

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ШЛАКОВЫХ ОТВАЛАХ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

© 2020 г. Е. С. Золотова

Приведен обзор исследований почвенно-растительного покрова на отвалах шлаков цветной металлургии: медеплавильного, свинцово-цинкового, никелевого и алюминиевого производств. Отмечены основные направления и результаты изучения техногенных почв и растительности, формирующихся на шлаковых отвалах, а также биодоступности тяжелых металлов.

Интенсивное развитие металлургической промышленности приводит к увеличению площадей нарушенных природных экосистем [Маслобоев и др., 2014; Рыбаков, Дальков, 2015]. Источниками загрязнения выступают газовые выбросы, сточные воды, шлаковые и шламовые отвалы производств. В прошлом существовала опасная практика размещать металлургические шлаки в низинных местах в малых городах. Например, в техноземах г. Чусовой содержится 1000 мг/кг бария и 2000 мг/кг хрома [Водяницкий и др., 2010].

К настоящему времени накоплено огромное количество техногенных отходов. Наиболее опасными из них являются отвалы цветной металлургии из-за высокого содержания тяжелых металлов. Токсичные вещества из шлака вовлекаются в биогеохимические циклы и приводят к загрязнению водных объектов, снижению плодородия почв, деградации растительного покрова и заболеваниям животных и людей [Khorasanipour, Esmaeilzadeh, 2016; Gabasiane et al., 2019]. Степень влияния отвала металлургического шлака зависит от гранулометрического, минералогического и химического состава отходов производства и комплекса природных факторов. Старые шлаки считаются более опасными для окружающей среды, чем современные, так как содержат больше потенциально токсичных элементов и размещались бесконтрольно [Kierczak et al., 2013].

Шлаки цветной металлургии направляются в отвалы после предварительной грануляции или в горячем состоянии. В последствие шлаки выступают в качестве материнской породы для образования техногенной почвы (технозема). Состав, физические и химические свойства шлака определяют свойства почвы, от которой, в свою очередь, зависят экологический состав поселяющихся растений и скорость зарастания отвала. Климатические условия определяют лишь видовой состав пионерных растений [Шилова, Логинова, 1974]. Однако самозарастание отвалов – процесс крайне медленный.

Цель литературного обзора – оценить степень изученности почвенно-растительного покрова, формирующегося на шлаковых отвалах цветной металлургии.

ОТВАЛЫ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

Минеральную основу медеплавильного шлака составляет фаялит ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), а состав второстепенных минералов зависит от исходной руды, технологий, применяемых на заводе, времени и условий, при которых шлак складировался. Например, черные шлаки Карабашского медеплавильного завода советского периода сложены преимущественно оливин-пироксеновым агрегатом со значительным содержанием стекла и постоянным присутствием хромита, вюститита и разных сульфидов систем Cu-Fe-S и Pb-Ni-S [Ерохин и др., 2019]. В состав шлаков Полевского завода (работавшего до 1931 г.) входят техногенное силикатное стекло, пироксен, магнетит и минералы, относящиеся к ферритам. Содержание породообразующих элементов: $\text{Si} > 10\%$, $\text{Al} > 5$, $\text{Fe} > 5$, $\text{Ti} - 0,106$, $\text{Mg} - 0,29$, $\text{Ca} - 0,37$, $\text{K} - 0,23$, $\text{Na} - 0,32\%$ [Макаров и др., 2018].

Для 200-летнего самозарастающего отвала Полевского медеплавильного завода исследовались геохимические особенности почвенно-растительного покрова, проводилась экологическая оценка [Золотова, Рябинин, 2020]. Наиболее существенные превышения ПДК для всех регламентированных элементов ($\text{As} -$ в 500 раз, $\text{Pb} -$ в 457, $\text{Cu} -$ в 389, $\text{Ni} -$ в 224 раз и т. д.) наблюдаются в мелкоземе техногенной почвы (частицы шлака меньше 1 мм), который составляет больше трети массы технозема и является сорбционным геохимическим барьером. Подтверждено, что в условиях неограниченного запаса высвобождаемых из шлака элементов у растительности существует верхний порог накопления. Для наземной части растений самые высокие значения коэффициента биологического поглощения обнаружены для селена, калия, кальция и фосфора; для корней растений и мхов – для селена и алюминия [Золотова, Рябинин, 2020].

Влияние более старых отвалов (XIV–XVI вв.) пирометаллургических медных шлаков (пористых и литых) на объекты окружающей среды изучено польскими учеными [Kierczak et al., 2013]. Отвалы расположены в лесах и руслах рек региона Рудава Яновички. Химический анализ почв выявил пре-

вышения экологически допустимых норм по содержанию меди (до 4000 мг/кг), цинка (до 1500), мышьяка (As – до 300) и свинца (до 200 мг/кг).

Данные по видовому составу растительности шлаковых отвалов в литературе не найдены, однако флористический состав изучен для заброшенных месторождений медной руды [Желева и др., 2012; Turisová et al., 2016]. При фитоценологических исследованиях отвалов медно-порфирового месторождения Елаците (Болгария) выявлено 55 видов растений, из которых 32 являются сорными. Доминирующие виды – мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.) и расторопша пестрая (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.). Сравнительно часто встречаются звербой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.) и яснотка пурпурная (*Lamium purpureum* L.) [Желева и др., 2012]. Для старого заброшенного месторождения Пиески (Словакия), где содержание тяжелых металлов в техногенной почве остается высоким (концентрация меди от 933,4 до 1485,4 мг/кг), найдено 156 таксонов сосудистых растений. Наиболее распространенные виды – щавелек обыкновенный (*Acetosella vulgaris*), полевица тонкая (*Agrostis capillaries*) и побегоносная (*A. Stolonifera*), резушка песчаная (*Arabidopsis arenosa*) и овсяница красная (*Festuca rubra*) [Turisová et al., 2016].

ШЛАКОВЫЕ ОТВАЛЫ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

По минеральному составу шлаки свинцово-цинкового производства «Дальполиметалл» (Приморский край) относятся к среднежелезистым (Fe_2O_3 – 14–25 мас. %), магниезильным (MgO – 8–16), глиноземистым (Al_2O_3 – 4–11), сравнительно богатым оксидом кальция (CaO – 9–20 мас. %), а SiO_2 содержится от 18 до 33 мас. %. Концентрация тяжелых металлов варьирует в пределах ($n \times 10^{-3}$ мас. %): Pb – 2–16, Zn – 2–13, Cu – 0,1–2,0; Mn – 0,01–1,00 [Земнухова, Фалалева, 2011]. Исследований по формированию почвенно-растительного покрова на данных отвалах (и вблизи них) не встречено.

Китайскими учеными проводятся комплексные исследования по фитостабилизации шлаковых отвалов цинкового производства [Luo et al., 2018, 2019, 2020]. Были высажены арундо тростниковый (*Arundo donax*), бруссонетия бумажная (*Broussonetia papyrifera*), робиния ложноакациевая (*Robinia pseudoacacia*) и криптомерия (*Cryptomeria fortunei*). Работы проводились по истечении 5 лет после рекультивации. Установлено, что восстановление растительного покрова играет важную роль в изменении физико-химических свойств шлакового субстрата, например таких, как влажность, pH; происходят увеличение накопления питательных веществ и снижение биодоступности тяжелых металлов (Cu, Zn и Cd), за исключением свинца, его подвижность возрастает [Luo et al., 2019]. После ре-

культивации в техногенной почве также зафиксировано повышение численности и разнообразия ризосферных бактерий, причем наибольшее влияние на их состав оказывало содержание доступных форм цинка и кадмия [Luo et al., 2018].

ШЛАКОВЫЕ ОТВАЛЫ НИКЕЛЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В шлаках комбината «Североникель» минеральная матрица представлена алюмосиликатом кальция $CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot SiO_2$, а техногенные рудные фазы – пирротинном, в структуру которого входит никель $(Fe, Ni)_9S_8$, и цинковой шпинелью – гинитом $ZnO \cdot Al_2O_3$ [Шадрунова и др., 2013]. По химическому анализу в шлаках никелевого производства присутствуют примеси серы (5–10%), хрома (0,4), никеля (0,1), меди (0,2) и кобальта (0,05%) [Паршина, Корельский, 2008]. Вымываемость элементов сильно зависит от возраста шлака, максимальные значения отмечены у 15-летних отходов и составляют 10–20 мг/л для хрома, 7–11 – серы, 5–8 – меди, 1,5–2,0 – никеля, 0,5–1,5 мг/л для кобальта. Вероятность образования кислых дренажных вод возрастает со временем функционирования отвала за счет окисления серы в зоне гипергенеза и достигает максимума через 15 лет, потом остается неизменной ввиду повышения трещиноватости вновь поступивших отходов. Шлаковые отвалы данного комбината формируют кислые дренажные воды (pH 3), которые образуют техногенные ореолы площадью 58 км² и потоки загрязнения протяженностью 15–20 км [Паршина, Корельский, 2008]. На настоящий момент учеными проводятся мониторинговые исследования почвенно-растительного покрова в лесных экосистемах, находящихся в импактной зоне никелевого производства.

ОТВАЛЫ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

По минералогическому составу основную массу красного шлама (более 90%) Уральского и Богословского алюминиевых заводов составляют железно- и алюмосодержащие минералы – гидрогетит, лимонит, шамозит, пирит, натролит, диаспор и др. [Шилова, Логинова, 1974]. Сравнительный анализ содержания отдельных элементов, в том числе токсичных для растений – Ni, Co, Pb, S, в шламе и природной почве показал существенные превышения (1–2 порядка). Кроме того, шлам имеет сильнощелочную реакцию среды и высокое содержание вредных солей [Шилова, Логинова, 1974]. На отвале Уральского алюминиевого завода учеными [Шилова, Логинова, 1974] был отмечен одновидовой фитоценоз из сведы рожконосной (*Suaeda corniculata* (C. A. Mey.) Vge.), но естественная растительность покрывала крайне незначительную

часть. В последствие ими был проведен эксперимент по заселению шламового отвала многолетними злаковыми и бобовыми растениями, сделан вывод, что биологическая рекультивация данного отвала возможна только после коренной мелиорации, т. е. корни выращиваемых растений должны изолироваться от отрицательного влияния алюминиевого шлама [Шилова, Логинова, 1974].

Представлены исследования токсикологического состояния светло-серых лесных почв, а также растительного покрова в зонах воздействия шлакоотвалов промышленного производства алюминиевого литья в Орловской области (Степанова и др., 2020).

Отдельно стоит упомянуть исследования, направленные на оценку влияния экстремального загрязнения тяжелыми металлами и других свойств техногенных почв на структуру и биоразнообразие пионерных растительных сообществ на шлаковых отвалах цветной металлургии [Osyczka, Rola, 2013; Rola et al., 2015]. Район изучения – Верхнесилезский промышленный регион на юге Польши. С помощью современных статистических методов изученные лишайники, мхи и сосудистые растений были поделены на три группы: 1) виды, которые не только устойчивы к загрязнению, но и более продуктивны при повышенных концентрациях тяжелых металлов; 2) виды, произрастающие только на менее загрязненных участках; 3) растения, индифферентные к загрязнению тяжелыми металлами и в изобилии присутствующие на всех отвалах. К первой группе преимущественно относятся лишайники (например, рода *Cladonia* [Osyczka, Rola, 2013]). Повышенные концентрации тяжелых металлов отрицательно сказываются на биоразнообразии сосудистых растений. Авторы делают вывод, что лишайники являются эффективными пионерными видами на отвалах шлаков цветной металлургии и выступают важным элементом естественного восстановления растительного покрова, что необходимо учитывать при рекультивации [Osyczka, Rola, 2013; Rola et al., 2015].

На настоящий момент предприятия цветной металлургии совершенствуют технологии производства, а также внедряют методы переработки отвальных шлаков. Появляются новые виды минеральных отходов, которые имеют отличные от исходного металлургического шлама свойства. Например, при переработке медеплавильного шлака путем измельчения (до 0,05 мм) с последующим флотационным извлечением медного концентрата получают «технические пески» [Котельникова, Рябинин, 2018].

Мониторинговые исследования отвалов шлаков цветной металлургии необходимы для целей устойчивого развития и экологической безопасности регионов. Анализ исследований показал проблемы в знаниях о поэтапном формировании по-

чно-растительного покрова на этих техногенных ландшафтах, биоразнообразии растений в условиях сильного загрязнения, способах их адаптации, а также нюансах накопления тяжелых металлов разными видами растений.

Работа выполнена в рамках темы № АААА-А18-118052590028-9 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Савичев А.Т., Чащин А.Н. Влияние техногенных и природных факторов на содержание тяжелых металлов в почвах среднего Предуралья (г. Чусовой и окрестности) // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1089–1099.
- Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Вещественный состав шлаков Карабашского медеплавильного завода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17, №3. С. 12–18. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-12-18.
- Желева Е.И., Божинова П.М., Венелинов М.А. Фитоценологическая характеристика отвалов открытой добычи медной руды // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель. Екатеринбург: УрГУ, 2012. С. 103–112.
- Земнухова Л.А., Фалалеева Н.А. Шлаки цветной металлургии: вымывание тяжелых металлов и перспективы использования в строительстве // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 5. С. 115–118.
- Золотова Е.С., Рябинин В.Ф. Экологическая геохимия старого отвала медеплавильного шлака на Среднем Урале // Изв. УГГУ. 2020. № 2 (58). С. 103–109. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-103-109.
- Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. Особенности вещественного состава и перспективы использования отхода вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков // Литосфера. 2018. Т. 18, № 1. С. 133–139. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139.
- Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Койнов С.А. Минералогическо-геохимические особенности старолежалых шлаков Полевского медеплавильного завода (Средний Урал, Свердловская область) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2018. № 21. С. 430–435.
- Маслобоев В.А., Селезнев С.Г., Макаров Д.В., Светлов А.В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 3. С. 138–153.
- Паршина М.В., Корельский Д.С. Комплексный мониторинг воздействия комбината «Североникель» на природную среду // Зап. Горн. ин-та. 2008. Т. 174. С. 217–221.
- Рыбаков Ю.С., Дальков М.П. Оценка опасности техногенных образований цветной металлургии и химической промышленности [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2, ч. 1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20580> (дата обращения: 29.10.2020).
- Степанова Л., Писарева А., Циканавичуте В. Токсикологическая оценка воздействия отходов металлургической промышленности на экологические свой-

- ства светло-серых лесных почв // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 6. С. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-6-54-59.
- Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г., Колодежная Е.В., Горлова О.Е. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.
- Шилова И.И., Логинова Н.Б. Экологическая специфика отвалов предприятий цветной металлургии и оценка возможности создания на них культурфитоценозов // Растений и промышленная среда. 1974. Вып. 3. С. 45–55.
- Gabasiane T.S., Bhero S., Danha G. Waste Management and Treatment of Copper Slag BCL, Selebi Phikwe Botswana: Review // Proc. Manufacturing. 2019. V. 35. P. 494–499. DOI: 10.1016/j.promfg.2019571.
- Khorasanipour M., Esmailzadeh E. Environmental characterization of Sarcheshmeh Cu-smelting slag, Kerman, Iran: Application of geochemistry, mineralogy and single extraction methods // Geochem. Explor. 2016. V. 166. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016315.
- Kierczak J., Potysz A., Pietranik A., Tyszka R., Modelska M., Néel C., Ettler V., Mihaljevič M. Environmental impact of the historical Cu smelting in the Rudawy Janowickie Mountains (south-western Poland) // Geochem. Explor. 2013. V. 124. P. 183–194. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012908.
- Luo Y., Wu X., Qiu J., Sun H., Wu Y. Root-induced changes in aggregation characteristics and potentially toxic elements (PTEs) speciation in a revegetated artificial zinc smelting waste slag site // Chemosphere. 2020. V. 243. P. 125414. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125414.
- Luo Y., Wu Y., Qiu J., Wang H., Yang L. Suitability of four woody plant species for the phytostabilization of a zinc smelting slag site after 5 years of assisted revegetation // Soils Sediments. 2019. V. 19. P. 702–715. DOI: 10.1007/s11368-018-2082-4.
- Luo Y., Wu Y., Wang H., Xing R., Zheng Z., Qiu J., Yang L. Bacterial community structure and diversity responses to the direct revegetation of an artisanal zinc smelting slag after 5 years // Environmental Sci. Pollution Res. 2018. V. 25. P. 14773–14788. DOI: 10.1007/s11356-018-1573-6.
- Osyczka P., Rola K. Cladonia lichens as the most effective and essential pioneers in strongly contaminated slag dumps // Central Eur. J. Biol. 2013. V. 8, iss. 9. P. 876–887. DOI: 10.2478/s11535-013-0210-0.
- Rola K., Osyczka P., Nobis M., Drozd P. How do soil factors determine vegetation structure and species richness in post-smelting dumps? // Ecol. Eng. 2015. V. 75. P. 332–342. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.1126.
- Turisová I., Sabo P., Štrba T., Koróny S., Andráš P., Širka P. Analyses of floristic composition of the abandoned Cu-dump field Piesky (Staré Hory Mountains, Slovakia) // Web Ecol. 2016. V. 16. P. 97–111. DOI: 10.5194/we-16-97-2016.