



УДК 502/504.054+543+54.4+622

Исследование возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах

О.Л.КАЧОР[✉], Г.И.САРАПУЛОВА, А.В.БОГДАНОВ*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

На основе геоэкологического и геохимического мониторинга выявлены масштабы загрязнения трех промзон горного производства, расположенных в Иркутской области и Забайкальском крае. Определены валовые содержания и подвижные формы As в почвогрунтах, огарках, кирпиче, отвалах горно-обогатительного производства. Это позволило выявить особенности химического состава техногенных субстратов с целью выбора способа их обезвреживания. Изучена возможность химической иммобилизации подвижных ионных форм As в природных и техногенных объектах посредством обработки щелочными реагентами. При этом выделены твердые нерастворимые осадки, в составе которых по данным рентгенофазового анализа (РФА) зафиксировано образование фармаколита $\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, арсената кальция $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, сегнитита $\text{Pb}(\text{Fe}^{3+})_3\text{AsO}_4(\text{AsO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$. Формирование новых твердых нерастворимых соединений свидетельствует о химическом связывании (иммобилизации) мышьякосодержащих соединений и о необратимости процесса. Это позволяет предложить эффективный способ фиксации токсикантов для снижения миграции в объектах окружающей среды посредством закрепления иммобилизованных форм. Проведены эксперименты с использованием золы шлам-лигнинов (накопленные отходы закрытого Байкальского целлюлозно-бумажного комбината) для обезвреживания мышьякосодержащих отходов горно-металлургических производств. Применение модифицированных угольных сорбентов для сорбции остаточных (после обработки щелочным реагентом) содержаний подвижных форм As позволяет достичь снижения его концентраций до ПДК вредных веществ. Наиболее эффективным сорбентом является NoritRO 3520. Результаты имеют большое практическое значение для реализации способа химической иммобилизации подвижных ионных форм As в зонах техногенеза.

Ключевые слова: геоэкологический и геохимический анализ; техногенез; почвогрунты; техногенные субстраты; соединения мышьяка; сорбция

Как цитировать эту статью: Качор О.Л. Исследование возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах / О.Л.Качор, Г.И.Сарапулова, А.В.Богданов // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 596-602. DOI 10.31897/PMI.2019.5.596

Введение. Возрастание масштабов загрязнения токсикантами геологической среды приводит к деградации ее естественных свойств в зоне техногенеза. Этот процесс приобретает необратимый характер во всем мире. Устойчивое нарушение биохимических процессов в поверхностном почвенном слое ухудшает его биосферную функцию, нарастание потоков загрязняющих веществ приводит к кумулятивному эффекту, что создает опасность повышения глобального геохимического фона, приводит к трансформации природных геосистем [1]. В условиях техногенеза также нарушаются естественные пути миграции химических элементов и веществ, что формирует опасные техногенные геохимические аномалии. В связи с этим в последние десятилетия новый импульс получила проблема изучения особенностей миграции и трансформации химических элементов в измененных ландшафтах [7]. С фундаментальной точки зрения поиск закономерностей, выявление причинно-следственной связи геохимических и гидрохимических параметров от условий нарушенной среды способствует пониманию малоизученного механизма распределения, трансформации и миграции веществ в условиях техногенеза.

Весьма актуальным является дальнейшее развитие методологических основ формирования геохимических барьеров в целях ограничения распространения токсикантов и их фиксации для повышения экологической безопасности территорий. Поэтому разработка научно обоснованных рекомендаций по нормализации и обезвреживанию загрязненной геохимической среды обитания является требованием времени [14].

Особенно остро стоит проблема обезвреживания опасных и токсичных образований (отвалов, шламов, карт, хвостохранилищ, отходов) в горной отрасли, содержащих соединения мышьяка (включены ООН в список наиболее опасных веществ) [13]. Мышьякосодержащие соединения могут очень долгое время оставаться активными в природных условиях, т.е. способными к химическим превращениям и миграции в объектах окружающей среды [10]. Накопленный экологический ущерб, масштабы и уровень загрязнения мышьяком в зоне отработавших горных предпри-



ятий обуславливают необходимость поиска способов для закрепления и локализации токсикантов для обезвреживания нарушенных почв, для обеспечения экологической безопасности природных геосистем и здоровья людей [11].

Несмотря на имеющиеся разработки в этой области, в настоящее время слабо изучена трансформация мышьяксодержащих соединений в нарушенном почвенном поле, особенно миграционные особенности подвижных форм, что не позволяет сразу предложить способ их локализации на территориях с высокой техногенной нагрузкой [15]. Наличие в субстратах мышьяка с переменной валентностью также усложняет проведение исследований по выбору способов их иммобилизации и выведения из миграционных процессов.

Методологической основой для оценки почвенных систем является геоэкологический анализ и экодиагностика, позволяющие не только выявить участки локализации загрязняющих веществ на территории, но также разработать способы для создания геохимических барьеров на пути миграции токсикантов [6].

Цель настоящих исследований: на основании приемов геоэкологического и геохимического анализов в зоне техногенеза изучить возможность иммобилизации подвижных форм мышьяка в составе образовавшихся почвенно-техногенных субстратов горного производства и получить объективные критерии необратимого химического связывания мышьяксодержащих соединений в нерастворимые соединения.

Задачи исследования:

- 1) выявить масштабы загрязнения трех промзон горного производства в Сибири на основе геохимического мониторинга;
- 2) определить вклады подвижных форм в химический состав сформировавшихся техногенных субстратов – почвогрунты, остатки кирпича цехов, огарков металлургического производства и их смесей;
- 3) оценить возможность химической иммобилизации подвижных форм мышьяка посредством обработки реагентами и получить аналитические критерии эффективности процесса;
- 4) изучить возможность сорбции остаточных (после обработки реагентом) содержаний подвижных форм мышьяка с использованием серии модифицированных угольных сорбентов для наиболее полного извлечения опасного токсиканта.

Объекты, материалы и методы. Методология исследований базировалась на междисциплинарном системном подходе, включающем:

- геохимический мониторинг территорий в зоне отработанных промышленных объектов в горной отрасли;
- комплекс физико-химических аналитических методов;
- методы статистики;
- оптимизация полученных экспериментальных зависимостей и результатов;
- сравнительный анализ.

Объектами исследования являлись три заброшенные зоны техногенеза горно-перерабатывающих производств Сибири: Ангарский металлургический завод (АМЗ), г. Свирск, Иркутская область (объект 1), в Забайкалье – поселки Вершино-Дарасунский (объект 2) и Запокровский (объект 3) (рис.1, 2).

1. Ангарский металлургический завод (г. Свирск), специализировавшийся на обжиге арсеникопиритных руд с получением оксидов мышьяка, расположен в Иркутской области на берегу Братского водохранилища. После закрытия завода ликвидация, обезвреживание накопленных мышьяксодержащих отходов, рекультивация загрязненной территории завода и прилегающей местности не проводились.

2. Вершино-Дарасунский рудник в Забайкалье является одним из самых старейших золотодобывающих предприятий Забайкалья (рис.2, а). Арсеникопиритную руду поставляли на Ангарский металлургический завод для обогащения (г. Свирск, Иркутская область). Впоследствии был открыт завод по производству белого мышьяка в самом поселке. Выявлено, что территория промплощадки и близлежащие территории сильно загрязнены мышьяком, при этом сформировалось несколько мощных аномальных геохимических зон сильного загрязнения. Однако рекультивационных работ не проводилось.



Рис.1. Космическая съемка района промплощадки АМЗ, г. Свирск, берег р. Ангары (Яндекс карты, 2011 г.)

а



б



Рис.2. Места расположения промплощадок мышьяковистых отходов в поселках Забайкалья: Вершино-Дарасунский (а) и Запокровский (б) (Яндекс карты, 2016 г.)

3. Рудник Запокровский Забайкалья и обогатительная фабрика по производству концентрата находятся в 27 км от райцентра. Основными источниками загрязнения мышьяком объектов окружающей среды в настоящее время остаются хвосты обогащения, развалины зданий старой фабрики и сформировавшиеся техногенные смеси почвогрунтов, кирпича, огарков старых отвалов.

Используемые методы. Анализу подвергались как загрязненные почвогрунты, огарки из отвалов, кирпич от разрушенных цехов, так и техногенная смесь, состоящая из трех указанных компонентов. Пробоотбор и аналитические определения осуществлялись в соответствии с утвержденными методиками в РФ (ПНД Ф 12.1:2.2.2:2.3.3.2-03. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления). Содержание As в образцах определялось на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICPE-9000 и атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 фирмы «Shimadzu», химический состав твердых образцов – на основе РФА (дифрактометр D8 ADVANCEBRUKER).

Предмет исследования – анализ накопленного экологического ущерба в виде химического загрязнения промплощадок мышьяком; соотношение содержания валовых и подвижных форм мышьяка в загрязненных субстратах (почвогрунты, лом кирпича, огарки в отвалах и техногенная смесь этих компонентов);

полученные экспериментальные физико-химические и аналитические параметры взаимодействия субстратов и реагентов; изотермы сорбции и результаты рентгенофазового анализа.

Используемый подход в работе позволяет:

- провести геоэкологическую оценку потенциальных миграционных свойств мышьяка в зоне техногенного воздействия;
- выявить новые возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах для обеспечения экологической безопасности;
- определить объективные аналитические критерии, позволяющие оценивать эффективность перевода ионных соединений мышьяка в связанное состояние с получением нерастворимых минерализованных форм.

Результаты и обсуждения. Общий уровень загрязнения As (валовое содержание) почв, отвалов огарков, старых строительных кирпичных конструкций на изученных территориях и морфологический состав техногенной смеси представлены в таблице.

Средние валовые содержания As в почвах, огарках, кирпиче и морфологический состав техногенной смеси (2016 г.)

Участок	As, мг/кг			Морфологический состав техногенной смеси огарки : почва : кирпич, %
	Огарки	Почвогрунт	Кирпич	
г. Свирск, Иркутская обл.	19500	4910	4194	70,9 : 21,6 : 7,5
пос. Вершино-Дарасунский	12095	6080	3006	79,8 : 10,4 : 9,8
пос. Запокровский	17310	3031	840	80,1 : 15,2 : 4,7

Примечание. Процентное соотношение компонентов в почвенно-техногенной смеси определяли в ходе геодезических изысканий с учетом глубины проникновения (миграции) мышьяка в почвенном профиле до 1 м вплоть до упорного глинистого слоя.

Известно, что мышьяк относится к веществам I класса опасности и его содержание в почве более 15 мг/кг (утвержденный показатель вредности) характеризует ее как чрезвычайно опасную (МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест).

Так, для завода в г. Свирске этот показатель выше в 72,7 раза, для промплощадки Вершино-Дарасунского в 78,7, а для Запокровского – в 55 раз соответственно (см. таблицу). Технология обезвреживания территорий при таком чрезвычайно высоком уровне загрязнения предусматривает изъятие слоя почвы и обработку его на специализированных полигонах. Однако масштабы загрязнения, финансовые проблемы, отсутствие безопасных технологий обезвреживания и специализированных предприятий в этом регионе не позволяют осуществить подобные работы.

Сформировавшийся в течение десятков лет почвенно-техногенный субстрат на 70 % состоит из огарков, поэтому физико-химические свойства техногенной смеси преимущественно обуславливают именно они. Однако формы нахождения мышьяксодержащих соединений в ее индивидуальных компонентах могут существенно отличаться и привносить различный вклад молекулярных и более подвижных ионных форм элемента в сформировавшийся почвенно-техногенный субстрат.

Так, специфика производственной технологии на заводах в г. Свирске и пос. Вершино-Дарасунский предусматривала обжиг арсенопиритной руды с возгонкой летучих форм мышьяка. Следовательно, в этих образцах следует ожидать как присутствие нейтральных молекулярных форм мышьяка в виде нерастворимых оксидов, в частности As_2O_3 , так и подвижных ионных форм мышьяксодержащих соединений. Это обуславливает необходимость определения содержания ионов AsO_2^- , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-} и As^{3+} .

В отличие от заводов г. Свирска и пос. Вершино-Дарасунский, на обогатительной фабрике в пос. Запокровский Забайкалья в объекты окружающей среды поступало больше сульфидных форм мышьяка в виде арсенопирита $FeAsS$ и скородита $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$.

На рис.3 показаны вклады подвижных ионных форм мышьяка в химический состав изученных образцов. Выявлено, что кирпичные обломки аккумулировали наибольшее количество подвижных форм.

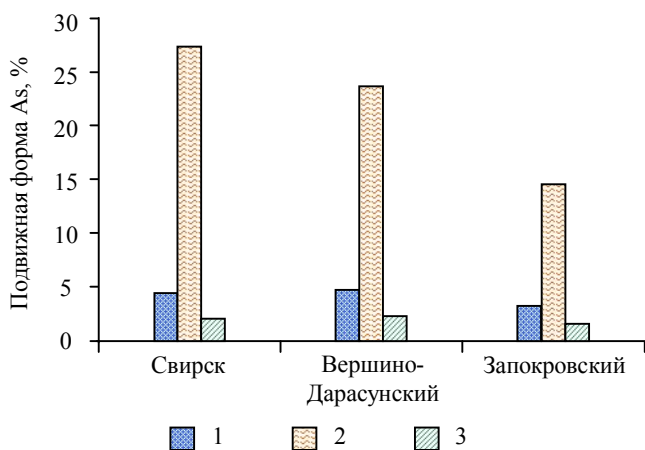


Рис.3. Динамика распределения подвижной формы As в субстратах на территориях объектов
1 – почвогрунт; 2 – кирпич; 3 – огарки

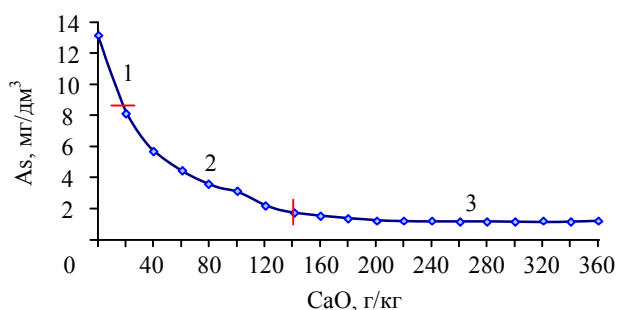


Рис.4. Динамика уменьшения концентрации мышьяка в фильтрате от дозы извести для техногенной смеси

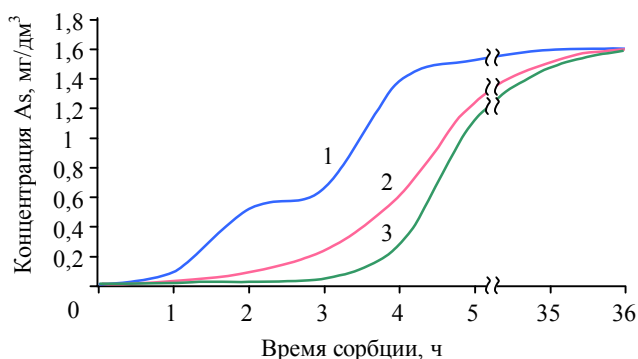


Рис.5. Кинетические кривые сорбции мышьяка для обработанной известью техногенной смеси
1 – КАД (анионный сорбент); 2 – СКТ (катионный сорбент); 3 – NoritRO 3520 (аполярный сорбент)

ной смеси (рис.4). Как видно из рисунка, кривую изменения концентрации мышьяка в фильтрате можно разбить на три участка: первый – прямолинейный участок кривой резкого уменьшения концентрации мышьяка в фильтрате при дозе извести по CaO 20 г/кг; второй – участок кривой имеет экспоненциальный характер, концентрация мышьяка в фильтрате при увеличении дозы гидроокиси кальция изменяется плавно; третий участок кривой имеет прямолинейный характер и начинается при дозе извести по CaO 140 г/кг.

Выявлен общий характер уменьшения концентрации As во всех фильтратах после обработки известью, который обусловлен содержанием ионной формы мышьяка и коррелирует с дозой извести.

Известно, что для обезвреживания загрязненных мышьяком почв используют различные приемы, реагенты и материалы [2, 8, 9, 12, 17], а также биологические способы обезвреживания [5]. Преобладание огарков в морфологическом составе техногенной смеси (см. таблицу), обладающих высокой кислотностью ($pH = 2,7$), обуславливают использование щелочной среды для обработки с целью обезвреживания [16].

В лабораторных условиях были проведены эксперименты по нейтрализации субстратов посредством извести. В химический стакан помещали образцы (отобранный почвогрунт, огарки, лом кирпича) массой 20 г, добавляли 5 %-ный раствор известкового молока с дозой 20-350 г/кг, перемешивали, после установления постоянного pH отфильтровывали в воронке Бюхнера и анализировали фильтрат на содержание мышьяка методом атомной абсорбции.

Для огарков зафиксировано снижение содержания мышьяка в водной вытяжке после обработки известью до $0,09 \text{ мг/дм}^3$ по сравнению с исходной концентрацией – $1,5 \text{ мг/дм}^3$ (уменьшение в 16 раз). Доза извести (по CaO) составила 40 г/кг.

Для почвогрунтов также наблюдается снижение содержания мышьяка в фильтрате после обработки известью до $0,62 \text{ мг/дм}^3$ по сравнению с исходной $5,8 \text{ мг/дм}^3$ (уменьшение в 9 раз). Доза извести (по CaO) уже составила 90 г/кг.

Для загрязненного кирпича содержание мышьяка в исходной водной вытяжке $139,3 \text{ мг/дм}^3$, снижается до $18,7 \text{ мг/дм}^3$ (уменьшение в 7 раз) в фильтрате после обработки известью. Доза (по CaO) уже 1100 г/кг.

Для техногенной смеси концентрация As в фильтрате $1,6 \text{ мг/дм}^3$ по сравнению с исходным показателем $13,2 \text{ мг/дм}^3$ (уменьшилось в 7 раз). Это достигается добавлением извести при концентрации 140 г/кг (по CaO). Сравнительный анализ аналитических результатов позволил определить оптимальные соотношения используемой извести для выбора режима нейтрализации общей техногенной смеси (рис.4).



В рентгенограммах твердого нерастворимого осадка зафиксированы пики, отвечающие следующим соединениям: фармаколит $\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, магнетит Fe_3O_4 , гётит $\text{FeO}(\text{OH})$, арсенат кальция $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, сегнитит $\text{Pb}(\text{Fe}^{3+})_3\text{AsO}_4(\text{AsO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$, которые отсутствовали в исходных необработанных образцах. Образование новых твердых нерастворимых соединений говорит об эффективности химического связывания (иммобилизации) мышьяксодержащих соединений и о необратимости процесса.

Иркутская область характеризуется высокой концентраций промышленных производств и объемами образующихся отходов [11]. Наиболее актуальной и злободневной задачей является ликвидация и утилизация накопленных отходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) в виде золы шлам-лигнина (ЗШЛ). Ранее нами было показано, что эти шламы относятся к IV классу опасности, обладают ионообменными и комплексообразующими свойствами, содержат до 70 % $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (связывающий агент и сорбент) и могут быть использованы как потенциальный материал для нейтрализации токсичных почвогрунтов и техногенных субстратов [4]. Нами проведена экспериментальная проверка применимости ЗШЛ для иммобилизации ионной формы мышьяка. Установлено, что при обработке золы шлам-лигнинами мышьяксодержащей техногенной смеси максимальный эффект их нейтрализации достигается при дозировке ЗШЛ, равной 335 г/кг. И хотя это количество в 2 раза больше, чем выявленная доза извести 140 г/кг, содержание мышьяка в обработанном фильтрате уменьшилось по сравнению с исходной в 3 раза – до 4,86 мг/дм³. Иными словами, для фиксации подвижных водорастворимых форм мышьяка выявлены дополнительные возможности в виде использования отходов БЦБК, которые позволяют рассматривать золу шлам-лигнина как альтернативный вариант не только для иммобилизации мышьяка, но также для получения дополнительного экологического эффекта на территории Иркутской области.

Однако полученные содержания мышьяка в фильтратах в обоих случаях – при обработке известью и ЗШЛ – превышают норматив ПДК вредных веществ на 0,05 мг/дм³ (норматив для водоемов рыбохозяйственного назначения). Была поставлена задача – найти способ доведения содержания мышьяка в фильтрате до утвержденного безопасного уровня [11]. С этой целью изучены процессы сорбции остаточных количеств мышьяка из водной среды с применением неамфотерных (СКТ, КАД) и амфотерных активированных углей (NoritRO 3520) [3]. Кинетические кривые процессов динамической сорбции на угольных композитах в водной среде по отношению к ионам As представлены на рис.5.

В соответствии с классификацией изотерм (теория БЭТ), большинство из них относятся к одному из пяти типов (от I до V). Ступенчатые изотермы относительно редки и представляют теоретический интерес в физической химии. В большинстве случаев образовавшийся мономолекулярный адсорбционный слой на поверхности сорбента не компенсирует полностью избыточную поверхностную энергию и влияние поверхностных сил может распространяться на второй, третий и последующие адсорбционные слои.

Полученные в нашем случае изотермы относятся к изотермам IV типа и характерны для многослойной адсорбции, при которой силы притяжения между молекулами сорбирующего вещества и сорбента выше, чем силы притяжения между молекулами сорбирующего вещества. Первый изгиб кривой соответствует полному заполнению первого монослоя, а вся кривая характеризует процесс полимолекулярной сорбции. Это позволяет сделать заключение о многостадийности процесса и максимальном контакте ионов As с поверхностью сорбента. Наиболее эффективным для сорбции ионной формы соединений мышьяка является NoritRO 3520. Причем время защитного действия NoritRO 3520 в 3,3 и 1,4 раза больше, чем у других сорбентов КАД и СКТ соответственно. Предельная динамическая емкость NoritRO 3520 в 1,1 и 0,9 раз больше, чем у КАД и СКТ соответственно.

Содержание мышьяка в фильтрате после сорбции на NoritRO 3520 до «проскока», который фиксируется после 3 ч сорбции, составляет 0,03 мг/дм³, что существенно меньше санитарно-гигиенических нормативов ПДК вредных веществ.

Заключение. Таким образом, полученные результаты и наблюдаемые эффекты свидетельствуют о высокой результативности используемого в работе подхода, научной обоснованности предлагаемых способов обработки техногенных субстратов, а также методов оценки эффективности процессов и контроля выведения токсичного мышьяка из почвенно-техногенной смеси



с целью ее обезвреживания. Оценены вклады подвижных форм в химический состав сформировавшихся техногенных субстратов, что позволило определить способ химической иммобилизации подвижных форм мышьяка и получить аналитические критерии его эффективности. Показана целесообразность использования золы шлам-лигнин (отходов Байкальского ЦБК) для нейтрализации токсичных почвенных смесей. Выявлена возможность сорбции остаточных (после обработки реагентом) содержаний подвижных форм мышьяка с использованием модифицированных угольных сорбентов для наиболее полного извлечения опасного токсиканта до показателей ПДК вредных веществ. Полученные результаты имеют большое практическое значение для реализации способа химической иммобилизации подвижных ионных форм As в зоне техногенеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдова Н.Д. Техногенная трансформация топогеосистем в условиях атмосферного загрязнения // География и природные ресурсы. 2002. № 4. С. 10-13.
2. Карпова А.Ю. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных мышьяком (обзор литературы) / А.Ю.Карпова, М.А.Шумилова // Труды Института механики УрО РАН «Проблемы механики и материаловедения». 2017. С. 285-293.
3. Лыков О.П. Охрана окружающей среды в процессе добычи нефти при обессоливании, обезвоживании и стабилизации нефти / О.П.Лыков, И.А.Голубева, С.В.Мещеряков. М.: Ноосфера, 2000. 70 с.
4. Патент № 2136599 РФ. Способ очистки сточных вод / А.В.Богданов, С.Б.Леонов, А.П.Миронов, М.А.Иванова. Оpubл. 10.09.99. Бюл. № 25.
5. Патент № 2582352 РФ. Способ биологической очистки почв / С.А.Дымнич, В.В.Красильников, Е.Б.Поторопин, Б.В.Серебренников. Оpubл. 27.04.2016. Бюл. № 12.
6. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами / Ю.И.Пиковский, А.Н.Геннадиев, С.С.Чернянский, Г.Н.Сахаров // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132-1140.
7. Сарапулова Г.И. Эколого-геохимическая оценка почв в зоне техногенных объектов // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 658-662. DOI 10.31897/PMI.2018.6.658
8. Сосницкая Т.Н. Экологическое состояние почв г. Свирска Иркутской области: особенности накопления и детоксикации тяжелых металлов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук / Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. Иркутск, 2014. 23 с.
9. Титова В.И. Подходы к выбору показателей и опыт оценки способности почвенного покрова к выполнению общепланетарных функций (аналитический обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 6 (67). С. 4-16.
10. Arsenic Uptake, Toxicity, Detoxification, and Speciation in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Aspects / G.Abbas, B.Murtaza, I.Bibi et al. // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. Vol. 15 (1). 59 p. DOI: 10.3390/ijerph15010059
11. Bogdanov A.V. Neutralization of arsenic wastes from mining and metallurgical industry / A.V.Bogdanov, O.L.Kachor, N.G.Abarinova // Russian Journal of General Chemistry. 2014. Vol. 84. N 11. P. 2346-2349.
12. Comparison of arsenic immobilization properties among calcium silicate hydrate, ettringite, and friedel's salt in a slag-based binder / Xiao-Bo Min, De-Gang Liu, Li-Yuan Chai et al. // Environmental progress and sustainable energy. 2019. Vol. 38. Iss. 1. P. 422-428. DOI:10.1002/ep.13100
13. Co-treatment of flotation waste, neutralization sludge, and arsenic-containing gypsum sludge from copper smelting: solidification/stabilization of arsenic and heavy metals with minimal cement clinker / De-Gang Liu, Xiao-Bo Min, Yong Ke et al. // Environmental science and pollution research. March 2018. Vol. 25. Iss. 8. P. 7600-7607. DOI:10.1007/s11356-017-1084-x
14. Gerasimova M.I. Soils in national atlases of different countries / M.I.Gerasimova, M.D.Bogdanova // Eurasian Soil Science. 2015. Vol 48. N 9. P. 911-922.
15. Leist M. The management of arsenic wastes: problems and prospects / M.Leist, R.J.Casey, D.Caridi // Journal of Hazardous Materials. 2000. Vol. 76. Iss. 1. P. 125-138.
16. Modeling and optimization of lime-based stabilization in high alkaline arsenic-bearing sludges with a central composite design / Jie Lei, Bing Peng, Xiaobo Min et al. // Journal of Environmental Science and Health. 2017. Part A. Vol. 52. N 5. P. 449-458.
17. Riveros P.A. Arsenic Disposal Practices in the Metallurgical Industry / P.A.Riveros, J.E.Dutrizac, P.Spencer // Canadian metallurgical quarterly. 2001. Vol. 40. Iss. 4. P. 395-420. DOI:10.1179/cmqr.2001.40.4.395

Авторы: О.Л.Качор, канд. техн. наук, доцент, olgakachor@gmail.com (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), Г.И.Сарапулова, д-р хим. наук, профессор, sara131@mail.ru (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия), А.В.Богданов, д-р техн. наук, профессор, bogdanov@istu.edu (Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия).

Статья поступила в редакцию 04.06.2019.

Статья принята к публикации 07.06.2019.