

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ПРОБЛЕМАМ ГЕОЭКОЛОГИИ,
ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Выпуск 21

Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах

**Материалы годичной сессии
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,
инженерной геологии и гидрогеологии
2-4 апреля 2019 года**

Пермь
2019

УДК 502.37
ББК 20.1+26.3
С 32

ISBN 978-5-91252-138-6

Редакционная коллегия:

В. И. Осипов (ответственный редактор), Н. Г. Максимович (зам. редактора),
А. А. Барях, Е. В. Булдакова, А. Д. Деменев, О. Н. Еремина, В. Г. Заиканов,
В. Н. Катаев, Ю. А. Мамаев, О. Ю. Мещерякова

С32 Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: сборник научных трудов (по материалам годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2-4 апреля 2019 г.) / под ред. В. И. Осипова, Н. Г. Максимовича, А. А. Баряха, Е. В. Булдаковой, А. Д. Деменева, О. Н. Ереминой, В. Г. Заиканова, В. Н. Катаева, Ю. А. Мамаева, О. Ю. Мещеряковой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2019. – Вып. 21. – 629 с., ил.

В сборнике опубликованы доклады, представленные на XXI ежегодную конференцию «Сергеевские чтения» памяти академика Е. М. Сергеева – выездную сессию Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, впервые организованную в г. Перми на базе Пермского государственного национального исследовательского университета (г. Пермь, 2-4 апреля 2019 г.). Чтения были посвящены обсуждению актуальных проблем природопользования в горнопромышленных регионах, поискам путей достижения эколого-экономического баланса природопользования. В соответствии с обсуждавшимися на конференции темами, сборник состоит из следующих разделов: «Рациональное природопользование. Пути оптимизации и достижения экономической эффективности»; «Общие проблемы экологической безопасности техногенно-нагруженных территорий»; «Загрязнение природной среды и трансформация гидросферы в горнопромышленных районах»; «Активизация опасных природных процессов в районах разработки месторождений полезных ископаемых»; «Пути реабилитации техногенно-нагруженных территорий»; «Развитие методов исследований и мониторинга трансформации природной среды».

Сборник представляет интерес для специалистов, студентов и аспирантов в области инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии.

ISBN 978-5-91252-138-6

УДК 502.37
ББК 20.1+26.3

Издание опубликовано при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края

©Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 2019
©Горный институт УрО РАН, 2019
©ПГНИУ, 2019
©Коллектив авторов, 2019

АНАЛИЗ НАКОПЛЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА В РЕЧНЫХ СИСТЕМАХ НА ТЕРРИТОРИИ СИБАЙСКОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**А.Ю. Опекунов, М.Г. Опекунова, С.Ю. Кукушкин, В.В. Спасский,
Е.В. Яськевич, З.Ю. Аржанцева, В.В. Сомов**

Санкт-Петербургский государственный университет, г.Санкт-Петербург, ВО 10 линия 33/35.
E-mail: a_opekunov@mail.ru

Объекты накопленного экологического ущерба являются атрибутом всех горнодобывающих предприятий [5]. К ним относятся отвалы пустой породы, шламохранилища, пруды-отстойники, карьеры, территории и водные объекты, подвергшиеся химическому загрязнению. Каждый из них оказывает определенное влияние на природные компоненты и среду обитания человека. Подобные объекты присутствуют на одном из старейших в Башкирском Зауралье по времени освоения Сибайском медно-цинковом месторождении. Среди них – р. Карагайлы, негативное влияние которой в настоящее время распространяется за пределы данного региона.

Сибайское медноколчеданное (медно-цинковое) месторождение разрабатывается с 1939 г. В 1956 г. начато освоение Сибайской рудной залежи сначала открытым способом, с 2003 г. – с использованием закрытых выработок. До начала строительства на месте Сибайского карьера протекала река Карагайлы, верховья которой были отведены в р. Камышлы-Узяк, а в среднем течении было прорыто новое русло в обход карьера. После начала освоения Сибайской залежи источником воды в реке стали подотвальные и подземные (трещинные) воды, разгрузка которых в виде родников происходила в этом месте до строительства карьера. Расход этих вод в летнее время составляет 15-30 л/с. Состав воды соответствует сульфатно-магниевому типу с минерализацией более 9 г/л и аномальными концентрациями индикаторных металлов – Cu, Zn, Cd – и др. хальфилов. Кроме того, в верхнем течении в русло реки происходит сброс карьерных вод. Длина водотока – 11 км. Она впадает в р. Худолаз – приток р. Урал. На реке выражены процессы техноседиментогенеза с накоплением техногенных минеральных илов [1, 4]. Исследования реки проводятся с 2004 по 2018 гг. На рис. 1 представлены результаты изучения донных осадков на 21 пробной площадке (ПП) (рис. 1).

Морфологические особенности поймы и русла реки обусловили разные режимы переноса и отложения осадочного материала. В верхнем течении при пересечении пос. Горный русло р. Карагайлы имеет ширину 2-6 м с расширениями до 20 м. Скорость течения в летнюю межень достигает 0,2-0,3 м/с. Форма русла в основном канавообразная, высота берегов не превышает

1-1,5 м. Режим осадконакопления – преимущественно аккумулятивный и транзитно-аккумулятивный. В среднем течении в г. Сибай водоток сформировал широкую (до 200 м) заболоченную пойму, заросшую тростником. На реке был построен пруд Строителей, выполнявший роль механического и сорбционного барьеров, где происходила активная аккумуляция металлов. Далее река протекает по узкому и относительно глубокому руслу. Скорость течения достигает 0,8 м/с, обеспечивая транзитный режим осадочного материала. В районе хвостохранилища в связи с насыпкой дорог вновь отмечается расширение и зарастание поймы. Ниже в пос. Калининское река характеризуется выработанным руслом и относительно широкой долиной, где она впадает в р. Худолаз. Скорость течения невелика (0,2-0,3 м/с), что обуславливает аккумулятивный, местами эрозионно-аккумулятивный характер современного осадконакопления.

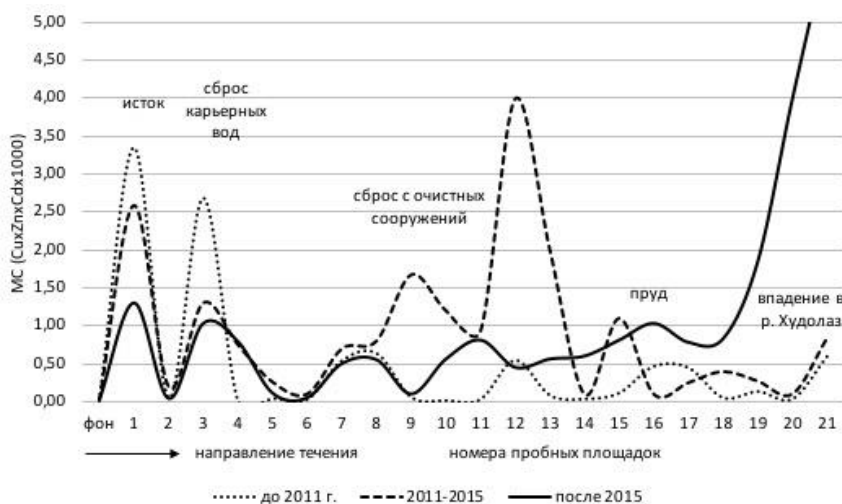


Рис. 1. Изменение мультипликативного показателя (МС) содержания Zn, Cu и Cd в донных осадках р. Карагайлы (по: [2] с дополнениями).

В таком режиме река функционировала в течение полувека. В этот период в разливах водотока и в акватории пруда Строителей шло отложение в осадках металлов, что привело к формированию толщи отложений с высокой концентрацией металлов-халькофилов. Причиной этого стали физико-химические (в основном кислотно-щелочного класса) и биогеохимические барьеры в акватории реки, на которых происходила аккумуляция техногенных илов (рис. 1, ПП1, 3, 8, 12). Осаждение Cu и Cd в верхнем и среднем течении проходило в основном в форме неосульфатов (56-86 и 43-60% от валового содержания), однако в устье реки их количество снижалось (до 15 и 7% соответственно). Доля сульфатов Zn была ниже и составляла в верхнем и среднем течении 22-29%, уменьшаясь в устье до 9%. Часть металлов мигрировала в речных водах и поступала в р. Худолаз, однако там в

связи с возникновением щелочного барьера в месте впадения они быстро осаждались в виде сульфатов и в адсорбированном состоянии на оксигидроксидах железа, а содержание в воде снижалось до нормативных значений.

Характер миграции и аккумуляции тяжелых металлов (ТМ) изменился после 2011 г. с началом работы очистных сооружений в 2,2 км ниже от истока реки (рис. 1, ПП 9). Очистка карьерных вод от Cu, Zn и других халькофильных элементов производится методом флокуляции после известкования воды. Очищенная вода, сбрасываемая в реку, имеет pH около 10,5, что приводит к значительному росту кислотно-щелочного показателя речной воды. До запуска очистных сооружений вода реки на среднем и нижнем участках характеризовалась слабокислой и нейтральной реакцией. В промышленной зоне города (рис. 1, ПП 9-16) pH составлял до 5,45-5,75, а в устье реки вода достигала нейтральных значений (6,45-7,10), вызывая отложение гидросульфатов.

Резкий рост pH речной воды (до 7,5-8,0), вследствие сброса очищенных вод, привел к образованию в месте сброса комплексного сорбционно-гидроксидного и щелочного барьеров (рис. 1, ПП 9). При росте щелочности воды интенсифицировался процесс осаждения металлов в составе сульфатов, началось образование бикарбоната железа $\text{FeSO}_4 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + \text{CaSO}_4$ с переходом его в гидроксид: $2\text{Fe}(\text{HCO}_3)_3 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 6\text{CO}_2$. Это проявилось в охристой окраске осадков и аномально высокой концентрации в них Fe (до 21%). В речной воде в месте сброса содержание железа составляет 0,62 мг/л. Свежеобразованный $\text{Fe}(\text{OH})_3$ активно адсорбирует рудные металлы. На это указывает высокая концентрация в донных отложениях Cu (до 0,83%), Zn (до 1,92%) и Cd (до 0,0048%). Содержание обменных форм этих металлов, максимальное в поверхностном слое, вниз по разрезу осадков падает в 1,3-1,8 раза вследствие раскристаллизации $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и недоступности металлов для ацетатно-аммонийной вытяжки. Таким образом, искусственный барьер вызвал активную аккумуляцию ТМ на дне в районе сброса и ниже по течению реки (рис. 1, ПП 10-15). Его эффективность подтверждается сравнительными данными (табл.). Они указывают на рост концентрации валового содержания и подвижных форм ТМ в донных отложениях водотока после 2011 г. Однако при увеличении абсолютного содержания подвижных форм их доля в валовом содержании снизилась, что еще раз подчеркивает возросшую роль гидроксидов железа в осаждении халькофилов. Заметно уменьшилась (практически до нормативных значений) концентрация металлов в нижнем течении реки при впадении в р. Худолаз [2].

Однако в 2014 г. было принято решение о проведении дноочистных работ от очистных сооружений до пос. Калининское (рис. 1, ПП. 19). Они свелись к строительству канавообразного русла с отвалом грунтов по бортам канавы. Эти работы привели к полному изменению гидрогеохимической ситуации, вызванному разрушением всех геохимических барьеров, сформировавшихся в верхнем и среднем течении реки. Кроме того, в связи с увеличением энергии потока начался размыв отложений, накопившихся за последние десятилетия. Основным последствием стал рост концентрации железа в

донных осадках (табл.), в воде и взвеси. В донных отложениях заметно понизилась доля подвижных (сорбционно-карбонатных) форм металлов, что еще раз подтверждает их преимущественное присутствие в составе гидроксидов железа. Пик концентрации железа и индикаторных металлов сместился к устьевой зоне реки (рис. 1, ПП 18-20). Вода приобрела выраженный охристый оттенок с очень высоким содержанием взвешенных оксигидроксидов железа, поток рассеяния которых в воде р. Худолаз распространился до р. Урал, т.е. на расстояние более 25 км.

Таблица 1

**Содержание подвижных и валовых форм металлов в донных осадках
р. Карагайлы в разные режимы ее функционирования**

Период	Формы	Cu (мг/кг)		Zn (мг/кг)		Cd(мг/кг)		Fe(%)	
		х	S	х	S	х	S	х	S
До 2011 г.	вал	5353	5082	5141	4109	8,9	8,2	7,05	3,48
	подвижные	1916	3019	2943	3848	5,0	5,9	0,046	0,041
2011- 2015 гг.	вал	6848	4369	9180	3746	15,9	9,8	10,7	5,56
	подвижные	1980	1400	4437	3128	6,4	4,7	0,48	0,43
После 2015 г.	вал	6946	3719	8048	6807	14,1	11,9	18,9	9,84
	подвижные	635	336	2713	4394	2,8	3,4	0,096	0,099

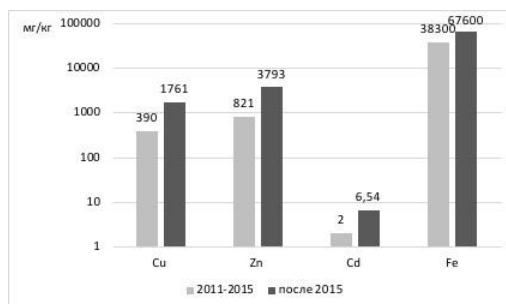
Проведение дноочистных работ сказалось на уровне загрязнения почвенного покрова. В этот период произошло значительное повышение содержания индикаторных металлов в почвах первой надпойменной террасы (рис. 2). Кларк концентрации валового содержания ТМ после 2015 г. по отношению к более раннему периоду оставил: Zn (4,6)>Cu (4,5) >Cd (3,3) >Fe (1,8); подвижных форм: Cu (23,8)>Zn (16,9)>Fe (4,9) >Cd (1,8). Такой существенный рост концентрации можно объяснить дестабилизацией равновесного состояния сформировавшейся техногенной системы в подчиненных ландшафтах [3] и усилением биогеохимического круговорота, изменившим латеральную и радиальную миграцию металлов.

Существенным экологическим следствием загрязнения донных отложений и речной воды является тот факт, что формирующиеся осадки характеризуются высокой токсичностью. Биотестирование отложений было проведено на базе климатостата Р2 по дафнии *Daphnia magna* Straus. Время экспозиции составило 48 часов (острая токсичность). В верхнем течении реки тестируемый осадок оказался токсичным (50% гибели тест-объекта), а в нижнем течении – высокотоксичным (80% гибели тест-объекта). Для сравнения в близлежащих водных объектах (оз. Култубан) осадки были нетоксичны (10% гибели) по отношению к *D. magna*.

Таким образом, система геохимических барьеров, которая сложилась в русле р. Карагайлы за время эксплуатации месторождения, была представлена в основном системой техногенных барьеров кислотно-щелочного и биогеохимического классов. В результате запуска очистных сооружений, возник искусственный сорбционно-щелочной барьер, который

заметно снизил миграционную способность поллютантов, поступающих из-под отвалов и со сбросами карьерных вод. Площадь активной аккумуляции поллютантов сконцентрировалась в верхнем и среднем течении реки. Однако дноуглубительные работы привели к полному разрушению сложившихся геохимических барьеров. Это явилось причиной увеличения миграционной способности металлов и повышения их концентрации за счет размыва ранее сформировавшихся техногенных илов. Процесс активизации загрязнения в значительной мере затронул и водоотки более высокого порядка (р. Худолаз). Произошла дестабилизация геохимического равновесия в подчиненных ландшафтах, вызвав значительное увеличение концентрации металлов в почвах первой пойменной террасы.

а)



б)

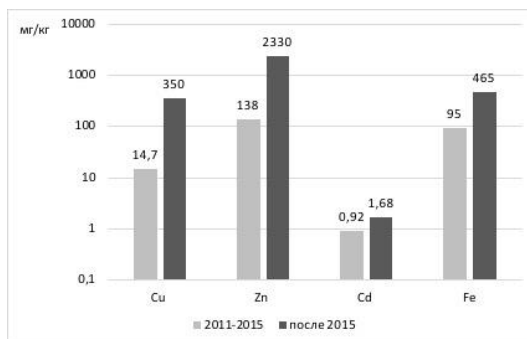


Рис. 2. Изменение содержания индикаторных металлов в почвах надпойменной террасы за период после проведения дноочистных работ (а – валовые содержания, б – подвижные формы).

В целом накопленный экологический ущерб, если рассматривать его за период разработки Сибайского медноколчеданного месторождения, по минимальной оценке, только по водооткам составил 70,3 га. При этом в период с 2011 по 2015 г. в условиях оптимальной системы функционирования геохимических барьеров основная концентрация поллютантов была сосредоточена в верхнем и среднем течении на площади около 35,5 га. Однако в настоящее время комплекс природоохранных

мероприятий без должного научного обоснования привел к тому, что площадь накопленного экологического вреда (70,3 га) будет увеличиваться за счет роста объема техногенных отложений в нижнем течении р. Карагайлы (где всегда доминировал транзитный режим переноса осадочного материала) и в р. Худолаз вплоть до впадения в р. Урал. Принципиально важным является вопрос загрязнения почв первой надпойменной террасы, где в 2017-2018 гг. был отмечен значительный рост концентрации металлов, в том числе и их подвижных форм. Выявленный уровень загрязнения значительно превосходит установленные для почв значения ПДК (рис. 2).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00217 «Биогеохимические индикаторы техногенной трансформации потоков тяжелых в ландшафтах».

Литература

1. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения // Записки Горного института, т. 203, 2013. С. 196-204.
2. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Сомов В.В., Митрофанова Е.С., Кукушкин С.Ю. Влияние разработки Сибайского месторождения (Южный Урал) на трансформацию потока металлов в подчиненных ландшафтах // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 1. С. 14-24.
3. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Папян Э.Э., Сомов В.В. Использование биоиндикационных свойств растительности при оценке трансформации ландшафтов в районе разработки Сибайского медноколчеданного месторождения (Южный Урал) // Сибирский экологический журнал, 2017, № 3. С. 350-366.
4. Опекунов А.Ю., Холмянский М.А., Куриленко В.В. Введение в экогеологию шельфа. Учебн. пособ. СПб, Изд-во С-Петербургского университета, 2000. 176 с.
5. Питулько В.М., Дэн Вэй, Опекунов А.Ю. Динамика накопленного прошлого экологического ущерба в ходе технологической эволюции разработки вольфрамового месторождения Яоган (южный Китай) // Региональная экология. № 2 (44) - № 3 (45), 2016. С. 31-37.