

Обзорная статья

УДК 504.75+691.4; 504.4.54

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-1-57-72>

<https://elibrary.ru/oxstsc>

О биоремедиации почв на территории складирования отходов добычи антрацита в Сибири

Валентина Сергеевна Артамонова ✉

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

✉ artamonovavs@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются способы биоремедиации почв, развивающихся в экстремальных условиях на территории складирования отходов неселективной отсыпки в районе открытой добычи антрацита в Западной Сибири (Горловское месторождение, Новосибирская область, Россия). Приводятся аргументы и факты реабилитации корнеобитаемой толщи для ускорения почвообразования в ситуациях длительного пребывания стадии инициального эмбриозёмобразования. Делается акцент на выявление очагов наиболее сложных условий новообразования почв с помощью дистанционных методов. Излагаются возможности использования фито-, мико- и микробной ремедиации слабозрелых почв, акваремедиации подотвальных вод для снижения техногенной нагрузки на прибрежные почвы. Подчёркивается необходимость предупреждения проявления рисков от применения мико- и микробной ремедиации. Делается вывод о необходимости проведения интеграционных исследований последствий биоремедиации, выявления тенденций позитивного характера в долгосрочном аспекте.

Ключевые слова: почвы, отвалы, антрацит, неселективная отсыпка отходов, биоремедиация

Для цитирования: Артамонова В.С. О биоремедиации почв на территории складирования отходов добычи антрацита в Сибири // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 1. С. 57–72. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-1-57-72>. EDN OXSTSC.

Review Paper

About bioremediation of soils in the territory of storage of anthracite mining waste in Siberia

Valentina S. Artamonova ✉

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

✉ artamonovavs@yandex.ru

Abstract. The article discusses methods of bioremediation of soils developing under extreme conditions in the territory of storage of waste from non-selective dumping in the area of open-pit mining of anthracite in Western Siberia (Gorlovskoye deposit, Novosibirsk region, Russia). The arguments and facts of rehabilitation of the root-dwelling stratum to accelerate soil formation in situations of long-term stay of the stage of initial embryo formation are presented. The emphasis is on identifying the foci of the most difficult conditions of soil neoplasm using remote methods. The possibilities of using phyto-, myco- and microbial remediation of underdeveloped soils, and aquaremediation of basement waters to reduce the anthropogenic load on coastal soils are described. The need to prevent the manifestation of risks from the use of myco- and microbial remediation is emphasized. It is concluded that it is necessary to conduct integration studies of the aftereffect of bioremediation, to identify positive trends in the long term.

Keywords: soils, landfills, anthracite, non-selective waste disposal, bioremediation

For citation: Artamonova V.S. About bioremediation of soils in the territory of storage of anthracite mining waste in Siberia. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 1. P. 57-72. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-1-57-72>. EDN OXSTSC. (In Russian)

Введение

Проблема вовлечения в хозяйственный оборот техногенных скоплений минерального сырья в угледобывающих регионах Сибири чрезвычайно актуальна. Отходы открытой добычи антрацита – вскрышные и вмещающие породы (ВВП), складированные при неселективной отсыпке в отвалы, представляют собой смесь рыхлых и твёрдых пород – техногенного элювия, состоящего из углевмещающих пород, углепородных

сростков и включений, низкосортных углей, поднятых на дневную поверхность. Масштабы их накопления на земной поверхности постоянно растут, поскольку достигают 85% объема пород, извлекаемых из недр в процессе угледобычи. Отходы претерпевают физические и химические изменения, обнаруживают образование новых аутогенных и техногенных минералов, представляя собой современный феномен геологического масштаба. Наряду с этим они малопродуктивны,

© Артамонова В.С., 2026



практически биологически стерильны, обеднены легкодоступными питательными веществами, что не способствует формированию фитомикробных сообществ (фитомикробиомов), вовлечению минеральных субстратов в почвообразование.

Экологические параметры, определяющие ресурсную ценность техногенных отходов, позволяющие установить возможность их эффективного вторичного использования, включают содержание токсичных элементов (тяжелых металлов) и естественных радионуклидов. Токсичные и потенциально токсичные металлы: V, Ni, Cr, Mn, Zn, Co, Mo и Pb в крупнотоннажных скоплениях отходов могут присутствовать в значительных количествах и при определённых условиях представлять угрозу окружающей среде – приземным слоям атмосферы, почвам, поверхностным и грунтовыми водам, биоте.

Вместе с тем, ВВП относятся к разновидности отходов недропользования¹. Они не подлежат учету на государственном или территориальном балансе запасов полезных ископаемых, если последние отсутствуют в ВВП, отчего могут подлежать рекультивации². В реальности в ВВП может находиться до 10% угля, прежде всего при наличии техногенного элювия – аргиллитов, алевролитов, песчаников, углистых включений. Большинство антрацитов, как и каменных углей, содержат поллютанты, поскольку они биолиты, формировавшиеся в период извержений и подвижек земной коры, что обусловило выполнение ими в былые эпохи роль геохимического барьера. Такая функция углей отразилась на содержании в них широкого набора тяжёлых металлов и металлоидов, определивших современную геохимическую (металлогенетическую) специализацию на химические элементы. Показано (Арбузов, Ершов, 2007, С. 128-129), что все угли С-Р возраста, к которым относятся и интенсивно метаморфизированные антрациты Сибири, обладают накоплением литофильных (Sr, Be, Nb, U, также REE), халькофильных (As, Au, Se) и сидерофильных (Co, Ni) элементов. Антрациты Новосибирской области (Горловское месторождение), которые оказались в центре внимания в данной статье, обнаруживают геохимическую специализацию на золото, в них также отмечаются контрастные аномалии As и малоконтрастные – Br, Co, Sr. Высвобождение металлов из техногенного элювия, в частности из антрацита – метаморфизированного угля высокой плотности – происходит постепенно, поскольку они прочно связаны по типу металл-углерод (Me – C) (Шишов и др., 2004). В аутогенных минералах:

сульфидах, карбонатах, силикатах, фосфатах они, как и другие элементы, могут быть сорбированы на минеральном веществе, высвобождаясь при его выветривании.

В тоже время угли Сибири содержат меньше сульфидных и сульфатсодержащих соединений, нежели таковые Урала, Подмосковья и Донбасса. Так, в углях Кузнецкого угольного бассейна количество общей серы составляет 0,23-2,7%; в углях Печорского угольного бассейна – 0,4-0,8%; Южно-Якутского угольного бассейна – лишь 0,19-0,67%³. Угли Западного Урала (Кизеловский углебассейн), Подмосковья (Подмосковский угольный бассейн) и Донбасса относятся к высоко сернистым, в них присутствует 4-8% серы (максимум в Пермском крае). Сера в углях представлена органической формой – So, пиритной – Sp (FeS и FeS₂) и сульфатной – Ss (CaSO₄, FeSO₄, MgSO₄). Неорганическая сера сосредоточена в минеральной части угля, органическая – в составе меркаптанов, тиозифиров, тиофенолов, тиофенов (Алешенкова и др., 2011). В углях Кузнецкого угольного бассейна органическая сера не превышает 0,7%, Печорского угольного бассейна – 0,73%, Южно-Якутского угольного бассейна – 0,67%.

Поэтому сернистые соединения, присутствующие в ВВП, при неселективной отсыпке, могут оказывать влияние на подвижность металлов, поскольку окисление сульфидов твёрдых пород сопровождается образованием серной кислоты, способствующей миграции металлов, проявляясь локально. О присутствии таких очагов экстремального почвообразования на отвалах свидетельствуют их космические изображения⁴. Ускорению почвообразования могут способствовать разные технологии биоремедиации. Внедрение в биологическую рекультивацию отвалов отходов добычи антрацита новых современных природоподобных методов, в том числе биоремедиации, обеспечивающей снижение негативного влияния тяжёлых металлов в очагах их присутствия на фитомикробиомы, актуально.

Биоремедиация – способ восстановления средообразующей функции почв с использованием метаболического потенциала представителей биоты: высших и низших растений, макро- и микромицетов, бактерий, водорослей, червей и других представителей педонаселения. Термин «биоремедиация» (bios – «жизнь», remediatio – «лечение», «восстановление баланса») заимствован из англоязычной литературы. В прямом смысле он означает «излечение» химически загрязнённых почв, грунтов, подземных (грунтовых) вод, то есть их восстановление, в том числе очищение (Янин,

¹ Письмо Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 20 августа 2024 г. № 08-11-30/33292 «О налоге на добычу полезных ископаемых». [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_485289/185723e93bf1a560cb24d4ed67c48de807f6f036/ (дата обращения: 12.09.2025).

² Об утверждении Порядка использования отходов недропользования, в том числе вскрышных и вмещающих горных пород, пользователями недр. Приказ от 25 апреля 2023 года № 247/04. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство по недропользованию. [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=467976&ysclid=mmvd3u11z1635250370> (дата обращения: 12.09.2025).

³ Ковалев Р.Ю. Содержание серы в углях Кузнецкого, Печорского и Южно-Якутского угольных бассейнов (обзор) // Россия молодая: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Кемерово, 16–19 апреля 2024 г. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2024. С. 73604.1-73604.7.

⁴ Соколова Н.А. Оценка почвенно-экологического состояния отвалов угольных разрезов дистанционными методами (на примере Горловского антрацитового месторождения): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 1.5.19. Томск, 27 с.

2014). Иногда толкование термина отождествляется с терминами биорекультивация, деконтаминация, что представляется не корректным. Отличие биоремедиации от биорекультивации заключается в том, что рекультивация фокусируется на восстановлении нарушенных земель в целом, а ремедиация – на восстановлении качества жизнеобитаемых сред, изменении в них валентности токсичных поливалентных металлов и неметаллов, снижении их концентрации.

В свою очередь, биоремедиация отличается от санации вовлечением в процесс очищения метаболически активных организмов, то есть жизнедеятельных.

Биомеридиация зародилась в связи с необходимостью решения проблемы загрязнения территорий нефтью и её продуктами переработки. В этой связи, основная масса имеющихся в настоящее время публикаций посвящена изучению данного воздействия, способам его устранения вплоть до использования наночастиц и привлечения искусственного интеллекта (Patowary et al., 2023). Позитивное воздействие прираще индуцированной фиторемедиации рассматривается как экстенсивный метод восстановления прежнего состояния загрязнённых почв и грунтов от нефтезагрязнения (Автухович, 2010), как инновационный метод санации депрессивных территорий (Демин и др., 2022). В последние годы в разных странах мира: Индии, Китае, Пакистане, Иране, Италии, Австралии, Португалии, России наблюдается тенденция роста информации о микробно-индуцированной фиторемедиации почв, в ИЭГМ УрО РАН под руководством акад. И.Б. Ившиной создана Региональная профилированная коллекция алканотрофных бактерий, в том числе углеводородокисляющих родококков (Углеводородокисляющие родококки..., 2021). Современные представления об использовании микроорганизмов в очищении техногенных сред от загрязнения нефти, углеводородного газа, нефтепродуктов изложены в учебных и научных публикациях (Пиковский и др., 2022; Туркин, 2025; Чайкин и др., 2025).

Некоторые микроорганизмы вошли в коммерческие биопрепараты для очистки от нефтезагрязнения. Например, производителем ООО «Уралэкоресурс» разработан препарат «БИОРЕК-РА» ТУ 929-011-00495603-00 от 11.01.2016 на основе инокуляции угольных отходов после обогащения бурого угля бактериями *Azotobacter chroococcum* АИН и *Pseudomonas fluorescens* ВКГ. Он зарекомендовал себя, как биосорбент с высокой степенью очистки почв от загрязнения нефтью и тяжёлыми металлами, благодаря наличию в нём гуминовых кислот углистого происхождения (Белик, Злобина, 2016). Внесение препарата *in situ* в нефтезагрязнённую почву оказывало позитивное влияние на снижение загрязнения до уровня ПДК (Егорова, Ташкинов, 2024). Следует добавить, что обе бактерии продуцируют альгинаты (Ertesvåg, 2015; Бонарцева, 2017), которые наряду с гуминовыми кислотами, могут связывать металлы полисахаридами.

Исследования, посвященные микробной ремедиации техногенного элювия и почв, деградированных в районах угледобычи, немногочисленны. Приводятся единичные сведения об использовании микоризообразующих грибов и хелатов, снижающих биотоксичность металлов в корнеобитаемом слое растений на территории Восточного Донбасса⁵ (Ivanov et al., 2025; Siunova et al., 2025). В Сибири фиторемедиационные подходы рассмотрены для хранилищ отходов рудообогащения (Бортникова и др., 2022), отвалов клинкеров цинкового завода (Артамонова и др., 2021) с целью вовлечения сидеральных растений и бактерии р. *Azotobacter*. Поиск путей содействия естественному возобновлению почвообразования на отходах угледобычи, образованной при неселективной отсыпке в Сибири, представляется своевременным. Их применение экономит расходы на биологическую рекультивацию традиционными методами, в том числе с применением землевания (гумусовой мелиорации).

Цель настоящей работы – показать возможности реабилитации новообразуемых и загрязнённых почв на территории складирования отвалов неселективного отвалообразования отходов антрацита в Сибири (по материалам литературных и собственных данных).

Объекты и методы

Основное внимание сосредоточено на отвалах отходов неселективного отсыпки ВВП на территории Горловского месторождения (Новосибирская область), которые интенсивно увеличиваются в размерах из-за интенсивной добычи антрацита в 37 км от г. мегаполиса (г. Новосибирск). Горловский угольный бассейн расположен в правобережье Оби в административных границах Новосибирской области. Угленосная толща месторождения имеет мощность 640-940 м, вытянута полосой в северо-восточном направлении на 120 км при средней ширине 1,5-7,5 км, залегает на небольшой глубине. Прогнозные запасы антрацита до глубины 900 м оценены в 6,5 млрд т. Они отличаются высоким качеством: малозольные, малосернистые, высокоуглеродистые, высокой механической прочности и термической стойкости. Промышленное освоение бассейна началось в 30-е годы прошлого века, с 1980-1990 гг. по настоящее время идёт активная добыча антрацита, что подтверждается присутствием техногенных образований – глубоких карьеров (рис. 1 / fig. 1) и многоярусных отвалов ВВП, протянувшихся на несколько километров (рис. 2 / fig. 2).

Как показывает расшифровка космических снимков, поверхность Нагорного отвала Горловского месторождения антрацита⁶ – одного из типичных на данной территории, по прошествии 20-25 лет самозарастания, обнаруживает мозаичное присутствие почвенноподобных тел (ППТ), или биогенно-неразвитых эмбриозёмов (Герасимова и др., 2003), которым принадлежит около 50% площади, остальная часть – не подвержена первичному почвообразованию. Эмбриозёмы инициальные (ЭИ) соответствуют литостратам (группа

⁵ Иванов Ф.Д. Оценка эффективности индуцированной биоремедиации почв угледобывающих Восточного Донбасса: дис. ... канд. биол. наук: 1.5.19; 1.5.15. Ростов-на-Дону, 2025. 147 с.

⁶ Соколова Н.А. Оценка почвенно-экологического состояния отвалов угольных разрезов дистанционными методами (на примере Горловского антрацитового месторождения): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 1.5.19. Томск, 27 с.

натурфабрикатов), эмбриозёмы органо-аккумулятивные (ЭОА) и дерновые (ЭД), формирующиеся на плотных породах – литозёмам, эмбриозёмы дерновые на рыхлых породах – пелозёмам (Шишов и др., 2023). Исходные почвы, прилегающие к отвалам, – черноземы, лугово-чернозёмные и серые лесные.

Современный природно-техногенный ландшафт (ПТП) привлекает внимание всех любителей природы.

Находясь вблизи прохождения федеральной трассы Р-256 «Чуйский тракт», по которой проходит маршрут от Новосибирска до Барнаула и далее на Алтай и в Монголию, ПТП может войти в список территорий, используемых в рекреационных и туристических целях, поскольку вокруг отвалов присутствует уникальная растительность, выходы обнажённых древних пород, природный водопад.



Рис. 1. Горловское месторождение антрацита, карьер
Fig. 1. Gorlovskoye anthracite deposit, quarry

Востребованность территории предопределяет проведение биологической рекультивации отвалов отходов открытой добычи антрацита, в том числе биоремедиации в связи с её экологичностью, высокой эффективностью, экономичностью по сравнению с

другими методами (Mokrani et al., 2024). Отсутствие информации по данному вопросу в отношении отвалов угледобычи Сибири, мотивировало изучение проблемы, её анализ и изложение возможных путей её решения.



Рис. 2. Отвалы отходов добычи антрацита, Горловское месторождение
Fig. 2. Anthracite mining waste dumps, Gorlovskoye deposit

Результаты и обсуждение

Биоремедиация биогенно – неразвитых почв, формирующиеся на ВВП. Судя по визуализации поверхности со спутникового радиометрического снимка ALOS, 68% формирующихся почв приурочено к плакорным участкам, остальная часть занята склоновыми позициями (32%)⁶. На плакоре развивается преимущественно берёза, под её пологом встречаются щавель,

клубника, пырей, другие злаковые растения. В единичном представительстве присутствует сосна обыкновенная (рис. 3 / fig. 3). Также регистрируются разрастания многолетнего мха *Polytrichum commune* (кукушкин лён обыкновенный), предпочитающего места обитания с повышенной влажностью, чему способствует присутствие твёрдых пород, ослабляющих фильтрацию атмосферных вод вглубь отвала. При этом не

исключено закисление среды обитания, поскольку слабо разложившийся лиственный опад берёзы сохраняет органические кислоты.

Известно, что актуальная рН может составлять в присутствии листового опада берёзы, например, на суглинках 6,0 ед. (среда – слабокислая), песчаных и супесчаных субстратах – до 7,5 ед. (слабощелочная среда). Обильное выпадение атмосферных осадков может дополнительно защелачивать поверхность. Кукушкин лён разрастается вблизи выветренных пород, в которых содержание металлов, например, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, превышает кларк углей (табл. 1 / tabl. 1). Установлено⁷, что кукушкин лён в кислых, техногенно загрязнённых средах отходов обогащения на полигонах золотодобычи, накапливал до 2,5 мг/кг Zn, а также депонировал Cu, Hg, As. При этом берёза плосколистная оказалась менее активной к аккумуляции металлов, в частности Zn – почти в 20 раз.

В нашем случае пробы эмбриозёмов, сформировавшиеся вблизи берёзы, характеризовались высоким присутствием валового содержания Mn, что обязано, очевидно, листьям берёзы. Её лиственный опад, как известно, повышает марганценосность сибирских почв. В коре берёзы содержание элемента почти в 2 раза больше, чем в сосне и осине. Однако минимальная способность поглощать Mn присуща мхам и лишайникам, возможно, кукушкин лён оказался толерантным к присутствию Mn.

Лидерство берёзы в растительном покрове отвала обусловлено её высокой устойчивостью к тяжёлым металлам по сравнению с соной. Берёза – это факультативный микоризообразователь, сосна же – облигатный, к тому же она, как симбионт, высокотрофна. Сосна не может нормально развиваться без микоризы, которая обеспечивает ей приток Ca, P, K в количестве, превышающем таковое у берёзы из-за большей потребности на формирование древесной ткани.

Берёза выступает в роли основного участника формирования фитоценотической среды, определяющей развитие и усложнение структуры группировок травянистых растений (Андроханов и др., 2004), способствует существенному привнесу на поверхность первичного органического вещества, необходимого для образования подстилки и дернины. Согласно мнению Л.О. Карпачевского (1981), листья древесных пород и травянистые растения относятся к активной фракции органических остатков, обладающих наибольшей скоростью разложения по сравнению, с другими структурными компонентами опада – ветками, корой и т.д., что способствует быстрому высвобождению углерода, азота и других элементов, необходимых для корневого питания травянистых растений.

Наряду с разложением легко минерализуемых остатков им присуще более быстрая деструкция лигнина по сравнению с таковым сосны. Это обусловлено тем, что лигнины лиственных пород содержат кроме

ванилина сиреневый альдегид, а травянистых растений – помимо ванилина, сиреневого альдегида – п-оксибензальдегид, которые быстро распадаются до ароматических кислот и альдегидов. В лигнине хвойных пород преобладают гваяциловые (кониферилловые) структуры, преимущественно ванилина, который разрушается крайне медленно. Распад лигнина хвой происходит под воздействием синергической системы, состоящей из почвенных животных, исключительно аэробных микромицетов, действующих как последовательно, так и параллельно друг другу. Возможно, что в техногенных экосистемах их содержание недостаточно для формирования фитомикобиома.

Поэтому берёза является основным биогенным почвообразователем, обеспечивая в течение 20-25 лет не только ЭИ, но и ЭОА, а также ЭД⁶. Появление ЭД на плотных породах спланированного участка неселективной отсыпки ВВП регистрируется через 25 лет, их доля в 2,6 раза уступает по площади 15-летним участкам отсыпки рыхлых пород. Тем не менее, они формируют условия для выживания и развития гемикриптофитов – дернообразующих травянистых растений, почки возобновления у которых находятся на уровне почвы или непосредственно под её поверхностью. Это свидетельствует о тенденции участия слабо развитых почв в формировании органогенного слоя на поверхности отвала, фактически на большей его площади (рис. 4 / fig. 4).

Ускорить темпы перехода слабо развитых почв на более зрелую стадию, например, гумусово-аккумулятивную, можно достичь, вероятно, привлечением биоремедиации, например, путём средоулучшения условий для выживания микоризы на корнях сосны. Известно, что причиной ослабленного роста сосны на отвалах отходов угледобычи является повышенная влажность, отсутствие в корнеобитаемом слое лёгкого механического состава, снижение числа арбускулярных грибов, особенно на ранних стадиях укоренения. Кислотность свежего опада хвой составляет 3,2-3,8 ед., а разложённого – 5,5-6,5 ед., поэтому подкисление корнеобитаемого слоя в начальный период поступления хвой в почву обуславливает повышение мобильности тяжёлых металлов⁵, к которым симбиотрофные грибные партнёры сосны чрезвычайно чувствительны.

Тяжёлые металлы вызывают преждевременное старение эумицетных хальмофаговых эктомикориз, их повреждение и отмирание, что наблюдалось, например, на отвалах Кумертауского бурогольного разреза (Фаизова, Зайцев, 2012). При загрязнении лесов промышленными выбросами также снижалась интенсивность микоризации поглощающих корней, уменьшалась длина корней, несущих активные микоризные чехлы (Зайцев, 2009), сокращалось число плодовых тел макромицетов – агариковых грибов, являющихся эктомикоризообразователями (Переведенцева, 1998).

⁷ Леоненко А.В. Геоэкологическая оценка состояния окружающей среды в границах влияния горного предприятия россыпной золотодобычи «Кербинский прииск»: дис. ... канд. геол.-минер. наук: 1.6.21. Томск, 2026. 178 с.



Злаковые растения // Cereal plants

*Betula verrucosa**Polytrichum commune*

Макромицеты // Macrofungi

*Taraxacum officinale*

Злаковые растения // Cereal plants



Сложноцветные растения // Compound-flowered plants

Рис. 3. Растительный покров на отвалах отходов угледобычи, Горловское месторождение
Fig. 3. Vegetation cover on coal mining waste dumps, Gorlovskoye field

Таблица 1

Максимальное содержание металлов в выветренных твёрдых породах плакора отвала угледобычи, Горловское месторождение (мг/кг)

Table 1

Maximum content of metal in weathered hard rocks at the coal mining dump site, Gorlovskoye deposit (mg/kg)

Элемент // Elements	Кларк // Clark		Субстрат // Substrate	
	литосферы ¹ // lithospheres ¹	углей ² // coals ²	Выветренные твёрдые породы // Weathered hard rocks	
			валовое содержание металлов // gross content of metals	содержание подвижных форм // content of mobile forms
K	25 000	–	25 637	280
Na	25 000	–	3 930	63
Ca	29 600	–	2 972	1 000
Mg	18 700	–	1 480	1 344
Fe	46 500	–	8 614	10
Mn	1 000	95±16	147	5,0
Zn	83	22±2	40	5,1
Cu	47	18,5±0,2	30	6,0
Cd	0,13	0,6±0,3	0,3	0,12
Pb	16	25±3	25	4
Co	18	5,2±0,3	5	0,7
Ni	59	16±2	20	1,6

*Примечание: 1 – кларк по (Виноградов, 1962); 2 – кларк по (Юдович и др., 1985).

Жирным шрифтом выделены значения, превышающие кларк литосферы и углей.

*Notes: 1 – clarke according to Vinogradov (Vinogradov, 1962); 2 – clarke according to (Yudovich et al., 1985).

Values exceeding the clarke of the lithosphere and coals are highlighted in bold.

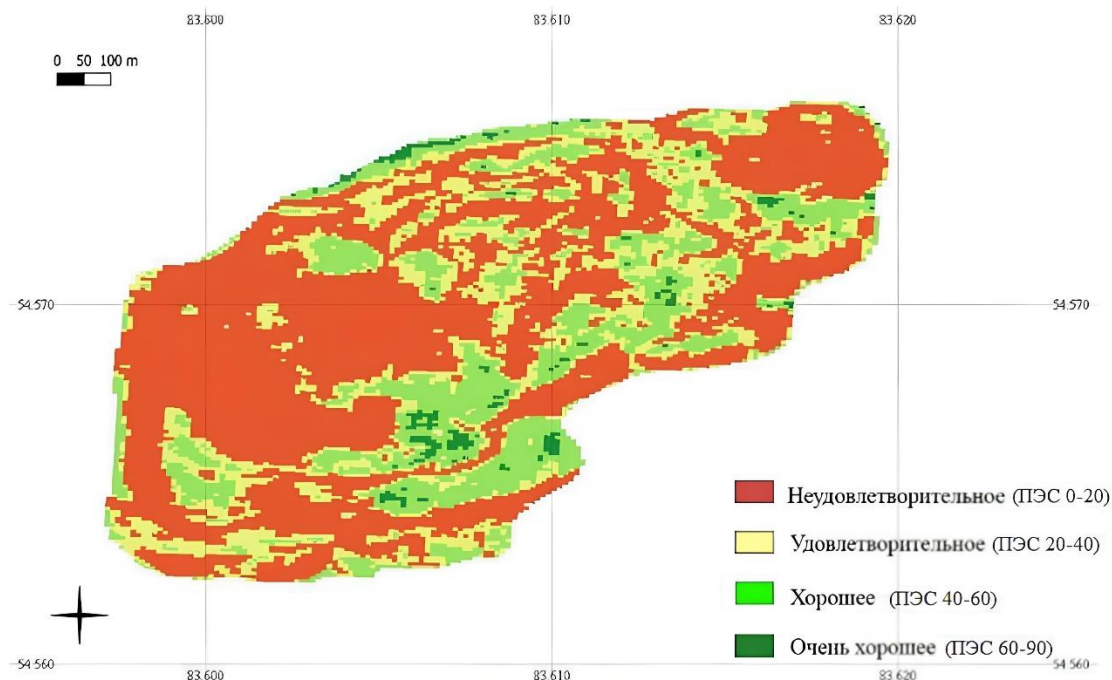


Рис. 4. Градации почвенно-экологического состояния Нагорного отвала (возраст 25-27 лет)⁶
Fig. 4. Gradations of the soil-ecological state of the Upland dump (25-27 years old)⁶

Воздействие выбросов завода синтетических моющих средств (г. Пермь) снизило в березняке разнообразие агариковых грибов со 135 видов до 39, в сосняках – с 91 вида до 26.

То есть, реакция макромицетов – микоризообразователей на техногенное загрязнение среды обитания в данном случае оказалась схожей, независимо от вида древесного растения – симбиотрофного партнёра. Микоризообразователями являются более 40% агариковых грибов, то есть их гибель нежелательна

ни для берёзы, ни тем более – для сосны. Некоторые семейства макромицетов являются 100% – микоризными, например, сыроежковые и трубчатые, они никогда не встречаются в отсутствие фитосимбионтов. Гибель плодового тела макромицетов может быть вызвана гибелью мицелия, на котором формируются базидиомы – плодовые тела (спороносящая структура) у грибов класса Basidiomycetes (базидиомицетов). Именно на базидиоме или внутри неё формируются специализированные клетки – базидии, в которых

образуются половые споры (базидиоспоры). Следовательно, загрязнение среды обитания грибов негативно влияет на гифальную сеть и базидий, благодаря которым формируются споры полового размножения. Не случайно, при выращивании сосны обыкновенной в открытых питомниках во избежание проявления кислотности, которая вызывает подвижность металлов, используют известковые удобрения для поддержания оптимальной pH.

Эктомикориза – форма симбиотических отношений, при которой грибы не проникают через клеточную стенку хозяина, а образуют полностью межклеточный интерфейс (сеть Гартига), переводя труднорастворимые соединения в доступные растениям формы. Поражение микоризных грибов при подкислении корнеобитаемого слоя древесных растений может сопровождаться анатомическими и физиологическими изменениями деревьев, что ведёт к снижению их охвоенности и облиственности, уменьшению длины и массы хвоинок и листьев, проявлению гипертрофии проводящего пучка в ассимиляционном аппарате.

Макромицеты, образующие эктотрофную микоризу на корнях деревьев и кустарников, составляют 40% от общего количества шляпочных грибов, известных в настоящее время. Доказано, что многие грибы, как высшие, так и низшие, в том числе симбиотрофные, обладают способностью к депонированию тяжёлых металлов и неметаллов: As, Cu, Zn, Fe, Pb, Ni, Hg, Al, Cr и др. Это происходит благодаря: 1) сорбции металлов на поверхности клеточных стенок грибов, в том числе хитином; 2) внутриклеточному накоплению металлов в вакуолях; 3) экстраклеточной иммобилизации металлов, например, с участием шавелевой кислоты, образующей нерастворимые соли – оксалаты, которые снижают биодоступность металлов.

Макромицеты аккумулируют металлы в ножке, шляпке, пластинках, трубчатке (Соколов, Черников, 1999). Такие виды, как вешенка, относятся к гипераккумуляторам свинца, кадмия, хрома, других металлов и востребованы в очистке от них (Karahi, Sachdeva, 2017). Однако многие высшие макромицеты представляют пищевую и лекарственную ценность (Юй и др., 2009; Переведенцева, 2021). Из 10 тыс. базидиальных грибов 700 видов считаются съедобными, более 200 видов обладают терапевтическим действием, что обуславливает их ограничение в биоремедиации из-за потенциального интереса в гастрономических и лечебных целях, что может привести к отравлению. Поэтому привнос макромицетов для дополнительного заражения корней сосны микоризообразователем должен быть ориентирован на ассортимент съедобных малоизвестных, либо ядовитых грибов-микоризообразователей во избежание нежелательных последствий. Это можно достичь путём привноса споровой суспензии из высушенных плодовых тел базидиомицетов, в том числе длительно хранящихся. Этот подход наиболее приемлем в сочетании с подщелачивания среды в корнеобитаемом слое.

Помимо эктомикоризных грибов можно использовать эндомикоризообразующие грибы, обеспечивающих растения P и N. Известно, что угли характеризуются высокой концентрацией неорганического азота

(Перельман, 1972), но в элювии проявляется недостаток аммиачной и нитратной форм. Это вызвано: 1) дефицитом аммиака, продуцируемого аммонифицирующими микроорганизмами, в том числе из-за ослабленной фиксации азота атмосферы несимбиотическими бактериями; 2) низким содержанием нитратов из-за замедленного роста возбудителей нитрификации; 3) востребованностью нитратов денитрификаторами в качестве акцептора электронов для энергообеспечения клеток. Поэтому привнос эндомикоризных грибов в корнеобитаемый слой сосны предпочтителен, но следует иметь в виду, что они, как и эктомикоризообразователи, облигатны. К тому же имеются факты неоднозначного реагирования сосны на эндомикоризу, проявляющиеся в ограничении её роста.

Наиболее перспективной представляется арбускулярная микоризация семян сидеральных растений, например, люцерны, отзывчивой на инфицирование (Алещенкова, 2011), которую можно подсеивать на малозаселённых участках. Такой путь обеспечит одновременно повышение органического вещества и доступного азота в корнеобитаемой толще эмбриозёмов. Образование арбускулярной микоризы не сопровождается существенными изменениями корневой системы растения. Мицелий влияет на уровень pH и подвижность элементов питания в зонах обитания. Арбускулярная микориза может составлять 4-17% сухого веса корня и содержать до 1,4 мг гиф на 1 см корня (Воронина, 2007), что важно для корневого питания растений.

Установлено, что микоризация люцерны в комбинации с применением органических хелатов, например, лимонной кислотой, способствует переводу труднодоступных металлов в доступные формы, снижая тем самым их фитотоксичность в почвах на территории угледобычи в Донбассе⁵. При этом наблюдалось повышение надземной и подземной биомассы. Схожая тенденция обнаружена и у пырея при совместном применении микоризации и хелатизации корней, что также свидетельствует об улучшении корнеобитаемой среды в условиях техногенного загрязнения.

Другой способ фиторемедиации, который может способствовать средоулучшению в корнеобитаемом слое и эмбриозёмообразованию на проблемных участках отвалов – это применение дернообразующих злаков. Установлено (Зуева, 2001), что на схожих объектах биорекультивации отвалов ВВП каменного угля в Кузбассе, формирование дернины происходило с сохранением высокой жизнеспособности испытанных дернообразующих злаков: овсяницы красной, овсяницы луговой, местных форм мятлики. Некоторые злаки накапливали Rb, Sb, Mn, Co (Ламанова, 2010). Семенной материал можно получить способом, апробированным в регионе (Куприянов и др., 2025). Подобный подход биоремедиации был апробирован для нефтезагрязнённых мерзлотных почв в Якутии (Ерофеевская и др., 2012). Были использованы дернообразующие злаки, обладающие активным побегообразованием, высокой семенной продуктивностью и комплексной устойчивостью в сочетании с предварительной микробной очисткой корнеобитаемой толщи. Она была предварительно обработана биопрепаратом,

содержащим аборигенные углеводородокисляющие микроорганизмы, культивированные в среде, содержащей именно ту нефть, которая присутствовала на территориях. Это обеспечило перевод аварийных участков в состояние, соответствующее безопасному уровню.

При достижении эмбриозёмами гумусово-аккумулятивной стадии можно использовать донник как регулятор содержания новообразуемых фракций гумусовых кислот (Клёнов, 2000). Для повышения содержания устойчивых фракций, а, следовательно, и бензоидных структур, можно рекомендовать привнос соломы, торфа, опилок, короминеральных отходов. Они также применяются в качестве структураторов – материалов, которые служат сорбентами загрязняющих веществ, аэрагорами субстратов, что особенно важно для аэробных микромицетов – деструкторов лигнина, а также фито- и микробных продуцентов меланиновых соединений – предшественников гумуса. Такой путь биоремедиации обеспечит накопление клетчатки и лигнина в молодых почвах, обеспечит их преобразования в гумусоподобные соединения, временное закрепление углерода в них и микробной плазме.

Меланины синтезируют некоторые виды высших растений, макро- и микромицеты, особенно плесневые грибы, а также бактерии рода *Azotobacter*. Азотобактер обладает широким набором адаптаций к экстремальным местообитаниям. Он быстро колонизирует техногенные среды, в том числе отвалы отходов угледобычи. Как биоремедиант, бактерия чрезвычайно перспективна вследствие полифункциональности. Она способна метаболизировать углеводородные соединения, фиксировать азот атмосферы, синтезировать ростстимулирующие соединения, сидерофоры, альгинаты – экзополимеры. Последние важны бактерии в качестве: 1) запасного питательного вещества, 2) защитного механизма от неблагоприятных факторов, 3) детоксиканта тяжёлых металлов и металлоидов. Экзополимеры бактерий обладают наибольшей способностью к гелеобразованию, по сравнению с водорослями, и меньшей вязкостью, чем у близкородственной бактерии р. *Pseudomonas* (Бонарцева и др., 2017).

Азотобактер – микроаэрофильная бактерия. Её способность к парамагнетизму обеспечивает ей перемещение с помощью магнитосом в локусы с кислородом. При этом, бактерия синтезирует ферменты: каталазу, пероксидазу, супероксидсмутазу, чтобы нейтрализовать активные формы кислорода. В свою очередь, защиту нитрогеназы обеспечивает меланин – полимерное соединение (молекулярная формула – $C_{18}H_{10}N_2O_4$) с множественными ароматическими кольцами, конденсированными с π -системами. Меланины обладают высокой термической стабильностью, что обеспечивает сохранность нитрогеназы в период перегрева поверхности отвалов. Меланины связывают Fe, Cu, Zn, U, сорбируют уран и трансурановые элементы, предохра-

няя клетки от их токсичного действия. При этом бактерия нуждается в Ni, необходимом для синтеза супероксидсмутазы, имеющемуся в достатке на отвалах. Помимо этого, меланины считаются предшественниками гумусовых веществ, что важно при формировании эмбриозёмами экологической функции почв – плодородия, а также при участии их в улучшении роста и питания растений, повышении продуктивности (Aasfar et al., 2021).

Предпосылкой для вовлечения азотобактера в ремедиацию корнеобитаемого слоя в случае с отвалами ВВП на антрацитовом разрезе является выявленная ростстимулирующая активность живых культур местных штаммов азотобактера. Установлено, что инокуляция семян аборигенными штаммами (из ВВП) увеличивала всхожесть семян горчицы до 20%, массу проростков – в 1,3 раза, длину максимального корня – в одну третью раза. Скрининг активных штаммов, отобранных из проб у разлива подотвальных вод в районе добычи антрацита, а также хвостохранилищ отходов рудообогащения, позволил выявить схожую тенденцию позитивного метаболического воздействия бактерии на некоторые морфометрические показатели проростков. Таким образом, азотобактер можно рекомендовать в качестве агента средоулучшения корнеобитаемого слоя фитопоселенцев отходов добычи антрацита.

Рассмотренные методы биоремедиации ориентированы на улучшение среды обитания растений, заселяющих техногенные отходы и выступающих в качестве фактора почвообразования в экстремальных условиях. При этом не менее важен вопрос о возможности использования акваремедиации для снижения негативного воздействия толщи отвалов на окружающие зрелые почвы вследствие транзита химических элементов и мелких минеральных частиц с фильтрующимися водоносными потоками за его пределы.

Биоремедиация загрязнённых почв подотвальными водами. Отвалы имеют большую водосборную площадь, ВВП – существенную скелетность и каменистость, что предопределяет значительный влагозапас в техногенном теле. Высокая водопроницаемость пород способствует транзиту поровых вод к основанию отвала, пополнению запаса грунтовых вод и разгрузке, что проявляется в разливе у подножья отвалов ручьёв (рис. 5 / fig. 5).

У истока ручья на поверхности пород наблюдается формирование снотитов в виде слизистых натёков, в том числе с присутствием водорослей и цианобактерий, в водной среде – образование вторичных минералов в виде «скорлупок» белого цвета, содержащих широкий набор химических элементов. Ниже по ходу водотока присутствуют сплавины (рис. 6 / fig. 6), в том числе минерализованные, мощностью 18-20 см, выдерживающие вес человека.



Рис. 5. Подотвальные водотоки, Горловское месторождение
Fig. 5. Sub-basement watercourses, Gorlovskoye field



Сноттиты и минерализованные образования



Формирование сплавин



Минерализованные сплавины

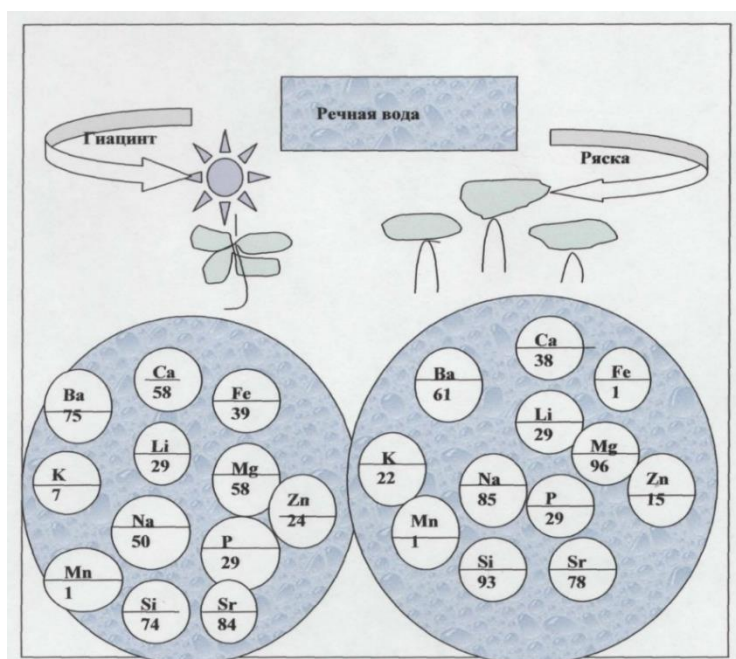


Заросли тростника

Рис. 6. Водоток у подножья отвала
Fig. 6. The watercourse at the foot of the dump

Почвы, находящиеся у истока подотвальных вод, содержат потенциально токсичные элементы: Ni, Zn, Cd, Co, Cu, Rb, As и другие (Артамонова и др., 2016). Кларковые значения металлов и мышьяка (Ni, Zn, Sr, Zr, As, Mo, Ca) превышают кларк земной коры, что может говорить о развитии технологической деградации (Деградация земельных ресурсов, 2025). Количество Zn и Ni выше ОДК тяжёлых металлов⁸ и ПДК⁹ фитотоксичности грунтов. В прибрежных почвах, удалённых от истока на 50 м, пул экотоксикантов ниже. Содержание валовых и подвижных форм Ni, Zn, Co имеет схожую тенденцию. Уменьшение концентрации 2-х валентных металлов, вероятно, обусловлено связыванием их низкомолекулярными

органическими соединениями. Обращает на себя внимание способность водорослей, накапливать в наибольшем количестве As, Mn, Mo, Fe; мхов – преимущественно Cu и Sr; рогоза, как и водорослей – Mo. В этой связи, для улучшения качества прибрежных почв, можно использовать акваремедиационный подход, то есть интенсифицировать депонирование химических элементов растениями сем. Рясковые – путём привноса их в водоток. Такое предложение основано на наблюдениях очистки загрязнённых вод г. Новосибирска и вокруг него (Артамонова и др., 2005). 30-дневный рост растения в загрязнённой среде обеспечивал существенное снижение содержания металлов (рис. 6 / fig. 6).



Показано также, что в техногенной среде вокруг корней ряски образуются муцигельные чехлы из полисахаридов (Артамонова, Марченко, 2013) где возможно депонирование металлов и неметаллов, их преобразование. Следовательно, есть все основания полагать, что гидрофит может быть востребован в акваремедиации техногенных ручьев на территории Горловского разреза, что будет способствовать и качеству прибрежных почв сельскохозяйственного фонда, прилегающих к техногенному ручью.

Заключение

Интенсивная добыча антрацита вблизи сибирского мегаполиса неизбежно сопровождается разрушением природных ландшафтов, ростом отходов неселективного отвалообразования на дневной поверхности, появлением высоких отвалов и глубоких карьеров. Техногенные образования находятся в окружении природных экосистем, в которых сохранились редкие виды растений, выходы древних пород, природные водопады. Такой природно-техногенный ландшафт привлекателен для туристических компаний, природоохранных и научных организаций. В свою очередь, промышленный интерес к месторождению неизбежно сопровождается появлением новых отвалов, что диктует поиск современных подходов биорекультивации с трендом на ускорение почвенно-растительного экранирования их поверхности. Учитывая мозаичный характер самозарастания отвалов, долговременное пребывание

молодых почв на стадии биогенно неразвитых, целесообразно проведение локального средоулучшения корнеобитаемой толщи, прежде всего на участках замедленного почвообразования, путём вовлечения в биоремедиацию.

Для оперативного выявления очагов экстремального почвообразования предлагается привлечение данных дистанционного зондирования, источниками которых могут быть космические спутники Sentinel, Landsat, а также БПЛА. Подобная информация обеспечит своевременное выявление проблемных участков самозарастания отвалов с целью привлечения конкретного содействия развитию эмбриозёмов, в том числе для достижения ими гумусово-аккумулятивной стадии. Использование индуцированной биоремедиации (фито-, мико-, микробной) в сочетании с другими способами биорекультивации ускорит восстановление природной среды. Биоремедиационные механизмы следует рассматривать как природосберегающие (природоподобные) и, возможно, в некоторых случаях, как альтернативные мелиорации. Своевременная минимизация негативного воздействия загрязнения окружающей среды подотвальными водами с применением акваремедиации снизит экологические риски. Для выявления позитивного последствия биоремедиации в долгосрочной перспективе необходимо проведение интеграционных исследований.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер государственной регистрации темы: ИПА СО РАН №126032419121-2

Funding

The work was performed within the framework of the state assignment, the state registration number of the topic: IPA SB RAS №126032419121-2

Благодарности

Статья посвящается памяти профессора Пермского университета Лидии Григорьевны Переведенцевой.

Acknowledgements

The article is dedicated to the memory of Perm University professor Lidiya Grigoryevna Perevedentseva.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interest

The author declares no conflicts of interest.

Список источников

1. Автухович И.Д. Индуцированная фиторемедиация как экстенсивный метод восстановления загрязненных почв и грунтов // *Агрехимический вестник*. 2010. № 2. С. 39–40.
2. Автушевич И.В., Броневец Т.М., Еремин И.В. Аналитическая химия и технический анализ угля. М.: Недра, 1987. 336 с.
3. Алещенкова З., Сафронова Г., Соловьева Е., Федоренчик А. Влияние арбускулярных микоризных грибов на рост и развитие растений // *Наука и инновации*. 2011. № 2 (96). С. 59–63.
4. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачёв В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 151 с.
5. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. Томск: Изд. Дом «Д-Принт», 2007. 468 с.
6. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Оплеухин А.А. Техногенное загрязнение почв подотвальными водами в районе угледобычи // *Известия Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2016. № 4 (28). С. 38–45.
7. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Черный Н.К. Проблемы и перспективы вовлечения отходов обогащения полиметаллических и железных руд в биологическую консервацию // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021. Т. 7. № 1. С. 87–101. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-87-101>

8. Артамонова В.С., Марченко М.И. Фитопригодность слабозрелых почв техногенных отвалов // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2013. Т. 1. С. 10–14.
9. Артамонова В.С., Танасиенко А.А., Бортникова С.Б. Современные аспекты ремедиации биологических свойств городских почв // *Сибирский экологический журнал*. 2005. Т. 12. № 5. С. 855–864.
10. Барановская А.Ю., Барановская Н.В., Судыко А.Ф. Элементный состав растений семейства рясковые (*Lemnaceae*) как индикатор природно-техногенных обстановок территории Томской области // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2024. Т. 30. № 1. С. 8–17.
11. Белик Е.С., Злобина К.А. Исследование возможности использования отходов производства в качестве биосорбента // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016. № 31. С. 62–76. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2016.03.05>
12. Бортникова С.Б., Артамонова В.С., Абросимова Н.А., Юркевич Н.В., Хващевская А.А. Результаты экспериментов по фиторемедиации сульфидных отходов хвостохранилищ овсом посевным (*Avena sativa*) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 11. С. 7–23. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3762>
13. Бонарцева Г.А., Акулина Е.А., Мышкина В.Л., Воинова В.В., Махина Т.К., Бонарцев А.П. Биосинтез альгинатов бактериями рода *Azotobacter* // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2017. Т. 53. № 1. С. 61–68. <https://doi.org/10.7868/S055510991701007X>
14. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571.
15. Воронина Е.Ю. Микоризы в наземных экосистемах: экологические, физиологические и молекулярно-генетические аспекты микоризных симбиозов // *Микология сегодня* / под ред. Ю.Т. Дьякова, Ю.В. Сергеева. Т. 1. М., 2007. С. 142–235.
16. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
17. Деградация земельных ресурсов / под ред. Л.А. Гафуровой, О.А. Макарова, С.А. Шобы: Учебное пособие. М.: Национальное информационное агентство «Природные ресурсы», 2025. 186 с.
18. Демин А.В., Рыбальченко И.В., Милькина И.В., Жандарова Ю.А. Технологии устойчивого развития территорий: фиторемедиация как инновационный метод санации депрессивных территорий // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Государственное и муниципальное управление*. 2022. Т. 9. № 2. С. 124–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-124-136>
19. Егорова Е.О., Ташкинов Е.В. Биоремедиация нефтезагрязнённых почв на территории Полазнинского месторождения // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2024. Т. 10. № 1. С. 51–63. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63>
20. Ерофеевская Л.А., Глязнецова Ю.С., Чалая О.Н. Использование дернообразующих растений в биоремедиации нефтезагрязнённых мерзлотных почв // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 11 (часть 1). С. 128–129.
21. Зайцев Г.А., Мухаметова Г.М., Веселкин Д.В. Особенности формирования микоризы сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009. Т. 6 (100). С. 137–139.
22. Зуева Г.А. Дернообразующие злаки в условиях Сибири. Новосибирск: Наука, 2001. 150 с.
23. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесная промышленность, 1981. С. 52–56.
24. Клёнов Б.М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 176 с.
25. Куприянов О.Я., Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Юфимцев В.И. Реконструкция лугово-степных фитоценозов на отвалах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2025. 168 с.
26. Ламанова Т.Г., Шермет Н.В. Агрофитоценозы на отвалах в южной части Кузнецкой котловины. Новосибирск: ЗАО ИПП «ОФСЕТ», 2010. 226 с.
27. Переведенцева Л.Г. Агариковые грибы (*Agaricales S.L.*) Пермской области (Западный Урал) // *Микология и фитопатология*. 1998. Т. 32. Вып. 1. С. 30–32.
28. Переведенцева Л.Г. Грибы лесов и зелёных насаждений города Перми. Пермь: Астер, 2021. С. 264 с.
29. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 287 с.
30. Пиковский Ю.А., Исмаилов Н.М., Дорохова М.Ф. Основы нефтегазовой экологии. М.: ИНФРА-М, 2022. 414 с.
31. Соколов О.А., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 1. Атлас распределения тяжёлых металлов в объектах окружающей среды. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 164 с.
32. Туркин К.А. Современные подходы к микробной ремедиации нефтезагрязнённых почв // *Экосистемы*. 2025. Т. 43. С. 61–69. <https://doi.org/10.29039/2413-1733-2025-43-61-69>
33. Угледородокисляющие родококки: особенности биологической организации под воздействием эколоплантов. Атлас-монография / под ред. И.Б. Ившиной. Екатеринбург: УрО РАН, 2021. 140 с.
34. Фаизова Л.И., Зайцев Г.А. Особенности микоризообразования сосны обыкновенной на отвалах Кумертауского бурогольного разреза // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. С. 1–6.

35. Чайкин С.А., Бузмаков А.С., Симонов В.Э. Современное представление о техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяных месторождений и роли территорий режима особого природопользования // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2025. Т. 11. № 1. С. 71–82. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-71-82>
36. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
37. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 655 с.
38. Юдович Я.Э. Кетрис М.П., Мерц А.В. Элементы-примеси в ископаемых углях. Л.: Наука, 1985. 239 с.
39. Юй Л., Тулигуэл, Хайин Б., Широких А.А., Широких И.Г., Егошина Т.Л., Кириллов Д.В. Лекарственные грибы в традиционной медицине и современных биотехнологиях. Киров: «О-Краткое», 2009. 320 с.
40. Янин Е.П. Ремедиация территорий, загрязненных химическими элементами: общие подходы, правовые аспекты, основные способы (зарубежный опыт) // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2014. № 3. С. 3-105.
41. Aasfar A., Bargaz A., Yaakoubi K., Hilali A., Bennis I., Zeroual Y., Meftah Meftah K.I. Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. 628379. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
42. Ertesvåg H. Alginate-modifying enzymes: biological roles and biotechnological uses // *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. 523. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00523>
43. Ivanov F.D., Pulikova E.P., Gorovtsov A.V., Chernikova N.P., Barahov A.B., Lacynnik E.S., Mendzhieva S.S., Minkina T.M., Rajput V.D. The effect of chelators on the microbiota and phytoremediation of coal dumps soils // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025. Vol. 22. P. 15625-15636. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06675-z>.
44. Kapahi M., Sachdeva S. Mycoremediation potential of *Pleurotus* species for heavy metals: a review // *Biore-sourced and Bioprocessing*. 2017. Vol. 4. P. 32. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0162-8>
45. Mokrani S., Houali K., Chaalal M., Yadav K.K., Arabi A.I.A., Eltayeb L.B., AwjanAlreshidi M., Benguerba Y., Cabral-Pinto M.S., Nacti E.H. Bioremediation techniques for soil organic pollution: mechanisms, microorganisms and hechnologies – a comprehensive review // *Ecological engineering*. 2024. Vol. 207. 107338. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107338>
46. Patowary R., Devi A., Mukherjee A.K. Advanced bioremediation by an amalgamation of nanotechnology and modern artificial intelligence for efficient restoration of crude petroleum oil-contaminated sites: a prospective study // *Environmental science and pollution research*. 2023. Vol. 30. P. 74459-74484. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27698-4>
47. Siunova T.V., Filonov A.E., Gorovtsov A.V., Akhmetov L.I., Ivanov F.D., Rajput V.D., Minkina T.M., Sushkova S.N., Wong M.H., Biswas J.K. Potential of nickel and cobalt resistant microorganisms for effective phytoremediation of heavy metal contaminated soil // *Discover Environment*. 2025. Vol. 3. Iss. 1. 99. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00301-y>

References

1. Avtuhovich I.D. Induced phytoremediation as an extensive method of restoration of polluted soils. *Agrochemical bulletin*. 2010. Vol. 2. P. 39-40. (in Russian)
2. Avtushevich I.V., Bronovets T.M., Eremin I.V. Chemistry and technical analysis of coal. Moscow: Nedra, 1987. 336 p. (in Russian)
3. Aleschenkova Z., Safronova G., Solovyova E., Fedorenchik A. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and development. *Science and innovation*. 2011. Vol. 2. Iss. 96. P. 59-63. (in Russian)
4. Androkhonov V.A., Kulyapina E.D., Kurachev V.M. Soils of technogenic landscapes: genesis and evolution. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. 151 p. (in Russian)
5. Arbuzov S.I., Yershov V.V. Geochemistry of rare elements in Siberian coals. Tomsk: Publishing House. House «D-Print», 2007. 468 p. (in Russian)
6. Artamonova V.S., Bortnikova S.B., Opleukhin A.A. Technogenic soil pollution by subsurface waters in the coal mining area. *Izvestiya Komi scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2016. Vol. 4. Iss. 28. P. 38-45. (in Russian)
7. Artamonova V.S., Bortnikova S.B., Cherny N.K. Problems and prospects of involving polymetallic and iron ore processing waste in biological conservation. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2021. Vol. 7. Iss. 1. P. 87-101. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-87-101> (in Russian)
8. Artamonova V.S., Marchenko M.I. Phytoprime of underdeveloped soils of man-made landfills. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2013. Vol. 1. P. 10-14. (in Russian)
9. Artamonova V.S., Tanasienko A.A., Bortnikova S.B. Modern aspects of remediation of biological properties of urban soils. *Siberian Ecological Journal*. 2005. Vol. 12. Iss. 5. P. 855-864. (in Russian)
10. Baranovskaya A.Yu., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. Elemental composition of plants of the duckweed family (*Lemnaceae*) as an indicator of the natural and man-made conditions of the Tomsk region. *Bulletin of the Trans-Baikal State University*. 2024. Vol. 30. Iss. 1. P. 8-17. (in Russian)

11. Belik E.S., Zlobina K.A. Investigation of the possibility of using industrial waste as a biosorbent. *Bulletin of PNRPU. Applied ecology. Urbanistics*. 2016. Vol. 31. P. 62-76. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2016.03.05> (in Russian)
12. Bortnikova S.B., Artamonova V.S., Abrosimova N.A., Yurkevich N.V., Khvashchevskaya A.A. Results of experiments on phytoremediation of sulfide waste from tailings storage facilities with oats (*Avena sativa*). *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, 2022. Vol. 333. Iss. 11. P. 7-23. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3762> (in Russian)
13. Bonartseva G.A., Akulina E.A., Myshkina V.L., Voinova V.V., Makhina T.K., Bonartsev A.P. Biosynthesis of alginates by bacteria of the genus *Azotobacter*. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2017. Vol. 53. Iss. 1. P. 61-68. <https://doi.org/10.7868/S055510991701007X> (in Russian)
14. Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the soils crust. *Geochemistry*. 1962. Vol. 7. P. 555-571. (in Russian)
15. Voronina E.Yu. Mycorrhizae in terrestrial ecosystems: ecological, physiological, and molecular genetic aspects of mycorrhizal symbioses. In: Dyakov Yu.T., Sergeev Yu.V. (ed.) *Mikologiya sevodnya*. Vol. 1. Moscow, 2007. P. 142-235. (in Russian)
16. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofieva, T.F. Anthropogenic soils: genesis, geographya, reclamation. Smolensk: Oikumena, 2003. 268 p. (in Russian)
17. Gafurova L.A., Makarov O.A., Shoby S.A. (ed.). Degradation of land resources. Moscow: National Information Agency «Natural Resources», 2025. 186 p. (in Russian)
18. Demin A.V., Rybalchenko I.V., Milkina I.V., Zhandarova Yu.A. Technologies of sustainable development of territories: phytoremediation as an innovative method of rehabilitation of depressed territories. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: State and Municipal Administration*. 2022. Vol. 9. Iss. 2. P. 124-136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-124-136> (in Russian)
19. Egorova E.O., Tashkinov E.V. Bioremediation of oil-contaminated soils in the territory of the Polazninskoye field, 2024. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2024. Vol. 10. Iss. 1. P. 51-63. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63> (in Russian)
20. Yerofeevskaya L.A., Glyanetsova Yu.S., Chalaya O.N. The use of sod-forming plants in bioremediation of oil-contaminated permafrost soils. *Successes of modern Natural Science*. 2012. Vol. 11. Iss. 1. P. 128-129. (in Russian)
21. Zaitsev G.A., Mukhametova G.M., Veselkin D.V. Features of the formation of mycorrhiza of scots pine in conditions of industrial pollution. *Bulletin of Orenburg State University*. 2009. Vol. 6. Iss. 100. P.137-139. (in Russian)
22. Zueva G.A. Sod-forming cereals in Siberia. Novosibirsk: Nauka Publ., 2001.150 p. (in Russian)
23. Karpachevsky L.O. Forest and forest soils. Moscow: Forest Industry, 1981. P. 52-56. (in Russian)
24. Klenov B.M. Stability of humus in automorphic soils of Western Siberia. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, Geo branch, 2000. 176 p. (in Russian)
25. Kupriyanov O.Ya., Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Yufimtsev V.I. Reconstruction of meadow-steppe phytocenoses in landfills. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2025. 168 p. (in Russian)
26. Lamanova T.G., Sheremet N.V. Agrophytocenoses on landfills in the southern part of the Kuznetsk basin. Novosibirsk: CJSC IPP «OFFSET», 2010. 226 p. (in Russian)
27. Perevedenceva L.G. Agaric mushrooms (*Agaricales* S.L.) Perm region (Western Urals). *Mycology and phytopathology*. 1998. Vol. 32. Iss. 1. P. 30-32. (in Russian)
28. Perevedenceva L.G. Mushrooms of forests and green spaces of the city of Perm. Perm: Aster, 2021. 264 p. (in Russian)
29. Perel'man A.I. Geochemistry of elements in the hypergenesis zone. Moscow: Nedra Publ., 1972. 287 p. (in Russian)
30. Pikovsky Yu.A., Ismailov N.M., Dorokhova M.F. Fundamentals of oil and gas ecology. Moscow: INFRA-M, 2022. 414 p. (in Russian)
31. Sokolov O.A., Chernikov V.A. Environmental safety and sustainable development. Book 1. Atlas of the distribution of heavy metals in environmental objects. Pushchino: ONTI PNTS RAS, 1999. 164 p. (in Russian)
32. Turkin K.A. Modern approaches to microbial remediation of oil-contaminated soils. *Ecosystems*. 2025. Vol. 43. P. 61-69. <https://doi.org/10.29039/2413-1733-2025-43-61-69> (in Russian)
33. Ivshina I.B. (ed.). Hydrocarbon-oxidizing rodococci: features of biological organization under the influence of environmental pollutants. Atlas-monograph. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. 140 p. (in Russian)
34. Faizova L.I., Zaitsev G.A. Features of mycorrhizal formation of Scots pine in the dumps of the Kumertau lignite section. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 14. P. 1-6. (in Russian)
35. Chaikin S.A., Buzmakov A.S., Simonov V.E. Modern understanding of the anthropogenic transformation of the natural environment during the exploitation of oil fields and the role of territories of the special nature management regime. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 71-82. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-71-82> (in Russian)
36. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of soils in Russia, Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (in Russian)

37. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Toxic elements-impurities in fossil coals. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. 655 p. (in Russian)
38. Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Merts A.V. Impurity elements in fossil coals. Leningrad: Nauka, 1985. 239 p. (in Russian)
39. Yu L., Tuliguel, Hayin B., Shirokikh A.A., Shirokikh I.G., Egoshina T.L., Kirillov D.V. Medicinal mushrooms in traditional medicine and modern biotechnologies. Kirov: «O-Kratkoe», 2009. 320 p. (in Russian)
40. Yanin E.P. Remediation of territories contaminated with chemical elements: general approaches, legal aspects, basic methods (foreign experience). *Problems of the environment and natural resources*. 2014. Vol. 3. P. 3-105. (in Russian)
41. Aasfar A., Bargaz A., Yaakoubi K., Hilali A., Bennis I., Zeroual Y., Meftah K.I. Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. 628379. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
42. Ertesvåg H. Alginate-modifying enzymes: biological roles and biotechnological uses. *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. 523. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00523>
43. Ivanov F.D., Pulikova E.P., Gorovtsov A.V., Chernikova N.P., Barahov A.B., Lacynnik E.S., Mendzhieva S.S., Minkina T.M., Rajput V.D. The effect of chelators on the microbiota and phytoremediation of coal dumps soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2025. Vol. 22. P. 15625-15636. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06675-z>
44. Kapahi M., Sachdeva S. Mycoremediation potential of *Pleurotus* species for heavy metals: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 2017. Vol. 4. 32. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0162-8>
45. Mokrani S., Houali K., Yadav K.K., Arabi A.I.A., Eltayeb L.B., AwjanAlreshidi M., Benguerba Y., Cabral-Pinto M.M.S., Nacti E. Bioremediation techniques for soil organic pollution: mechanisms, microorganisms and technologies – a comprehensive review. *Ecological engineering*. 2024. Vol. 207. 107338. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107338>
46. Patowary R., Devi A., Mukherjee A.K. Advanced bioremediation by an amalgamation of nanotechnology and modern artificial intelligence for efficient restoration of crude petroleum oil-contaminated sites: a prospective study. *Environmental science and pollution research*. 2023. Vol. 30. P. 74459-74484. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27698-4>
47. Siunova T.V., Filonov A.E., Gorovtsov A.V., Akhmetov L.I., Ivanov F.D., Rajput V.D., Minkina T.M., Sushkova S.N., Wong M.H., Biswas J.K. Potential of nickel and cobalt resistant microorganisms for effective phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Discover Environmental*. 2025. Vol. 3. Iss. 1. 99. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00301-y>

Поступила в редакцию / Received: 30.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised: 28.04.2026

Принята к публикации / Accepted: 25.05.2026