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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882

Обзорная статья
http://fptt.ru

Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса

Н. В. Фотина*, В. П. Емельяненко, Е. Е. Воробьева, Н. В. Бурова, Е. В. Остапова

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 08.09.2021

Принята после рецензирования: 05.11.2021
Принята в печать: 01.12.2021

**e-mail: fotina.natashenka@mail.ru*
© Н. В. Фотина, В. П. Емельяненко, Е. Е. Воробьева, Н. В. Бурова, Е. В. Остапова, 2021

Аннотация.
Введение. Основным источником антропогенного воздействия на ландшафты Кемеровской области – Кузбасса является добыча угля. Темпы рекультивации нарушенных земель незначительны по сравнению с их ежегодным приростом. Для решения проблемы предлагается сформировать фонд рекультивации. Цель работы – анализ и систематизация имеющихся данных антропогенного воздействия угледобычи на территории Кемеровской области; анализ новых методов рекультивации, позволяющих с высокой эффективностью восстанавливать плодородный слой почвы, а также повышать процесс ее очищения от вредных ингредиентов.
Объекты и методы исследования. Общедоступная научная информация баз данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США) и Elsevier (Scopus, ScienceDirect), платформы Web of Science и отечественной электронной библиотеки eLibrary.ru с глубиной поиска 10 лет.
Результаты и их обсуждение. На основании литературных источников выявлены территории Кемеровской области – Кузбасса, подвергшиеся наибольшему антропогенному воздействию в ходе угледобычи (Новокузнецкий, Прокопьевский Кемеровский, Беловский, Ленинск-Кузнецкий округа/районы). Описаны распространенные поллютанты, присутствующие на территории угледобычи и в местах захоронения ее отходов. Показано, что наибольшую опасность представляют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Это связано с тем, что в процессе горения отвалов они способны распространяться в газовой среде на значительные расстояния. Так как большинство отвалов находится вблизи населенных пунктов, а ПАУ обладают канцерогенными свойствами, то были подробно рассмотрены варианты их биодеструкции. Также рассмотрена законодательная база рекультивации нарушенных земель. Приведен перечень рекомендованных растений для биологического этапа рекультивации, в том числе культур растений, обладающих высокой поглотительной способностью в отношении поллютантов. Приведены примеры микроорганизмов и их комплексов, применяемых для целей биоремедиации.
Выводы. В ходе обзора литературы выявлены перспективные методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса. К ним относят процессы биоремедиации с использованием перспективных микробных консорциумов и культур растений, характеризующихся способностью к связыванию поллютантов.

Ключевые слова. Угольные отвалы, угледобыча, рекультивация, фиторемедиация, биоремедиация, поллютанты, полициклические ароматические углеводороды, загрязнение окружающей среды, горнодобывающая промышленность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания 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: Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса / Н. В. Фотина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 869–882. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882.

Review article

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

Contemporary Biological Methods of Mine Reclamation in the Kemerovo Region – Kuzbass

Natalya V. Fotina*, Vladislav P. Emelianenko, Ekaterina E. Vorob'eva, Nadezhda V. Burova, Elena V. Ostapova

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: September 08, 2021

Accepted in revised form: November 05, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

**e-mail: fotina.natashenka@mail.ru*
© N.V. Fotina, V.P. Emelianenko, E.E. Vorob'eva, N.V. Burova, E.V. Ostapova, 2021

Abstract.
Introduction. Coal mining is the main source of anthropogenic impact on the landscapes of the Kemerovo Region – Kuzbass. The current mine reclamation rate lags far behind the annual increase in disturbed lands. A reclamation fund can be a perfect solution to this relevant issue. The present research objective was to analyze and structure the available data on the anthropogenic impact of coal mining in Kuzbass. The article reviews new efficient methods of reclamation and resoiling.
Study objects and methods. The study featured ten years of research publications that were registered in the PubMed database of the National Center for Biotechnology Information (USA), Elsevier (Scopus, ScienceDirect), the Web of Science, and the Russian Electronic Library (eLibrary.ru).
Results and discussion. The research revealed the following Kuzbass districts that experience the greatest mining impact: Novokuznetsk, Prokopyevsk, Kemerovo, Belovo, and Leninsk-Kuznetskiy. The authors also identified the most common pollutants associated with coal mining. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) appeared to be the most dangerous pollutants: as waste coal burns, these substances cover considerable distances with the wind. Biodegradation seems to be the optimal solution because PAHs are known to be carcinogenic, and most mine tips are located near settlements. The article also features mine reclamation laws and introduces a list of plants with a high absorption capacity recommended for biological reclamation, as well as microorganisms and their consortia used for bioremediation.
Conclusion. The authors identified the most promising methods of mine reclamation in the Kemerovo region, i.e. bioremediation with pollutant-binding microbial consortia and plants.

Keywords. Coal dumps, coal mining, reclamation, phytoremediation, bioremediation, pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons, environmental pollution, mining industry

Funding. The research is part of state assignment "Development of approaches to phytoremediation of post-technogenic landscapes using the "omics" technologies that stimulate the growth of rhizobacteria (PGPB)", supplementary agreement No. 075-03-2021-189/4 from 30.09.2021 (internal number 075-ГЗ/Х4140/679/4).

For citation: Fotina NV, Emelianenko VP, Vorob'eva EE, Burova NV, Ostapova EV. Contemporary Biological Methods of Mine Reclamation in the Kemerovo Region – Kuzbass. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):869–882. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882.

Введение

Площадь нарушенных земель Кузбасса в результате различных видов деятельности растет. По данным Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Кемеровской области – Кузбассу, площадь нарушенных земель оценивается в 174,8 тыс. га, что в 12,5 раза (0,75 % площади) превышает среднероссийские показатели (0,06 %). В некоторых муниципальных районах техногенные изменения затрагивают до 20 % пахотных земель.

Только за 2019 г. нарушено 5,443 тыс. га земель (при разработке месторождений полезных ископаемых – 4,863 тыс. га, при строительных работах – 0,414 тыс. га). В «Стратегии социально-экономического развития Кемеровской области – Кузбасса до 2035 года» отмечено, что прирост площади нарушенных земель по годам будет кратно (от 3 до 5) увеличиваться. Удельный показатель нарушения земель (рассчитываемый исходя из одного гектара земли на 1 млн т добытого угля) увеличился для шахт на 10 %, для разрезов – в 2,7 раз. Доля добычи угля открытым способом увеличилась с 65 до 82 % [1]. Площадь рекультивированных земель в 2019 г. составила 0,012 тыс. га, т. е. 0,01 %. При таких темпах рекультивации «даже если больше не добывать уголь в разрезах, восстановление земель займет несколько веков» [2, 3].

Для решения проблемы восстановления нарушенных земель было предложено сформировать фонд рекультивации – экономический инструмент, который гарантирует восстановление нарушенных земель за счет средств угледобывающих компаний. Этот инструмент позволит избежать ситуаций, при которых компания к моменту своего закрытия не имеет необходимых средств для возмещения экологического

ущерба [4]. Зарубежный опыт показывает эффективность формирования таких экономических гарантий. Их обеспечение осуществляется при помощи различных инструментов – отчисления в целевые фонды, страхование, облигации и т. д. [5, 6]. Выбор экономического инструмента зависит от того, будет ли предусмотрено снижение суммы гарантий для компаний, показывающих ответственное выполнение рекультивации.

Низкие темпы рекультивации и отсутствие применения современных методов восстановления и очистки земель говорят об актуальности темы исследования.

Цель работы – систематизация и анализ данных об антропогенном воздействии угледобычи на территорию Кемеровской области; анализ данных о видовом составе растений, применяемых на биологическом этапе рекультивации, методах фито- и биоремедиации земель, нарушенных в процессе угледобычи.

Задачи исследования: выявить наиболее подвергнутые антропогенному воздействию угледобычи муниципальные округа/районы Кемеровской области; описать особенности посттехногенных ландшафтов угледобычи; составить перечень перспективных методов рекультивации и ремедиации нарушенных территорий.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является общедоступная научная информация, поиск которой осуществлялся в базах данных PubMed от National Center for Biotechnology Information (США) и Elsevier (Scopus, ScienceDirect), платформе Web of Science и отечественной электронной библиотеке eLibrary.Ru. Также была проанализирована нормативная документация. Глубина поиска составила 10 лет, язык поиска – английский и русский.

Результаты и их обсуждение

Причиной формирования посттехногенных ландшафтов на территории Кемеровской области является угледобыча, но существуют и другие причины. Например, добыча полезных ископаемых.

Антропогенные причины возникновения посттехногенных ландшафтов можно классифицировать по режимам: постоянные, периодические и катастрофические.

В геохимическом плане различают техногенные и природно-техногенные процессы (рис. 1).

Техногенные загрязнения, возникающие при добыче угля, связаны с высоким содержанием в нем следующих элементов:
– тяжелые металлы (Zn, Pb, Hg, Fe, Cd, W);
– переходные металлы (Mo, Au, Ag);
– легкие металлы (Bi);
– актиноиды (U);
– полуметаллы (As, Sb);
– неметаллы (Ge, Se);
– галогены (Cl, Br, J);
– редкоземельные элементы (Sm).

Уголь Кемеровской области содержит примеси токсичных элементов, таких как марганец, кобальт, мышьяк, ванадий, цинк, свинец, никель, хром и медь. Такие тяжелые металлы, как цинк, железо, медь и марганец, необходимы растениям и микрофлоре в небольших количествах. Однако высокая концентрация любых микроэлементов отрицательно влияет на физиологические процессы растений – дыхание, фотосинтез и деление клеток [7].

Степень экологической опасности токсичных элементов, содержащихся в угле, определяется не столько их концентрацией, сколько долей содержания в составе угля токсичных элементов, способных при его сжигании (например, на ТЭЦ и металлургических заводах) переходить в аэрозольную или газовую фазы [8].

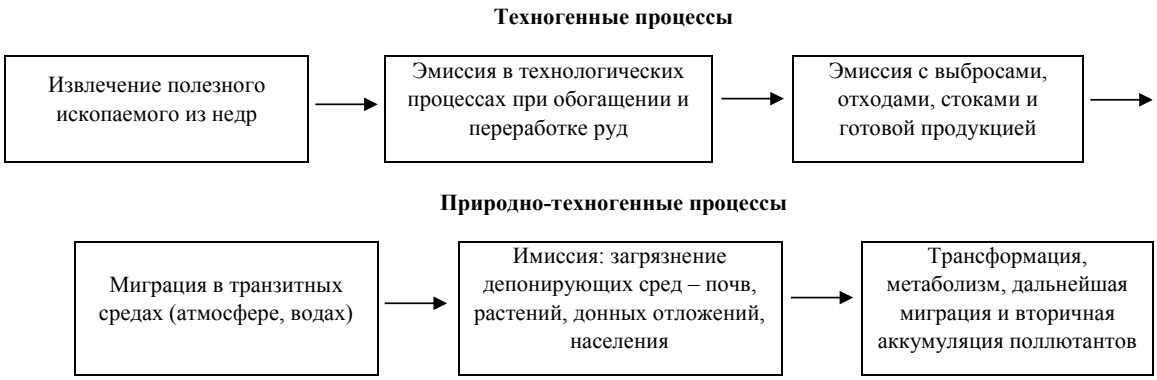

Рисунок 1. Техногенные и природно-техногенные процессы

Figure 1. Man-induced and natural-technogenic processes

Таблица 1. Угольные компании РФ

Table 1. Coal companies of the Russian Federation

Субъект РФ	Количество угледобывающих предприятий	Субъект РФ	Количество угледобывающих предприятий
Тульская область	1	Иркутская область	12
Мурманская область	1	Республика Тыва	3
Республика Коми	7	Республика Бурятия	4
Ростовская область	4	Забайкальский край	11
Оренбургская область	1	Амурская область	3
Челябинская область	1	Хабаровский край	3
Новосибирская область	3	Приморский край	8
Ростовская область	4	Республика Саха (Якутия)	18
Оренбургская область	1	Сахалинская область	10
Челябинская область	1	Магаданская область	2
Новосибирская область	3	Камчатский край	1
Республика Хакасия	8	Чукотский АО	2
Красноярский край	13	Кемеровская область	97

В процессе угледобычи в атмосферу попадает значительное количество оксидов углерода, диоксида серы и оксидов азота, что связанно с работой двигателей внутреннего сгорания тяжелой карьерной техники (оксиды являются продуктами сгорания дизельного топлива). Вышеперечисленные оксиды при попадании в водную среду растворяются, в результате чего происходит реакция образования кислот. Это снижает pH водоемов и ведет к нарушениям в сформированном биоценозе [9, 10].

Важную роль в загрязнении территории отвалов играет процесс окисления сульфидов железа и других металлов. В процессе окисления сульфидов металлов образуются сульфатные и водорастворимые формы химических элементов, что приводит к изменению условий миграции элементов. Резко увеличивается минерализация, pH почв снижается до значения 2–3. Образуются сернокислые ожелезненные солончаки. Достигается содержание сульфатной серы 60–70 %, а свободной до 10–20 %. Для автоморфных таежных почв характерно снижение pH почвы, увеличение содержания сернистых соединений и тяжелых металлов. Находящиеся в гидроморфных почвах сульфаты и поливалентные тяжелые металлы подвергаются восстановлению, что приводит к образованию аномалий на латеральных сульфидных барьерах. Такие аномалии существуют длительное время и являются вторичными источниками загрязнения.

Также с угледобычей связано загрязнение окружающей среды полициклическими углеводородами, особенно во время горения отвалов или при сжигании угля [11].

По данным Минэнерго России, по состоянию на 1 января 2016 г. добычу угля осуществляли 192 угольных предприятия, в том числе 71 угольная шахта и 121 разрез. Однако данные угольных компаний и ФГУП «ЦДУ ТЭК» отличаются от официальных: 214 угледобывающих предприятия (63 шахты и 151 разрез), действующих по состоянию на 1 июня 2017 г. (ИТС 37-2017).

Распределение по субъектам РФ представлено в таблице 1.

Как следует из приведенных данных, наибольшее количество угледобывающих компаний сосредоточено в Кемеровской области – Кузбассе. Интерес представляет анализ данных по количеству отвалов, разрезов, шахт и их местоположению. Распределение шахт и разрезов по муниципальным округам представлено в таблице 2.

Согласно таблице 2 наибольшее количество угледобывающих компаний сосредоточено в Новокузнецком муниципальном районе (добывается уголь марки Т, ГЖ, Ж и ГЖО), Прокопьевском (добывается Д, ДГ, К, КС и СС), Беловском (добывается Д), Кемеровском (добывается К и КС) и Ленинск-Кузнецком (добывается Г) округах.

Расшифровка аббревиатур марок угля представлена в таблице 3 [12].

По данным государственного реестра объектов размещения отходов (ГРОРО), на территории Кемеровской области располагается 395 объектов захоронения отходов горнодобывающих предприятий [13]. Их распределение по муниципальным округам и районам представлено в таблице 4.

Из таблицы 4 следует, что наиболее подверженными негативному влиянию угледобычи являются следующие муниципальные округа/районы: Новокузнецкий (31,6 %), Прокопьевский (20,76 %), Кемеровский (16,71 %) и Беловский (16,2 %).

Стоит отметить, что в Ленинск-Кузнецком муниципальном округе находится всего 2 зарегистри-

Таблица 2. Шахты и разрезы Кемеровской области

Table 2. Mines and open pits of the Kemerovo region

Муниципальный район/округ	Количество шахт и разрезов	Количество предприятий, добывающих марки угля*	
		Марка угля	Количество предприятий
Новокузнецкий	30	Т	10
		ГЖ	7
		Ж	7
		ГЖО	6
		КС	4
		К	3
		ОС	3
		ДГ	3
		КО	3
		Д	2
		Г	2
		ТС	2
		СС	1
		ГЖОС	1
Прокопьевский	25	Д	10
		ДГ	6
		К	5
		КС	4
		СС	4
		Г	3
		ОС	3
		ТС	2
		ГЖО	2
		КСН	1
		Т	1
		КЖ	1
		КО	1
Беловский	16	Д	11
		Т	3
		КС	2
		СС	2
		Ж	1
		КО	1
		ДГ	1
Кемеровский	14	К	6
		КС	5
		КЖ	2
		СС	2
		ОС	2
		Д	1
		Т	1
		КО	1
		Ж	1
Ленинск-Кузнецкий	9	Г	6
		Д	1
		Ж	1
		ГЖ	1
Тисульский	1	Б	1
Таштагольский	1	Т	1
Гурьевский	1	КО	1
		КСН	1
		ГЖО	1
		СС	1

* указано количество предприятий, добывающих определенные марки угля (например, в Ленинск-Кузнецком муниципальном районе 6 предприятий осуществляют добычу угля марки Г, 1 предприятие вырабатывает уголь марки Д, по 1 предприятию добывают уголь марки Ж и ГЖ.

* the number of enterprises mining certain grades of coal, e.g. in the Leninsk-Kuznetskiy municipal district, six enterprises are mining grade G coal, one enterprise produces coal grade D, and one enterprise produces coal of grade Zh and GZh.

Таблица 3. Марки угля Кемеровской области

Table 3. Grades of coal in the Kemerovo region

Обозначение марки	Наименование марки	Вид угля
Д	Длиннопламенный	Каменный
ДГ	Длиннопламенный газовый	
Г	Газовый	
ГЖ	Газовый жирный	
ГЖО	Газовый жирный отощенный	
Ж	Жирный	
КЖ	Коксовый жирный	
К	Коксовый	
КО	Коксовый отощенный	
КС	Коксовый слабоспекающийся	
КСН	Коксовый слабоспекающийся низкометаморфизованный	
ОС	Отощенный спекающийся	
СС	Слабоспекающийся	
Т	Тощий	
ТС	Тощий спекающийся	
А	Антрацит	Антрацит

Таблица 4. Распределение отвалов по муниципальным округам/районам

Table 4. Distribution of dumps by municipal districts/areas

Муниципальный округ/район	Количество отвалов
Новокузнецкий	125
Прокопьевский	82
Кемеровский	66
Беловский	64
Таштагольский	29
Гурьевский	15
Промышленновский	5
Яшкинский	4
Ленинск-Кузнецкий	2
Крапивинский	2
Чебулинский	1

рованных отвала, но присутствует 9 разрезов и шахт. Это может быть связано как с наличием несанкционированных отвалов, так и с захоронением отходов угледобычи на территории других муниципальных округов/районов. Данный факт требует дальнейшего детального рассмотрения.

Уголь является многокомпонентной породой органического происхождения. Его состав зависит от месторождения и включает простые химические элементы, сложные органические соединения (в том числе ПАУ) и минеральные примеси [7, 14, 15]. Одним из наиболее опасных поллютантов являются ПАУ. Они состоят из ароматических структур, которые связаны эфирными или метиленовыми мостиками, и алифатических боковых цепей, состоящих из метильных групп (также могут присутствовать этильные, пропильные или бутильные функциональные группы). Среднее количество ароматических колец на структурную единицу в большинстве видов угля составляет 3–5. В зависимости от количества колец ПАУ делятся на 2 группы. Первая – ароматические соединения с 2 либо 3 кольцами, вторая – ароматические соединения с 4 либо 5 кольцами. Наиболее распространенными ПАУ в угле являются фенантрен, флуорантен, пурен и хризен [15–17]. Существует несколько механизмов попадания ПАУ в окружающую среду [15, 18, 19]:

– добыча угля;
– сжигание угля;
– выбросы в атмосферу несгоревшего угля;
– обогащение и промывка угля;
– транспортировка угля;
– хранение «пустой» породы в отвалах и хвостохранилищах;
– самовозгорание «пустой» породы на отвалах и хвостохранилищах.

Попадая в окружающую среду, ПАУ образуют соединения с органическими и неорганическими взвешенными частицами, которые могут легко проникать в растительные и животные клетки за счет своей липофобности [20–23].

Наиболее опасными источниками загрязнения окружающей среды ПАУ являются обогатительные фабрики, отвалы, терриконы, ТЭЦ и различные металлургические заводы. Это связано с тем, что продуктами горения угля также являются ПАУ. Попадая в газовую фазу, они способны распространяться на значительные расстояния от источника загрязнения. Большая часть таких предприятий или отвалов находится в непосредственной близости от населенных пунктов. Из-за этого возникает риск развития у жителей различных заболеваний, связанных с мутациями [16, 24–26].

ПАУ подвергаются биодеградации с низкой скоростью (являются стойкими органическими загрязнителями). Большинство из них относятся к первому классу опасности. При попадании в организм человека они способны вызывать респираторные, сердечно-сосудистые и онкологические заболевания, аллергию, астму и т. д. Также негативно влияют на развитие плода [27–29].

Качественный и количественный состав ПАУ в угле зависит от нескольких факторов [30, 31]:

– растительного сырья, участвовавшего в процессе образования угля;
– термодинамических условий процесса образования угля;
– года образования угольного пласта.

В работе Z. R. Ismagilo и др. исследован состав ПАУ нескольких марок каменного угля Кузбасса.

Таблица 5. Содержание ПАУ

Table 5. PAH content

Марка угля	Наибольшее содержание ПАУ
Д	Фенантрен, пирен, бенз(а)антрацен
ДГ	Фенантрен, бенз(а)антрацен, бенз(b)флуорантен
ГЖО	Фенантрен, бенз(а)антрацен
ГЖО	Фенантрен, бенз(b)флуорантен
Ж	Фенантрен, пирен, бенз(b)флуорантен
К	Фенантрен, пирен, бенз(b)флуорантен, бенз(а)пирен
КС	Фенантрен, пирен, бенз(b)флуорантен, бенз(а)пирен
КС	Фенантрен, хризен, бенз(а)пирен
ОС	Фенантрен, пирен, бенз(b)флуорантен, хризен

Авторами установлено, что во всех пробах среди ПАУ концентрация фенантрена является наибольшей. В пробах также найдены пирен, бенз(а)антрацент, хризен и бенз(б)флуорент. Наибольшее общее содержание ПАУ обнаружено у коксующихся марок угля. Содержание ПАУ в исследованных марках угля представлено в таблице 5 [32].

Найденные вещества имеют следующий класс опасности:

– 1 класс опасности: бенз(а)пирена, бенз(а)антрацент и бенз(б)флуорент;

– 2 класс опасности: фенантрен, пирен и хризен.

Одним из наиболее опасных источников антропогенного загрязнения угледобычи являются отвалы вскрышных пород. Это связано с продуктами их горения. Из данных таблиц 2 и 4 видно, что общее количество отвалов превышает количество шахт и разрезов более чем в 4 раза. Угольные отвалы являются термически активными участками с трещинами на поверхности. Их характеризуют высокие внешние и внутренние температуры. Выбрасываемые токсичные и дымовые газы создают зоны, аналогичные вулканическим сульфатарам. В состав токсичных газов могут входить различные ПАУ. В исследовании P. Kuna-Gwoździewicz определено содержание ПАУ в этих газах. Были обнаружены такие соединения, как нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен и антрацен. Не были найдены флуорантен, пирен и бенз(а)пирен. Среднее содержание ПАУ составило 10,251 мг/м^3 [33].

Стоит отметить, что концентрация и распределение микроэлементов, ПАУ и органических соединений в угольных отходах различаются. На это влияют исходный состав, процессы обработки (нагревание, окисление и коксование), уровень кислорода, влажность, температура и др.

К одним из видов отходов углепереработки относится технический битум. В работе T. Mukasa-Mugerwa и др. исследовались происходящие изменения на угольных отвалах, содержащих технический битум [34].

На свалках угольных отходов уровень pH варьируется от кислого до щелочного (pH = 5,4–7,5), что характеризует только термически неактивные отходы. Отвалы с присутствием пиролитического битума характеризуются низкими уровнями pH (3,4–3,9), что отражает окисление присутствующих в них сульфидов. Также в процессе горения угольных отвалов Pb и Hg испаряются из более горячих и глубоких частей отвалов в виде HgS, PbS, $PbCl_2$ и осаждаются в верхних частях отвалов или в непосредственной близости от них.

Органическая фаза угольных отходов различается и зависит от условий саморазогрева. Нафталина больше в отходах, содержащих пирогенный битум, который препятствует испарению некоторых отходов, подвергшихся термическому изменению. Высокое количество нафталина соответствует начальной стадии саморазогрева. Высокое содержание антрацена, фторарантена, пирена и фенантрена в отходах может отражать интенсивное окисление органических веществ или выгорание почвенного покрова во время самонагревания. Высокие (~ 300–1078 мг/кг) концентрации Hg на изученных свалках представляют серьезную опасность для окружающей среды и для тех, кто живет в непосредственной близости от мест хранения отходов угледобычи [34, 35].

Стоит отметить, что на законодательном уровне установлено, что все нарушенные земли в процессе угледобычи должны быть подвергнуты обязательной процедуре рекультивации. У каждой угледобывающей компании обязательно должен присутствовать план рекультивации территории угледобычи. Рекультивацией может заниматься как угледобывающая компания, так и подрядная организация, которая на этом специализируется.

Согласно постановлению Правительства РФ от 10.07.2018 г. «О проведении рекультивации и консервации земель» рекультивацией называют «мероприятия по предотвращению деградации земель и (или) восстановлению их плодородия посредством приведения земель в состояние, пригодное для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, в том числе путем устранения последствий загрязнения почвы, восстановления плодородного слоя почвы и создания защитных лесных насаждений» [36].

Согласно ГОСТ Р 57446-2017 рекультивация нарушенных земель проходит в 2 этапа:

1. Технический этап проводится с целью формирования структуры почвы, необходимой для произрастания культур, используемых в биологическом этапе рекультивации (включает в себя планировку и землевание);

Таблица 6. Культуры, используемые для рекультивации нарушенных земель на территории Кемеровской области

Table 6. Plants used for mine reclamation in the Kemerovo region

Виды деревьев и кустарников	Наименование культуры
Хвойные породы	Лиственница сибирская, ель сибирская, кедр сибирский, пихта сибирская
Лиственные породы	Береза повислая, тополь лавролистный, тополь бальзомический, вяз перистоветвистый, ясень пенсильванский, лох узколистный
Кустарники	Облепиха крушиновая, лох серебристый, карагана древовидная, бузина сибирская, рябина сибирская, черемуха обыкновенная, жимолость татарская, смородина золотистая, вишня песчанная, кизиль черноплодный, рябинник рябинолистный, спирея средняя, роза коричная, пузыреплодник калинолистный, ольховник кустарниковый, ивы (козья, прутиновидная, шелюга, сибирская, трехтычинковая)

2. Биологический этап необходим для возобновления процесса почвообразования, повышения самоочищающей способности почвы и воспроизводства биоценозов. Методы, применяемые на этом этапе, можно разделить на 2 группы: физико-химические и биологические с использованием растений. В последние годы на биологическом этапе рекультивации начинают применять методы, позволяющие с высокой эффективностью восстанавливать плодородный слой почвы, а также повышать процесс ее очищения от вредных ингредиентов. К таким методам относят применение микробных комплексов, гуматов, торфа и др. для ускорения почвообразовательного процесса, а также фиторемедиацию и биоремедиацию (например, с использованием микроорганизмов), которые позволяют связывать и разлагать вредные ингредиенты. Биологическим этапом заканчивается формирование культурного ландшафта на нарушенных землях.

Перечень культур, рекомендованных к применению для рекультивации нарушенных земель на территории Кемеровской области, представлен в таблице 6 [37].

Культуры, применяемые для фиторемедиации, и поллютанты, накапливающиеся в их биомассе, представлены в таблице 7 [38–43].

Ориентировочная стоимость рекультивации, включая технический и биологический этапы, одного гектара земли на территории региона составляет 200 тыс. руб. Оценочная стоимость всех этапов рекультивации – 20–24 млрд. руб. Из них 1,8–6,4 млрд руб. может стоить биологический этап рекультивации [44]:

– прямой посев семян (около 1900 млн руб.);
– широкорядная посадка хвойных пород с подсевом многолетних трав (около 1950 млн руб.);
– смешанная посадка сосны обыкновенной и кедра сибирского (около 1800 млн руб.);
– смешанная посадка хвойных и лиственных кустарников (около 1800 млн руб.);
– плантационно-обсеменительная посадка сосны обыкновенной (около 5500 млн руб.).

Засев территории нарушенных земель только выбранными культурами (без использования удобрений) является наименее эффективным методом, поскольку показывает низкие показатели выживаемости используемых культур, а биомасса погибших растений незначительно изменяет состав почвы/грунта.

Посадка культур с использованием удобрений снижает количество погибших культур на территории угледобычи. Исследованиями Н. Н. Терещенко с соавторами, проводимыми на территории восточного разреза «Краснобродский» Кемеровской области, показано, что применение торфяного мелиоранта повышало выживаемость посевных трав [45].

Авторами в ходе эксперимента проводилось исследование по нижепредставленной схеме:

– применение полного минерального удобрения;
– применение торфяного мелиоранта (25 т/га);
– применение торфяного мелиоранта (50 т/га);
– применение полного минерального удобрения + подсев семян, предварительно обработанных оксигуматом.

Торфяной мелиорант является органическим удобрением, которое производят на основе оксигумата. Он содержит твердые остатки гидролиза торфа и обогащен азотом и минеральными солями. Оксигумат является продуктом гидролиза торфа в присутствии $CoSO_4$ при высоких температурах.

Эксперимент проводили поэтапно. В первый год засеивали донник (*Melilotus albus*), затем подсеивали люцерну посевную (*Medicago sativa*) и смесь многолетних трав.

Результаты эксперимента показали, что устойчивый травостой формируется только в случае использования торфяного мелиоранта. В контрольном варианте наблюдалась низкая выживаемость многолетних трав.

Применение торфяного мелиоранта увеличило содержание легко- и среднеокисляемых органических

Таблица 7. Культуры, применяемые для фиторемедиации

Table 7. Crops used for phytoremediation

Название культуры	Содержание поллютантов, мг/кг биомассы
Populus alba	Zn (2500), Cu (580)
Salix viminalis L.	Cd (8,9), Zn (6000)
Salix viminalis *Salix fragilis* *Populus deltoides* *Populus nigra* *Populus trichocarpa*	Cd (34,5), Zn (760), Pb (45), Cu (10,4)
Salix Klara *Salix Inger*	Zn (900), Pb (1,9), Cu (9,5)
Deschampsia cespitosa	Cd (1258,2), Zn (5246,0), Pb (4504,7)

веществ, а количество труднокисляемых уменьшилось. Это связано с активным разложением растительных остатков. Торфяной мелиорант также увеличивал количество аммонификаторов и азотоусваивающих микроорганизмов в почве [45].

M. Desai и др. провели исследование на территории бывшего угольного разреза по очищению почвы от тяжелых металлов с использованием лесных массивов. Почва была загрязнена такими металлами, как Zn, Cb, Mn, Pb и Cu. Посадки саженцев ольхи обыкновенной и березы сибирской через 14 лет позволили уменьшить содержание тяжелых металлов на 52 %. Исследование листьев деревьев показало, что береза поглощала больше Zn, Cb, Mn, Cu, а ольха Pb. Разные породы деревьев поглощают тяжелые металлы с различной скоростью, поэтому для эффективной фиторемедиации почв рекомендуется использовать смешанные посадки древесных пород [46].

A. A. Juwarkar и H. P. Jambhulkar провели исследование эффективности использования осадка очистных сооружений и биоудобрения для биоремедиации почв угольных отвалов. Анализ почвы после внесения осадка очистных сооружений и биоудобрения показал, что содержание таких тяжелых металлов, как Zn, Cu, Ni, Fe, Cr, Mn, Pb и Cb, снизилось на 40 %. Результаты исследований показали эффективность использования биоудобрения для восстановления биоразнообразия почвы и снижения содержания поллютантов [47].

Помимо растений, для ремедиации земель также применяются и микроорганизмы. Основной технологией создания микробных препаратов для рекультивации земель является анализ микробного состава почвы/грунта отвалов (для поиска микроорганизмов-деструкторов – основных загрязняющих компонентов почвы) или корней растений, произрастающих на исследуемой территории, для поиска перспективных штаммов ризобактерий (ризоремедиация).

Рассмотрели некоторые исследования, посвященные разработке микробных препаратов.

Актуальным является исследование T. T. Mukasa-Mugerwa и др., в котором выделили микроорганизмы-деструкторы частиц угля. Целью этого исследования было изучение роли арбускулярно микоризных грибов (АМГ), засеваемых вместе с *Cynodon dactylon*, для разложения каменного угля. Были проведены эксперименты в лабораторных контролируемых условиях, моделирующих условия угольного отвала. Результаты показывают, что сочетание АМГ с *C. dactylon* привело к эффективному разложению угля. Основным продуктом метаболизма микроорганизмов-деструкторов является гуминовая кислота [48].

В исследовании T. M. Palanivel и др. показано, что выделенные из почвы микроорганизмы способны усваивать ион Cu(II). Результаты исследования биологической очистки показали, что эффективность удаления из раствора Cu изолятом *Pseudomonas stutzeri* LA3 составила 50, 41, 32, 25 и 9 % через 96 ч (начальная концентрация Cu 50, 100, 150, 200 и 400 мг/л соответственно). Процент удаления Cu(II) из жидкой среды, его внутриклеточное накопление и производство внеклеточных полимерных веществ доказали эффективность использования изолята *P. stutzeri* LA3 в биоремедиации земель с высокой концентрацией меди. Исследуемый штамм *P. stutzeri* LA3 является аборигенным, адаптированным к засушливым условиям среды, поэтому его можно легко выращивать в полевых условиях [49, 50].

R. Miao и др. использовали в своей работе культуры растений *Lolium multiflorum* L. и *Glycine max* L., а также культуры экзогенных штаммов *Pseudomonas* sp. Они исследовали их способность к разложению ПАУ в загрязненных почвах. Проверяли наличие ПАУ в почве на 0, 10, 20 и 30 сутки. Выяснилось, что уже на 30 день содержание полициклических ароматических углеводородов снизилось на 47 % по сравнению с их начальным содержанием. При внесении этих компонентов изменилась структура и биоразнообразие естественной микрофлоры почвы [51].

Выводы

В ходе исследований были выявлены основные территории Кемеровской области, подвергшиеся антропогенному загрязнению в ходе угледобычи (Новокузнецкий, Прокопьевский Кемеровский, Беловский, Ленинск-Кузнецкий округа/районы). Подробно изучены особенности посттехногенных ландшафтов угледобычи (дана характеристика поллютантам, выявлены наиболее опасные поллютанты – ПАУ). Проанализирована законодательная база РФ по рекультивации земель, представлен перечень рекомендованных культур

растений для фиторемедиации. Приведен расчет необходимых денежных средств для проведения рекультивации нарушенных земель Кемеровской области. Рассмотрено влияние угольных отвалов на экологическую ситуацию в регионе.

Описаны перспективные методы рекультивации земель, в том числе методы, позволяющие с высокой эффективностью восстанавливать плодородный слой почвы, а также повышать процесс ее очищения от вредных ингредиентов. К таким методам относят применение микробных комплексов, гуматов, торфа и др. для ускорения почвообразовательного процесса, а также биоремедиации (с использованием растений и микроорганизмов), позволяющей связывать и разлагать вредные ингредиенты.

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 the writing of 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. Цивилев С. Е. Кузбасс 2035: национальные интересы и стратегические приоритеты развития региона. // Экономика промышленности. 2020. Т. 13. № 3. С. 281–289. https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-3-281-289.

2. Зеленый Кузбасс: как увеличить темпы рекультивации. URL: https://gazeta.a42.ru/lenta/projects/62513-zelyonyi-kuzbass-kak-uvelichit-tempy-rekultivacii (дата обращения: 21.08.2021).

3. Наумов И. В. Исследование пространственных диспропорций в процессах нарушения и рекультивации земельных ресурсов в России // Известия Уральского государственного горного университета. 2019. Т. 56. № 4. С. 143–152.

4. Борзенкова А. В., Синьков Л. С. Механизм финансовых гарантий рекультивации земель при открытых горных работах // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2013. Т. 58. № 10.

5. Петрова Т. В., Корабель Л. А. Анализ возможностей использования механизмов финансовых гарантий для финансирования работ по рекультивации // Горный информационно-научный бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 250–254.

6. Яковлева А. В. Концепция формирования проектного фонда рекультивации земель при открытых горных работах // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 1. https://doi.org/10.15862/33EVN115.

7. Li W., Chen B., Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities Environ // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120. № 5. P. 184–185. https://doi.org/10.1289/ehp.1205117.

8. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum × drummondii*) / J. J. A. Dominguez [et al.] // Chemosphere. 2019. Vol. 234. P. 789–795. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.290.

9. Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany / K. Wolf [et al.] // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 579. P. 1531–1540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.160.

10. Borah P., Kumar M., Devi P. Types of inorganic pollutants: metals/metalloids, acids, and organic forms // Inorganic pollutants in water / editors P. Devi, P. Singh, S. K. Kansal. Elsevier, 2020. P. 17–31. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0.

11. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes / R. Dixit [et al.] // Sustainability. 2015. Vol. 7. № 2. P. 2189–2212. https://doi.org/10.3390/su7022189.

12. Марки угля. URL: https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/vidyi-uglya/marki-uglya/#:~:text=Какие%20марки%20угля%20существуют.%20Согласно,(КС).%20Коксовый%20слабоспекающийся%20низкометаморфизованный%20(КСН (дата обращения: 22.08.2021).

13. Государственный реестр объектов размещения отходов. URL: https://www.fcao.ru/groro?page=332 (дата обращения: 21.08.2021).

14. Авгушевич И. В., Сидорук Е. И., Броновец Т. М. Стандартные методы испытания углей. Классификация углей. М.: Реклама мастер, 2018. 574 с.

15. Полициклические ароматические углеводороды из углей в объектах окружающей среды / Е. В. Журавлева [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 3. С. 328–336. https://doi.org/10.15372/KhUR2020237.

16. Polar polycyclic aromatic compounds from different coal types show varying mutagenic potential, EROD induction

and bioavailability depending on coal rank / W. Meyer [et al.] // Science of the Total Environment. 2014. Vol. 494–495. P. 320–328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.140.

17. Chemical fingerprinting of hydrocarbons / S. A. Stout [et al.] // Introduction to environmental forensics / editors B. L. Murphy, R. D. Morrison. San Diego: Academic Press, 2002. P. 137–260.

18. Determination of PAH in coal of different metamorphism degrees from the Kuznetsk coal basin / E. R. Khabibulina [et al.] // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2015. Vol. 2. P. 268–271.

19. Ahrens M. J., Morrisey D. J. Biological effects of unburnt coal in the marine environment // Oceanography and Marine Biology. 2005. Vol. 43. P. 69–122.

20. Yahiya M., Miranda M. T. P. Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the south west coast of Kerala, India // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 41. P. 736–743. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.440.

21. Effects of benzo [a] pyrene (BaP) on the composting and microbial community of sewage sludge / H. Liu [et al.] // Chemosphere. 2019. Vol. 222. P. 517–526. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.180.

22. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and plants of the tundra zone under the impact of coal-mining industry / E. V. Yakovleva [et al.] // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49. № 11. P. 1319–1328. https://doi.org/10.1134/S1064229316090143.

23. Effect of naphthalene on photosystem 2 photochemical activity of pea plants / A. V. Lankin [et al.] // Biochemistry. 2014. Vol. 79. № 11. P. 1216–1225. https://doi.org/10.1134/S0006297914110091.

24. Hindersmann B., Achten C. Urban soils impacted by tailings from coal mining: PAH source identification by 59 PAHs, BPCA and alkylated PAHs // Environmental Pollution. 2018. Vol. 242. P. 1217–1225. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.014.

25. Leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal dumps reclaimed with apple trees: a mechanistic insight / M. J. Garcia-Martinez [et al.] // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40. № 6. P. 2695–2706. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0133-9.

26. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils / C. Pies [et al.] // Chemosphere. 2008. Vol. 72. № 10. P. 1594–1601. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.021.

27. Dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Cochin estuary, India / A. Ramzi [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2017. Vol. 144. № 2. P. 1081–1087. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.015.

28. Drwal E., Rak A., Gregoraszczuk E. L. Review: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) – action on placental function and health risks in future life of newborns // Toxicology. 2019. Vol. 411. P. 133–142. https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.10.003.

29. Comparative mechanisms of PAH toxicity by benzo[*a*]pyrene and dibenzo[*def,p*]chrysene in primary human bronchial epithelial cells cultured at air-liquid interface / Y. Chang [et al.] // Toxicology and Applied Pharmacology. 2019. Vol. 379. https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.114644.

30. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin / S. Laumann [et al.] // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159. № 10. P. 2690–2697. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032.

31. Achten C., Hofmann T. Native polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coals – A hardly recognized source of environmental contamination // Science of the Total Environment. 2009. Vol. 407. № 8. P. 2461–2473. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.008.

32. Экологические проблемы кузнецкого угольного бассейна. Научные подходы и технологии для снижения загрязнений окружающей среды / З. Р. Исмагилов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26. № 3. С. 241–260. https://doi.org/10.15372/KhUR20180302.

33. Kuna-Gwozdziewicz P. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhalation zones of thermally active mine waste dumps // Journal of Sustainable Mining. 2013. Vol. 12. № 1. P. 7–12. https://doi.org/10.7424/jsm130103.

34. Mukasa-Mugerwa T. T., Dames J. F., Rose P. D. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal // Biodegradation. 2011. Vol. 22. № 1. P. 129–141. https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8.

35. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland) / A. Nadudvari [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 412. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244.

36. Правила проведения рекультивации и консервации земель. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302235/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5/ (дата обращения: 22.08.2021).

37. Уфимцев В. И., Манаков Ю. А., Куприянов А. Н. Методические рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель на предприятиях угольной промышленности в Кузбассе. Кемерово: Ирбис, 2017. 44 с.

38. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils / P. Kidd [et al.] // International Journal of Phytoremediation. 2015. Vol. 17. № 11. P. 1005–1037. https://doi.org/10.1080/15226514.2014.1003788.

39. Effect of chemophytostabilization practices on arbuscular mycorrhiza colonization of *Deschampsia cespitosa*

ecotype Waryński at different soil depths / E. Gucwa-Przepiora [et al.] // Environmental Pollution. 2007. Vol. 150. № 3. P. 338–346. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.024.

40. Clonal differences in survival capacity, copper and zinc accumulation, and correlation with leaf polyamine levels in poplar: A large-scale field trial on heavily polluted soil / S. Castiglione [et al.] // Environmental Pollution. 2009. Vol. 157. № 7. P. 2108–2117. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.011.

41. Assessing phytotoxicity of trace element-contaminated soils phytomanaged with gentle remediation options at ten European field trials / C. Quintela-Sabaris [et al.] // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 599–600. P. 1388–1398. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.187.

42. Short rotation coppice culture of willows and poplars as energy crops on metal contaminated agricultural soils / A. Ruttens [et al.] // International Journal of Phytoremediation. 2011. Vol. 13. P. 194–207. https://doi.org/10.1080/15226514.2011.568543.

43. Risk management and regeneration of brownfields using bioenergy crops / A. Enell [et al.] // Journal of Soils and Sediments. 2016. Vol. 16. № 3. P. 987–1000. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1264-6.

44. Власюк Л. И. Стратегический приоритет экологизации экономики Кузбасса: фонд рекультивации земель // Управленческое консультирование. 2021. Т. 146. № 2. С. 69–78. https://doi.org/10.22394/1726-1139-2021-2-69-78.

45. Биоремедиация угольных отвалов Кузбасса при помощи продуктов комплексной переработки торфа / Н. Н. Терещенко [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 11–9. С. 1866–1872.

46. Desai M., Haigh M., Walkington H. Phytoremediation: Metal decontamination of soils after the sequential forestation of former opencast coal land // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 656. P. 670–680. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.327.

47. Juwarkar A. A., Jambhulkar H. P. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99. № 11. P. 4732–4741. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.060.

48. Mukasa-Mugerwa T. T., Dames J. F., Rose P. D. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal // Biodegradation. 2011. Vol. 22. № 1. P. 129–141. https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8.

49. Bioremediation of copper by active cells of *Pseudomonas stutzeri* LA3 isolated from an abandoned copper mine soil / T. M. Palanivel [et al.] // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 253. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109706.

50. 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.

51. Response of soil bacterial communities to polycyclic aromatic hydrocarbons during the phyto-microbial remediation of a contaminated soil / R. Miao [et al.] // Chemosphere. 2020. Vol. 261. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127779.

References

1. Tsivilev SE. Kuzbass 2035: National interests and strategic priorities of the regional development. Russian Journal of Industrial Economics. 2020;13(3):281–289. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-3-281-289.

2. Zelenyy Kuzbass: kak uvelichit′ tempy rekul′tivatsii [Green Kuzbass: how to increase the rate of reclamation] [Internet]. [cited 2021 Aug 21]. Available from: URL: https://gazeta.a42.ru/lenta/projects/62513-zelyonyi-kuzbass-kak-uvelichit-tempy-rekultivacii.

3. Naumov IV. The study of spatial imbalances in the processes of disruption and land reclamation in Russia. News of the Ural State Mining University. 2019;56(4):143–152. (In Russ.).

4. Borzenkova AV, Sin′kov LS. The financial assurance to guarantee remediationof the open-cast mining areas. Upravlenie ehkonomicheskimi sistemami: ehlektronnyy nauchnyy zhurnal [Management of economic systems: electronic scientific journal]. 2013;58(10). (In Russ.).

5. Petrova TV, Korabel LYa. The analysis of possibility of using mechanisms of financial assurance for financing operations on recultivation. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2015;(7):250–254. (In Russ.).

6. Yakovleva AV. The concept of remediation fund formation at open-pit mining. Internet-zhurnal Naukovedenie [Science Studies Online Journal]. 2015;7(1). (In Russ.). https://doi.org/10.15862/33EVN115.

7. Li W, Chen B, Ding X. Environment and reproductive health in China: challenges and opportunities Environ. Environmental Health Perspectives. 2012;120(5):184–185. https://doi.org/10.1289/ehp.1205117.

8. Dominguez JJA, Bacosa HP, Chien M-F, Inoue C. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum* × *drummondii*). Chemosphere. 2019;234:789–795. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.290.

9. Wolf K, Cyrys J, Harciníková T, Gu J, Kusch T, Hampel R, et al. Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany. Science of the Total Environment. 2017;579:1531–1540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.160.

10. Borah P, Kumar M, Devi P. Types of inorganic pollutants: metals/metalloids, acids, and organic forms. In: Devi P, Singh P, Kansal SK, editors. Inorganic pollutants in water. Elsevier; 2020. pp. 17–31. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0.

11. Dixit R, Wasiullaha, Malaviya D, Pandiyan K, Singh UB, Sahu A, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes. Sustainability. 2015;7(2):2189–2212. https://doi.org/10.3390/su7022189.

12. Marki uglya [Coal grades] [Internet]. [cited 2021 Aug 22]. Available from: https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/vidyi-uglya/marki-uglya/#:~:text=Какие%20марки%20угля%20существуют.%20Согласно,(КС).%20Коксовый%20слабоспекающийся%20низкометаморфизованный%20(КСН.

13. Gosudarstvennyy reestr ob″ektov razmeshcheniya otkhodov [State register of waste disposal facilities] [Internet]. [cited 2021 Aug 21]. Available from: https://www.fcao.ru/groro?page=332.

14. Avgushevich IV, Sidoruk EI, Bronovets TM. Standartnye metody ispytaniya ugley. Klassifikatsiya ugley [Standard test methods for coals. Coal classification]. Moscow: Reklama master; 2018. 574 p. (In Russ.).

15. Zhuravleva EV, Mikhailova ES, Zhuravleva NV, Ismagilov ZR. Polycyclic aromatic hydrocarbons from coal in the objects of the environment. Chemistry for Sustainable Development. 2020;28(3):328–336. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/KhUR2020237.

16. Meyer W, Seiler T-B, Schwarzbauer J, Püttmann W, Hollert H, Achten C. Polar polycyclic aromatic compounds from different coal types show varying mutagenic potential, EROD induction and bioavailability depending on coal rank. Science of the Total Environment. 2014;494–495:320–328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.140.

17. Stout SA, Uhler AD, McCarthy KJ, Emsbo-Mattingly S. Chemical fingerprinting of hydrocarbons. In: Murphy BL, Morrison RD, editors. Introduction to environmental forensics. San Diego: Academic Press; 2002. pp. 137–260.

18. Khabibulina ER, Ismagilov ZR, Zhuravleva NV, Sozinov SA. Determination of PAH in coal of different metamorphism degrees from the Kuznetsk coal basin. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2015;2:268–271.

19. Ahrens MJ, Morrisey DJ. Biological effects of unburnt coal in the marine environment. Oceanography and Marine Biology. 2005;43:69–122.

20. Yahiya M, Miranda MTP. Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the south west coast of Kerala, India. Materials Today: Proceedings. 2021;41:736–743. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.440.

21. Liu H, Yin H, Tang S, Wei K, Peng H, Lu G, et al. Effects of benzo [a] pyrene (BaP) on the composting and microbial community of sewage sludge. Chemosphere. 2019;222:517–526. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.180.

22. Yakovleva EV, Gabov DN, Beznosikov VA, Kondratenok BM. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and plants of the tundra zone under the impact of coal-mining industry. Eurasian Soil Science. 2016;49(11):1319–1328. https://doi.org/10.1134/S1064229316090143.

23. Lankin AV, Kreslavski VD, Khudyakova AYu, Zharmukhamedov SK, Allakhverdiev SI. Effect of naphthalene on photosystem 2 photochemical activity of pea plants. Biochemistry. 2014;79(11):1216–1225. https://doi.org/10.1134/S0006297914110091.

24. Hindersmann B, Achten C. Urban soils impacted by tailings from coal mining: PAH source identification by 59 PAHs, BPCA and alkylated PAHs. Environmental Pollution. 2018;242:1217–1225. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.014.

25. Garcia-Martinez MJ, Ortega MF, Bolonio D, Llamas JF, Canoira L. Leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal dumps reclaimed with apple trees: a mechanistic insight. Environmental Geochemistry and Health. 2018;40(6):2695–2706. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0133-9.

26. Pies C, Hoffmann B, Petrowsky J, Yang Y, Ternes TA, Hofmann T. Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils. Chemosphere. 2008;72(10):1594–1601. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.021.

27. Ramzi A, Habeeb Rahman K, Gireeshkumar TR, Balachandran KK, Jacob C, Chandramohanakumar N. Dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Cochin estuary, India. Marine Pollution Bulletin. 2017;144(2):1081–1087. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.015.

28. Drwal E, Rak A, Gregoraszczuk EL. Review: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) – action on placental function and health risks in future life of newborns. Toxicology. 2019;411:133–142. https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.10.003.

29. Chang Y, Siddens LK, Heine LK, Sampson DA, Yu Z, Fischer KA. Comparative mechanisms of PAH toxicity by benzo[*a*]pyrene and dibenzo[*def,p*]chrysene in primary human bronchial epithelial cells cultured at air-liquid interface. Toxicology and Applied Pharmacology. 2019;379. https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.114644.

30. Laumann S, Micić V, Kruge MA, Achten C, Sachsenhofer RF, Schwarzbauer J, et al. Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin. Environmental Pollution. 2011;159(10):2690–2697. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032.

31. Achten C, Hofmann T. Native polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in coals – A hardly recognized source of environmental contamination. Science of the Total Environment. 2009;407(8):2461–2473. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.008.

32. Ismagilov ZR, Zhuravleva NV, Kerzhentsev MA, Yashnik SA, Matus EV, Podyacheva OYu, et al. Environmental issues in Kuznetsk coal basin. Scientific approaches and technologies to reduce environmental pollution. Chemistry for Sustainable Development. 2018;26(3):241–260. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/KhUR20180302.

33. Kuna-Gwozdziewicz P. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhalation zones of thermally active mine waste dumps. Journal of Sustainable Mining. 2013;12(1):7–12. https://doi.org/10.7424/jsm130103.

34. Mukasa-Mugerwa TT, Dames JF, Rose PD. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal. Biodegradation. 2011;22(1):129–141. https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8.

35. Nadudvari A, Kozielska B, Abramowicz A, Fabiańska M, Ciesielczuk J, Cabała J, et al. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). Journal of Hazardous Materials. 2021;412. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244.

36. Pravila provedeniya rekul′tivatsii i konservatsii zemel′ [Rules for land reclamation and conservation] [Internet]. [cited 2021 Aug 22]. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302235/90e01d185047971fe921b2bb4ea2abe4389a57d5.

37. Ufimtsev VI, Manakov YuA, Kupriyanov AN. Metodicheskie rekomendatsii po lesnoy rekul′tivatsii narushennykh zemel′ na predpriyatiyakh ugol′noy promyshlennosti v Kuzbasse [Methodical recommendations for forest reclamation of disturbed lands at coal industry enterprises in Kuzbass]. Kemerovo: Irbis; 2017. 44 p. (In Russ.).

38. Kidd P, Mench M, Álvarez-López V, Bert V, Dimitriou I, Friesl-Hanl W, et al. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils. International Journal of Phytoremediation. 2015;17(11):1005–1037. https://doi.org/10.1080/15226514.2014.1003788.

39. Gucwa-Przepiora E, Małkowski E, Sas-Nowosielska A, Kucharski R, Krzyzak J, Kita A, et al. Effect of chemophytostabilization practices on arbuscular mycorrhiza colonization of *Deschampsia cespitosa* ecotype Waryński at different soil depths. Environmental Pollution. 2007;150(3):338–346. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.024.

40. Castiglione S, Todeschini V, Franchin C, Torrigiani P, Gastaldi D, Cicatelli A, et al. Clonal differences in survival capacity, copper and zinc accumulation, and correlation with leaf polyamine levels in poplar: A large-scale field trial on heavily polluted soil. Environmental Pollution. 2009;157(7):2108–2117. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.011.

41. Quintela-Sabaris C, Marchand L, Kidd PS, Friesl-Hanl W, Puschenreiter M, Kumpiene J, et al. Assessing phytotoxicity of trace element-contaminated soils phytomanaged with gentle remediation options at ten European field trials. Science of the Total Environment. 2017;599–600:1388–1398. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.187.

42. Ruttens A, Boulet J, Weyens N, Smeets K, Adriaensen K, Meers E, et al. Short rotation coppice culture of willows and poplars as energy crops on metal contaminated agricultural soils. International Journal of Phytoremediation. 2011;13:194–207. https://doi.org/10.1080/15226514.2011.568543.

43. Enell A, Andersson-Sköld Y, Vestin J, Wagelmans M. Risk management and regeneration of brownfields using bioenergy crops. Journal of Soils and Sediments. 2016;16(3):987–1000. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1264-6.

44. Vlasyuk LI. Strategic priority for greening the Kuzbass economy: land rehabilitation fund. Administrative Consulting. 2021;146(2):69–78. (In Russ.). https://doi.org/10.22394/1726-1139-2021-2-69-78.

45. Tereshchenko NN, Pisarchuk AD, Alekseeva TP, Burmistrova TI. Bioremediation of coal dumps in Kuzbass region with using the products of deep peat processing. Fundamental research. 2013;(11–9):1866–1872. (In Russ.).

46. Desai M, Haigh M, Walkington H. Phytoremediation: Metal decontamination of soils after the sequential forestation of former opencast coal land. Science of the Total Environment. 2019;656:670–680. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.327.

47. Juwarkar AA, Jambhulkar HP. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach. Bioresource Technology. 2008;99(11):4732–4741. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.060.

48. Mukasa-Mugerwa TT, Dames JF, Rose PD. The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal. Biodegradation. 2011;22(1):129–141. https://doi.org/10.1007/s10532-010-9382-8.

49. Palanivel TM, Sivakumar N, Al-Ansari A, Victor R. Bioremediation of copper by active cells of *Pseudomonas stutzeri* LA3 isolated from an abandoned copper mine soil. Journal of Environmental Management. 2020;253. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109706.

50. 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.

51. Miao R, Guo M, Zhao X, Gong Z, Jia C, Li X, et al. Response of soil bacterial communities to polycyclic aromatic hydrocarbons during the phyto-microbial remediation of a contaminated soil. Chemosphere. 2020;261. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127779.