. Acid maim drainage from the tailings run into the Ur river. The Ur river upstream sediments are not polluted, despite the proximity of the ore field. The sediments from the technogenic pond (tailing site) are highly contaminated, as well as the sediments from downstream (1, 3, 5 km) from point of the acid maim drainage inflow into the Ur river. The mercury average content in the sediments decreases with the removal from the tailing, however, these values are higher in the pond sediments than in the sediments of the stretches of stream with continuous flow.

Key words: surface waters, sediments, sulphide tailings, contamination of mercury.

Введение

Ртуть в земной коре встречается в незначительных количествах и, преимущественно, в рассеянном виде (кларк Hg в земной коре $4,5 \cdot 10^{-6}$ % масс.) [1]. Также Hg является одним из наиболее токсичных элементов, загрязняющих окружающую среду. Особенно опасно увеличение содержания Hg в воде и последующее ее концентрирование в донных отложениях, поскольку элемент может мобилизоваться в результате деятельности микроорганизмов, населяющих дно. В свою очередь, это приводит к её преобразованию в

растворимые токсичные органические соединения, которые сорбируются на взвешенных частицах, находящихся в воде, и повторно оседают в донные отложения. Типичные содержания ртути в донных осадках на 3–4 порядка выше, чем в воде [2]. Донные отложения выступают своеобразным депо для различных соединений ртути. Наряду с этим в них интенсивно происходит трансформация форм нахождения Hg [3, 4]. Исследования вертикального распределения ртути в донных отложениях, позволяют определить периоды наиболее интенсивного

поступления элемента в окружающую среду, обусловленные как природными причинами, так и повышением уровня антропогенной нагрузки [5, 6, 7].

В глобальном масштабе ртуть перемещается в слоях атмосферы, куда в свою очередь она поступает из природных и антропогенных источников. Конечным пунктом миграции обычно являются донные осадки [7]. В донных осадках пресных водоемов доля атмосферной ртути может достигать 75% [8, 9]. Между содержаниями различных соединений Hg в природных водах и донных отложениях и содержанием органического углерода, в частности гумусовых веществ, существует прямая зависимость [10].

Одним из источников загрязнения Hg окружающей среды являются складированные отходы обогащательного производства, которые образуют ореолы рассеяния с повышенным содержанием токсичных компонентов [11]. Например, на территории России складировано около 650 тыс. т отходов с содержанием ртути от 0,02 до 75%. Кроме того, ежегодно производится и складировается еще около 11 т отходов [12]. Загрязнение окружающей среды в ореолах рассеяния месторождений и их хвостохранилищ связано с тем, что с высокосульфидным веществом полиметаллических руд и/или их отходами происходит окислительное выщелачивание с последующим растворением, переотложением и распространением материала по площади. Процессы трансформации и миграции вещества обеспечены воздействием гипергенных факторов (атмосферный кислород, дождевые и временные потоки). Одно из следствий воздействия на окружающую среду – загрязнение природных поверхностных и грунтовых вод рудничными водами и дренажными потоками отвалов и хвостохранилищ, а, следовательно, и донных отложений даже в районах, удаленных от областей локализации техногенных объектов [13, 14]. Помимо этого зачастую хвостохранилища и другие подобные объекты расположены поблизости к жилым поселкам [15, 16], а местное население активно использует ближайшие водоемы в качестве мест отдыха, купания и рыбалки. Целью работы является выявление изменения содержания Hg в воде и донных осадках реки Ур, а также в воде и донном осадке техногенного пруда в зоне влияния Урского хвостохранилища; оценка степени загрязненности вод и осадков.

Объект исследования

Урское хвостохранилище расположено в поселке Урск (Кемеровская область, Россия) и имеет координаты 54°27'11,03"с. ш., 85°24'09,76" в. д. Хвостохранилище (рис. 1, 2А) сформировано более 80 лет назад в результате добычи золотосодержащих руд открытым карьерным способом. Руды обогащались при помощи цианирования, а отходы складировали в два отвала высотой 10–12 м. Первый отвал сложен хвостами обогащения руд зоны окисления, второй – отходами первичных сульфидных руд, для которых характерно повышенное содержание ртути. В среднем

в веществе отходов концентрация ртути составляет 120 г/т [17].

Изначально ртуть в рудах присутствовала в виде киновари (HgS), тонких включений теллурида (HgTe) и селенида ртути (HgSe) в пирите и барите, кроме того, можно предположить, что Hg в рудах имела следующие формы нахождения: изоморфная примесь и в виде физически сорбированной (HgCl_2 и Hg^0), которая по некоторым данным может локализоваться в дефектах кристаллов [1]. Также отходы колчеданных руд Ново-Урского месторождения содержат в своем составе сфалерит (ZnS), галенит (PbS), арсенопирит (FeAsS), халькопирит (CuFeS_2), теннантит ($\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe},\text{Zn})_2\text{As}_4\text{S}_{13}]$), тетраэдрит ($(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), которые также содержат Hg в виде примеси [18].

Природно-техногенная система Урского хвостохранилища представляет собой затопленный карьер, используемый местными жителями для купания (рис. 1) [18, 19]. Породные отвалы расположены ниже по лугу от карьера, и ещё ниже – две кучи хвостохранилища (рис. 2А). По лугу, в котором расположено хвостохранилище, протекает природный ручей; за счет его взаимодействия с отходами, воды ручья преобразуются в алюминий-железо-сульфатные кислые (pH=2; рис. 2Б) [18]. При удалении от хвостов на расстояние нескольких десятков метров, происходит отставание дренажных вод в техногенном пруду (рис. 2В), образовавшемся на месте старого дражного отвала, представляющем кучи крупных обломков известняка. Кроме того, дренажный ручей впадает в реку Ур (приток реки Иня, систем р. Обь). Установлено, что основной ионный состав реки Ур восстанавливается через 5 км после впадения в него дренажного ручья (рис. 1, точка 5) [19].

Материал отвалов не был закреплен и на протяжении всего времени существования хвостохранилища размывался дождевыми и паводковыми водами. В результате образовался компактный конус снесенного вещества, которое покрывает лог вплоть до реки Ур (рис. 1, 2Б). Растительность в пределах него уничтожена в результате воздействия кислых дренажных вод [18, 19].

Методы исследования

Для того чтобы определить интенсивность загрязнения ртутью и выявить закономерности распределения элемента, были выбраны 5 точек пробоотбора. Поверхностные воды и донные отложения отбирались параллельно на участке гидрографической системы реки Ур в районе хвостохранилища (рис. 1): точка №1 (пруд (притока р. Ур), выше влияния дренажного ручья, точка №2 (техногенный пруд, сформированный в результате отставания кислых дренажных вод); точки №3, 4 и 5 – р. Ур в 1, 3 и 5 км, соответственно ниже по течению от устья дренажного ручья.

Вода отбиралась в точках опробования (рис.1) в тщательно очищенные бутылки из боросиликатного стекла во избежание абсорбции ртути на стенках сосуда [20]. Во время пробоотбора посуда ополаски-

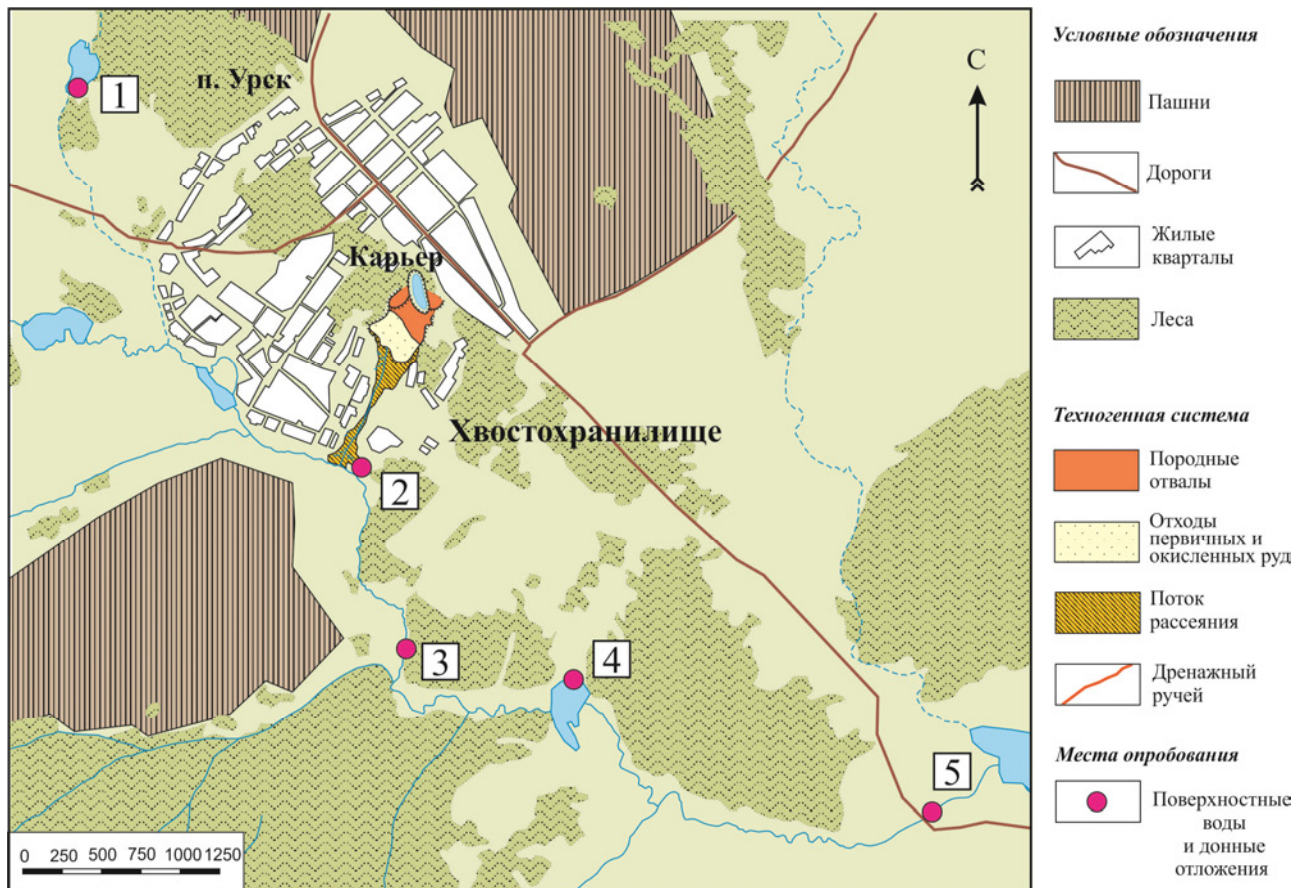


Рис. 1. Схема опробования поверхностных вод и донных отложений в районе поселка Урск и Урского хвостохранилища.



Рис. 2. Фотографии Урского хвостохранилища: А – общий вид (слева отвал отходов первичных руд, справа отвал отходов руд зоны окисления), Б – поток рассеяния, В – техногенный пруд.

валась не менее трех раз отбираемой водой и закрывалась пластмассовыми пробками, предварительно прокипяченными в дистиллированной воде. В сосуде оставался объем воздуха 5–10 мл между отобранной водой и пробкой, в соответствии с общими правилами и рекомендациями по отбору водных проб [21]. Пробы предварительно консервировались азотной кислотой HNO_3 (очс.) в пропорции 1 мл на 250 мл воды, а далее транспортировались и хранились в темном прохладном месте [22].

Потенциометрическим методом на месте определялись неустойчивые параметры pH и Eh. Использовался портативный анализатор («АНИОН-7051», Россия).

В лабораторных условиях содержание Hg в водных пробах определено методом атомной абсорбции на анализаторе «РА-915М» с приставкой «РП-92», фирмы «Люмэкс» (Россия) [23]. Ионный состав водных проб изучался методом капиллярного электрофореза (КЭФ метод; «Капель 103Р», "Люмэкс", Россия). Пределы обнаружения для определения различных ионов 10^{-3} – $10^{-4}\%$ [24].

Пробы донных отложений отбирались согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 [25] в колонки (пластиковые цилиндрические трубки) методом задавливания. Колонки герметично заворачивались в пищевую полиэтиленовую пленку, консервировались замораживанием и хранились в вертикальном положении.

В лабораторных условиях колонки донных отложений распиливались вдоль вертикальной оси, измерялась мощность донных отложений в каждой колонке. Далее донные отложения в колонках делились на интервалы (рис. 4): колонка №1 (глубина 27 см) через 3 см; колонка №2 (глубина 41 см) 1–4 см по глубине разреза, в зависимости от визуальных различий; колонка №3 (глубина 17 см) через каждые 4–5 см; колонки № 4 (глубина 33 см) и 5 (глубина 30 см) через 3 см. Гранулометрический состав определялся методом лазерной дифрактометрии (Fritsch analysette 22 MicroТес, Германия). Пробы донных отложений выкладывались в чашки Петри, накрывались фильтровальной бумагой и высушивались в

защищенном от света проветриваемом помещении при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния во избежание потерь ртути.

Для определения минерального состава донных отложений, состава и микроморфологии минералов ртути использовали электронный сканирующий микроскоп MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа Aztec Energy/INCA Energy 450+ XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd), позволяющими изучать частицы наноразмерности (Аналитический центр ИГМ СО РАН). Время набора спектра – 60 сек. Состав минеральных зёрен размером менее 5 мкм оценивался с учетом примеси окружающих минералов.

Валовое содержание Hg в пробах донных отложений определяли методом беспламенной атомной абсорбции с помощью анализатора «РА-915М» с пиролитической приставкой «РП-91С» («Люмэкс», Россия) по методикам «М 03-09-2013». Все лабораторные работы проведены на базе Центра коллективного пользования «Многоэлементных и изотопных исследований» ИГМ СО РАН, г. Новосибирск.

Обсуждения результатов

По классификации А. А. Алекина [26], вода пруда в верхнем течении ручья притока р. Ур до впадения кислого дренажного ручья (точка №1) относится к слабощелочным Ca-Mg-HCO_3 , пресным, не насыщенным водам (минерализация (М) = 0,3 г/л; pH 8,95; Eh 330 мВ; рис. 3). Содержание ртути в момент опробования было ниже предела обнаружения (< 0.02 мкг/л).

Воды техногенного пруда (точка №2) относятся к сильнокислым Fe-Al-SO_4 (М = 4,8 г/л; pH 2,9; Eh 645 мВ) с концентрацией Hg 0,50 мкг/л (рис. 3), которая соответствует пределу допустимой концентрации (ПДК) для вод питьевого назначения [27]. Состав дренажных вод и высокая концентрация Hg здесь обусловлены окислительным выщелачиванием сульфидных отходов переработки руд Ново-Урского месторождения.

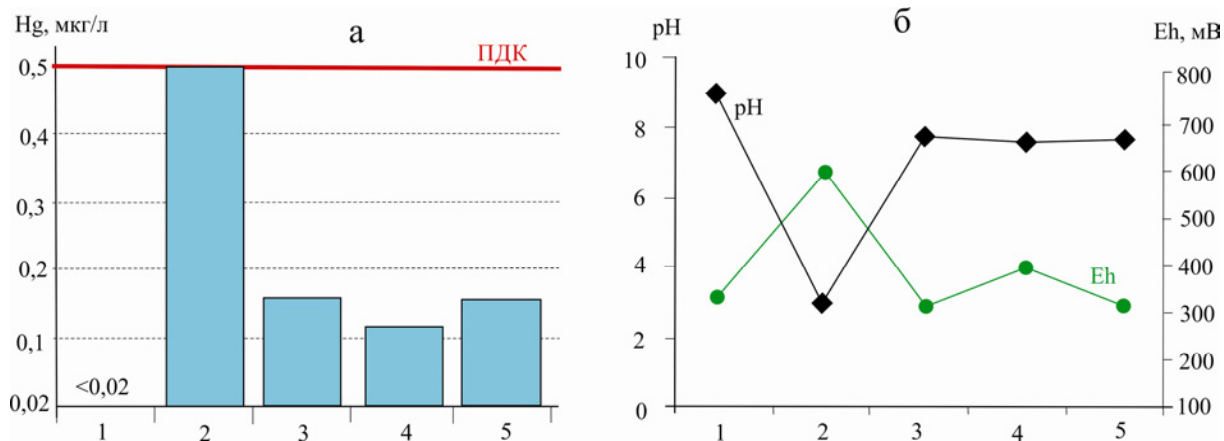


Рис. 3. Распределение ртути (а), pH и Eh (б) в водах реки Ур и техногенного пруда. По оси X номера соответствуют точкам отбора.

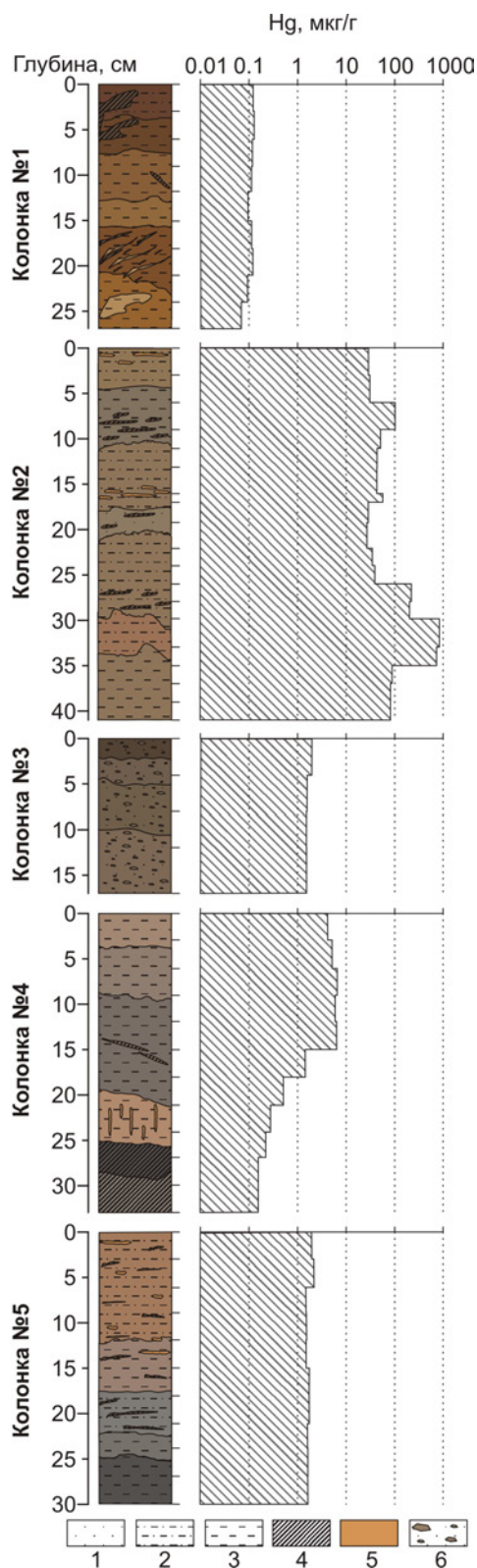


Рис. 4. Вертикальное распределение ртути в донных отложениях в водных объектах Урского хвостохранилища: 1 – песчаное вещество; 2 – песчано-илистое вещество; 3 – илистое вещество; 4 – органическое вещество; 5 – гидроксид железа; 6 – дресва. На схеме колонок показан реальный цвет вещества. Штриховка отражает гранулометрический состав.

На удалении в 1 км (точка №3) от впадения кислого дренажного ручья в р. Ур, ее воды характеризуются Ca-Mg-НСO₃ составом (M = 1 г/л; рН 7,88; Eh 302 мВ). Концентрация Hg составляет 0,16 мкг/л (рис. 3), что в 3 раза ниже ПДК для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [27]. Увеличение содержания ртути в воде реки Ур происходит на счёт смешения ее вод с кислыми дренажными водами.

В 3-х км (точка №4) от впадения кислого дренажного ручья в р. Ур находится искусственный пруд, сформированный в период работы драги, которая обрабатывала россыпь золота на реке. Ионный состав вод реки здесь (рН составляет 7,75, Eh = 393 мВ) соответствует водам до впадения дренажного ручья (точка №1, рис. 3), а концентрация ртути в 4 раза ниже ПДК [27] и составляет 0,12 мкг/л.

На расстоянии 5-ти км (точка №5, рис. 3) от впадения кислого дренажного ручья в реку, ее воды характеризуются M=0,3 г/л; рН 7,81; Eh 303 мВ, а концентрация Hg в 3 раза меньше ПДК [32] и составляет 0,16 мкг/л.

В результате перемешивания гидрокарбонатных вод реки Ур и кислых сульфатных дренажных вод Урского хвостохранилища, происходит обильное образование гидроксидов железа (Fe(OH)₃), которые активно абсорбируют на своей поверхности ртуть и депонируют ее в осадок [17]. При этом концентрация ртути снижается с 0,5 до 0,16 мкг/л. Ранее нашими исследованиями было показано, что минерализация, основной ионный состав, а также концентрация потенциально опасных элементов (Cu, Zn, Pb, Fe, Cd и Hg) восстанавливаются до исходных концентраций уже в 5-ти км от устья дренажного ручья [28]. Однако последними исследованиями установлены повышенные содержания ртути в поверхностных водах, что может быть обусловлено большим поступлением ртути в гидрологическую систему реки Ур.

Донные отложения пруда, находящегося выше влияния техногенного ручья (точка №1), представлены илистым веществом с прослойками органического вещества по всей длине разреза. Распределение ртути по высоте колонки очень равномерное, колеблется незначительно от 0,07 до 0,13 мкг/г (рис. 4). Среднее содержание составляет 0,11 мкг/г, наибольшая концентрация (0,13 мкг/г) установлена на глубине 3–6 см. Для сравнения, содержание ртути в донных отложениях Новосибирского водохранилища в среднем составляет 0,037 мкг/г [29]; на различных участках среднего течения реки Урал, содержание ртути в донных отложениях варьирует в интервале 0,01–0,05 мкг/г [30]. Повышенные содержания ртути в донных отложениях водоема в верхнем течении р. Ур объясняются высоким геохимическим фоном ртути вблизи месторождения и тем, что весь регион является золоторудным [31].

Мощность разреза донных отложений, отобранных из техногенного пруда (колонка №2), составляет 41 см (рис. 4). Среднее содержание ртути по разрезу составляет 160 мкг/г. Вещество разреза неоднородное песчано-илистое с прослойками органического вещества по все длине колонки. Концентрация ртути в данном разрезе на 4 порядка (29–222 мкг/г), а в некоторых слоях, на 5 порядков больше, чем в отложениях пруда верхнего течения р. Ур (точка №1).

Основная часть ртути сконцентрирована в нижней части колонки №2 на глубине 28–35 см, а на глубинах 35–41 см несколько снижается. Наибольшие концентрации 886 мкг/г и

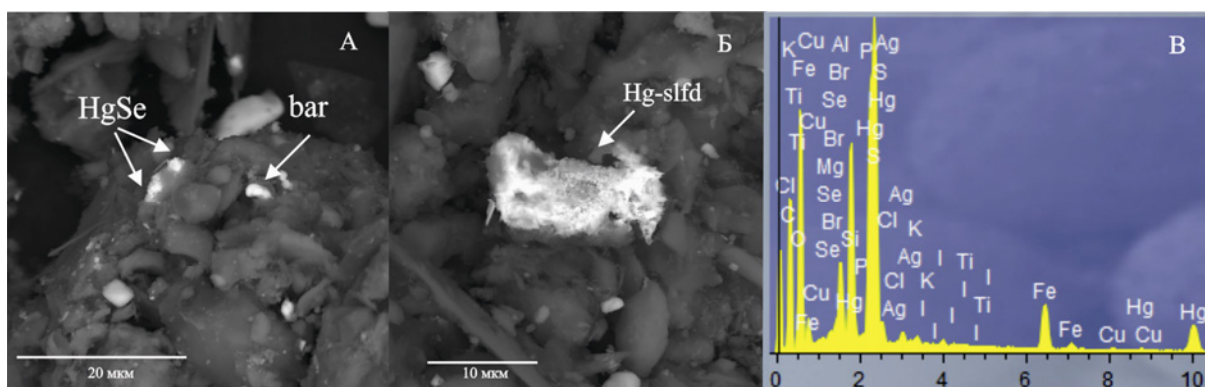


Рис. 5. Соединения ртути в донных отложениях техногенного пруда (колонка № 2, слой 30–33 см и 33–35 см) ореола рассеяния Урского хвостохранилища: А – селенид ртути; Б – сульфид ртути с примесью Se, I, Ag, Cu; В – энергодисперсионный спектр для Б. Фото сканирующего микроскопа в режиме BSE.

776 мкг/г находятся в слоях 30–33 и 33–35 см. Наиболее обогащенные ртутью слои были исследованы с помощью электронного сканирующего микроскопа (рис. 5). Снесенное вещество отходов представлено смесью минералов группы каолинита, гидроксидов и сульфатов Fe(III), а также кварца и барита (рис. 5А). Ртуть присутствует в виде новообразованных сульфидов (рис. 5 Б, В) и селенидов с примесью I, Ag и Cu (рис. 5А), подобных тем, что описаны в торфяном веществе ближней зоны потока рассеяния Урского хвостохранилища [36, 37]. Техногенный пруд (колонка №2) является продолжением конуса рассеяния Урского хвостохранилища, поэтому состав вещества колонки №2 соответствует верхней части конуса.

Мощность донных отложений в р. Ур на удалении 1 км (колонка №3) после впадения кислого дренажного ручья составляет 17 см (рис. 4).

По глубине колонки наблюдается равномерное перемешивание тонкодисперсного песка с галькой диаметром от 3 мм до 4 см. Среднее содержание ртути по разрезу составляет 1,59 мкг/г, что на 2 порядка превышает значения ртути в колонке №1. Максимальное накопление Hg (1,91 мкг/г) отмечается в поверхностном слое (0–4 см), т. е. в веществе, контактирующем с водой.

Донные отложения были отобраны в бывшем дренажном пруду на расстоянии 3 км после впадения кислого дренажного ручья (рис. 4, колонка №4). Мощность исследованного разреза составляет 33 см. Разрез представлен неоднородными илистыми отложениями с прослойками органического вещества и гидроксидов железа. Содержание ртути в колонке №4 варьирует от 0,15 до 6,3 мкг/г и в среднем составляет 2,73 мкг/г, что в среднем на 3 порядка превышает содержание ртути в колонке №1. Максимальное содержание ртути (6,3 мкг/г) установлено на глубине слоя 6–9 см. В верхнем слое 0–3 см содержание ниже, чем в слоях 3–15 см. Ниже по профилю (слой 12–15 см) наблюдается снижение содержания более чем в 4 раза (с 6,15 до 1,38 мкг/г).

Донные отложения, отобранные на расстоянии

5 км после впадения кислого дренажного ручья (рис. 4, колонка №5), илистые и песчано-илистые с прослойками органического вещества. Мощность разреза составляет 30 см. Ртуть распределена относительно равномерно по всему профилю. Концентрация ее в среднем составляет 1,64 мкг/г, что более чем на 2 порядка выше, чем в колонке №1. Максимальное содержание установлено в слое 3–6 см и составляет 2,12 мкг/г.

Существует несколько нормативов по оценке качества донных отложений, основанных на различных методиках [34]. Например, согласно принятой сравнительной шкале критериев оценки загрязнения донных отложений для некоторых тяжелых металлов [35], донные отложения пруда верхнего течения ручья – притока р. Ур (колонка №1) относятся к незагрязненным, поскольку среднее содержание ртути по разрезу менее 0,1 мкг/г. Колонки, отобранные в техногенном пруду (колонка №2), а также в реке Ур на расстоянии 1 км (колонка №3), 3 км (колонка №4) и 5 км (колонка №5), можно отнести к сильно загрязненным, так как среднее содержание по колонкам составляет более 1 мкг/г.

Также для оценки загрязнения водного объекта (рис. 6) возможно использовать коэффициент донной аккумуляции (КДА) [36], который рассчитывается согласно формуле (1):

$$КДА_{(Hg)} = C(Hg)_{до} / C_{вода} \quad (1)$$

где $C(Hg)_{до}$ – концентрация ртути в донных отложениях (мг/кг), а $C_{вода}$ – концентрация ртути в воде (мг/л), отобранных в одной и той же точке.

Согласно рассчитанным коэффициентам $КДА_{(Hg)}$ и в соответствии с критериями оценки [36], донные отложения пруда верхнего течения р. Ур (колонка №1) имеют относительно удовлетворительное состояние ($КДА_{(Hg)} = 5.5$, рис. 6), а отложения техногенного пруда (колонка №2) имеют уже высокий уровень хронического загрязнения водного объекта ($КДА_{(Hg)} = 320$). В донных отложениях в р. Ур на удалении 1 км (колонка №3) и на расстоянии 5 км (колонка №5) ниже впадения дренажного ручья

Урского хвостохранилища – $KDA_{(Hg)} = 10$, а на расстоянии 3 км после впадения кислого дренажного ручья (колонка №4) $KDA_{(Hg)} = 23$ (рис. 6), что говорит о постоянном поступлении в водный объект свежего загрязнения. Как следствие этого существуют повышенные концентрации ртути в воде.

Коэффициент обогащения (КО) донных отложений также служит мерой уровня загрязненности [37], показывающего во сколько раз содержание тяжёлых металлов в донных отложениях превышает их фоновые значения, который рассчитывают согласно формуле (2):

$$KO_{(Hg)} = C(Hg)_{\text{точка } n} / C(Hg)_{\text{точка фон}} \quad (2)$$

где $C(Hg)_{\text{точка } n}$ – концентрация ртути в донных отложениях в исследуемой точке (n), $C(Hg)_{\text{точка фон}}$ – концентрация ртути в донных отложениях на фоновом участке.

Следует отметить, что по критерию КО оценить уровень загрязненности донных отложений можно условно, так как не существует нормативно определенных значений КО [37]. Коэффициент обогащения ртутью донных отложений пруда верхнего течения ручья притока р. Ур (колонка №1) равен 1 (рис.6); данная точка была принята за

фоновое значение. В техногенном пруду (колонка № 2) $KO_{(Hg)}$ на три порядка больше, чем в колонке №1 и составляет 1450 (рис. 6). В донных отложениях в р. Ур на удалении 1 км от места впадения кислого дренажного ручья (колонка №3) в 100 раз ($KO_{(Hg)} = 14$) меньше, чем KO техногенного пруда (рис. 6), за счет эффективного депонирования ртути в осадок, в результате соосаждения Hg с гидроксидами Fe и Al, обильно выпадающими в осадок при смешении кислых дренажных растворов и вод р. Ур [19]. На расстоянии 3-х километров ниже впадения кислого дренажного ручья (колонка №4) коэффициент обогащения ртутью увеличивается ($KO_{(Hg)} = 25$), что может происходить из-за изменения окислительно-восстановительных условий. В воде дренажного пруда (точка №4) Eh увеличивается до 393 мВ относительно вод реки (Eh=303 мВ, точка №3). Кроме того, бывший дренажный пруд Урского хвостохранилища выступает своеобразным депо илистых частиц, которые имеют наибольшую сорбционную емкость. На удалении 5-ти километров ниже впадения дренажного ручья коэффициент обогащения ртутью донных отложений снова снижается ($KO_{(Hg)} = 15$), что объясняется промывным режимом реки Ур.

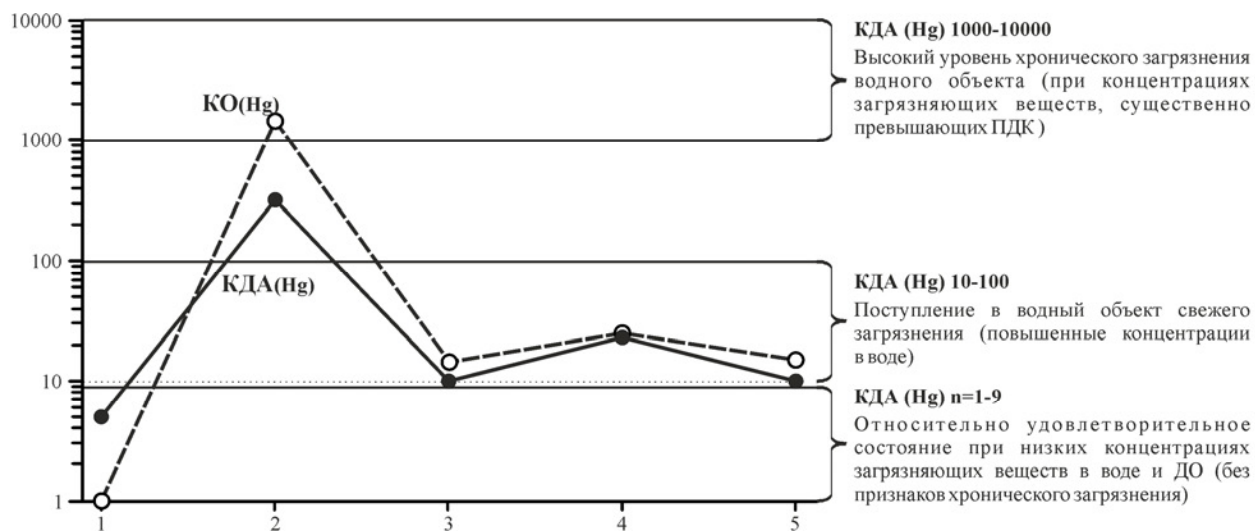


Рис. 6. Уровень загрязнения ртутью донных отложений реки Ур вблизи Урского хвостохранилища, где 1–5 точки отбора вод и донных отложений согласно схеме на рисунке 1, $KDA_{(Hg)}$ – коэффициент донной аккумуляции ртути, $KO_{(Hg)}$ – коэффициент обогащения ртутью донных отложений.

Заключение

Донные отложения реки Ур в верхнем течении (колонка №1) имеют достаточно высокие содержания ртути, что обусловлено нахождением объекта в пределах Урского рудного поля. Техногенный пруд (колонка №2) нельзя рассматривать как единую гидрологическую систему реки Ур, т. к. он является продолжением потока рассеяния Урского хвостохранилища. При этом донные отложения этого пруда загрязнены чрезвычайно сильно, что соответствует высокому уровню хронического загрязнения водного объекта. Донные отложения р.

Ур на удалении (1, 3 и 5 км) от места впадения кислого дренажного ручья Урского хвостохранилища в р. Ур имеют постоянное загрязнение ртутью. Ранее (2007 год) нашими исследованиями показано [19], что минерализация и основной ионный состав реки Ур в 5-ти км от места впадения кислого дренажного ручья уже восстанавливается, а содержание Hg снижается до <0,02 мкг/л на этом расстоянии. Однако, последними мониторинговыми исследованиями (2014 год) установлено сезонное повышенные содержания ртути до 0,16 мкг/л в воде. Исследования содержания ртути в воде показали, что местами в реке Ур

содержания элемента достигают 1,64 мкг/г и в целом значительно превышают содержания, характерные для донных отложений реки, выше впадения дренажного ручья. Поступление элемента в реку продолжается, а загрязнение будет распространяться дальше вниз по течению. Высокие содержания ртути в донных отложениях имеют весьма негативные последствия для окружающей среды, т. к. образование метилированных (самых токсичных) соединений Hg происходит главным образом в толще вод и в донных осадках.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0330-216-0011 и при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-05-05362 и №16-35-60108, 17-05-41076 РГО_а. Аналитические исследования проведены в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН».

ЛИТЕРАТУРА

1. Озерова, Н. А. Ртуть и эндогенное рудообразование. / Н. А. Озерова, – М.: Наука, 1986. – С. 232
2. Химическая энциклопедия. [Н. С. Зефирова, ред.]. – Москва: Советская энциклопедия, 1995. – Т. 4. – С. 639 с.
3. Conversion of Hg(II) into Hg(0), methylmercury cation, and dimethylmercury in saltmarsh sediment slurries. / Weber J. H [et al.] // *Chemosphere.*, 1998 – V.36. – №7. – P. 1669–687.
4. Симонова, Л. Н. Концентрирование ртути при определении ее в объектах окружающей среды. / Симонова Л. Н., Брускина И. М., Иванов В. М. – М.: Наука, 2006. – С. 581–596.
5. Baldi, F. Mercury pollution in marine sediments near a chlor-alkali plant: distribution and availability of the metal / Baldi F., Bargagli R. // *Sci. Total Environ.*, 1984 – V. 39. – P.15–26.
6. Bister, H. Binding and mobility of mercury in solid contaminated by emissions from chlor-alkali plants. / H. Bister, G. Muller, H. F. Scoler // *Sci. Total Environ.* 2002 – V.284. – P. 191–203.
7. Аксентов, К. И. Скорости аккумуляции ртути в донных осадках Амурского залива (Японского моря). / Аксентов К. И., Астахов А. С., Калугин И. А. // *Материалы второго международного симпозиума «ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты».* – Новосибирск, 21–25 сентября, 2015. – С. 16–18.
8. Ртуть в поверхностных донных осадках озера Байкал / Гелетий В. Ф. [и др.] // *Геохимия* – 2005. – № 2. – С. 220–226.
9. Modeling the atmospheric transport and deposition of mercury to the Great Lakes. / Cohen M. D. [et al.] // *Environmental Research.* – 2004. – V. 95. – № 3. – P. 247–265.
10. Перельман, А. И. Геохимия: учеб. Для геол. спец. Вузов. / Перельман А. И. – М.: Высш.шк., 1989. – 528 с.
11. Effects of acid-sulfate weathering and cyanide-containing gold tailings on the transport and fate of mercury and other metals in Gossan Creek: Murray Brook mine, New Brunswick, Canada / Al T. A. [et al.] // *Applied Geochemistry.* – 2006. – V. 21 – № 11. – P. 1969–1985.
12. Вертинский, А. П. К вопросу о ртутной интоксикации техногенного происхождения Байкало-Ангарского бассейна. / Вертинский А. П. // *Современные наукоемкие технологии.* – 2010. – № 9 – С. 66–70.
13. Toxicity and potential risk assessment of a river polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) / Sarmiento A. M. [et al.] // *Sci. Total Environ.*, 2011.– V.409 – № 22. – P. 4763–4771.
14. Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco / Lghoul M. [et al.] // *J. Geochem. Explor.* 2014. – V. 144 (C). – P. 456–467.
15. Lazareva, E. V. Arsenic speciation in the tailings impoundment of a gold recovery plant in Siberia // E. V. Lazareva, V. G. Tsimbalist, O. V. Shuvaeva // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis.* – 2002. – V. 2. – Iss. 3. – P. 263–268.
16. Mobility of heavy metals in self-burning waste heaps of the zinc smelting plant in Belovo (Kemerovo Region, Russia) / N. V. Sidenko [et al.] // *Journal Geochemical Exploration.* – 2001. – V. 74. – Iss. 1–3. – P. 109–125.
17. Распространение химических форм ртути в сульфидных хвостохранилищах. / Густайтис М. А. [и др.] // *Доклады Академии Наук.* – 2010. – Т. 432. – №5 – С.655–659.
18. Gold and Silver in a System of Sulfide Tailings. Part 1: Migration in water flow / Myagkaya I. N. [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2016. – V. 160. – P. 16–30.
19. Поведение тяжелых металлов (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) в ореоле рассеяния Урского хвостохранилища (Россия, Кемеровская область). / Щербакова И. Н. [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2010. – №18 – С. 621–633.
20. Лапердина, Т. Г. Определение ртути в природных водах. / Лапердина Т. Г., – Новосибирск: Наука, 2000. – 222 с.
21. Вода. Общие требования к отбору проб. ГОСТ 31861-2012.– М.: Изд-во стандартов, 2012. – 16 с.
22. Мур, Дж. Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния / Дж. Мур, С. Рамамурти. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – С. 288
23. Методика определения ртути в воде методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). ИСО 12846:2012.
24. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций анионов (хлоридов, сульфатов, нитратов, бромидов и йодидов) в природных и питьевых водах методом ионной хроматографии. ПНДФ 14.2:4.176-2000.
25. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. ГОСТ 17.1.5.01-80.– М.: Изд-во стандартов, 1980. – 11 с.
26. Резников, А. А. Методы анализа природных вод. / А. А. Резников, Е. В. Муликова, И. Ю. Соколов– М.: Недра, 1970. – С.488
27. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. – М.: Министерство здравоохранения, ГН 2.1.5.1315-03. 2003. – 8 с.
28. Mercury species in solid matter of dispersion of the Ursk tailing dispersion train (Ursk village, Kemerovo region, Russia) / Gustaytis M. A. [et al.] // *International Conference on Heavy Metals in the Environment (16th ICHMET) Abstracts.* – Rome, Italy, 23–27 September 2012. The The E3S Web of Conferences journal. EDP Sciences. – Vol. 1. – 2013. – P. 19007–19011.
29. Тяжелые металлы и ¹³⁷Cs в донных осадках Новосибирского водохранилища. / Цибульчик В. М. [и др.] // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы исследования водохранилищ»* Пермь, 24–26 мая. – 2005. – С.109–113.
30. Исследование гранулометрического состава физико-химической емкости донных отложений среднего течения река Урал как факторов, влияющих на накопление соединений ртути в исследуемых экотопах / Соловых Г.Н. [и др.] // *Современные проблемы науки и образования*, 2015. – №2–2. – 38 с.

31. Болгов, Г. П. Сульфиды Салаира. Урская группа полиметаллических месторождений / Болгов Г. П. // Известия ТИИ. – 1937. – Т. 58. – Вып. 1–3. – С. 45–96;
32. Новообразованные минералы меди, цинка, селена, ртути, мышьяка, золота и серебра в потоке рассеяния сульфосодержащего хвостохранилища/ Мягкая И. Н. [и др.] // Вопросы естествознания. – 2015. – №3(7) – С.118–122
33. Gold and Silver in a System of Sulfide Tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat / Myagkaya I. N. [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 2016. – V. 165. – P. 8–22.
34. Macdonald, D. D. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems/ D. D. Macdonald, C. G. Ingersoll, T. A. Berger //

- Archives of Environmental Contamination Toxicology. – 2000. – V. 39 – P. 20–31.
35. Contaminants in the Mississippi River, 1987-1992. [Ed. by R. H. Meade]. (U.S. Geological Survey; Circular 1133) – Denver. – 1996. P. 140.
36. Никаноров, А. М. Хроническое загрязнение пресноводных объектов/ А. М. Никаноров, А. Г. Страдомская //Водные ресурсы. – 2007. – 34. – №3. – С. 337–344.
37. Соколова, О. В. Экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование миграции тяжелых металлов в системе «вода – донные отложения» в зоне антропогенного воздействия: дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.09 / Соколова Олеся Владимировна. – Москва, 2008. – 189 с.

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
СО РАН
Новосибирский Государственный университет (НГУ)*

*Густайтис Мария Алексеевна, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель НГУ
E-mail: gustaitis@igm.nsc.ru; Тел.: +7(383) 330-80-32.*

*Багай-оол Юрьевич Сарыг-оол: младший научный сотрудник, ассистент НГУ
E-mail: sarygbi@igm.nsc.ru; Тел.: +7(383) 333-23-07*

*Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
СО РАН*

*Мягкая Ирина Николаевна: научный сотрудник института геологии и минералогии, кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: i_myagkaya@igm.nsc.ru, i_myagkaya@tpu.ru
Тел.: +7(383) 333-23-07*

*Лазарева Елена Владимировна, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: lazareva@igm.nsc.ru; Тел.: +7(383) 333-23-07*

*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Novosibirsk State University (NSU)*

*Gustaytis M. A., senior researcher, PhD of geological and mineralogy science, senior lecturer of NSU
E-mail: gustaitis@igm.nsc.ru
Tel.: +7(383) 330-80-32*

*Saryg-ool B. Y., junior researcher, assistant of NSU
E-mail: sarygbi@igm.nsc.ru
Tel.: +7(383) 333-23-07*

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

*Myagkaya I. N., PhD of geological and mineralogy science, researcher Institute of Geology and Mineralogy
E-mail: i_myagkaya@igm.nsc.ru
Tel.: +7(383) 333-23-07*

*Lazareva E. V., senior researcher PhD of geological and mineralogy science
E-mail: lazareva@igm.nsc.ru
Tel.: +7(383) 333-23-07*