Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/35NZVN225.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Богданов, А. В. Оценка эффективности методов воздушной сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» / А. В. Богданов, А. С. Шатрова, А. И. Шкрабо, Е. О. Бакеев // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/35NZVN225.pdf.

For citation:
Bogdanov A.V., Shatrova A.S., Shkrabo A.I., Bakeev E.O. Evaluation of the effectiveness of air separation methods for contaminated soil at the industrial site of the former Vostsibelement plant. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 35NZVN225. Available at: https://esj.today/PDF/35NZVN225.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 621.928.6

Богданов Андрей Викторович
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия
Профессор кафедры «Обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды имени С.Б. Леонова»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bogdanovav@istu.edu
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7519-1126
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=525986

Шатрова Анастасия Сергеевна
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия
Научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред
Кандидат технических наук
E-mail: shatrova.irk@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8054-1680
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=734723

Шкрабо Анна Ивановна
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия
Научный сотрудник лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред
E-mail: bogdanov.lab@istu.edu
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2018-3751
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1041080

Бакеев Евгений Олегович
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия
E-mail: evgenbaken@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8585-2249

Оценка эффективности методов воздушной сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент»

Аннотация. В статье приведены исследования по оценке эффективности методов воздушной сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», расположенной в Муниципальном образовании «город Свирск» Иркутской области. На всей территории промплощадки установлено превышение ориентировочно допустимых концентраций по таким тяжелым металлам, как кобальт, никель, медь, цинк, ртуть, свинец, а также по мышьяку. Почва промплощадки отнесена к чрезвычайно опасной категории

химического загрязнения почв. Таким образом, крайне актуальной задачей является ликвидация негативного воздействия исследуемой промплощадки на объекты окружающей среды. С целью предотвращения вторичного загрязнения объектов окружающей среды сточными водами, образующимися, при мокром фракционировании, был выбран сухой метод фракционирования — воздушная гравитационная сепарация. В ходе экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец воздушного гравитационного сепаратора производительностью 10 кг/ч и определены его оптимальные конструкционные размеры и технологические параметры для классификации загрязненной почвы от металлических частиц свинца — основного загрязняющего компонента. Было установлено, что эффективность воздушной сепарацией загрязненной почвы от металлического свинца размером фракции -5 + 1 мм составляет 90 %, что для данного метода является очень хорошим результатом. Также стоит отметить, что предлагаемые технологические решения позволяют не только решить проблему рекультивации почв изучаемого объекта накопленного вреда, но и извлечь ценный компонент — металлический свинец с его дальнейшей реализацией.

Ключевые слова: воздушная сепарация; бывший аккумуляторный завод «Востсибэлемент»; загрязнение; аккумуляторная промышленность; рекультивация; свинец; ликвидация негативного воздействия

Введение

Исследуемый объект накопленного вреда окружающей среде — промплощадка бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» МО (Муниципальное образование) «г. Свирск», Иркутской области, расположенная в селитебной зоне МО «г. Свирск» (рис. 1) является крайне опасным действующим источником загрязнения всей верхней части Братского водохранилища [1–3]. При этом сама промплощадка внесена в государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде РФ (ГРОНВОС), негативное воздействие которых подлежит ликвидации в первоочередном порядке и занимает третье место по негативному воздействию на объекты окружающей среды со значением общего влияния промплощадки на состояние экологической безопасности, равным 6,35.

Рисунок 1. *Космическая съемка расположения промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» МО «г. Свирск» (источник: космическая съемка google)*

В настоящее время на промплощадке площадью 33 га располагаются развалины цехов и строительный мусор (105 тыс. м куб.), техногенный почвогрунт, загрязненный тяжелыми металлами (110 тыс. м куб.), а также отходы неустановленного происхождения (20 тыс. м куб.).

На всей территории промплощадки установлено превышение ориентировочно допустимых концентраций по кобальту в 2,2–7,5 раза, никелю — в 2,1–7,2 раза, меди — в 1,1–23 раза, цинку — в 1,7–166 раз, мышьяку — в 6,1–60 раз, ртути — в 1,1–3,2 раза, свинцу — в 1,3–13862 раза; предельно допустимых концентраций (подвижные формы) никеля — до 7,9 раза, меди — в 1,3–81 раз, цинка — в 1,3–21 раз, свинца — в 3,5–1733 раза. Рассчитанный суммарный показатель загрязнения почв — Zc > 128, что соответствует чрезвычайно опасной категории химического загрязнения почв. Также было установлено превышение содержания свинца в лапчатке гусиной (Potentilla anserina), которое составило 10 фоновых значений. Установлено превышение фонового содержания в разовой точечной пробе донных отложений, отобранной по течению реки Ангара в начале промплощадки на Pb, Cu, Zn в 59, 12 и 4,7 раз соответственно. Такое аномальное содержание тяжелых металлов в донных отложениях, скорее всего, обусловлено смывом атмосферными осадками загрязнений с территории промплощадки [4].

Одним из перспективных решений ликвидации накопленного вреда промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» могут быть разработанные в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» технологические решения, состоящие из следующих основных этапов [5]:

Первый этап: разборка строений и выемка фундаментов IV класса опасности объемом 105 тыс. м^3 с применением специальной строительной техники; разделка фрагментов сооружений с извлечением арматуры до кусков крупности, используемых при дорожно-строительных и других возможных типах работ (заполнение выемок карьеров, рельефа и т. п.); отправление арматуры на вывоз и сдачу в качестве вторсырья.

Второй этап: разделка специальных строительных и оставшихся гидротехнических сооружений промплощадки III класса опасности (не более 10 % от общего объема отходов IV класса опасности).

Третий этап: перемещение разделенных строительных отходов IV класса опасности и размещение их на подготовленной площадке временного хранения отходов площадью около 1 га (временная площадка должна быть оптимально расположена на территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент», но находится за пределами водоохраной зоны и иметь санитарно-защитную зону, не охватывающую жилые строения).

Четвертый этап: доставка разделенных строительных отходов III класса опасности, отходов, присущих для аккумуляторного производства и других различных отходов II и III классов опасности и складирование их на Ангарском полигоне промышленных отходов.

Пятый этап: техническая рекультивация земель, которая заключается, в частности, в специальной переработке установленных зон очагов загрязнения грунтов III класса опасности (до 25 % от общей площади) и объема грунтов IV класса опасности, которые составляют около 110 тыс. м^3:

- сбор и отделение металлических отходов, состоящих из фрагментов аккумуляторных решеток, металлического свинца, железа, меди и т. п. на спецоборудовании (грохот, сита, магнитная и воздушная сепарации и др.) на площадке временного хранения;
- отделение из грунтов III класса опасности частиц металлического свинца на спецоборудовании (грохот, воздушная сепарация и др.) на площадке временного хранения;

- вывоз на сдачу отделенных металлических отходов свинца, железа и других металлов в качестве вторсырья или их плавка в мобильных металлургических печах на площадках временного хранения с получением товарной продукции;
- завершающий этап технической рекультивации земель промплощадки — планировка, складирование и т. д.

Шестой этап: биологическая рекультивация растениями-фиторемедиантами в два-три этапа с использованием площадки временного хранения отходов (силосная яма и др.).

Седьмой этап: рекультивация площадки временного хранения отходов с передачей всех рекультивированных земель МО «г. Свирск».

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по оценки эффективности метода воздушной сепарации загрязненной почвы и грунтов третьего класса опасности промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент».

Материалы и методы

Воздушная сортировка (сепарация) основана на том, что крупные (более тяжелые) частицы сортируемого материала, находящиеся в потоке воздуха, под влиянием сил (гравитационных, центробежных, инерции, трения) осаждаются, а мелкие (более легкие) уносятся воздушным потоком. В настоящее время воздушная сепарация в частности широко используется для дезинтеграции различных пород в горно-перерабатывающей промышленности [6]. Ряд общепризнанных преимуществ «сухих» технологий переработки минерального сырья по сравнению с «мокрыми», необходимость освоения малых и месторождений с невысоким качеством сырья, включая техногенные, вызывают стремление к использованию «сухих» прогрессивных технологий или отдельных этапов переработки в процессах обогащения минерального сырья [7].

При этом метод пневматического (воздушного) обогащения может стать альтернативой используемому в настоящее время гравитационному концентрированию, так как данный способ позволяет проводить обогащение без использования воды, а это в дальнейшем упрощает работу с пробой [8; 9].

Главными преимуществами воздушных сепараторов является: эффективность очистки; универсальность (возможно применение для разных типов отходов); технологичность (удобная в обслуживании, замене деталей и ремонте конструкций); минимальный уровень шума при работе; высокая производительность оборудования (до 150 т/ч в зависимости от типа очистки), отсутствие использования воды. Наиболее широкое распространение получила классификация воздушных сепараторов по виду и соотношению массовых сил и сил сопротивления, предложенная Р. Нагелем, согласно которой воздушные классификаторы делятся на три основные группы: гравитационные, центробежные и линейно-инерционные. Также различные конструкции классификаторов отличаются по количеству получаемых продуктов разделения, т. е. существуют 2-х продуктовые и многопродуктовые классификаторы. При воздушном обогащении минерального и техногенного сырья посредством разделения частиц по форме или плотности, необходимый состав технологической линии существенно зависит от свойств сырья и может содержать только воздушные сепараторы или комбинацию воздушных сепараторов с виброситами, при необходимости дополненных одним или несколькими измельчителями для разрушения сростков или спаек. В этих технологиях используются многопродуктовые каскадно-гравитационные или комбинированные классификаторы.

Для обогащения посредством разделения сырья по крупности возможно использование многопродуктовых каскадно-гравитационных или комбинированных классификаторов,

например, при регенерации пескоструйных и дробеструйных отходов, или центробежных классификаторов, например, при обогащении песка посредством удаления тонкодисперсной фракции, обычно характеризующейся повышенным содержанием тяжелых примесей или при обогащении измельченных материалов от аппаратного намола железа.

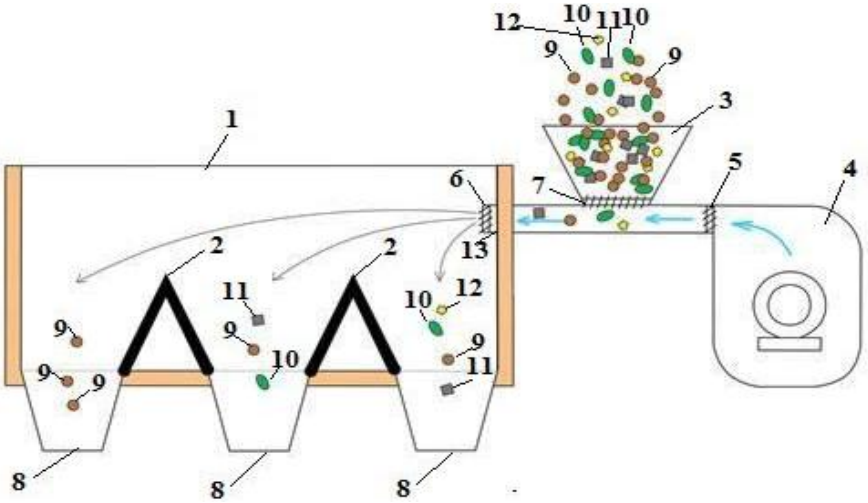
В подготовительных процессах обогащения воздушные классификаторы могут быть использованы для фракционирования, обеспыливания, сушки или нагрева сырья с целью оптимизации последующих процессов «сухого» (электростатического, магнитного) или «мокрого» процессов обогащения [7].

В данном технологическом решении по рекультивации почв промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» с целью предотвращения вторичного загрязнения объектов окружающей среды сточными водами, образующимися, при мокром фракционировании, был выбран сухой метод фракционирования — воздушная гравитационная сепарация.

По конструкционной аналогии используемых сепараторов в горно-перерабатывающей промышленности был изготовлен опытный образец воздушного гравитационного сепаратора производительностью 10 кг/ч.

В ходе экспериментальных исследований были определены оптимальные конструкционные размеры и технологические параметры работы аппарата для классификации загрязненной почвы от металлических частиц свинца, а именно установлено: размер приемной камеры (1) — 05×1,5×06 м (Ш×Д×В), объем — 0,45 м куб; количество разделительных перегородок (2) — 3 шт., высота 0,2 м; воздуходувка FinePower SEB50 (4) со скоростью потока воздуха 40 км/ч и производительностью 180 м³/ч, режимом мощности 13 000 об/мин; делитель воздушного потока (5) — 3 секции; делитель воздушного потока с почвой (6) — 3 секции; делитель потока загрязненной почвы (7) — 4 секции; скорость загрузки загрязненной почвы в бункере приема осажденного продукта (8) — 10 кг/ч; диаметр сопла разгрузочного патрубка (13) — 65 мм.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема воздушной сепарации загрязненного почвогрунта промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» МО «г. Свирск».



1 — приемная камера; 2 — разделительная перегородка; 3 — загрузочная воронка; 4 — воздуходувка FinePower SEB50; 5 — делитель потока воздуха; 6 — делитель воздушного потока с почвой; 7 — делитель подачи загрязненной почвы; 8 — бункер приема осажденного продукта; 9 — частицы почвы; 10 — частицы растительных органических остатков; 11 — частицы свинца; 12 — минеральные примеси в виде мелких камней и песка; 13 — разгрузочный патрубок

Рисунок 2. *Принципиальная схема воздушной сепарации исследуемых образцов (составлено авторами)*

Результаты

На рисунках 3–5 приведен морфологический фракционный состав частиц сепарации загрязненной почвы. Извлечение свинца составило 90 % и представлено в основном мелкими свинцовыми окатышами и различными частицами аккумуляторных решеток размером -5 + 1 мм — 85 % в первой секции, 14 % во второй секции и 1 % в третьей секции. Частицы металлического свинца размером более 5 мм осели в первой секции и составляют от их общей массы 10 %.

а б в г

Рисунок 3. *Морфологический фракционный состав частиц при сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» в перовой секции: а — фракция +5 мм (17,8 грамм); б — фракция -5 + 2 мм (6,8 грамм); в — фракция -2 + 1 мм (3 грамма); г — фракция -1 (2,4 грамма) (фотографии авторов)*

а б в г

Рисунок 4. *Морфологический фракционный состав частиц при сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» во второй секции: а — фракция +5 мм (3,4 грамма); б — фракция -5 + 2 мм (4,7 грамма); в — фракция -2 + 1 мм (3,5 грамма); г — фракция -1 (4 грамма) (фотографии авторов)*

а б в г

Рисунок 5. *Морфологический фракционный состав частиц при сепарации загрязненной почвы промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» в третьей секции: а — фракция +5 мм (0,2 грамма); б — фракция -5 + 2 мм (2,1 грамма); в — фракция -2 + 1 мм (2,8 грамма); г — фракция -1 (8,5 грамма) (фотографии авторов)*

Усреднённые значения распределения частиц почвы (без органических остатков и камней в секциях по ее массе составило в первой секции 23,3 %, во второй секции 32,5 % и в третей секции 50,2 % Распределение сепарированного из почвы частиц металлического свинца по фракциям составило 6 % — (+5 мм), 58 % — (-5 +2 мм), 36 % — (-2 + 1). Во фракции -1 металлический свинец отсутствует.

Для получения достоверных результатов, все исследования проводили в трех параллельных опытах. В общей сложности с промплощадки Востсибэлемент было отобрано 320 проб общей массой 350 кг. Для того, чтобы оценить рассеивание полученных значений сепарации свинца относительно их математического ожидания, был проведен расчёт среднеквадратичного отклонения (СКО) [10]. СКО используют при расчёте стандартной ошибки среднего арифметического, при построении доверительных интервалов, при статистической проверке гипотез, при измерении линейной взаимосвязи между случайными величинами.

СКО сепарации частиц свинца составило 7,5 %, СКО фракционированной почвы с размерами фракции частиц +5; -5 + 2; -2 + 1; -1, составило 3,5 %. Полученные значения СКО говорят о хорошей сходимости экспериментальных результатов, так как значение СКО не превышает 10 %.

Обсуждение

Таким образом, по полученным представительным экспериментальным данным, эффективность воздушной сепарацией загрязненной почвы от металлического свинца размером фракции -5 + 1 мм составляет 90 %, что для данного метода является очень хорошим результатом. Воздушная гравитационная сепарация может быть рекомендована как один из составляющих технологических этапов ликвидации накопленного вреда промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» МО «г. Свирск». Предлагаемая экологически-безопасная технология позволяет не только решить проблему рекультивации почв объекта накопленного вреда — промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент», но и извлечь ценный компонент — металлический свинец с его дальнейшей реализацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов А.В. Оценка воздействия промплощадки бывшего аккумуляторного завода "Востсибэлемент" Иркутской области на объекты окружающей среды / А.В. Богданов, А.С. Шатрова, О.В. Тюкалова // Экология и промышленность России. — 2022. — Т. 26, № 3. — С. 52–57. — DOI 10.18412/1816-0395-2022-3-52-57.
2. Бутырин М.В. Оценка степени загрязнения природной среды, сельскохозяйственных растений и показатели здоровья населения г. Свирска Иркутской области / М.В. Бутырин, Р.В. Замащиков, Ш.К. Хуснидинов // Вестник ИрГСХА. — 2015. — № 67. — С. 17–24.
3. Янин Е.П. Эколого-геохимические аспекты воздействия аккумуляторной промышленности на окружающую среду // Ресурсосберегающие технологии. — 2002. — № 18. — С. 3–33.
4. Богданов А.В. Оценка воздействия промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» Иркутской области на объекты окружающей среды / А.В. Богданов, А.С. Шатрова, О.В. Тюкалова // Экология и промышленность России. — 2022. — Т. 26. — № 3. — С. 52–57. — DOI 10.18412/1816-0395-2022-3-52-57.

5. Богданов А.В. Технологические решения рекультивации промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» / А.В. Богданов, А.И. Шкрабо, А.С. Шатрова // Науки о Земле и недропользование. — 2023. — Т. 46, № 1(82). — С. 84–96. — DOI 10.21285/2686–9993–2023–46–1–84–96.

6. Смышляев Г.К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых / Г.К. Смышляев. — М.: Недра. — 1969. — 102 с.

7. Фогелев В.А. Возможности воздушной классификации и сепарации в процессах обогащения минерального сырья / В.А. Фогелев, А.В. Мельников, Д.А. Мельников // Золото и технологии. — 2013. — № 1(19). — С. 70–74.

8. Волков П.С. Возможности использования пневматической сепарации в схеме подготовки проб, содержащих недробимые включения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 1-1. — С. 128—139. DOI: 10.25018/0236_1493_20 24_011_0_128.

9. Завьялов С.С. Теоретическое обоснование возможностей применения пневматической сепарации при обогащении сульфидных медных руд / С.С. Завьялов, Р.С. Мамонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–1. — С. 199–209. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_199.

10. Ивченко Г.И. Введение в математическую статистику / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведева — М.: Издательство ЛКИ. — 2010. — 600 с.

Bogdanov Andrei Viktorovich
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
E-mail: bogdanovav@istu.edu
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7519-1126
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=525986

Shatrova Anastasiya Sergeevna
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
E-mail: shatrova.irk@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8054-1680
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=734723

Shkrabo Anna Ivanovna
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
E-mail: bogdanov.lab@istu.edu
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2018-3751
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1041080

Bakeev Evgeniy Olegovich
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
E-mail: evgenbaken@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8585-2249

Evaluation of the effectiveness of air separation methods for contaminated soil at the industrial site of the former Vostsibelement plant

Abstract. The article presents studies on the assessment of the efficiency of air separation methods for contaminated soil at the industrial site of the former battery plant «Vostsibelement» located in the Municipal Formation «city of Svirsk» of the Irkutsk Region. The entire territory of the industrial site was found to have excess of the approximate permissible concentrations of such heavy metals as cobalt, nickel, copper, zinc, mercury, lead, as well as arsenic. The soil of the industrial site is classified as an extremely hazardous category of chemical soil pollution. Thus, an extremely urgent task is to eliminate the negative impact of the industrial site under study on environmental objects. In order to prevent secondary pollution of environmental objects with wastewater generated during wet fractionation, a dry fractionation method was chosen — air gravitational separation. During the experimental studies, a prototype of an air gravity separator with a capacity of 10 kg/h was manufactured and its optimal design dimensions and process parameters for classifying contaminated soil from metallic lead particles, the main polluting component, were determined. It was found that the efficiency of air separation of contaminated soil from metallic lead with a fraction size of -5 + 1 mm is 90 %, which is a very good result for this method. It is also worth noting that the proposed technological solutions allow not only to solve the problem of reclamation of soils of the studied object of accumulated harm, but also to extract a valuable component — metallic lead with its subsequent implementation.

Keywords: air separation; former battery plant «Vostsibelement»; pollution; battery industry; reclamation; lead; elimination of negative impact