© Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеева, 2016

УДК
504.53.062.4

Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеева

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ И ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ НА ТЕРРИТОРИИ МЕДНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЮЖНОГО УРАЛА

Рассмотрены месторождения медных руд на Южном Урале и их роль в загрязнении территории тяжелыми металлами, в первую очередь отходами обогатительных фабрик. Для очистки загрязненных почв предложена технология фиторемедиации путем использования биоматов из соломы с семенами многолетних трав, способных извлекать (аккумулировать) тяжелые металлы из почв. Подобраны многолетние травы, способствующие максимальной очистке почвогрунтов от тяжелых металлов. Предложены составы двухкомпонентных травосмесей для извлечения металлов. Установлены закономерности накопления металлов в растениях. Максимальная аккумуляция металлов происходит в листве, после скашивания металлы изымаются из почв и после сжигания могут быть утилизированы. Для улучшения условий фиторемедиации хвостохранилищ предложено использовать композитный экранирующий слой из медеплавильного шлака, цемента и глины.

Ключевые слова: обогатительные фабрики, фиторемедиация, тяжелые металлы, техногенные намывные грунты, растения – биоаккумуляторы, композит.

Добыча и переработка медных руд на Южном Урале занимает одно из ведущих мест. На территории Южного Урала находятся более 20 месторождений медьсодержащих руд. В Оренбургской области известны месторождения Гайское, Летнее, Джусинское, Барсучий Лог и другие. Челябинская область представлена Александрийским, Узельгинским, Маукским, Талганским, Султановским, Михеевским, Томинским, Тарутинским месторождениями и месторождением Чебачье. В Республике Башкортостан известны месторождения Учалинское, Сибайское, Ново-Учалинское, Западно-Озерное, Подольское и Юбилейное. Каждое из указанных месторождений имеет от-

личительные особенности по запасам как руд, так и самой меди. Основными обогатительными фабриками по переработке медной руды на Южном Урале являются: Карабашская, Гайская, Сибайская, Бурибаевская, Учалинская с запасом хвостов 9,1; 47,0; 18,4; 5,4 и 24,0 млн т соответственно.

При переработке медных руд на обогатительных фабриках происходит существенное загрязнение окружающей среды отходами производства, в первую очередь хвостами обогащения, переливами сточных вод, испарениями, сдувами пыли с сухих пляжей и т.д. [1].

На хвостохранилищах при технологических процессах образуются, так называемые сухие пляжи, занимающие от 25 до 30% площади, которые длительное время остаются эрозионнопасными. Кроме того, на хвостохранилищах открытыми остаются откосы дамб и плотин, различной площади. При ветреной сухой погоде пыль с поверхностей пляжей и плотин поднимается в воздух и разносится на значительные расстояния, загрязняя воздушный бассейн и прилегающие территории. Количество пыли, сдуваемой с поверхности хвостохранилищ, зависит от влажности хвостов, их гранулометрического состава и скорости ветра.

Рассеивание техногенных выбросов в атмосфере и последующее выпадение их на поверхность путем гравитационного осаждения или выпадения с осадками приводит к формированию в почвенном покрове техногенных аномалий (почва является индикатором загрязнения, так как она сохраняет долгосрочную информацию о среде и отражает стабильное многолетнее накопление загрязнителей) [2].

В ходе хозяйственной деятельности предприятий медеперерабатывающего комплекса в почву попадает значительное количество соединений тяжелых металлов, которые в большинстве своем представлены оксидами. В результате взаимодействия соединений тяжелых металлов с почвой оксиды цветных металлов подвергаются изменениям и существенно начинают различаться по своей устойчивости [11, 12].

Уровень загрязнения почв определяет их деградацию, которая обусловлена наличием химических веществ в почвах, превышающих природный (фоновый) уровень [4].

Загрязненные территории необходимо очищать и проводить работы по ремедиации (remediatin – восстановление, «излечивание») загрязненных почв. Во многих странах мира создана целая индустрия по ремедиации территорий, существуют фир-

мы по очистке почв, переработке загрязненных материалов и разработке технологий [9,10].

В настоящее время известны два основных подхода к ремедиации почв. Первый из них основан на удалении загрязнений из почв тем или иным способом, вернее на снижении их концентраций до безопасного с эколого-гигиенической точки зрения уровня содержания. Второй предполагает проведение мероприятий, направленных на стабилизацию зоны загрязнения и на снижение подвижности и биоактивности загрязнителей (иммобилизация загрязнителей и детоксикация почв), включая механические и инженерно-геологические способы изоляции загрязненных мест.

Технологии ремедиации почв рассматривают с позиций их места (способа) применения: 1. Обработка вне загрязненного участка, которая связана с извлечением, как правило, больших объемов загрязненного грунта и переработкой его на стационарных установках, расположенных за пределами рекультивируемой территории; 2. Обработка in siti (на месте) с инжектированием в загрязненный участок соответствующих химических агентов и последующей утилизацией выделяющихся парогазообразных фракций загрязнителей; 3. Обработка извлеченной почвы (как правило, небольших ее объемов) вблизи загрязненного участка с последующим возвращением очищенного материала на место прежнего его залегания; 4. Локализация поллютантов в пределах участка посредством проведения физико-химической стабилизации. К настоящему времени разработаны и внедрены в практику физические, физико-химические, химические и биологические методы ремедиации. Каждый из методов ремедиации имеет свои достоинства и недостатки, самое главное стоимость технологии очистки. С точки зрения авторов настоящего исследования наиболее экологически и экономически целесообразной технологией ремедиации является биоремедиация, а точнее фиторемедиация.

Целью настоящей работы является разработка технологии фиторемедиации территорий, загрязненных тяжелыми металлами в районах переработке медных руд.

Фиторемедиация (фитобиоремедиация) представляет собой использование растений и ассоциированных с ними микроорганизмов для очистки окружающей среды. В этой технологии используются природные процессы, с помощью которых растения и ризосферные микроорганизмы деградируют и накапливают различные поллютанты.

Фиторемедиация включает абсолютно весь спектр метаболических процессов по поглощению и аккумуляции тяжелых металлов. Соответственно, при отработке технологии фиторемедиации почв от тяжелых металлов основное внимание уделяется отбору растений, способных трансформировать их по растительному организму, переводя их в менее подвижную и активную форму.

В настоящей работе нами разработана технология фиоторемедиации in siti путем высевания на загрязненной территории растений – биоаккумуляторов тяжелый металлов. В качестве растений – биоаккумуляторов, нами испытаны такие растения, как: Пырей ползучий (Elytrigia repens), Житняк гребенчатый (Agropyron cristatum), Овсяница луговая (Festuca pratensis) и Мятлик луговой (Poa pratensis).

Исследования проводили в полевых условиях путем создания площадок фиторемедиации с одновидовым посевом исследуемых трав. Площадь каждой площадки составляла 5 м^2. Верхний слой почвы подвергали рыхлению на глубину от 20 до 30 см с предварительной механической очисткой. Исследования выполняли в трехкратной повторности. Посевные качества семян исследовали в соответствии с ГОСТ 12038-84 [5]. Норма высева семян и посевная годность исследуемых трав определяли по [5]. Содержание накопленных фитомассой металлов определяли в золе растений вольтамперометрическим методом по принятым методикам.

Выбор трав для фиторемедиации загрязненных почв и техногенных грунтов обусловлен их биоаккумуляционной способностью по отношению к тяжелым металлам и распределения их по вегетативным органам.

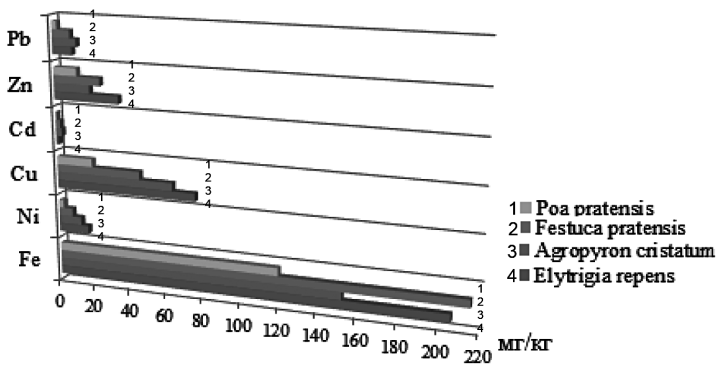

Рис. 1. Среднесезонные концентрации тяжелых металлов в корнях растений

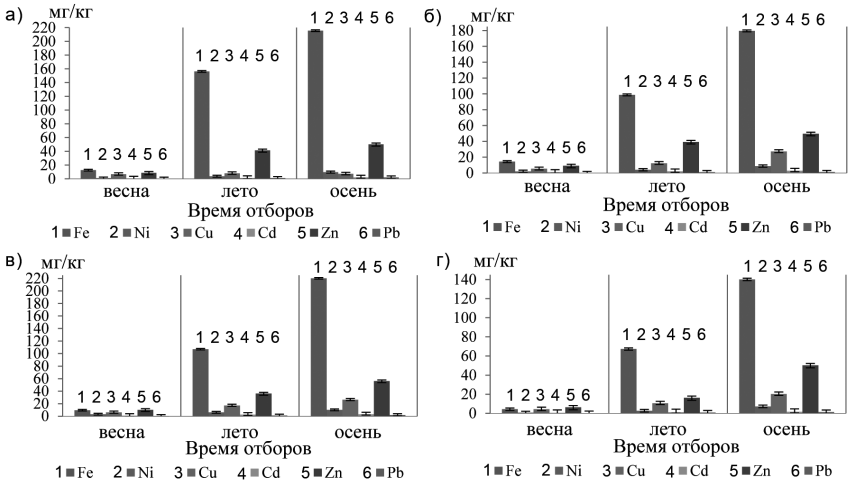

Рис. 2. Среднесезонные концентрации тяжелых металлов в листве многолетних трав: а) E. repens; б) A. cristatum; в) F. pratensis; г) P. pratensis

На рис. 1 представлены результаты определения накопления металлов в корнях растений.

Установлено, что у всех исследуемых растений металлы из корней транспортируются в выше расположенные органы по сосудам ксилемы с транспирационным током [6; 7]. Можно предположить, что общий механизм транспорта тяжелых металлов происходит по ксилеме. Кадмий и цинк являются химически сходными элементами, поэтому они могут транспортироваться в растении одинаковыми путями, однако подвижность цинка в сосудах флоэмы выше, чем кадмия [8]. Во флоэмном соке растений, транспорт ионов тяжелых металлов осуществляется за счет различных типов лигандов.

На рис. 2 приведены данные по накоплению металлов в листве исследуемых трав.

Представленные результаты исследований указывают на эффективность выноса тяжелых металлов из почвы, с максимальной концентрацией в осенний период. Распределение тяжелых металлов в листьях исследуемых растений можно представить по каждому из изученных металлов, убывающим рядом: Elytrigia repens: (Cu, Ni, Zn) > Fe > Pb > Cd; Agropyron cristatum: (Fe, Cu, Zn, Pb) > Ni > Cd; Festuca pratensis: Zn > Ni > (Fe, Cu, Cd, Pb); Poa pratensis: (Pb, Ni, Zn) > Cd > (Fe, Cu).

Благодаря исследованиям по определению функций к накоплению и транспортировке тяжелых металлов в корнях и ли-

стьях данных трав, которые проводились в сезонном аспекте в течение трех лет с 2012–2014 гг. нам удалось подобрать травосмеси, эффективно извлекающие тяжелые металлы и предложить технологию фиторемедиации.

Технология фиторемедиации загрязненных почв предусматривает следующие операции: подготовительные, земляные и планировочные работы; подготовку биомата, представляющего собой многослойную полностью биологически разлагающуюся основу из прессованной соломы, между слоями которой уложены семена предлагаемых травосмесей многолетних трав. Травосмесь подбирается исходя из условий загрязнения по доминирующему металлу.

Почвогрунт выравнивается и рыхлится с использованием культиваторов до образования разрыхленного слоя мощностью от 20–30 см. На подготовленный почвогрунт укладывается заранее подготовленный биомат с травосмесью с заданной нормой высева в нем.

Первое время при начальном развитии растений, биомат, выполняет все защитные функции, предотвращая эрозионные процессы. В течение последующих 2–3-х лет, к моменту образования равномерного травостоя с обильной корневой системой, которая проникая глубоко в почву, он связывает грунт и образует дернину. При этом предлагаемый биомат полностью усваивается в почве. Образуемый дерновой покров обладает высокой механической прочностью, кроме того, обладает влагоудерживающими свойствами с повышением устойчивости склонов и откосов к эрозии. Крепление биоматов производится деревянными колышками.

В случае фиторемедиации техногенных намывных грунтов в хвостохранилищах, для повышения эффективности покрытия хвостохранилищ и минимизации фильтрования влаги в техногенный почвогрунт, предлагается использование композитного грунтобетона, полученного из смеси шлака отвального Карабашского медеплавильного комбината, цемента марки ЦЕМ II-32,5Н и белой глины.

С помощью лабораторных исследований и математического моделирования получены оптимальные по прочности и влагонепроницаемости соотношения сырьевых материалов.

Для получения грунтобетона, сырьевые материалы тщательно перемешивали в течение 5 мин., до получения однородной консистенции смесей. По окончании перемешивания смеси определяли подвижность растворной смеси с использо-

ванием встряхивающего столика и металлической формы-конуса. Определяли пределы прочности при сжатии композитов в различные сроки твердения при различных соотношениях компонентов.

Предлагаемая нами технология может быть реализована следующим образом: на поверхность хвостохранилища, содержащего отходы обогащения укладывается экранирующий слой грунтобетона из композитного материала, состоящего из отработанного шлака, цемента и глины. Данный слой устраняет непосредственный контакт водонасыщенных хвостов с экраном, который обрывает капиллярную кайму, вследствие чего исключает восходящую миграцию вредных веществ в вышележащие слои и предотвращает инфильтрацию атмосферных осадков в нижние слои хвостов.

На водоупорный слой, для предотвращения коррозионных процессов, отсыпают слой суглинков, на который размещается слой почвенной массы, состоящей из чернозема. Высота плодородного слоя определяется глубиной проникновения корневой системы растений – фитомелиорантов. На почвенный слой укладывается биомат с семенами многолетних трав, которые в данном случае будут способствовать крепкому дернообразованию, высокой степени транспирации и являться фитоиндикаторами.

Предложенная технология фиторемедиации техногенных грунтов в хвостохранилищах с использование экранирующих слоев, способствует прекращению загрязнения поверхностных и грунтовых вод, почвогрунтов, а также улучшению качества атмосферного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Орехова Н. Н.* Научное обоснование и разработка технологии комплексной переработки и утилизации техногенных медно-цинковых вод горных предприятий. дис....док-ра. техн. наук. – Магнитогорск, 2014. – 388 с.

2. *Пашкевич М. А.*, *Понурова И. К.* Геоэкологические особенности техногенного загрязнения природных экосистем зоны воздействия хвостохранилищ Михайловского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 5. – С. 349–356.

3. *Мартьянычев А. В.* Применение фиторемедиации почв для очистки земель сельскохозяйственного назначения // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 10. – С. 56–63.

4. *Горно-металлургическая* компания «Норильский никель» (влияние на окружающую среду и здоровье людей). Доклад объединения Bellona. 2010 – Режим доступа: http://bellona.ru/filearchive/fil_nikel-report-bellona-2010-ru.pdf

5. *ГОСТ 12038-84*. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – М.: Изд. стандарт, 1991. – 55 с.

6. *Salt D.E.*, *Prince R.C.*, *Pickering I.J., Raskin I.* Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard // Plant Physiol. 1995.V. 109. P. 1427–1433.

7. *Hart J.J.*, *Welch R.M.*, *Norvell W.A.*, *Sullivan L.A.*, *Kochian L.V.* Characterization of cadmium binding, uptake and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars // Plant Physiol. 1998 V. 116. P. 1413–1420.

8. *Титов А.Ф.*, *Таланова В.В.*, *Казнина Н.М.*, *Лайдинен Г.Ф.* Устойчивость растений к тяжелым металлам / Отв. ред. Н. Н. Немова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 172 с.

9. *Тимофеева С.С.*, *Тимофеев С.С.* Современные фитотехнологии в решении экологических проблем Байкальского региона // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 2. – С. 52–58.

10. *Тимофеева С.С.*, *Тимофеев С.С.*, *Мишенькина Е.А.* Роль фитотехнологий в улучшении среды обитания // Известия Иркутского государственного университета. Серия биология, экология. – 2013. – т. 3.1 спецвыпуск. – С. 73–77.

11. *Ульрих Д.В.*, *Тимофеева С.С.* Современное состояние хвостохранилища в г. Карабаш и его влияние на техногенез прилегающей территории // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19. – С. 56–59.

12. *Ульрих Д.В.*, *Тимофеева С.С.* Оценка влияния горнодобывающих и перерабатывающих предприятий на состояние окружающей среды Челябинской области // Горный журнал. – 2015. – Т. 5. – С. 94–99. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ульрих Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), e-mail: ulrich.dm.25@mail.ru,
Тимофеева Светлана Семеновна – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: timofeeva@istu.edu.

UDC 504.53.062.4

D.V. Ul'rikh, S.S. Timofeeva

PHYTOREMEDIATION OF POLLUTED SOIL AND INDUSTRIALLY AFFECTED SUBSOIL OF WASTE STORAGE IN THE COPPER MINING AREAS IN THE SOUTH URAL

Under discussion are copper deposits of the South Ural and their role in pollution of the area with heavy metals, for the first turn, from waste of processing plants. For polluted soil treatment, it is proposed to use the technology of phytoremediation using bio mats of straw and perennial grass seeds capable to extract (accumulate) heavy metals from soil. Perennial grasses enabling maximum removal of heavy metals from soil are selected. Compositions of

two-component grass mixtures are put forward. Mechanisms of metal accumulation in plants are determined. The maximum accumulation of metals occurs in leaves; metals are removed from soil with mowed grass and can be disposed after straw burning. Aiming to improve phytoremediation of waste storage areas, it is suggested to use a composite shield layer made of copper smelting slag, cement and clay.

Key words: processing plants, phytoremediation, heavy metals, production-generated filled-up soil, plants–bioaccumulators, composite.

AUTHORS

Ul'rikh D.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
South Ural State University (National Research University),
454080, Chelyabinsk, Russia, e-mail: ulrich.dm.25@mail.ru,
Timofeeva S.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair,
Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russia,
e-mail: timofeeva@istu.edu.

REFERENCES

1. Orekhova N.N. *Nauchnoe obosnovanie i razrabotka tekhnologii kompleksnoy pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh medno-tsinkovykh vod gornykh predpriyatiy* (Feasibility study and development of integrated treatment and disposal technology for copper–zinc process water at mines), Doctor's thesis, Magnitogorsk, 2014, 388 p.

2. Pashkevich M.A., Ponurova I.K. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2006, no 5, pp. 349–356.

3. Mart'yanychev A.V. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo instituta*. 2012, no 10, pp. 56–63.

4. *Gorno-metallurgicheskaya kompaniya «Noril'skiy nikel'» (vliyanie na okruzhayushchuyu sredu i zdorov'e lyudey). Doklad ob"edineniya Bellona* (Norilsk Nickel Mining and Metallurgical Company (Impact on the Environment and Health): Report of Bellona), 2010, available at: http://bellona.ru/filearchive/fil_nikel-report-bellona-2010-ru.pdf

5. *Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti. GOST 12038-84* (Seeds of agricultural crops. Methods to determine germinating capacity. State Standart 12038-84), Moscow, Izd. standart, 1991, 55 p.

6. Salt D.E., Prince R.C., Pickering I.J., Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard. *Plant Physiol*. 1995. V. 109. P. 1427–1433.

7. Hart J.J., Welch R.M., Norvell W.A., Sullivan L.A., Kochian L.V. Characterization of cadmium binding, uptake and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiol*. 1998 V. 116. P. 1413–1420.

8. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laydinen G.F. Ustoychivost' rasteniy k tyazhelym metallam, pod red. Nemova N.N. (Tolerance of plants to heavy metals, N.N. Nemova (Ed.), Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2007, 172 p.

9. Timofeeva S.S., Timofeev S.S. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2012, no 2, pp. 52–58.

10. Timofeeva S.S., Timofeev S.S., Mishen'kina E.A. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya biologiya, ekologiya*. 2013, vol. 3.1 special issue, pp. 73–77.

11. Ul'rikh D.V., Timofeeva S.S. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2015, no. 19, pp. 56–59.

12. Ul'rikh D.V., Timofeeva S.S. *Gornyy zhurnal*. 2015, no 5, pp. 94–99.