ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818

Обзорная статья
http://fptt.ru

Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов

Л. К. Асякина*, Л. С. Дышлюк, А. Ю. Просеков

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 04.09.2021

Принята после рецензирования: 15.11.2021
Принята в печать: 01.12.2021

**e-mail: alk_kem@mail.ru*
© Л. К. Асякина, Л. С. Дышлюк, А. Ю. Просеков, 2021

Аннотация.
Введение. Постоянно увеличивающиеся объемы токсичных выбросов в биосферу способствуют накоплению загрязняющих веществ в почве, воде и атмосфере. Это представляет серьезную угрозу для живых систем и экосистемы в целом. Поэтому целью работы является разработка и/или усовершенствование существующих методов и комплексов на их основе по восстановлению загрязненных природных систем.
Объекты и методы исследования. Общедоступная научная информация баз данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), платформы Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.ru с глубиной поиска 16 лет.
Результаты и их обсуждение. В результате анализа научной литературы выделены основные техногенные объекты, оказывающие токсическое действие на биоту. Деструктивному воздействию подвержены почвенные покровы. Среди существующих техногенно нарушенных объектов наибольшую площадь занимают отходы горнодобывающей промышленности. К загрязняющим веществам относятся тяжелые металлы, углеводороды, соединения серы, кислоты и др. Для снижения техногенного воздействия на окружающую среду используют различные технологии ремедиации. Они включают в себя полное или частичное разрушение поллютантов, извлечение их для дальнейшей переработки в нетоксичную продукцию и/или полного удаления, а также стабилизацию в менее токсичные формы. В настоящем обзоре представлена информация об основных методах восстановления нарушенных почв и обоснована перспектива разработки комплексных технологий ремедиации.
Выводы. Рассмотрены основные поллютанты антропогенного происхождения, влияющие на состояние окружающей биоты. Изучены классические методы восстановления техногенно-нарушенных почв. Обоснована перспектива разработки новых технологий ремедиации почв на основе комбинирования биологических методов – фиторемедиации, биоаугментации и биостимуляции для восстановления посттехногенных ландшафтов.

Ключевые слова. Экология, поллютанты, горнодобывающая промышленность, рекультивация, биоремедиация

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) для выполнения научно-исследовательских работ по теме «Разработка подходов к фиторемедиации посттехногенных ландшафтов с использованием стимулирующих рост растений ризобактерий (PGPB) и “омиксных” технологий», дополнительное соглашение № 075-03-2021-189/4 от 30.09.2021 (внутренний номер 075-ГЗ/Х4140/679/4).

Для цитирования: Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов / Л. К. Асякина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 805–818. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818.

Review article

Available online at http://fptt.ru/eng

Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience

Lyudmila K. Asyakina*, Lyubov S. Dyshlyuk, Alexander Yu. Prosekov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: September 04, 2021

Accepted in revised form: November 15, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: alk_kem@mail.ru
© L.K. Asyakina, L.S. Dyshlyuk, A.Yu. Prosekov, 2021

Abstract.
Introduction. Anthropogenic activities cause large-scale environmental problems. The growing volumes of toxic emissions contribute to soil, water, and air pollution, thus posing a serious threat to all living systems and the global ecosystem. New reclamation methods are a relevant research topic as they help to restore and preserve ecosystems.
Study objects and methods. The research covered sixteen years of scientific publications from PubMed of the National Center for Biotechnology Information (USA), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), Web of Science, and the national electronic library service eLibrary.ru.
Results and discussion. The authors reviewed various scientific publications to define the main technogenic objects that have a toxic effect on biota. Soil is more vulnerable to destructive effects, and mining wastes are responsible for the largest share of technogenically disturbed objects. Pollutants include many compounds, such as heavy metals, hydrocarbons, sulfur compounds, acids, etc. Reclamation technologies reduce the man-induced impact on the environment, e.g. pollutants can be completely or partially destroyed, processed into non-toxic products, completely removed, stabilized into less toxic forms, etc. This review provides information on the main methods of reclamation of disturbed soils and substantiates the prospect of developing integrated reclamation technologies.
Conclusion. The present review featured the main pollutants of anthropogenic origin and the traditional soil reclamation methods. The most prospective new technologies of soil reclamation appeared to be a combination of such biological methods as phytoremediation, bioaugmentation, and biostimulation.

Keywords. Ecology, pollutants, mining industry, reclamation, bioremediation

Funding. The research was part of the state task ordered by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka): “Development of approaches to phytoremediation of post-technological landscapes using plant growth-stimulating rhizobacteria and “omics” technologies”, supplementary agreement No. 075-03-2021-189/4 dated September 30, 2021 (internal number 075-GZ/X4140/679/4).

For citation: Asyakina LK, Dyshlyuk LS, Prosekov AYu. Reclamation of Post-Technological Landscapes: International Experience. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):805–818. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-805-818.

Введение

Индустриализация и урбанизация, современные методы ведения сельского хозяйства и другие формы антропогенной деятельности человека в последние десятилетия привели к крупномасштабным экологическим проблемам [1, 2]. Научно-технический прогресс способствовал увеличению техногенной нагрузки и стимулировал накоплению вреда окружающей среде. На сегодняшний день к числу основных экологических проблем относят: загрязнение атмосферного воздуха и водных объектов, загрязнение и деградацию почвенно-земельных ресурсов [3, 4]. Результатом является снижение биоразнообразия. Загрязнение – присутствие различных объектов в окружающей среде в концентрациях, ухудшающих ее функционирование и представляющих риск для живых систем. Загрязняющие вещества (поллютанты) имеют твердую, жидкую и газообразную формы. Высокие концентрации данных веществ оказывают негативное влияние на биоту и способны изменять естественные ландшафты и рельефы местностей [5, 6].

Для устранения негативного воздействия поллютантов, повышения качества жизни и здоровья населения, обеспечения экологической безопасности и охраны окружающей среды обязательным условием является их удаление с загрязненных участков (с последующим восстановлением техногенно нарушенных земель). Среди существующих техногенно нарушенных объектов наибольшую площадь занимают отходы горнодобывающей промышленности. Концентрация поллютантов на данных территориях в 100 и 1000 раз превышает предельно допустимые значения [7]. Например, по экспертным оценкам площадь нарушенных земель в Кузбассе составляет 120–150 тыс. га, на которой работают 114,9 тыс. человек. Из них 79,3 % напрямую контактируют с вредными и/или опасными поллютантами, вызывающими онкологические и прочие заболевания [8]. Следовательно, существует острая необходимость в осуществлении рекультивационных мероприятий техногенно загрязненных территорий. Однако на сегодняшний день не существует универсального метода по восстановлению нарушенной экосистемы, т. к. загрязнители имеют различную структурную форму (являются органическими веществами или

тяжелыми металлами) и/или имеют различный источник происхождения, т. е. для их устранения требуются индивидуальные методы и технологии по обработке и утилизации [9]. Поэтому перспективным направлением для сохранения и восстановления безопасной для жизнедеятельности организмов экосистемы является разработка и/или усовершенствование существующих методов и комплексов на их основе по восстановлению загрязненных природных систем.

Целью данной работы является проведение литературного обзора, посвященного рассмотрению видов поллютантов и методам восстановления техногенно нарушенных территорий, для выбора оптимального комплекса мероприятий по рекультивации земель, в частности пригодных для использования на загрязненных территориях Кемеровской области – Кузбасса.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является общедоступная научная информация, поиск которой осуществлялся в базах данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), на платформе Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.ru. Глубина поиска составляла 16 лет, язык поиска – английский и русский.

Результаты и их обсуждение

В ходе обзора были выделены основные виды техногенных объектов, являющихся источниками поллютантов:

1. Терриконы шахт, хвостохранилища, отвалы – отходы горной промышленности, основанной на добыче, обогащении и переработке полезных ископаемых [10];

2. Золошлаковые отходы – золы уноса и шлаки, образуемые в процессе факельного и слоевого сжигания угля [11, 12];

3. Металлургические шламы – твердые отходы, образующиеся в процессе добычи и выплавки металлических руд, складируются в шламонакопителях и характеризуются высокой концентрацией тяжелых металлов [13];

4. Отходы сельскохозяйственной деятельности – продукты жизнедеятельности птиц и животных, жмых растительных культур, отработанные масла и химикаты (пестициды, гербициды) [14];

5. Полигоны твердых, жидких и маслоотходов – складируются в виде свалок и захоронений [15].

Данные техногенные объекты лишены плодородного почвенного слоя, т. к. поллютанты делают их непригодными для представителей флоры и фауны, обитающих рядом с очагом загрязнения [7]. Пириты тяжелых металлов, подвижные формы железа и алюминия, критические значения pH почв и вод и другие факторы оказывают фитотоксическое действие на окружающую биоту. В процессе угледобычи и углеобогащения экосистема, особенно почва, подвергается разрушительному воздействию. Как при закрытом, так и при открытом способе добычи угля на местах работает тяжелая техника, которая выделяет в экосистему оксиды азота, диоксид серы, оксид и диоксид углерода, оксид хлора. Они попадают в атмосферу, в водоемы и в почву. Помимо данных газов, в окружающую среду на разрезах выделяются угольная пыль и взвешенные вещества различного диаметра. Попадая в грунтовые воды, оксиды серы и хлора растворяются и превращаются в серную и соляную кислоту соответственно. Это приводит к увеличению кислотности водоемов и почв. При открытом способе добыче угля из тяжелых металлов больше всего накапливаются Zn, Cd, Pb, Hd, Fe, Al и Mn. Кроме металлов, выделяется большое количество свободной серы [16].

Поллютанты, проявляющие негативное воздействие на экосистему, подразделяют на 2 основные группы [17, 18]:

1. Органические соединения: галоидированные летучие (хлороформ, винилхлорид), галоидированные полулетучие (тетрахлорфенол), негалоидированные летучие (бензол, толуол, ацетон, этилбензол), негалоидированные полулетучие (фенол, полициклические ароматические углеводороды), органические агрессивные вещества (анилин), органические цианидины, пестициды, гербициды и нефтяные углеводороды;

2. Неорганические соединения: металлы (ртуть, хром, свинец), металлоиды (мышьяк, сурьма), радионуклиды (радиоактивные изотопы урана) и неорганические агрессивные вещества (соляная и серная кислоты) [19, 20].

Данные вещества также проявляют фитотоксическое действие, приводящее к нарушению круговорота питательных веществ в почве, и угнетающее развитие местной микробиоты и растительности, повышающее рост заболеваемости и смертности населения (работников, постоянно контактирующих с техногенно нарушенными ландшафтами, – горнорабочие и т. п., местного населения, проживающего вблизи нарушенных земель) [5, 21]. Поллютанты, поступая в организм, вызывают развитие респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, дисфункции репродуктивной и центральной нервной систем, кожных заболеваний, онкологии. Тяжелые металлы при всасывании в организм человека биоаккумулируются, что приводит к прямому отравлению или хронической интоксикации [5]. В работе J. J. Zocche и др. исследован элементный состав печени мышей, в рационе питания которых присутствовали овощи, выращенные на угольных отвалах [22]. В результате исследования отмечено высокое содержание

металлов и металлоидов (Mg, S, Ca, K, Fe, Zn и др.) в печени, что приводит к риску развития заболеваний нервной и сердечно-сосудистой систем, почек и др. Токсическое действие на организм сверхвысоких концентраций тяжелых металлов связано с изменением метаболических процессов и активных центров биологических молекул.

Органические вещества устойчивы к биодеградации в естественных условиях. Поэтому долго остаются в окружающей среде в первоначальном виде. Такие соединения принято называть стойкими органическими загрязнениями. Так как большинство органических поллютантов способно аккумулироваться в живых организмах, то это способствует их долгому нахождению в окружающей среде.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – органические соединения, имеющие в структуре 2 и более конденсированных кольца. Эти вещества образуются в результате пиролиза или неполного сгорания органических веществ. ПАУ из-за гидрофобных свойств являются одними из наиболее распространенных поллютантов в окружающей среде [23].

Для снижения техногенного воздействия на окружающую среду используют различные технологии рекультивации (восстановления, ремедиации) [24, 25]. Данные технологии включают в себя полное или частичное разрушение поллютантов, их извлечение для дальнейшей переработки в нетоксичную продукцию и/или полного удаления, стабилизацию поллютантов в менее токсичные формы и территориальное изолирование техногенных объектов (при помощи специализированных барьеров для препятствия их перемещения либо выкапывание для захоронения на полигоне) [26, 27]. К инженерным методам ликвидации и обезвреживания отходов или ремедиации посттехногенных территорий относятся методы, основанные на применении сложных инженерных сооружений, устройств и технологических приемов. Наиболее распространено захоронение отходов, которые осуществляют в том случае, когда их переработка опасна или невозможна. Для захоронения загрязненных почв и отходов отводятся специально оборудованные полигоны, характеризующиеся минимальным ущербом окружающей среде [28]. Данные технологии по ремедиации почвы разделяются на физические, химические и биологические методы.

Физические методы рекультивации техногенно-нарушенных почв часто используются в качестве вспомогательных мер на начальных этапах восстановительных процессов. Механические методы обработки загрязненных почв, такие как дробление, сортировка и брикетирование, имеют широкое распространение. Однако после их применения требуется дополнительная обработка химическими методами. В исследовании G. Dermont и др. описан способ восстановления загрязненных металлами (мышьяк, кадмий, медь, цинк, свинец) городских почв. Рекультивацию осуществляют флотацией измельченной фракции загрязненной почвы с размером частиц менее 250 мкм [29]. S. Bisone и др. в своей работе также использовали дробление загрязненных металлургическими отходами почв для полного удаления тяжелых металлов и полициклических ароматических углеводородов [30].

Еще одой технологией, основанной на физических методах, является вакуумная или паровая экстракция почв. Процесс очистки осуществляется путем откачивания воздуха из зоны аэрации при помощи вакуумного компрессора. После чего откачанный воздух, содержащий в своем составе поллютанты, улавливается и очищается в специальном оборудовании. Данный тип ремедиации характерен для почв или твердых бытовых отходов, загрязненных летучими поллютантами (нефтепродуктами, летучими углеводородами, хлорсодержащими соединениями и др.) [31]. В Китае паровая экстракция почвы – одна из наиболее широко используемых технологий ремедиации нарушенных земель, которая имеет много различных модификаций: сочетание пенной промывки неионогенными поверхностно-активными веществами и паровой экстракции для удаления летучих соединений нефтянной смеси из почвы, загрязненной дизельным топливом [32, 33]. Стоит отметить, что серьезным недостатком данного метода является неоднородность природы загрязняющих веществ, присутствие нелетучих поллютантов и низкая проницаемость поверхностных слоев загрязненных почв. Вследствие чего извлечение поллютантов может быть продолжительным, неполным и неэффективным по сравнению с другими методами ремедиации.

В ряде исследований проанализирован метод вакуумной экстракции для ремедиации почв, загрязненных ПАУ. В исследованиях L. Trine и др. показано, что при использовании экстракции с усиленным паром (в данном методе температура пара составляет свыше 105 °C) происходит эффективное удаление незамещенных форм ПАУ [23]. Однако параллельно с этим происходит синтез производных продуктов, которые характеризуются высокими показателями токсичности.

Также проблема образования полярных и токсичных производных ПАУ в процессе ремедиации почв рассмотрена в работе L. Chibwe и др. [34]. В модельных условиях биореактора осуществляли аэробную ремедиацию почв, загрязненных каменноугольной смолой. Неполное окисление ПАУ в процессе восстановления может привести к синтезу их производных, которые включают кислородные и нитрогруппы. Полученные производные характеризуются повышенной токсичностью, что объясняется наличием в их структуре веществ электроотрицательных групп.

К физическим методам также относятся относительно новые технологии рекультивации, основанные на включении механизмов самоочищения почв, такие как вспашка и взрыв. В основе указанных методов лежит концепция увеличения площади поверхности загрязненных почв, контактирующей с воздухом. Это способствует интенсивному выветриванию летучих и полулетучих загрязняющих соединений, повышению активности аборигенной аэробной микрофлоры [35].

Отдельную категорию образуют специализированные технологии – обработка материала ультразвуком, ультрафиолетовым или рентгеновским излучением, СВЧ и т. д. Эти технологии используют для решения конкретных специфических задач. Например, для обезвоживания загрязненных объектов и повышения их хрупкости. Указанные технологии эффективны при утилизации полимерных поллютантов [36, 37]. В большинстве случаев ультразвуковые методы используют для очистки сточных вод.

В последних исследованиях J. Choi и др. изучали эффективность использования ультразвука для ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами [38]. В качестве контрольного метода использовали классическую механическую промывку почв при помощи механического перемешивателя. В качестве жидкой фазы выступали растворы соляной кислоты или ЭДТА (для увеличения процента десорбции металлов). С точки зрения эффективности процесса удаления металлов (Cu, Pb, Zn), расхода реактивов и объема реактора определены следующие условия ремедиации почвы: гибридизация механического промывания и ультразвука в растворе 0,05 М ЭДТА и соотношение растворителя к массе образца 3:1.

Отдельно выделяется группа термических методов. Они имеют широкое применение с целью глубокой переработки многих опасных отходов, характеризующихся наличием нетермостойких поллютантов. Главным преимуществом термических методов деградации является практически 100 % удаление органических загрязнителей, а также уменьшение объема отходов в 5–10 раз. Традиционно термический метод используется для переработки ртуть-загрязненных почв и отходов [39]. Иногда термическую переработку используют с целью пиролиза, выпаривания или газификации нефтепродуктов из загрязненных нефтью или замазученных грунтов и нефтешламов. При этом основная масса грунта не претерпевает необратимых превращений, вследствие чего возвращается на исходное место после термообработки. Наиболее часто применяют такой вид тепловой обработки как витрификация или остекловывание – экстремально высокотемпературное (в пределах 1400–2000 °C) разложение с использованием стеклоподобных материалов [40].

В недавних исследованиях группы китайских ученых изучена эффективность использования газовой термической очистки загрязненных органическими соединениями почв и грунтовых вод [41]. В качестве основных поллютантов выступали бензол, хлорбензол и нефтепродукты. Процесс очистки осуществляли в течение 34 суток при температуре 100–200 °C и давлении 0,5–2,0 кПа. В результате исследования определено, что процент нейтрализации каждого анализируемого органического соединения составил не ниже 97,5 %. Но стоит отметить высокую энергоемкость процесса термической ремедиации и возможность нарушения почвенного слоя.

Также в результате термической обработки загрязненные материалы преобразуются в зольный остаток и отходящие дымовые газы. Они могут быть источником высокотоксичных химических соединений, т. к. при их охлаждении образовываются диоксины и фураны. Поэтому они проходят несколько дополнительных стадий очистки (высокотемпературное дожигание, быстрое охлаждение и очистка от механических примесей).

К следующей группе методов ремедиации техногенно нарушенных территорий относятся химические. Они основаны на взаимодействии специально подобранных реактивов и токсичных соединений. В результате происходящих химических реакций поллютанты преобразуются в менее токсичные и нетоксичные соединения, а затем утилизируются [42]. Среди химических методов восстановления загрязненных почв выделяют стабилизацию (реагентную нейтрализацию), химическую экстракцию, окислительно-восстановительную ремедиацию и электрохимическую обработку [43, 44].

Метод реагентной нейтрализации или стабилизации основан на интоксикации поллютанта и перевода его в безопасную форму по отношению к окружающей среде [45]. Исследуемый стабилизирующий реактив вносят в загрязненные почвы или твердые бытовые отходы на глубину до 5 м. В результате происходит связывание и инкапсуляция поллютантов. Полученные капсулированные формы водонепроницаемы и характеризуются нейтральным биологическим воздействием на окружающую экосистему. Чаще всего данный метод используется для выщелачивания тяжелых металлов. Для химической стабилизации металлов используют ионы железа с разной валентностью, т. к. они характеризуются высокой способностью к восстановлению [46]. Также для целей стабилизации используют низкоуглеродистые глины, известь, цемент и соединения фосфора [47].

Комбинированный химико-микробиологический метод восстановления загрязненных земель используют в своей работе L. Fu и др. [48]. Данный метод авторы использовали для решения проблемы вторичного загрязнения почв Cr(VI) после первичной

химической ремедиации. Отмечено, что химические методы являются нестабильными, несмотря на быстрые сроки восстановления и эффективность. Использование авторами исследования питательных веществ (смеси глюкозы и мочевины) для стимулирования роста эндогенной микрофлоры привело к снижению токсичности почвы на 97 %.

Метод химической экстракции основан на извлечении загрязняющих веществ специально подобранными реактивами путем перехода из твердой нерастворимой фазы и жидкую растворимую. Эффективность данного способа напрямую зависит от прочности образующихся соединений или комплексов [48, 49]. Удаление поллютантов посттехногенных ландшафтов – более сложный процесс по сравнению с экстракцией на основе физического разделения. Это обусловлено разнообразием химической природы загрязняющих веществ в одном объекте, что приводит к побочным химическим реакциям. В качестве растворителя выступают летучие вещества, такие как ацетон или гексан. Процесс растворения твердых форм поллютантов осуществляют в условиях специализированных реакторов с последующей отгонкой растворителя [50].

Электрохимическая деструкция загрязненных почв основана на использовании постоянного электрического тока в электрохимическом реакторе. Под действием электрического тока возникает ряд процессов (электрофорез, электроосмос, электромиграция и др.), приводящих к движению отдельных видов поллютантов и накоплению их на катодах и анодах реактора [51, 52].

Биологические методы рекультивации посттехногенных ландшафтов или биоремедиация – безопасная, экономически эффективная и устойчивая технология восстановления загрязненных территорий [53]. Подходы биоремедиации, в зависимости от природы загрязнителя и условий загрязненного объекта, подразделяются на 2 типа – *in situ* и *ex situ.* Обработка в условиях *in situ* является более привлекательной и рентабельной, т. к. она не вызывает разрушительных действий и не требует выемки и транспортировки загрязненных почв. Подходы ремедиации почв в условиях *in situ* включают естественное затухание, биостимуляцию, компостирование, биоаугментацию и фиторемедиацию. Биоремедиация в условиях *ex situ* включает изъятие и удаление загрязненной почвы или твердых отходов для обработки либо на месте, либо для транспортировки в подходящее место. Данный вид ремедиации включает земледелие, биологические штабеля и биошламы.

Естественные процессы затухания основаны на естественных процессах почв, которые способствуют снижению массы и концентрации поллютантов без вмешательства посторонних факторов [54]. Естественное затухание включает аэробное и анаэробное разложение загрязняющих веществ и сопровождается биологическими, химическими и физическими процессами естественной деградации. Улучшенным вариантом является поддерживаемое естественное затухание, характеризующееся интенсификацией процесса восстановления загрязненных почв путем частичного вмешательства человека: добавление в почву мелиорирующих веществ или хлорида кальция приводит к иммобилизации и стабилизации тяжелых металлов. Процесс естественного затухания используют для почв, загрязненных нефтяными углеводородами (бензолом, этилбензолом, толуолом, ксилолом).

Биостимуляция – один из подходов биоремедиации, основанный на стимулировании активности аборигенной микрофлоры, содержащейся в посттехногенных ландшафтах. Метод основан на переработке стойких органических загрязнителей (дихлордифенилтрихлорэтана, полициклических ароматических углеводородов, пиретроидных инсектицидов, линдана и других соединений) [55]. В процессе биостимуляции осуществляется обогащение почв недостающими питательными веществами (азотом, углеродом, калием, фосфором) с целью повышения метаболической активности и роста естественной микрофлоры почв. Перспективным направлением в биостимуляции микроорганизмов выступает обогащение загрязненных почв компостом – неочищенным органическим отходом, повышающим естественные процессы сбраживания [56]. Помимо компоста, в работах используют мульчу и навоз, что сказывается на повышенном стимулировании анаэробных процессов разложения поллютантов микроорганизмами [53].

Метод компостирования на сегодняшний день считается одним из наиболее экономически эффективных способов ремедиации. Внесение компоста в загрязненную почву способствует увеличению содержания органических соединений, повышению плодородия нарушенных земель, детоксикации и стабилизации многих поллютантов за счет обогащения почв собственной микрофлорой. Однако стоит отметить, что, помимо положительного эффекта, использование компоста сопровождается выбросами токсичных газов во время разложения. Это может привести к загрязнению окружающей атмосферы [57].

Еще одним способом, основанном на действии микроорганизмов, является биоаугментация. Это экологически чистый и эффективный способ, отличающийся от биостимуляции тем, что в загрязненную почву вносят штаммы микроорганизмов, нехарактерных для данной местности и характеризующиеся высокой способностью разлагать целевые поллютанты. Микробная популяция, используемая для ремедиации почв, должна обладать высокими ростовыми характеристиками в условиях высокой концентрации загрязняющих

веществ. Биоаугментацию используют для нейтрализации широкого спектра загрязнителей: нефтепродуктов, пестицидов, тяжелых металлов, полиароматических углеводородов, линдана и других соединений [58]. В работе M. Cycoń проведен анализ перспективных штаммов микроорганизмов для ремедиации загрязненных пестицидами почв методом биоаугментации [59]. К перспективным биодеструкторам отнесены штаммы из родов *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brucella*, *Burkholderia*, *Catellibacterium*, *Pichia*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Stenotrophomonas*, *Streptomyces* и *Verticillum*.

Для снижения концентрации шестивалентного хрома во многих исследованиях применяют метод биоаугментации различными микроорганизмами. Среди наиболее перспективных выделяют *Pannonibacter phragmitetus*, *Pseudomonas* spp., *Halomonas* spp., *Brucella* spp. и *Cellulomonas* spp. Научными работами доказана эффективность комбинированной ремедиации почвы методами биоаугментации и биостимуляции для снижения концентрации шестивалентного Cr: в Мексике доказана эффективность использования ацетатов в качестве добавки к микробному консорциуму *Halomonas* и *Herbaspirillum* для ремедиации долговременно загрязненных свалок; использование глюкозы оказывает существенное влияние на процесс восстановления Cr(VI), способствуя росту эндогенной микробиоты [48].

Эффективность метода напрямую зависит от правильного выбора штаммов с высокой способностью нейтрализовать поллютанты, стимулировать рост местной микрофлоры и запускать естественные процессы самоочищения почвы [60].

Таким образом, исследование физиологических и метаболических реакций микроорганизмов на металлический стресс в почве имеет важное значение для выбора оптимальных консорциумов, применимых в стратегиях биоремедиации, таких как биоаугментация или фитоэкстракция с микробиологическим усилением. Результаты исследований в области металлургии помогут разработать приложения, включая идентификацию биомаркеров для экотоксикологических исследований, биовыщелачивания, регенерации почвы на месте и фиторемедиации с микробиологическим участием загрязненных земель. Таким образом, этот обзор будет сосредоточен на молекулярном понимании устойчивости к металлам у бактерий и грибов, которое может быть получено из исследований в области металломики [61].

Направление биологической ремедиации почв с использованием растений называется фиторемедиация. Данный способ используется в условиях *in situ*, т. е. непосредственно на месте. Растения в данном методе используются для нейтрализации тяжелых металлов и металлоидов. Недостатки фиторемедиации заключаются в том, что это медленный процесс, требующий нескольких и более лет сбора урожая. Проблема в том, что существуют стрессоры (колебания температуры, питательных веществ, осадков, травоядность, патогены растений и конкуренция со стороны сорняков), которые влияют на фиторемедиацию в полях, но в теплице не встречаются. Фиторемедиация подразделяется на фитоэкстракцию, фитостабилизацию и ризофильтрацию [62].

Фитоэкстракция (фитоаккумуляция) характеризуется удалением поллютантов из загрязненных почв без оказания какого-либо влияния на изменения в ее плодородии. Тяжелые металлы накапливаются в биомассе растения, поэтому в этом методе перспективно использовать металлоаккумулирующие растения с высоким коэффициентом биологического поглощения [63]. Для боле полного протекания процесса применяют растения-гипераккумуляторы (горчица индийская (*Brassica juncea* (L.) Czern.), горчица черная (*Brassica nigra* (L.) W.D.J. Koch), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.), люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) и др.), способные поглощать в 50–500 раз большие концентрации тяжелых металлов, чем обычные растения [64]. В статье B. F. Nero изучена способность ятрофа куркаса (*Jatropha curcas* L.) и ветивера (*Chrysopogon zizanioides* L.) снижать концентрацию углеводородов почв вблизи горных выработок [65]. Максимальная эффективность поглощения поллютантов данными растениями отмечена при дополнительном обогащении почв компостом.

Для модификации данного метода актуально использовать биотехнологические методы, в частности бактерии (ризобактерии) и грибы (арбускулярные микоризные грибы), стимулирующие рост растений.

Ризофильтрация представляет собой процесс удаления поллютантов из окружающей среды (почвы, ила, донных отложений) с помощью корневой системы растения. Метод схож с фитоэкстракцией, но в данном случае тяжелые металлы остаются только в прикорневой части, не циркулируя по биомассе растения.

Более перспективным и эффективным методом фиторемедиации является фитостабилизация. Метод заключается в иммобилизации загрязняющих веществ вблизи корневой культуры растения при помощи корневых экссудатов. Инактивированные металлы могут выступать в качестве питательного субстрата для ризогенной микрофлоры местных растений [66].

Стратегия использования комбинированного метода фиторемедиации посттехногенных почв на базе фитостимуляции, биостимуляции и биоаугментации является альтернативой традиционным методам ремедиации и представляет интерес для дальнейших исследований. Актуальными являются исследования

фитостабилизирующих растений, ризогенных микроорганизмов и аборигенной микрофлоры техногенных земель для дальнейшего использования их в едином комплекте.

Выводы

В данной работе отражены основные виды загрязнителей техногенного характера и очаги их возникновения. Особую опасность представляют собой территории горнодобывающей промышленности, т. к. они негативно воздействуют на почву, биоту и население. Для восстановления таких техногенно-нарушенных территорий необходимо использовать методы рекультивации почв. К традиционным методам восстановления почв относят физические (вакуумную экстракцию, дробление, ультразвуковую и ультрафиолетовую обработку и др.), химические (экстракцию, стабилизацию, электрохимическую деструкцию), термические и биологические методы (биостимуляцию, фитоэкстракцию, ризофильтрацию, биоаугментацию). К сожалению, использование указанных методов по отдельности не эффективно, экономически невыгодно и сопровождается побочными эффектами.

Перспективно комбинировать существующие методы ремедиации загрязненных почв, т. к. их синергический эффект устраняет недостатки друг друга, приводя к максимальной переработке и удалению поллютантов. К наиболее щадящим и экономически выгодным относят биологические методы. Механизм деструкции поллютантов почвы различен для разных видов растений, но большинство процессов осуществляется в корневой системе растения. Симбиотическое взаимодействие растений и ризогенной или эндогенной (к нарушенным почвам) микрофлоры способствует эффективному процессу восстановления и возвращения в хозяйственную деятельность земель.

Таким образом, большой потенциал имеют новые комбинированные технологии на основе фиторемедиации и микробиологической композиции, удовлетворяющей основам биоаугментации и биостимуляции, для восстановления посттехногенных ландшафтов.

Критерии авторства

Авторы были в равной степени вовлечены в написание рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствие конфликта интересов.

Contribution

The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges / D. Kour [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. № 20. P. 24917–24939. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13252-7.

2. A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes / A. Saravanan [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 419. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126451.

3. Goswami S., Manna K. Organochlorine pesticide residues and other toxic substances in salted T*enualosa ilisha* L.: Northeastern part of India. Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 2. P. 201–206. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-201-206.

4. Громов Д. А., Борисова А. В., Бахарев В. В. Пищевые аллергены и способы получения гипоаллергенных пищевых продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 232–247. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247.

5. Environmental and health impacts of air pollution: A review / I. Manisalidis [et al.] // Frontiers in Public Health. 2020. Vol. 8. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014.

6. Azubuike C. C., Chikere C. B., Okpokwasili G. C. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2016. Vol. 32. № 11. https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x.

7. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction / I. Kuiper [et al.] // Molecular Plant – Microbe Interactions. 2004. Vol. 17. № 1. P. 6–15. https://doi.org/10.1094/MPMI.2004.17.1.6.

8. Материалы по рекультивации нарушенных земель. URL: http://kuzbasseco.ru/inye-dokumenty/materialy-po-rekultivacii-narushennyx-zemel (дата обращения: 10.08.2021).

9. Rahman Z. An overview on heavy metal resistant microorganisms for simultaneous treatment of multiple chemical pollutants at co-contaminated sites, and their multipurpose application // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 396. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122682.

10. Welch C., Barbour S. L., Hendry M. J. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 795. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798.

11. Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements / N. Cristelo [et al.] // Waste Management. 2020. Vol. 104. P. 60–73. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.013.

12. Co-disposal of municipal solid waste incineration fly ash and bottom slag: A novel method of low temperature melting treatment / G. Wong [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 408. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124438.

13. Fractionation and leachability of Fe, Zn, Cu and Ni in the sludge from a sulphate-reducing bioreactor treating metal-bearing wastewater / P. Kousi [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25. № 36. P. 35883–35894. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1905-6.

14. Rao P., Rathod V. Valorization of food and agricultural waste: A step towards greener future // Chemical Record. 2018. Vol. 19. № 9. P. 1858–1871. https://doi.org/10.1002/tcr.201800094.

15. Oil removal from spent HDT catalyst by an aqueous method with assistance of ultrasound / Y. Yang [et al.] // Waste Management. 2018. Vol. 78. P. 595–601. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.055.

16. Скугорева С. Г., Фокина А. И., Домрачева Л. И. Токсичность тяжёлых металлов для растений ячменя, почвенной и ризосферной микрофлоры // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 2. С. 32–45.

17. Ayangbenro A. S., Babalola O. O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14. № 1. https://doi.org/10.3390/ijerph14010094.

18. Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils / S. Sharma [et al.] // 3 Biotech. 2018. Vol. 8. № 4. https://doi.org/10.1007/s13205-018-1237-8.

19. Kurwadkar S. Occurrence and distribution of organic and inorganic pollutants in groundwater // Water Environment Research. 2019. Vol. 91. № 10. P. 1001–1008. https://doi.org/10.1002/wer.1166.

20. Effective removal of inorganic and organic heavy metal pollutants with poly(amino acid)-based micromotors / T. Hou [et al.] // Nanoscale. 2020. Vol. 12. № 8. P. 5227–5232. https://doi.org/10.1039/c9nr09813e.

21. Scullion J. Remediating polluted soils // Naturwissenschaften. 2006. Vol. 93. № 2. P. 51–65. https://doi.org/10.1007/s00114-005-0079-5.

22. Elemental composition of vegetables cultivated over coal-mining waste / J. J. Zocche [et al.] // Anais da Academia Brasileira de Ciencias. 2017. Vol. 89. № 3. P. 2383–2398. https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170234.

23. Formation of PAH derivatives and increased developmental toxicity during steam enhanced extraction remediation of creosote contaminated superfund soil / L. S. D. Trine [et al.] // Environmental Science and Technology. 2019. Vol. 53. № 8. P. 4460–4469. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07231.

24. Souza L. R. R., Pomarolli L. C., da Veiga M. A. M. S. From classic methodologies to application of nanomaterials for soil remediation: an integrated view of methods for decontamination of toxic metal(oid)s // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. № 10. P. 10205–10227. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08032-8.

25. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review / S. S. Dhaliwal [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. № 2. P. 1319–1333. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1.

26. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities / S. R. S. Abdullah [et al.] // Chemosphere. 2020. Vol. 247. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125932.

27. Quantifying soil contamination and identifying interventions to limit health risks / A. D. Gailey [et al.] // Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care. 2020. Vol. 50. № 1. https://doi.org/10.1016/j.cppeds.2019.100740.

28. Hölzle I. Contaminant patterns in soils from landfill mining // Waste Management. 2019. Vol. 83. P. 151–160. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.013.

29. Remediation of metal-contaminated urban soil using flotation technique / G. Dermont [et al.] // Science of the Total Environment. 2010. Vol. 408. № 5. P. 1199–1211. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.036.

30. Bisone S., Mercier G., Blais J.-F. Decontamination of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from slag-polluted soil // Environmental Technology. 2013. Vol. 34. № 18. P. 2633–2648. https://doi.org/10.1080/09593330.2013.781231.

31. Removal kinetics of petroleum hydrocarbons from low-permeable soil by sand mixing and thermal enhancement of soil vapor extraction / Y. Yu [et al.] // Chemosphere. 2019. Vol. 236. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.050.

32. Liang C., Yang S.-Y. Foam flushing with soil vapor extraction for enhanced treatment of diesel contaminated soils in a one-dimensional column // Chemosphere. 2021. Vol. 285. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131471.

33. Research progress in the enhancement technology of soil vapor extraction of volatile petroleum hydrocarbon pollutants / W. Cao [et al.] // Environmental Science: Processes and Impacts. 2021. Vol. 23. № 11. P. 1650–1662. https://doi.org/10.1039/d1em00170a.

34. Aerobic bioremediation of PAH contaminated soil results in increased genotoxicity and developmental toxicity / L. Chibwe [et al.] // Environmental Science and Technology. 2015. Vol. 49. № 23. P. 13889–13898. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00499.

35. Self-cleaning of very heavily oil-polluted sites proceeds even under heavy-metal stress while involved bacteria exhibit bizarre pleomorphism / N. Ali [et al.] // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020. Vol. 200. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110717.

36. A new insight on enhanced Pb(II) removal by sludge biochar catalyst coupling with ultrasound irradiation and its synergism with phenol removal / Z.-H. Diao [et al.] // Chemosphere. 2021. Vol. 263. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128287.

37. Ultrasound-assisted catalytic reduction of Cr(VI) by an acid mine drainage based nZVI coupling with FeS_2 system from aqueous solutions: Performance and mechanism / Z. H. Diao [et al.] // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 278. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111518.

38. Choi J., Lee D., Son Y. Ultrasound-assisted soil washing processes for the remediation of heavy metals contaminated soils: The mechanism of the ultrasonic desorption // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 74. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105574.

39. Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption / M. J. Sierra [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. № 5. P. 4898–4907. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5688-8.

40. Dynamic immobilization of simulated radionuclide ^{133}Cs in soil by thermal treatment/vitrification with nanometallic Ca/CaO composites / S. R. Mallampati [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2015. Vol. 139. P. 118–124. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.10.006.

41. Gas thermal remediation of an organic contaminated site: field trial / J. Xu [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. № 6. P. 6038–6047. https://doi.org/10.1007/s11356-018-4027-2.

42. Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils / C. Mouvet [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. № 33. P. 25500–25512. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7582-4.

43. Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate recovered from phosphorus-rich wastewater / Y. Liu [et al.] // Environmental Pollution. 2021. Vol. 272. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115978.

44. Remediation of contaminated soil and groundwater using chemical reduction and solidification/stabilization method: a case study / S.-F. Lu [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. № 10. P. 12766–12779. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11337-3.

45. Komárek M., Vaněk A., Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review // Environmental Pollution. 2013. Vol. 172. P. 9–22. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.045.

46. Zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation / A. Galdames [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17. № 16. https://doi.org/10.3390/ijerph17165817.

47. Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification / L. Wang [et al.] // Environment International. 2019. Vol. 126. P. 336–345. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.057.

48. Remediation of soil contaminated with high levels of hexavalent chromium by combined chemical-microbial reduction and stabilization / L. Fu [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 403. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123847.

49. Li Q., Zhong H., Cao Y. Effective extraction and recovery of rare earth elements (REEs) in contaminated soils using a reusable biosurfactant // Chemosphere. 2020. Vol. 256. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127070.

50. Saldaña M. D. A., Nagpal V., Guigard S. E. Remediation of contaminated soils using supercritical fluid extraction: a review (1994–2004) // Environmental Technology. 2005. Vol. 26. № 9. P. 1013–1032. https://doi.org/10.1080/09593332608618490.

51. Decontamination of petroleum-contaminated soils using the electrochemical technique: Remediation degree and energy consumption / C. Streche [et al.] // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. № 1. https://doi.org/10.1038/s41598-018-21606-4.

52. Electrochemical degradation of ibuprofen-contaminated soils over Fe/Al oxidation electrodes / C.-H. Hung [et al.] // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 640–641. P. 1205–1213. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.001.

53. Megharaj M., Naidu R. Soil and brownfield bioremediation // Microbial Biotechnology. 2017. Vol. 10. № 5. P. 1244–1249. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12840.

54. Jørgensen K. S., Salminen J. M., Björklöf K. Monitored natural attenuation // Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.). 2010. Vol. 599. P. 217–233. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-439-5_14.

55. Cycoń M., Piotrowska-Seget Z. Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils: A review // Frontiers in Microbiology. 2016. Vol. 7. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01463.

56. Kästner M., Miltner A. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil // Applied Microbiology and Biotechnology. 2016. Vol. 100. № 8. P. 3433–3449. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7378-y.

57. Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives / H.-T. Tran [et al.] // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 753. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250.

58. Bioaugmentation: possible scenarios due to application of bacterial preparations for remediation of oil-contaminated soil / L. G. Bakina [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. 2021. Vol. 43. № 6. P. 2347–2356. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00755-4.

59. Cycoń M., Mrozik A., Piotrowska-Seget Z. Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review // Chemosphere. 2017. Vol. 172. P. 52–71. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.129.

60. Effect of consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil / D. Chaudhary [et al.] // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2021. Vol. 37. № 3. https://doi.org/10.1007/s11274-021-02999-3.

61. Haferburg G., Kothe E. Metallomics: lessons for metalliferous soil remediation // Applied Microbiology and Biotechnology. 2010. Vol. 87. № 4. P. 1271–1280. https://doi.org/10.1007/s00253-010-2695-z.

62. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: A case study at an industrial town site / B. Lorestani [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. 2013. Vol. 185. № 12. P. 10217–10223. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3326-9.

63. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review / V. S. Kanwar [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. № 36. P. 44835–44860. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3.

64. Копцик Г. Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113–1130. https://doi.org/10.7868/S0032180X1409007X.

65. Nero B. F. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils with two plant species: Jatropha curcas and Vetiveria zizanioides at Ghana Manganese Company Ltd // International Journal of Phytoremediation. 2021. Vol. 23. № 2. P. 171–180. https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1803204.

66. Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas / M. Radziemska [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 15. № 1. https://doi.org/10.3390/ijerph15010024.

References

1. Kour D, Kaur T, Devi R, Yadav A, Singh M, Joshi D, et al. Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges. Environmental Science and Pollution Research. 2021;28(20):24917–24939. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13252-7.

2. Saravanan A, Kumar PS, Vo D-VN, Jeevanantham S, Karishma S, Yaashikaa PR. A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes. Journal of Hazardous Materials. 2021;419. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126451.

3. Goswami S, Manna K. Organochlorine pesticide residues and other toxic substances in salted *Tenualosa ilisha* L.: Northeastern part of India. Foods and Raw Materials. 2021;9(2):201–206. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-201-206.

4. Gromov DA, Borisova AV, Bakharev VV. Food allergens and methods for producing hypoallergenic foods. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):232–247. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-232-247.

5. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. Frontiers in Public Health. 2020;8. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014.

6. Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2016;32(11). https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x.

7. Kuiper I, Lagendijk EL, Bloemberg GV, Lugtenberg BJJ. Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction. Molecular Plant – Microbe Interactions. 2004;17(1):6–15. https://doi.org/10.1094/MPMI.2004.17.1.6.

8. Materialy po rekul′tivatsii narushennykh zemel′ [Materials on reclamation of disturbed lands] [Internet]. [cited 2021 Aug 10]. Available from: http://kuzbasseco.ru/inye-dokumenty/materialy-po-rekultivacii-narushennyx-zemel.

9. Rahman Z. An overview on heavy metal resistant microorganisms for simultaneous treatment of multiple chemical pollutants at co-contaminated sites, and their multipurpose application. Journal of Hazardous Materials. 2020;396. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122682.

10. Welch C, Barbour SL, Hendry MJ. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review. Science of the Total Environment. 2021;795. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798.

11. Cristelo N, Segadães L, Coelho J, Chaves B, Sousa NR, de Lurdes Lopes M. Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements. Waste Management. 2020;104:60–73. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.013.

12. Wong G, Gan M, Fan X, Ji Z, Chen X, Wang Z. Co-disposal of municipal solid waste incineration fly ash and bottom slag: A novel method of low temperature melting treatment. Journal of Hazardous Materials. 2021;408. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124438.

13. Kousi P, Remoundaki E, Hatzikioseyian A, Korkovelou V, Tsezos M. Fractionation and leachability of Fe, Zn, Cu and Ni in the sludge from a sulphate-reducing bioreactor treating metal-bearing wastewater. Environmental Science and Pollution Research. 2018;25(36):35883–35894. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1905-6.

14. Rao P, Rathod V. Valorization of food and agricultural waste: A step towards greener future. Chemical Record. 2018;19(9):1858–1871. https://doi.org/10.1002/tcr.201800094.

15. Yang Y, Cao T, Xiong Y, Huang G, Wang W, Liu Q, et al. Oil removal from spent HDT catalyst by an aqueous method with assistance of ultrasound. Waste Management. 2018;78:595–601. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.055.

16. Skugoreva SG, Fokina AI, Domracheva LI. Heavy metal toxicity and barley plants, soil and rhizosphere microflora. Theoretical and Applied Ecology. 2016;(2):32–45. (In Russ.).

17. Ayangbenro AS, Babalola OO. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017;14(1). https://doi.org/10.3390/ijerph14010094.

18. Sharma S, Tiwari S, Hasan A, Saxena V, Pandey LM. Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils. 3 Biotech. 2018;8(4). https://doi.org/10.1007/s13205-018-1237-8.

19. Kurwadkar S. Occurrence and distribution of organic and inorganic pollutants in groundwater. Water Environment Research. 2019;91(10):1001–1008. https://doi.org/10.1002/wer.1166.

20. Hou T, Yu S, Zhou M, Wu M, Liu J, Zheng X, et al. Effective removal of inorganic and organic heavy metal pollutants with poly(amino acid)-based micromotors. Nanoscale. 2020;12(8):5227–5232. https://doi.org/10.1039/c9nr09813e.

21. Scullion J. Remediating polluted soils. Naturwissenschaften. 2006;93(2):51–65. https://doi.org/10.1007/s00114-005-0079-5.

22. Zocche JJ, Rohr P, Damiani AP, Leffa DD, Martins MC, Zocche CM, et al. Elemental composition of vegetables cultivated over coal-mining waste. Anais da Academia Brasileira de Ciencias. 2017;89(3):2383–2398. https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170234.

23. Trine LSD, Davis EL, Roper C, Truong L, Tanguay RL, Simonich SLM. Formation of PAH derivatives and increased developmental toxicity during steam enhanced extraction remediation of creosote contaminated superfund soil. Environmental Science and Technology. 2019;53(8):4460–4469. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07231.

24. Souza LRR, Pomarolli LC, da Veiga MAMS. From classic methodologies to application of nanomaterials for soil remediation: an integrated view of methods for decontamination of toxic metal(oid)s. Environmental Science and Pollution Research. 2020;27(10):10205–10227. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08032-8.

25. Dhaliwal SS, Singh J, Taneja PK, Mandal A. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. Environmental Science and Pollution Research. 2020;27(2):1319–1333. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1.

26. Abdullah SRS, Al-Baldawi IA, Almansoory AF, Purwanti IF, Al-Sbani NH, Sharuddin SSN. Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. Chemosphere. 2020;247. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125932.

27. Gailey AD, Schachter AE, Egendorf SP, Mielke HW. Quantifying soil contamination and identifying interventions to limit health risks. Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care. 2020;50(1). https://doi.org/10.1016/j.cppeds.2019.100740.

28. Hölzle I. Contaminant patterns in soils from landfill mining. Waste Management. 2019;83:151–160. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.013.

29. Dermont G, Bergeron M, Richer-Laflèche M, Mercier G. Remediation of metal-contaminated urban soil using flotation technique. Science of the Total Environment. 2010;408(5):1199–1211. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.036.

30. Bisone S, Mercier G, Blais J-F. Decontamination of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from slag-polluted soil. Environmental Technology. 2013;34(18):2633–2648. https://doi.org/10.1080/09593330.2013.781231.

31. Yu Y, Liu L, Yang C, Kang W, Yan Z, Zhu Y, et al. Removal kinetics of petroleum hydrocarbons from low-permeable soil by sand mixing and thermal enhancement of soil vapor extraction. Chemosphere. 2019;236. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.050.

32. Liang C, Yang S-Y. Foam flushing with soil vapor extraction for enhanced treatment of diesel contaminated soils in a one-dimensional column. Chemosphere. 2021;285. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131471.

33. Cao W, Zhang L, Miao Y, Qiu L. Research progress in the enhancement technology of soil vapor extraction of volatile petroleum hydrocarbon pollutants. Environmental Science: Processes and Impacts. 2021;23(11):1650–1662. https://doi.org/10.1039/d1em00170a.

34. Chibwe L, Geier MC, Nakamura J, Tanguay RL, Aitken MD, Simonich SLM. Aerobic bioremediation of PAH contaminated soil results in increased genotoxicity and developmental toxicity. Environmental Science and Technology. 2015;49(23):13889–13898. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00499.

35. Ali N, Khanafer M, Al-Awadhi H, Radwan S. Self-cleaning of very heavily oil-polluted sites proceeds even under heavy-metal stress while involved bacteria exhibit bizarre pleomorphism. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020;200. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110717.

36. Diao Z-H, Dong F-X, Yan L, Chen Z-L, Guo P-R, Xia X-J, et al. A new insight on enhanced Pb(II) removal by sludge biochar catalyst coupling with ultrasound irradiation and its synergism with phenol removal. Chemosphere. 2021;263. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128287.

37. Diao ZH, Yan L, Dong F-X, Chen Z-L, Guo P-R, Qian W, et al. Ultrasound-assisted catalytic reduction of Cr(VI) by an acid mine drainage based nZVI coupling with FeS_2 system from aqueous solutions: Performance and mechanism. Journal of Environmental Management. 2021;278. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111518.

38. Choi J, Lee D, Son Y. Ultrasound-assisted soil washing processes for the remediation of heavy metals contaminated soils: The mechanism of the ultrasonic desorption. Ultrasonics Sonochemistry. 2021;74. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105574.

39. Sierra MJ, Millán R, López FA, Alguacil FJ, Cañadas I. Sustainable remediation of mercury contaminated soils by thermal desorption. Environmental Science and Pollution Research. 2016;23(5):4898–4907. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5688-8.

40. Mallampati SR, Mitoma Y, Okuda T, Simion C, Lee BK. Dynamic immobilization of simulated radionuclide ^{133}Cs in soil by thermal treatment/vitrification with nanometallic Ca/CaO composites. Journal of Environmental Radioactivity. 2015;139:118–124. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.10.006.

41. Xu J, Wang F, Sun C, Zhang X, Zhang Y. Gas thermal remediation of an organic contaminated site: field trial. Environmental Science and Pollution Research. 2019;26(6):6038–6047. https://doi.org/10.1007/s11356-018-4027-2.

42. Mouvet C, Dictor M-C, Bristeau S, Breeze D, Mercier A. Remediation by chemical reduction in laboratory mesocosms of three chlordecone-contaminated tropical soils. Environmental Science and Pollution Research. 2017;24(33):25500–25512. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7582-4.

43. Liu Y, Zhang R, Sun Z, Shen Q, Li Y, Wang Y, et al. Remediation of artificially contaminated soil and groundwater with copper using hydroxyapatite/calcium silicate hydrate recovered from phosphorus-rich wastewater. Environmental Pollution. 2021;272. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115978.

44. Lu S-F, Wu Y-L, Chen Z, Li T, Shen C, Xuan L-K, et al. Remediation of contaminated soil and groundwater using chemical reduction and solidification/stabilization method: a case study. Environmental Science and Pollution Research. 2021;28(10):12766–12779. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11337-3.

45. Komárek M, Vaněk A, Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review. Environmental Pollution. 2013;172:9–22. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.045.

46. Galdames A, Ruiz-Rubio L, Orueta M, Sánchez-Arzalluz M, Vilas-Vilela JL. Zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020;17(16). https://doi.org/10.3390/ijerph17165817.

47. Wang L, Cho D-W, Tsang DCW, Cao X, Hou D, Shen Z, et al. Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification. Environment International. 2019;126:336–345. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.057.

48. Fu L, Feng A, Xiao J, Wu Q, Ye Q, Peng S. Remediation of soil contaminated with high levels of hexavalent chromium by combined chemical-microbial reduction and stabilization. Journal of Hazardous Materials. 2021;403. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123847.

49. Li Q, Zhong H, Cao Y. Effective extraction and recovery of rare earth elements (REEs) in contaminated soils using a reusable biosurfactant. Chemosphere. 2020;256. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127070.

50. Saldaña MDA, Nagpal V, Guigard SE. Remediation of contaminated soils using supercritical fluid extraction: a review (1994–2004). Environmental Technology. 2005;26(9):1013–1032. https://doi.org/10.1080/09593332608618490.

51. Streche C, Cocârţă DM, Istrate I-A, Badea AA. Decontamination of petroleum-contaminated soils using the electrochemical technique: Remediation degree and energy consumption. Scientific Reports. 2018;8(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-21606-4.

52. Hung C-H, Yuan C, Wu M-H, Chang Y-C. Electrochemical degradation of ibuprofen-contaminated soils over Fe/Al oxidation electrodes. Science of the Total Environment. 2018;640–641:1205–1213. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.001.

53. Megharaj M, Naidu R. Soil and brownfield bioremediation. Microbial Biotechnology. 2017;10(5):1244–1249. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12840.

54. Jørgensen KS, Salminen JM, Björklöf K. Monitored natural attenuation. Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.). 2010;599:217–233. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-439-5_14.

55. Cycoń M, Piotrowska-Seget Z. Pyrethroid-degrading microorganisms and their potential for the bioremediation of contaminated soils: A review. Frontiers in Microbiology. 2016;7. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01463.

56. Kästner M, Miltner A. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil. Applied Microbiology and Biotechnology. 2016;100(8):3433–3449. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7378-y.

57. Tran H-T, Lin C, Bui X-T, Ngo H-H, Cheruiyot NK, Hoang H-G, et al. Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives. Science of the Total Environment. 2021;753. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250.

58. Bakina LG, Chugunova MV, Polyak YM, Mayachkina NV, Gerasimov AO. Bioaugmentation: possible scenarios due to application of bacterial preparations for remediation of oil-contaminated soil. Environmental Geochemistry and Health. 2021;43(6):2347–2356. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00755-4.

59. Cycoń M, Mrozik A, Piotrowska-Seget Z. Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. Chemosphere. 2017;172:52–71. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.129.

60. Chaudhary D, Bajagain R, Jeong S-W, Kim J. Effect of consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2021;37(3). https://doi.org/10.1007/s11274-021-02999-3.

61. Haferburg G, Kothe E. Metallomics: lessons for metalliferous soil remediation. Applied Microbiology and Biotechnology. 2010;87(4):1271–1280. https://doi.org/10.1007/s00253-010-2695-z.

62. Lorestani B, Yousefi N, Cheraghi M, Farmany A. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: A case study at an industrial town site. Environmental Monitoring and Assessment. 2013;185(12):10217–10223. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3326-9.

63. Kanwar VS, Sharma A, Srivastav AL, Rani L. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. Environmental Science and Pollution Research. 2020;27(36):44835–44860. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3.

64. Koptsik GN. Problems and prospects concerning the phytoremediation of heavy metal polluted soils: A review. Eurasian Soil Science. 2014;(9):1113–1130. (In Russ.). https://doi.org/10.7868/S0032180X1409007X.

65. Nero BF. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils with two plant species: Jatropha curcas and Vetiveria zizanioides at Ghana Manganese Company Ltd. International Journal of Phytoremediation. 2021;23(2):171–180. https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1803204.

66. Radziemska M, Koda E, Bilgin A, Vaverková MD. Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017;15(1). https://doi.org/10.3390/ijerph15010024.