

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья
УДК 631.4

Гумусовая мелиорация нарушенных земель: прошлое, настоящее, будущее (обзор)

Валентина Сергеевна Артамонова

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

artamonovavs@yandex.ru, artamonova@issa-siberia.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8606-7975>

Аннотация. Многолетняя добыча каменных углей открытым способом на юге Западной Сибири сопровождается разрушением природных ландшафтов, утратой редких видов флоры, фауны, плодородных почв в лесостепной и степной зоне. Это актуализирует решение проблемы биологической рекультивации нарушенных территорий. В представленном обзоре приведены сведения об объёмах вскрышных пород, погребении ими плодородных земель, перспективах развития почв и угольной промышленности. В статье рассмотрена история применения гумусовой мелиорации нарушенных земель, обеспечивающей привнос стартового плодородия и микробиоты, участвующей в биогенном почвообразовании. Акцентировано внимание на ограниченность наличия гумусированных резервов в сибирском регионе, ухудшение качества отчуждённого плодородного слоя при длительном хранении в буртах. Представлена информация об исходных свойствах отвальных пород, которые выступают в качестве подстилающей породы в искусственно созданных почвоподобных образованиях. Акцентируется внимание на значимость формирования эдафических услуг в корнеобитаемом слое. Подчёркивается необходимость привлечения инновационных разработок для повышения азотного режима технозёмов, а также микробиологических способов улучшения корневого питания фитопоселенцев и повышения их стрессоустойчивости. Данный обзор отражает проблемы сложного и медленного восстановления природной среды, особенно в зоне сухих степей, в результате её быстрого разрушения при недропользовании.

Ключевые слова: гумусовая мелиорация, землевание, технозём, экологическая безопасность

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания, номер госрегистрации темы: ИПА СО РАН № 1210311700316-9.

Для цитирования: Артамонова В. С. Гумусовая мелиорация нарушенных земель: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Антропогенная трансформация природной среды. 2023. Т. 9. № 1. С. 32–45.

SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

Humus reclamation of disturbed lands: past, present, future (review)

Valentina S. Artamonova

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

artamonovavs@yandex.ru, artamonova@issa-siberia.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8606-7975>

Abstract. Long-term open-pit mining of coal in the south of Western Siberia is accompanied by the destruction of natural landscapes, the disappearance of rare species of flora, fauna, fertile soils in forest-steppe and steppe zones. This actualizes the problem of biological reclamation of disturbed territories. The presented review provides information about the volumes of overburden rocks, the burial of fertile lands by them, and the prospects soils and for the development of the coal industry. The article considers the history of the use of humus reclamation of disturbed lands, which ensures the introduction of initial fertility and microbiota involved in biogenic soil formation. Attention is focused on the limited availability of humus reserves in the Siberian region, the deterioration of the quality of the alienated fertile layer during long-term storage in burts. Information is presented on the initial properties of dump rocks, which act as the underlying rock in artificially created soil-like formations. Attention is focused on the importance of the formation of edaphic services in the root layer. The need to attract innovative developments to increase the nitrogen regime of technozems, as well as microbiological ways to improve the root nutrition of phytoplankton and increase their stress resistance is emphasized. This review reflects the problems of complex and slow restoration of the natural environment, especially in the dry steppe zone, as a result of its rapid destruction during subsurface use.

Key words: land use, humus reclamation, waste, technozem, soil, environmental safety

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of State Assignment, the state registration number of the topic: Institute of Soil Science and Agrochemistry of the SB RAS № 1210311700316-9.

For citation: Artamonova, V., 2023. Humus reclamation of disturbed lands: past, present, future (review). *Anthropogenic Transformation of Nature*, 9(1). pp. 32–45. (in Russian)

Введение

На юге Западной Сибири, на территориях с лесостепной и степной растительностью исторически сформировались уникальные природные экосистемы, в том числе почвенные. В 2000 г. лесостепи и степи Кемеровской области и Хакасии включены в состав Алтае-Саянского экорегиона, одного из двухсот в мире, где сохранились редкие виды флоры и фауны. Однако ареалы их распространения сокращаются вследствие активного недропользования.

Административно лесостепные и степные зоны входят в состав Сибирского федерального округа, расположены в Кемеровской области, Красноярском крае, Республике Хакасия. Под почвенно-растительным покровом на относительно небольшой глубине залегают большие запасы различных полезных ископаемых, поэтому ресурсный потенциал этих территорий – это экономически значимый объект антропогенного воздействия [37], отчего сохранение природных наземных экосистем чрезвычайно актуально. В последнее десятилетие расширились и продолжают расти площади, занятые угледобычей, в связи с чем наметилась тенденция вовлечения самих отвалов в процессы восстановления на них прежнего фитообразия.

Реставрация наземных экосистем базируется на «экоцентризме», современной парадигме – от экономических приоритетов к экологическим. Такому подходу способствуют совместные усилия инвесторов, власти, собственников угольных компаний, частных лиц. Ключевую роль в организации природного заказника «Караканский» 2012 г. сыграла Кузбасская топливная компания. Она согласовала создание ООПТ на землях, оформленных в собственность угольной компании, тем самым способствовала сохранению уникального природного комплекса с разнообразными степными экосистемами. В 2013-2017 гг. на территории Кемеровской области и республики Хакасия были организованы комплексные исследования сухопутных экосистем по Проекту Программы развития ООН и Глобального экологического фонда совместно с Минприроды России «Задачи сохранения биоразнообразия в политике и программах развития энергетического сектора России». В последние 5 лет проведены комплексные фундаментальные исследования растительности, почв и почвоподобных образований, финансово поддержанные РНФ. Они расширили знания о современном состоянии земель, нарушенных 35–40 лет тому назад и вовлеченных в рекультивацию путём землевания. Такая информация необходима для понимания процессов восстановления плодородия и зональной растительности, разработки перспективных обоснованных способов биологической рекультивации.

К настоящему времени действуют Методические рекомендации для реставрации лугово-степной и лесной растительности на отвалах угольной промышленности в Кузбассе [27, 48], национальный стандарт

наилучших доступных технологий [14], ориентированный на восстановление исходного биоразнообразия, в том числе редких видов, на нарушенных землях и земельных участках. Однако существует немало проблем по обеспеченности растений стабильным корневым питанием, по накоплению и образованию гумуса, в котором сосредоточены основные доступные элементы. Не решены вопросы о путях обогащённости гумуса азотом, наиболее дефицитном биогенном элементе в почвоподобных образованиях, а также развитии в них биогенности и биологической активности. Недостаточно изучены технозёмы, созданные во второй половине прошлого столетия путём землевания отвальных пород – привноса на их поверхность потенциально плодородных пород, гумусированной массы, либо одновременно тех и других, для повышения в корнеобитаемом слое запаса доступного питания и ускорения вовлечения подстилающих отвальных пород в почвообразовательные процессы. К настоящему времени информации о последствиях гумусовой мелиорации породных отвалов на процессы восстановления биоты и биологических свойств искусственно созданных почв недостаточно. Цель данной работы заключалась в обобщении имеющихся знаний об истории гумусовой мелиорации отвалов, проблемах и перспективах использования гумусированных масс на объектах техногенных отходов в районах угледобычи.

История гумусовой мелиорации отвальных пород

Впервые нанесение почвенного слоя для восстановления пространств, образованных при открытой добыче угля, было продекларировано в Германии в 1940 г. [68]. В СССР вовлечение плодородного слоя почв вменялось в обязанность землепользователей для повышения малопродуктивных угодий и рекультивации нарушенных земель на законодательном уровне в 1968 г., после выхода Закона № 3401-VII (статья 11) [17]. Землевание – это комплекс работ по снятию, транспортированию и нанесению плодородного слоя почвы и (или) потенциально плодородных пород на малопродуктивные угодья, легкие подзолы, солонцы и другие маломощные почвы [12]. Землевание отвалов в районах угледобычи с использованием гумусового горизонта было ориентировано на улучшение обеспеченности питанием корневых систем растений. Расчётный срок окупаемости капитальных затрат на землевание по результатам ожидаемой дополнительной продукции (на основании достоверных результатов о биологической эффективности гумусовой мелиорации, то есть данных о получении устойчивой прибавки урожая на участках с насыпными почвами по сравнению с контрольными участками) в случае с улучшаемыми малопродуктивными угодьями, превышал 40 лет [34]. Для техногенных почвоподобных образований такой срок не прогновировался, поскольку, рассчитать его было сложно.

В Сибири основные положения по использованию землевания сформулированы в 1981 г. [22]. Они были ориентированы на вовлечение породных отвалов в сельское хозяйство в зонах степи, лесостепи и подтайги. Рекомендовался привнос как плодородной массы почвы, так и лессовидного карбонатного или бескарбонатного суглинка. Благодаря гумусу ожидалось проявление наилучшей обеспеченности корнеобитаемой зоны многолетних культур основными элементами питания. При создании пашен и возделывании на них культур, наиболее требовательных к почвенному плодородию, предварительно формировали насыпный гумусовый горизонт мощностью 20–35 см. Применение экраняющих прослоек против поднятия токсичных солей из отвальных пород не предполагалось, ибо подавляющая часть вскрышных пород угольных месторождений Сибири не содержит фитотоксичных компонентов.

Активное землевание вскрышных пород с применением гумусированной массы на территории Кузбасса, КАТЭКа, Хакасии отмечалось в конце прошлого века. Надежды на интродуцированный гумусированный слой, как источник плодородия, возлагались большие. Но в начале текущего столетия выяснилось, что качество почвенного слоя, складированного в бурты под открытым небом и находящегося в таком состоянии в течение десятилетий, снижается. Согласно нормативному документу о формировании и хранении почв в буртах [13], хранение почвенной массы допускается до 20 лет. За это время физические и агрохимические свойства почв в значительной степени меняются в худшую сторону: теряется агрегация, разрушаются гумусовые вещества, вымывается из гуминовых кислот кальций, снижается содержание нитратов. Кроме этого, в толще буртов развиваются анаэробные процессы, активизируется брожение. Фактически плодородный слой превращается в почвогрунт с нежелательными физико-химическими и биологическими свойствами [25].

В этой связи, была предпринята попытка использовать «свежую» (только что снятую) гумусированную массу в качестве рекультивационного слоя [26]. Законом не запрещается применять свежеснятый слой, но соответствующая технология в нормативных актах не прописана, экономически и юридически не обоснована. Размещение жизнеспособного почвенного слоя (ЖПС) на поверхность отвала отработанного угольного разреза (минуя стадию буртования), дал положительный эффект. Оказалось, что почвенная масса, сохранившая исходные агрохимические, физические и микробиологические свойства, а также содержащая корневища, семязачатки, фрагменты растений, обеспечила возобновление растений, особенно не долговечных, что позволило создать природоподобное растительное сообщество с широким видовым разнообразием и высокой продуктивностью. В другом случае были увеличены мощности привносимого ЖПС – до 40 и 60 см, что способствовало накоплению фитомассы уже за три года развития травостоев лугово-степных видов [28]. Положительный результат показал также вариант с применением меньшей толщи гумусированного слоя, но привносимой

на предварительно размещённый слой потенциально плодородных суглинков.

Однако следует сказать, что реализация варианта с нанесением на отвальные породы увеличенной толщи гумусового для ускорения восстановления фиторазнообразия может быть применима лишь в исключительных случаях, поскольку гумусовый горизонт фоновых почв, подверженных отчуждению имеет небольшую мощность, он по сравнению с европейскими аналогами, короче. Следовательно, вторичное использование гумусированной массы ограничено его исходными ресурсами.

Почвенные ресурсы

Эволюционно сложившиеся почвы в Кемеровской области и Хакасии, которые обладают гумусовым горизонтом и потенциальным плодородием, постепенно сокращают свои площади в результате недропользования. В 2008 г. в Кузбассе около 40–45 % площади Кемеровской области уже было представлено антропогенным ландшафтом, маркируемым в разной степени интенсивными площадными инфракрасными аномалиями (по данным космического мониторинга) [31]. К настоящему времени около 150 тыс. га пахотных земель относится к категории эрозионно опасных и 340 тыс. га, подверженных водной и ветровой эрозии [44]. При этом пахотные угодья уже 40 лет назад обнаруживали признаки снижения запасов гумуса [54], истощение азотного фонда, поскольку главной культурой в регионе были зерновые злаки, пожнивные остатки которых и солома очень бедны азотом [23]. Учитывая, что в составе почвенного покрова земель сельскохозяйственного назначения лидируют чернозёмы, то их деградацию и потерю следует предотвратить, поскольку компенсировать такую утрату невозможно никакими технологиями.

В Республике Хакасия активное аграрное освоение целины в середине прошлого века способствовало расширению площадей пахотных земель, сенокосов и пастбищ, но они быстро подверглись дефляции. К началу XXI в. ветровая эрозия поразила до 50% всех сельхозугодий республики. Пахотные почвы утратили прежний запас гумуса, гумусовый профиль резко сократился. Уже сегодня земли сухостепной зоны преимущественно непахотнопригодны, степной зоны – ограниченно-пахотнопригодны. Фоновые почвы, например каштановые карбонатные, преимущественно солонцеватые, на территории расположения Черногорского угольного месторождения имеют чрезвычайно узкий гумусовый горизонт – менее 12 см [57]. Накоплению гумуса в каштановых почвах сухих степей не способствует гидротермический режим почв. На фоне острого дефицита влаги развивается ксероморфитизация, преобладают мелкодерновинные злаки (ковыль Крылова, типчак, тонконог, змеевка), бедные азотом. Их растительные остатки минерализуются медленно, что ведёт к аккумуляции мортмассы, в которой сосредоточена основная доля (до 82 %) азота. Но в корнеобитаемом слое почв азот дефицитен, его запасы в живых корнях низкие (8–17,8 т/га в слое 0–40 см). В верхнем слое почв (0–10 см) регистрируется лишь 0,16–

0,18 % общего азота [20]. Запасы мортмассы почти в 3 раза выше, чем корней, содержание углерода в ней достигает 9,88 т С/га. При этом запасы углерода в корнях не превышают 1,46 т С/га [59]. Поэтому средняя мощность гумусового горизонта чернозёмов и каштановых почв не превышает 25 см, по степени гумусированности они относятся к слабогумусированным [57]. К тому же в каштановых почвах сухих степей развитие корней приурочено к верхним горизонтам, где преобладают процессы аэробно-биологического разложения. Развитие в них гетеротрофной микрофлоры сдерживается дефицитом влаги и сжатым вегетационным периодом, что не способствует полному разложению злаковой растительности. В сухой степи отмечается слабая степень конденсированности новообразованных органических соединений, поверхностная концентрация запасов гумуса. Основным компонентом гумуса оказываются фульвокислоты, а не гуминовые кислоты (отчасти от преобладания в групповом составе почвенной микрофлоры актиномицетов, способных разлагать гуминовые кислоты). Биогенное почвообразование в степной зоне изначально характеризуются большей ксерофитизацией микробного ценоза, быстрой утилизацией мобильных углеводов, азотистых соединений, торможением разложения лигнизированных компонентов.

Доказано, что распашка степей на территории европейской части страны ведёт к резкому снижению С и N в денсиметрических фракциях [50], особенно низки их показатели в свободном и окклюдированном почвенном органическом веществе (плотностью менее 1,6 г/см³). Относительное содержание азотсодержащих соединений в составе этих частиц во всех распаханых почвах уступает фоновому значению, в залежных вариантах тенденция сохраняется. Не исключено, что в распаханых степях Хакасии, как и при залеживании почв наблюдается такая же картина. Укороченность гумусового горизонта сибирских почв (их фациальная специфика в отличие от европейских аналогов) обуславливает быструю утрату ими ценных свойств.

Не способствует сохранению прежнего качества гумуса в почвах Кузбасса и Хакасии сложившаяся к началу XXI в. и эколого-геохимическая обстановка. В Кузбассе выявляется загрязнение водных и почвенных экосистем [36]. В гумусированном слое почв некоторых районов аккумулируется высокое разнообразие и содержание тяжёлых металлов: 3-4 ПДК, порою загрязнение формируется присутствием подвижных форм двух, трех и даже четырех металлов одновременно [18]. Металлы и неметаллы обнаружены в снежном покрове и растительности, в количествах, превышающих фоновые значения [9, 30], что означает возврат химических соединений в почвы. В Хакасии группа элементов (Zn, Mo, Cu, V, Li, Yb, Pb, Sc) обнаруживает характерное устойчивое превышение регионального кларка в разных типах почв [7, 29, 58]. Коэффициенты концентрации таких элементов превышают 2,3. Элементы относятся к классам опасности (1 класс опасности – Zn и Pb, 2 класс – Cu и Mo, 3 класс – V), поэтому их повышенные концентрации потенциально опасны для людей и животных. Установлено, что Ва,

V, Sr, Yb, а для каштановых почв и чернозёмов обыкновенных также и Zr, имеют кларки концентрации выше допустимого предела (1,2), что связано с влиянием подстилающих пород, особенностями распределения этих элементов на региональном уровне. Таким образом, исходный гумусированный горизонт, востребованный для землевания породных отвалов, может содержать экотоксиканты, что необходимо отслеживать.

Характеристика отвальных пород, вовлекаемых в гумусовую мелиорацию

В Кузбассе вскрышные и вмещающие породы, вовлекаемые в землевание, представляют собой гетерогенную смесь осадочных четвертичных отложений, преимущественно лессовидных покровных суглинков, песчаников, алевролитов и аргеллитов. Иногда песчаники составляют до 78 % горной массы, алевролиты – до 28%, аргиллиты – до 2% [35]. В некоторых разрезах, например Калтанском, вскрышные массы, представлены бурыми некарбонатными глинами и лессовидными иловато-пылеватыми тяжелыми суглинками [45]. Для лессовидных суглинков характерна микроагрегированность, пористость, преимущественно нейтральная реакция среды, насыщенность основаниями, обогащенность биогенными элементами, унаследованными от былых фаз почвообразования. Помимо этого, глинистые минералы способны химически связывать воду, что немаловажно в ситуациях иссушения минеральной поверхности. Алевролиты, обладают сравнительно быстрой способностью к выветриванию, что, в свою очередь, способствует высвобождению глинистых минералов и ила, образованию мелкозёма. Присутствие глинистых минералов с обильными сколами кристаллической решётки и некомпенсированными зарядами увеличивает им катионнообменную способность. Однако в период планирования отвалов и привноса на их поверхность гумусированного слоя, происходит уплотнение технозёмов вследствие механических нагрузок, которые ухудшают агрофизические свойства жизнепригодного субстрата.

На территории степной зоны Усть-Абаканского района (центральная часть Минусинского прогиба) в составе отвалов вскрыши преобладают песчаники, аргиллиты, алевролиты, их углистые разности [58]. Отвальная смесь характеризуется следующими свойствами: рН=7,0–8,6; содержание подвижных форм фосфора достигает 1,9 мг/100 г, обменного калия – до 40 мг/100 г; содержание натрия до 10,0 мг-экв/л; содержание СО₂ карбонатов – до 8,8%. Отвальная масса засолена. Химизм засоления сульфатный, средней мощностью 1,5–2,0 м [57]. В составе вмещающих пород и углистых частицах присутствуют в незначительном количестве органические азотсодержащие соединения, однако многочисленные очаги эндогенных пожаров, причиной возникновения которых являются легковоспламеняющиеся углистые аргиллиты, снижают содержание элементов-биогенов, отчего в корнеобитаемой зоне возникает дефицит доступного питания растениям.

Следовательно, в разных природных зонах вскрышные породы отвалов различаются по своим физико-химическим свойствам.

Приоритеты гумусовой мелиорации

Они определяются в первую очередь острой необходимостью улучшения экологической обстановки в угледобывающих регионах. Создание почвоподобных покрытий с применением гумусированного слоя снижает загрязнение окружающей среды, способствует увеличению зон с возобновляемыми наземными ресурсами. Гумусовое покрытие экранирует породные отвалы, способствует уменьшению углеродного следа в угледобывающих регионах. Одновременно решается вопрос экологической утилизации отчуждённого ранее гумусированного слоя, в том числе длительно складированного в буртах. Оно является единственным эволюционно сложившимся ресурсом плодородия, питательных элементов и микроорганизмов, которые обуславливают биологическую активность вокруг корней растений, как культурных, так и ранее произрастающих в данной зоне, что важно для восстановления прежних сообществ на разрушенных территориях.

В Кузбасском угольном бассейне, формирование отвалов вскрышных пород при открытом способе добычи угля сопровождается ежегодным поглощением земельных угодий до 42 га на 1 млн т добычи угля [55]. Такие потери регистрируются во всем мире, Россия не исключение. Ежегодно под отвалы отчуждается 10–15 тыс. га. Ожидается, что в Кузбассе к 2030 г. площадь отчуждённых земель превысит таковую всеми отработанными и действующими разрезами за весь период развития открытой угледобычи в Кузнецком угольном бассейне. К 2035 г. планируется добыча 427 млн т. угля/год, площадь нарушенных земель – 5,956 тыс. га/год [60]. Под нарушение попадают районы с относительно высокоразвитым сельским хозяйством, что приведёт к существенной потере продуктивных пахотных земель с плодородными, преимущественно чернозёмными почвами [43].

Искусственно созданные почвоподобные образования с насыпным гумусированным слоем частично компенсируют дефицит сенокосных и пастбищных угодий. Наряду с этим перспективно вторичное вовлечение отчуждённого почвенного ресурса в зонах неотложной и первоочередной биологической рекультивации [18], например при осуществлении озеленения населённых мест, создании парков, скверов, резерваций для редких видов и полигонов реставрации бывшего зонального фиторазнообразия, питомников для разведения кустарников и травянистых растений в лесохозяйственных и садоводческих целях. Показано, что на отвалах с землеванием сеянцы берёзы 4–6 летнего возраста демонстрируют лучший результат приживаемости – до 87,5%, превосходя по этому показателю сосну обыкновенную, производство которой для лесной рекультивации в регионе сократилось [15].

В Республике Хакасия высококачественные угли, добываемые издавна открытым способом, располагаются преимущественно в сухостепной зоне под тёмно-каштановыми почвами [38]. Описания угольных месторождений известны с 1772 г., сведения о них сохранились в языке местных народов, например, слово «кара-бас» означает «чёрная голова» на выходе угольного пласта. В 2020 г. объём вскрышных масс достиг

1,958 млрд м³. На территории Черногорского месторождения (около Абакана) за период 2019–2021 гг. объём изъятых вскрышных пород приблизился суммарно к 190 млн м³, в то время как объём самого добытого угля составил около 27 млн т [56], то есть выемка 1 т угля сопровождалась извлечением около 7 тыс. м³ вскрышной породы. В ближайшей перспективе добыча угля открытым способом возрастёт, что неизбежно расширит площади, занимаемые отвалами, сократит запас фоновых почв, в том числе агрогенных, востребованных в настоящее время под пастбища, поскольку в приоритете остаётся развитие грубошерстного овцеводства, мясного скотоводства и табунного коневодства [40]. Не исключено, что создание технозёмов в сухостепной зоне с обеспечением регламентированного использования их под выпас, будет способствовать сохранению животноводческого сектора.

Помимо этого, технозёмообразование в Кузбассе и Хакасии частично уменьшит эмиссию углерода, размер которого увеличился вследствие разрушения почвенно-растительного покрова, экранирующего выбросы CO₂. Экспериментально доказано [24], что лесовидные карбонатные суглинки, которые входят в состав вскрыши, теряют за сравнительно короткий срок нахождения на дневной поверхности (6 лет) значительное количество CO₂ карбонатов, высокодисперсных илистых частиц, вследствие чего потеря веса минеральной массы составляет около 15%.

Для депонирования углерода на отработанных месторождениях каменного угля предлагается облесение отвалов, которое обеспечит сохранение углерода в древесине [48]. Создание лесных природоподобных сообществ обеспечивает накопление 4 т/га углерода в год. За рубежом в качестве «жизнеспособного» варианта предупреждения потерь как углерода, так и азота из почв, в том числе обнажённых, обсуждаются популярные почвопокровные культуры (ячмень, овёс, рожь, реди́с, бобовые) [64–66, 69, 71].

Привнос на отвалы гумусированного слоя неизбежен из-за медленного формирования почв естественным путём. Так, процесс накопления гумуса в ходе естественного зарастания внешних отвалов в лесостепной части на соседствующей с Кузбассом и Хакасией территории – Назаровской котловине (Красноярский край) регистрируется на 3-й год самозарастания, но лишь в слое 0–1 см [8]. В нижележащем слое (1–5 см) самозарастающих отвалов гумусонакопление замедлено. Его накопление в верхнем слое (0–20, 0–30 см) лесовых толщ длится 150–250 лет [16]. Полный гумусовый профиль фиксируется через несколько сотен и тысяч лет [3, 62].

Главной задачей «экологизации» отвалов остаётся создание условий стартового момента формирования экосистем [46], что в полной мере относится и к почвенным экосистемам. Привнос гумусированной массы на породные отвалы – это альтернатива их естественного формирования, но с более расширенными возможностями, поскольку интродуцированный слой обладает наследуемой биогенностью, элементами питания, «памятью почв» – свойстве, на которое неоднократно акцентировал внимание Г.В. Добровольский.

Сообщается, что технозёмы по прошествию 20-летнего сельскохозяйственного использования приближаются по основным агрохимическим показателям к фоновым почвам, за исключением азотного режима [4]. Количество нитратного азота в слое 0-10 см и 10-30 см технозёмов составляет 2,07 мг/100г и 1,85 мг/100г соответственно. Низкое содержание нитратов могло быть обусловлено хранением гумусированной массы в буртах [25], денитрификацией, вызванной присутствием гидрологического барьера над подстилающим техногенным субстратом. Нитраты химически не поглощаются, не формируют ни с одним другим присутствующим катионом трудно растворимые соединения, поэтому легко мигрируют с дождевыми и снеготальными водами. Транзит нитратов мог быть обусловлен отрицательной заряженностью полианионных глин, что позволяет им легко поглощать аммоний (NH_4^+), а нитратные ионы (NO_3^-) – оставаться в почвенном растворе. Помимо этого, высокое содержание в отвалах физической глины – до 50% [4], преобладание гидрослюдисто-монтмориллонитовых минералов, характеризующихся трехслойной кристаллической решеткой, которая расширяется при увлажнении, очевидно, благоприятствуют поглощению катионов, в том числе аммония, экстрамицелярно и интрамицелярно. Дефицит нитратных форм азота мог возникнуть также из-за недостатка содержания аммонифицирующих и строго специализированных нитрифицирующих бактерий (нитритных и нитратных) в связи с коагуляцией бактериальных дисперсий монтмориллонитом [33]. В сорбции могли принимать участие углистые частицы, являющиеся природными сорбентами микроорганизмов [41]. В свою очередь, тяжёлые металлы и полуметаллы могли ослабить процессы разложения азотсодержащих органических остатков.

Изучение микро- и макрокомпонентного состава почвогрунтов на рекультивированных территориях угольных шахт Донбасса выявило в них избыток Zn (выше оптимальных значений в почве для растений) и дефицит Cu [19]. В технозёмах Кузбасса, КАТЭКа, Хакасии по истечению 35-40-летнего срока их функционирования также обнаружено широкое разнообразие тяжёлых металлов и металлоидов [9] при высоких значениях концентраций некоторых из них. Сорбционная способность глин в отношении Pb^{2+} и Cu^{2+} в значительной степени определяется процессами ионного обмена [10]. В тетраэдрических позициях часть ионов кремния (Si^{4+}) замещается на ионы алюминия (Al^{3+}), в октаэдрических позициях – ионами Mg^{2+} и двухвалентного железа (Fe^{2+}). Ионы свинца Pb^{2+} могут находиться в межпакетном пространстве, а также на внешней поверхности глинистых минералов, а, значит, мигрировать в почвенный раствор. В прочносвязанной форме монтмориллонит удерживает около 10% металлов, остальные присутствуют в растворе в прикорневой зоне растений [42].

Повышенное содержание тяжёлых металлов и металлоидов обнаружено в корнеобитаемом слое травянистых растений на рекультивированных участках [5], у истока подотвальных вод [6]. Присутствие мышьяка в значительных количествах не случайно, поскольку месторождения угля в Западной Сибири арсеноносны.

В отвале Бейского угольного разреза (сухая степь, Минусинский бассейн) содержание As в среднем достигает 13,5 г/т, что значительно выше ПДК (2г/т) [1, 61]. Высокое содержание As и некоторых тяжёлых металлов обнаружено в фоновых почвах, эмбриозёмах 40-летних технозёмах и растениях Кузбасса, КАТЭКа и Хакасии [9]. В анаэробных условиях, например формирующихся в зоне контакта технозёма с породой, As может присутствовать в токсичной форме. Кроме того, в этой зоне гидрослюдисто-монтмориллонитовые минералы лессовидных покровных суглинков могли сорбировать широкий набор экотоксикантов, особенно хемогенным путём, в том числе 3-х и 6-валентные формы хрома, которые чрезвычайно генотоксичны и канцерогенны. О повышенном содержании хрома на отвалах Кузбасса сообщалось ранее [18].

В рекультивируемом слое отвала угольного разреза Чалпан, в зоне сухой степи Хакасии, обнаружены чрезвычайно высокие концентрации элементов различных классов опасности, что не позволило использовать его в сельскохозяйственных целях [1, 2]. При биотестировании в экспериментах с использованием тест-объектов: рачков *Daphnia magna*, инфузорий *Paramecium caudatum*, мушек *Drosophila melanogaster* и культуры клеток крови человека установлено негативное воздействие отвалов на живые объекты, оказывающее токсическое действие разной степени.

Снижению вредного действия экотоксикантов, как и повышению доступного минерального питания корням растений, в техногенных ландшафтах, уделяется много внимания. Используются традиционные способы и инновационные предложения.

Для искусственного возмещения утраченного плодородия, например, идёт поиск современных удобрений с «адресным» высвобождением нутриентов (CRF или SRF), приготовленных из минерала суглинков с добавлением мочевины [39]. Предполагается, что высвобождение азота из синтезированных удобрений будет происходить с разной скоростью. На начальной стадии будет расходоваться внешняя азотная микропенка или микропокрытие удобрений, после чего питательным веществом будет выступать интеркалированная и абсорбированная часть нутриента. Экспериментально установлено, что композиты, полученные путем механической активации смеси мочевины и монтмориллонита, подходят в качестве экологически безопасных, многофункциональных и комплексных минеральных удобрений. Более того, до 23,2 % азота обратимо включается в межслоевое пространство монтмориллонита. Около 20 % азота адсорбируется на поверхности минеральных частиц, около 5% – в микропоровом пространстве глинистых ультрамикроагрегатов [51, 52]. Однако нужно заметить, что процесс нитрификации должен быть строго контролируемым во избежание негативного действия мочевины на рост нитрифицирующих бактерий, как основных участников формирования нитратного фонда вокруг корней.

Заключение

«Услуги экосистем», базирующиеся на климаторегулирующих функциях и формировании глобального углеродного баланса, являются предметом учёта при

международной торговле квотами в рамках Киотского протокола. Не исключено, что в будущем количественные характеристики продукционных, средообразующих и других услуг почвенных экосистем, обретут адекватность их денежного эквивалента в регионах интенсивного многолетнего недропользования, окажутся уместными и учтёнными в долгосрочных проектах восстановления биоразнообразия и возобновления почвенного плодородия. Утраченный природный почвенный капитал будет оцениваться по реальной стоимости компенсационных затрат на возмещение его отдельных составляющих уже на этапе создания искусственных почвоподобных образований. При оценке расходов на восстановление былого качества почв будет признана значимость и специфики эдафических условий, определяющих почвенно-экологическое состояние любого техногенного ландшафта, даже если они относятся к одной категории [11]. Под почвенно-экологическим потенциалом техногенного ландшафта понимается его способность обеспечить перспективы развития почвообразовательных процессов, самовосстановления комплекса свойств и режимов почвы и, в конечном счёте, экосистемы в целом [4]. Биологическая рекультивация породных отвалов в районах отвалов должна учитывать остаточную токсичность субстратов, их жизнестойкость для биоты, реализовать ресурсосберегающие технологии землевания, рационально и целенаправленно использовать отчуждённый гумусированный слой почв. Этот ценный «продукт» почвообразования формировался эволюционно, тысячи лет и он быстро не восполняется. В степной зоне восстановление видовой обилия растений напрямую зависит от эдафического фактора [47]. При этом, эколого-ценотическая структура травянистых сообществ подтайги, лесостепи и степи в современной обстановке почвообразования смещена на одну ступень в сторону ксероморфизма. По нашим наблюдениям в составе диссоциантов азотобактерий в технозёмах по мере продвижения к степи возрастает доля морфотипов, адаптированных к иссушению и инсоляции. Возможно, в технозёмах юга Западной Сибири проявляются признаки миграции почвенных зон, обусловленные ослаблением атмосферного увлажнения и повышением континентальности климата, что в свою очередь влияет на растительность и проявление почвообразовательных процессов [21]. По-видимому, участки с технозёмообразованием можно будет рассматривать в будущем как экоклины.

Технозёмы с привнесённым гумусовым горизонтом – это искусственные почвы, близкие по своей конструкции, свойствам, артефактам и сельскохозяйственной ориентации к реферативной группе Антросоли (Antrosoils) международной системы почв WRB, которые в условиях сухой степи наиболее приближены к группе Ареносоли (Arenosoils). В них проявление эдафических услуг наиболее лимитировано климатическими условиями. Преднамеренное внедрение экологической реинтродукции – переселения (возврата) видов, ранее обитавших в лесостепной и степной зоне, но потом исчезнувших по вине человека, должно учиты-

вать особенности почвенной среды в условиях техногенеза. Улучшение корневого питания таких реинтродуцентов и ускорения их физиолого-биохимической адаптации к новым условиям обитания требует разных подходов. Искусственно созданные технозёмы – это не полнопрофильные почвы, а почвоподобные тела с двумя горизонтами. Верхний горизонт – привнесённый плодородный, нижний горизонт – это минеральная порода, медленно вовлекаемая в образование горизонта вымывания продуктов распада органических остатков, поэтому все биогенные запасы сосредоточены исключительно в нём. Высвобождающиеся при разложении органических остатков и гумуса элементы зольного и азотного питания быстро вовлекаются в биологический круговорот. Гумусообразование в технозёмах происходит в условиях напряжённости микробиологических процессов, особенно в степях. В них априори формируются менее сложные гумусовые вещества и подвижные гуминовые кислоты. Преобладание минерализации над гумификацией не способствует накоплению гумуса. Помимо всего сказанного важно обратить внимание на состав микробиоты, обеспечивающей протекание процессов минерализации, гумификации, азотфиксации, а также её метаболическую активность в корнеобитаемом слое технозёмов. Стабильности корневого питания растений в технозёмах будут способствовать микробные препараты, в составе которых присутствуют живые культуры ассоциативных и симбиотических микроорганизмов, продукты их метаболизма. Некоторые микроорганизмы и их инокулянты уже используются в биологической рекультивации нарушенных земель в районах угледобычи [52]. Другие представители рассматриваются как потенциал для биорекультивации, поскольку участвуют в преобразовании минерального субстрата [32], продуцируют соединения стимулирующего действия, участвуют в формировании симбиотрофных отношений [70], повышают стрессоустойчивость растений к абиотическим нагрузкам [63], в том числе солевым [67]. При разработке эффективных микробных биодобавок следует ориентироваться на высокоактивные штаммы и их адаптационные возможности. У разных видов и штаммов микроорганизмов предел адаптационных возможностей на используемый субстрат, экстремальные факторы среды (рН, ионы металлов и металлоидов) разный. Интродукция чужеродных штаммов в новые экосистемы, в том числе искусственно созданные почвоподобные тела, малоперспективна. Наиболее эффективными окажутся местные популяции, особенно их диссоциированные особи, наиболее адаптированные к новым условиям обитания, и, возможно, наиболее экологически безопасные.

Список источников

1. Азарова С.В. Отходы горнодобывающих предприятий и комплексная оценка их опасности для окружающей среды (на примере объектов республики Хакасия): Автореф. ... дис. канд. с.-х. наук: 25.00.36. Томск, 2005. 21 с.

2. Азарова С.В., Язиков Е.Г., Ильинских Н.Н. Оценка экологической опасности отходов горнодобывающих предприятий республики Хакасия с применением метода биотестирования // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 4. С. 55–59.
3. Александровский А.Л. Педогенез на датированных поверхностях: скорость ЭПП // История развития почв СССР в голоцене: Тез. докл. всес. научн. конф., Пуцино, 4–7 декабря 1984 г. / отв. за вып.: В.М. Алифанов, В.А. Демкин; отв. ред. О.В. Макеев. Пуцино: Научный центр биологических исследований [ИЦБИ] АН СССР, 1984. С. 54–56.
4. Андроханов В.А., Курачёв В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2010. 224 с.
5. Артамонова В.С., Бортникова С.Б. Биогеохимическая характеристика корнеобитаемого слоя травянистых растений на рекультивированных участках техногенных отходов // Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2022. Вып. 2. С. 155–163.
6. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Оплеухин А.В. Техногенное загрязнение почв подотвальными водами в районе угледобычи // Известия Коми научного центра УрО РАН. №4 (28). 2016. С. 38–45.
7. Архипов А.Л. Геоэкологическое и экогеохимическое состояние геологической среды Южно-Минусинской котловины (республика Хакасия): Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук: 25.00.36. Томск, 2011. 23 с.
8. Афанасьев Н.А. Процессы почвообразования в ходе сукцессии // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: Наука. 1993. С. 124–136.
9. Богуславский А.Е., Андроханов В.А., Колмагорова Ю.О., Ужогова А.А., Госсен И.Н., Саева О.П. Геохимический фон тяжёлых металлов в почвах и растениях на участках отвалов угольных месторождений // Известия АО РГО. 2021. №2 (61). С. 40–49.
10. Везенцев А.И., Трубицын М.А., Голдовская-Перистая Л.Ф., Воловичева Н.А. Сорбционная очистка почв от тяжёлых металлов // Научные ведомости Белгородского гос. университета. 2008. №3 (43). С. 172–175.
11. Гаджиев И.М., Курачев В.М., Андроханов В.А. Стратегия и перспективы решения проблем рекультивации нарушенных земель. Новосибирск: ЦЭРИС, 2001. 37 с.
12. ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения // Охрана природы земли. М.: Изд-во стандартов, 2002. 13 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/43745/?ysclid=lfbz3goau5835790447> (дата обращения: 17.03.2023).
13. ГОСТ 17.4.3.02-85. Охрана природы. Почвы. Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ. М.: Стандартинформ. 2008. 2 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004382> (дата обращения: 18.03.2023); URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/29224/> (дата обращения: 29.03.2023).
14. ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. М.: Стандартинформ. 2019. 23 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64416/> (дата обращения: 29.03.2023).
15. Дремова М.С., Яковченко М.А. Мониторинг фитоценозов рекультивированных земель Кемеровской области // Методы и методики мониторинга окружающей природной среды техногенных ландшафтов: материалы науч.-практ. семинара. Кемерово, 30 октября 2012 г. / отв. редкол.: И.А. Ганиева, Е.А. Ижмулкина. Кемерово: Кемеровский ГСХИ, 2012. С. 18–21.
16. Етеревская Л.В., Лехциер Л.В., Михневская А.Д., Ланта Е.И. Почвообразование в техногенных ландшафтах на лессовых породах // Техногенные экосистемы: организация и функционирование. Новосибирск: Наука, 1985. С. 107–134.
17. Закон СССР «Об утверждении Основ земельного законодательства Союза ССР и союзных республик», 1968. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=37756&ysclid=lfbzj1aafa481569980> (дата обращения: 27.03.2023).
18. Заушенцева А.И., Кожевников Н.В. Биорекультивационное районирование Кузбасса // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 1-2 (61). С. 20–25.
19. Зубова Л.Г., Харламова Ф.В. Эдафические условия рекультивированных терриконов // Агрэкологічний ж. 2012. С. 41–47. URL: <https://www.researchgate.net/publication/348714738> (дата обращения: 16.03.2023).
20. Кадычегова А.Н. Запасы азота в чернозёмах и каштановых почвах и его основные потоки в агроценозах Минусинской котловины: Автореф. ... дис. канд. с-х. наук: 03.00.27. Красноярск, 2008. 18 с.
21. Каллас Е.В. Почвоведение с основами геологии и агроэкологического землепользования. Часть II. Томск: ТГУ., 2011. URL: <https://soil.tsu.ru/wp-content/uploads/2020/05/.pdf> (дата обращения: 26.03.2023).
22. Кандрашин Е.П. Проведение сельскохозяйственной рекультивации земель, нарушенной при открытой добыче каменных углей в зонах степи, лесостепи и подтайги Сибири // Биологическая рекультивация земель в Сибири и на Урале. Новосибирск: Наука. 1981. С. 5–7.
23. Клёнов Б.М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео». 2000. 176 с.
24. Корсунов В.М. Автоморфное почвообразование в системе возвышенностей и кряжей восточного и юго-восточного окаймления Западно-Сибирской равнины: Автореф. ... дис. докт. биол. наук: 03.00.12. Новосибирск, 1984. 48 с.
25. Кожевников Н.В., Заушенцева А.В. Проблема хранения плодородного слоя почвы в горнодобывающей отрасли промышленности // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 1 (61). С. 10–14.
26. Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Куприянов О.А., Шатилов Д.А. Реконструкция почвенно-растительного слоя на поверхности отвалов в Кузбассе // Уголь. 2021. № 2. С. 46–52.

27. Куприянов А.Н., Уфимцев В.Н., Манаков Ю.А., Стрельникова Т.О., Куприянов О.А. Методические рекомендации по реставрации лугово-степной растительности в Кузбассе. Кемерово: КРЭОО «Ирбис», 2017. 28 с.
28. Куприянов А.Н., Куприянов О.А., Манаков Ю.А., Шатилов Д.А. Изменение продуктивности отвалов угольных предприятий Кузбасса при реконструкции растительного покрова // Ботаника. 2022. № 9(123). С. 1–6. URL: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.33> (дата обращения: 27.03.2023).
29. Кырова С.А., Швабенланд И.С., Кыров В.В. Геоэкологическая оценка территории Абакано-Черногорского промышленного района республики Хакасии // Вестник Томского государственного университета. 2007. № 304. С. 198–203. URL: https://sun.tsu.ru/rnminfo/000063105/304/im-age/304_198-203.pdf (дата обращения: 17.03.2023).
30. Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Агрофитоценозы на отвалах в южной части Кузнецкой котловины. Новосибирск: ЗАО ИПП «ОФСЕТ», 2010. 226 с.
31. Литвиненко В.С., Пашкевич Н.В., Шувалов Ю.В. Экологическая емкость природной среды Кемеровской области. Перспективы развития промышленности // Экобюллетень ИнЭка-консалтинг. 2008. № 3(128). С. 28–34. URL: <https://ineca.ru/index.php?dr=library&library=bulletin/2008/0128/009> (дата обращения: 20.03.2023).
32. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Влияние микроорганизмов на минеральный состав и свойства грунтов // Вестник Пермского университета. Серия Геология. 2012. Вып. 3 (16). С. 47–55.
33. Никовская Г.Н., Гарбара С.В. Коагуляция бактериальных дисперсий с помощью монтмориллонита // VI съезд Украинского микробиологического общества: Тез. докл. Донецк, июнь 1984 г. Киев: Наукова Думка. 1984. Ч. 1. С. 167.
34. Овчинников В.А. О снятии плодородного слоя почв и использовании его для повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий // Современные методы изучения, охраны и использования земель. М.: ГИЗР, 1975. С. 72–77.
35. Потапов В.А., Мазикин В.П., Счастливец Е.Л., Вашилаева Н.Ю. Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск: Наука. Сиб отделение, 2005. 660 с.
36. Просянкин В.И., Просянкина О.И. Агроэкологическая оценка агрогенных почв степного ядра лесостепи Кузнецкой котловины по содержанию тяжелых металлов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 12. С. 28–30.
37. Реймерс Н.Ф. Экология: теории, законы, правила, принципы и гипотезы. М.: Россия молодая. 1994. 367 с.
38. Рихванов Л.П., Язиков Е.Г., Арбузов С.И., Шатилов А.Ю., Язиков В.Г., Худяков В.М. Путеводитель по району геоэкологической практики в Хакасии. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 91 с.
39. Рудмин М.А., Рева И.В., Якич Т.Ю., Соктоев Б.Р., Буяков А.С., Табакаев Р.Б., Ибраева К. Монтмориллонит как перспективный композитный минерал для создания современных удобрений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 14–22.
40. Савостьянов В.К. Использование земель Хакасии и сопредельных территорий для ведения земледелия // Почвы Хакасии, их использование и охрана: материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию М.Г. Танзыбаева. Абакан, 19–20 января 2012 г. / отв. ред. В.К. Савостьянов. Абакан: ООО Кооператив “Журналист”, 2012. С. 199–209.
41. Салата О.В. Сравнительная оценка адсорбционных свойств природных сорбентов в отношении энтеровирусов // VI съезд Украинского микробиологического общества: Тез. докл. Донецк, июнь 1984 г. / отв. ред. В.В. Смирнов. Киев: Наук. Думка, 1984. Ч. 1. С. 171–172.
42. Середина В.П. Загрязнение почв. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 346 с.
43. Середина В.П., Овсянникова С.В. Оценка гумусного состояния почв естественных экосистем основных почвенно-географических зон Кузбасса // Вестник КрасГАУ. 2019. № 12. С. 32–37.
44. Томилин К.В. Оценка эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения региона // Экономика и предпринимательство. 2016, № 8(73). С. 536–541.
45. Трофимов С.С. Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 300 с.
46. Уфимцев В.И. Опыт и современное состояние лесной рекультивации в Кузбассе // Сибирский лесной ж. 2017. № 4. С. 12–27.
47. Уфимцев В.И., Андроханов В.А., Куприянов О.А., Уфимцев Ф.Г. Плодородный слой почвы как фактор восстановления зональных фитоценозов на отвалах угольной промышленности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 6. С. 64–71.
48. Уфимцев В.И., Куприянов А.И. Карбоновые фермы – отвалы угольных предприятий Кузбасса // Уголь. № 11. 2021. С. 56–69.
49. Уфимцев В.Н., Манаков Ю.А., Куприянов А.Н. Методические рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель на предприятиях угольной промышленности в Кузбассе. Кемерово: КРЭОО «Ирбис», 2017. 44 с.
50. Фарходов Ю.Р. Молекулярный состав лабильного и стабильного органического вещества типичных чернозёмов разного вида использования: Автореф. ... дис. канд. биол. наук: 03.02.13. М.: МГУ, 2022. 24 с.
51. Филисюк Г.Н. Получение и эффективность применения новой формы капсулированной мочевины под картофель на выщелоченном чернозёме Тюменской области: Автореф. ... дис. канд с.-х. наук: 06.01.04. Тюмень, 2004. 17 с.

52. Филисюк Г.Н. Экономическая эффективность применения капсулированной мочевины с ингибиторами уреазы при выращивании картофеля на выщелоченном черноземе Тюменской области // *Аграрная наука на современном этапе: Сб. науч. тр. Тюмень*, 2004. С. 178–181.
53. Харинковский А.А., Данилова М.Ю. Рекультивация земель в угольной промышленности // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. № 3. 2017. С. 72–77.
54. Хмельёв В.А., Танасиенко А.А. Чернозёмы Кузнецкой котловины. Новосибирск: Наука, 1983. 256 с.
55. Ческидов, Боблььский, 2017. Ческидов В.И., Боблььский А.С. Технологическо-экологические аспекты отвалобразования вскрышных пород на разрезах Кузбасса // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 5. С. 96–104.
56. Шаповаленко Г.Н. Итоги работы разреза «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакасия» за 2020 год и перспективы на 2021 год // *Уголь*. 2021. № 8. С. 23–25.
57. Швабенланд И.С., Карпухина И.В. К вопросу о рекультивации отвалов горнодобывающего предприятия «Черногорская угольная компания» // *Молодой учёный*. 2011. Т. 1, № 11(34). С. 94–98. URL: <https://moluch.ru/archive/34/3919/> (дата обращения: 19.03.2023).
58. Швабенланд И.С., Мажерский Ю.А. Геолого-почвенная характеристика Минусинского прогиба на примере Черногорского каменноугольного месторождения // *Агрохимический вестник*. 2011. № 6. С. 2–6.
59. Швабенланд И.С. *Запас лабильного органического вещества в почвах Хакасии // Геоэкологические проблемы почвоведения и оценки земель: материалы Международной научной конференции. Томск, 2012 г. / отв. ред. Л.И. Герасько. Томск: ТГУ, 2012. Т.1. С. 210–211.*
60. Шутько Л.Г., Самородова Л.Л. Углеродный след и эффект декаплинга в угледобыче Кузбасса // *Уголь*. № 2. 2022. С. 61–66.
61. Язиков Е.Г., Худяков В.М., Азарова С.В. Отвалы горнодобычного производства: комплексная оценка токсичности (на примере объектов Республики Хакасия) // *Известия вузов. Геология и разведка*. 2003. № 3. С. 93–97.
62. Anderson D.W. Early stages of soil formation on glacial till mine spoils in semiarid climate // *Geoderma*. 1977. Vol. 19. P. 11–19.
63. Baker R., Pokem D.S., Ilangumaran G., Lamont D., Praslikova D., Richchi E., Subramanian S., Svit D.L. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture // *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. 40 p. URL: <https://www.frontiersin.org/> (дата обращения: 15.06.2020).
64. Delgado J.A., Dillon M.A., Sparks R.T., Essah S.Y. A decade of advances in cover crops // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2007. Vol. 62. P. 110A–117A.
65. Delgado J., Barrera V., Alwang J., Villacis A., Ayala Y., Neer D., Monar C., López L. Potential use of cover crops for soil and water conservation, nutrient management and adaptation to climate change in the tropics // *Advances in agronomy*. Vol. 165. 2021. P. 175–247. <https://www.researchgate.net/publication/346870410>; <https://www.sciencedirect.com/bookseries/advances-in-agronomy> (дата обращения: 08.11.2022).
66. Delgado J.A., Gantzer C.J. The 4Rs for cover crops and other advances in cover crop management for environmental quality // *Journal of soil and water conservation*. 2015. Vol. 70. N. 6. P. 142A–145A.
67. Diagne N., Ndour M., Djighaly I.P., Ngom D., Ngom M. C. N., Ndong G., Svistoonoff S., Silini H.C. Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Salt Stress Tolerance of *Casuarina obesa* (Miq. // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020. Vol. 4. P. 1–8. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346966925> (дата обращения: 21.03.2023).
68. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of Post-Mining Disturbed Land: Review of Content and Comparative Law and Feasibility Study // *Resources*. 2020. Vol. 9 (6). N. 73. P. 1–17. URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/resources/resources-09-00073/article_deploy/resources-09-00073.pdf (дата обращения: 03.03.2023)
69. Keestra S., Nunes J., Novara A., Finger D., Avelar D. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 610. P. 997–1009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>
70. Lambers H., Mougel C., Jaillard B., Hinsinger Ph. Plant – microbe-soil interaction in the rhizosphere: an evolutionary perspective // *Plant Soil*. 2009. Vol. 321. P. 83–115.
71. Porwollik V., Rolinski S., Heinke J., Werner von Bloh., Schaphoff S., Müller C. The role of cover crops for cropland soil carbon, nitrogen leaching, and agricultural yields-A global simulation study with LPJmL (V. 5.0-tillage-cc) // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 9. 24 p. URL: <https://doi.org/10.5194/bg-2021-215> (дата обращения: 08.11.2022).

References

1. Azarova, S., 2005. *Okhody gornodobyvayushchej promyshlennosti i kompleksnaya ocenka ih opasnosti dlya okruzhayushchej sredy (na primere obyektov respubliky Hakassiya)* [Waste from the mining industry and a comprehensive assessment of their danger to the environment (on the example of objects of the Republic of Khakassia)]. Ph.D. (Agriculture). Abstract. Tomsk, 21 p. (in Russian)
2. Azarova, S., Yazikov, E. and Il'inskih, N., 2004. [Environmental hazard assessment of waste from mining enterprises of the Republic of Khakassia using the method of biotesting]. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 307, pp. 55–59. (in Russian)
3. Alexandrovsky, A., 1984. *Pedogenesis on dated surfaces: EPP speed*. In: Makeev, O. (ed.). *The history of the development of soils of the USSR in the Holocene: Proceedings of All-Russian Scientific Conference, 4-7 December, 1984, Pushchino, Russia*. Pushchino, Scientific Center for Biological Research [NCBI] of the USSR Academy of Sciences, pp. 54–56. (in Russian)

4. Androkhonov, V. and Kurachchev, V., 2010. *Pochvenno-ecologicheskoe sostoyanie tehnogennyh landshaftov: dinamika i ocenka* [Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment]. Novosibirsk, Publishing SB RAS. 224 p. (in Russian)
5. Artamonova, V., and Bortnikova S., 2022. Biogeochemical characteristics of the root layer of herbaceous plants on recultivated areas of technogenic waste. *Bulletin of the Perm University. Biology series*, 2, pp. 155–163. (in Russian).
6. Artamonova, V., Bortnikova S., and Opleukhin A., 2016. Technogenic pollution of soils by subsurface waters in the coal mining area. *Izvestiya Komi scientific Center UrO RAS*, 4(28), pp. 38–45. (in Russian)
7. Arkhipov, A. 2011. *Geologicheskoe i ekogeohimicheskoe sostoyanie geologicheskoy sredy Yuzhno-Minusinskoj kotloviny* [Geoecological and ecogeochemical state of the geological environment of the South Minusinsk basin (Republic of Khakassia): Ph.D. (Geologiya). Abstract. Tomsk, 23 p. (in Russian)
8. Afanasyev, N., 1993. *Processy pochvoobrasovaniya v hode sukcesii* [Processes of soil formation during succession]. *Sukcessii i biologicheskij krugovorot*. Novosibirsk, Nauka, pp. 124–136. (in Russian)
9. Boguslavsky, A., Androkhonov, V., Kolmagorova, Yu., Uzhegova, A., Gossen, I. and Saeva O., 2021. *Geohimichij fon tyazholyh metallov v pochvah i rasteniyah na uchastkah otvalov ugol'nyh mestorozhdenij* [Geochemical background of heavy metals in soils and plants in the areas of coal deposits dumps]. *Izvestiya AO RGO*, 2 (61), pp. 40–50. (in Russian)
10. Vezentsev, A., Trubitsyn, M., Goldovskaya-Peristaya, L. and Volovicheva, N., 2008. *Sorbcionnaya ochistka pochv ot tyazholyh metallov*. [Sorption purification of soils from heavy metals]. *Scientific Vedomosti Belgorod State university*. 3 (43), pp. 172–175. (in Russian)
11. Gadzhiev, I., Kurachev, V. and Androkhonov, V., 2001. *Strategiya i perspektivy resheniya problem rekul'tivacii narushennyh zemel'*. [Strategy and prospects for solving problems of recultivation of disturbed lands]. Novosibirsk, TSARIS, 37 p. (in Russian)
12. GOST 17.5.1.01-83. *Ohrana prirody. Recul'tivaciya zemel'. Terminy i opredeleniya*, 2002. [Nature conservation. Land reclamation. Terms and Definitions]. *Ohrana prirody zemli*. M.: Publishing House of standards, 13 p. Available from: <https://internet-law.ru/gosts/gost/43745/?ysclid=1fbz3goau5835790447> [Accessed: 17 Marth 2023].
13. GOST 17.4.3.02-85. *Ohrana prirody. Pochvy. Trebovaniya k ohrant plodorodnogo sloya pochvy pri proizvodstve zemlyanyh rabot*, 2008. [Nature conservation. Soil. Requirements for the protection of fertile soil layer in the production of earthwork]. *Ohrana prirody*. M.: Standartinform, 2 p. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200004382> [Accessed: 18 Marth 2023]; <https://internet-law.ru/gosts/gost/29224> [Accessed: 29 Marth 2023].
14. GOST R 57446-2017. *Nailuchshie dostupnye tehnologii. Rekultivaciya narushennyh zemel i zemelnyh uchastkov. Vosstanovlenie biologicheskogo raznoobraziya*, 2019. [The best available technologies. Reclamation of disturbed lands and land plots. Restoration of biological diversity]. M.: Standartinform, 23 p. Available from: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64416/> [Accessed: 29 Marth 2023].
15. Dremova, M., Yakovchenko, M., 2012. *Monitoring of phytocenoses of cultivated lands of the Kemerovo region*. In: *Ganieva, I. and Izmutina, E. (ed.). Methods and techniques for monitoring the natural environment of technogenic landscapes: Proceedings materials of scientific and practical seminar, 30 October 2012. Kemerovo, Russia. Kemerovo: Kemerovo State Agricultural Academy*, pp. 18–21. (in Russian)
16. Eterevsckaya, L., Lekhtsier, L., Mikhnevskaya, A. and Lapta, E., 1985. *Pochvoobrazovanie i tehnogennyh landshaftah na lessovyh porodah* [Soil formation in technogenic landscapes on loess rocks]. *Tehnogennye ekosistemy: organizatya i funkcionirovanie tkosistem*. Novosibirsk, Nauka, pp. 107–134. (in Russian)
17. *Zakon SSSR «Ob utverzhdenii Osnov zemel'nogo zakonodatel'stva Soyuza SSR i soyuznyh respublik*. [The Law of the USSR "On the approval of the Fundamentals of the land legislation of the USSR and the Union Republics"]. 1968. Moscow, VVC SSSR. 21 p. Available from: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=37756&ysclid=1fbzj1aafa481569980> (Accessed: 27 Marth 2023).
18. Zaushintsena, A. and Kozhevnikov, N., 2015. *Biorekul'tivazionnoe rajonirovanie Kuzbassa* [Biorecultivation zoning Kuzbass]. *Bulletin of Kemerovo State University*. 1-2(61), pp. 20–25. (in Russian)
19. Zubova, L. and Kharlamova, F., 2012. *Edafik usloviya rekul'tivirovannyh terrikonov*. [Edaphic conditions of recultivated landfills]. *Agroecologichny zh.*, pp.41–47. Available: <https://www.researchgate.net/publication/348714738> (Accessed: 16 Marth 2023).
20. Kadychegova, A., 2008. *Zapasy azota v chernozemah i kashtanovyh pochvah i ego osnovnye potoki v agrozenozah Minusinskoj kotloviny* [Nitrogen reserves in chernozems and chestnut soils and its mainflows in agroecosystems of the Minusinsk basin]. Ph. D. (Agriculture) Abstract. Krasnoyarsk. 18 p. (in Russian)
21. Kallas, E., 2011. *Pochvovedenie s osnovami geologii i agroekologicheskogo zemlepol'zovaniya* [Soil science with the basics of geology and agroecological land use]. Part II. Tomsk: TSU. Available from: <https://soil.tsu.ru/wp-content/uploads/2020/05/pdf> (Accessed: 26 Marth 2023).
22. Kandrashin, E., 1981. *Provedenie sel'skohozytstvennoj rekul'tivacii zemel, narushennyh pri otkrytoj dobyche kamennyh uglej v zonah stepi, lesosteoi i podtajgi Sibiri* [Carrying out agricultural recultivation of lands disturbed during open mining of coal in the steppe, forest-steppe and subtaiga zones of Siberia]. *Biologicheskaya rekul'tivaciya zemel v Sibiri i na Urale*. Novosibirsk: Nauka, pp. 5–7. (in Russian)
23. Klenov, B., 2000. *Ustojchivost' gumusa avtomorfnyh pochv Zapadnoj Sibiri* [Stability of humus of automorphic soils of Western Siberia]. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, Geo branch. 176 p. (in Russian)
24. Korsunov, V., 1984. *Avtomorfnoe pochvoobrasovanie v sisteme vozvyshehnostej i krazhej vostochnogo okajmleniya Zapadno-Sibirskoi ravniny* [Automorphic soil

formation in the system of hills and ridges of the eastern and southeastern framing of the West Siberian plain]. PH. D. (Soil science). Abstract. Novosibirsk. 48 p. (in Russian)

25. Kozhevnikov, N. and Zaushintsena A., 2015. Problema hraneniya plodorodnogo sloya pochvy v gornodobyvayushchej otrasli promyshlennosti [The problem of storage of the fertile soil layer in the mining industry // *Bulletin of Kemerovo State University*, 1 (61), pp. 10–14. (in Russian)

26. Kupriyanov, A., Manakov, Yu., Kupriyanov, O. and Shatilov D., 2021. Rekonstrukciya pochvenno-rastitel'nogo pokrova na povtrhnosti otvalov v Kuzbasse [Reconstruction of the soil-vegetation layer on the surface of dumps in Kuzbass]. *Coal*, 2, pp. 46–52. (in Russian)

27. Kupriyanov, A., Ufimtsev V., Manakov, Yu., Strelnikova, T. and Kupriyanov, O., 2017. Metodicheskie rekomendacii po restavracii lugovo-stepnoj rastitel'nosti v Kuzbasse [Methodological recommendations for the restoration of meadow-steppe vegetation in Kuzbass]. Kemerovo, KREOO "Irbis". 28 p. (in Russian)

28. Kupriyanov, A., Kupriyanov, O., Manakov, Yu. and Shatilov, D., 2022. Izmenenie produktivnosti otvalov ugol'nyh predpriyatij Kuzbassa pri rekonstrukcii rastitel'nogo pokrova [Changes in the productivity of dumps of coal enterprises of Kuzbass during the reconstruction of vegetation cover]. *Botany*, 9 (123), pp. 1–6. Available from: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.33> (Accessed: 27 March 2023). (in Russian)

29. Kyrova, S., Shvabenland I. and Kyrov V., 2007. Gtoekologicheskaya ozenka territorii Abakano-Chernogorskogo promyshlennogo rajona respubliki Hakasii [Geoecological assessment of the territory Abakan-Chernogorsky industrial district of the Republic of Khakassia]. *Tomsk State University Journal*, 6 p. Available from: https://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/304/image/304_198-203.pdf (Accessed: 17.03.2023) (in Russian)

30. Lamanova, T. and Sheremet N., 2010. *Agrofitocenozы na otvalah yuzhnoj chaste Kuzneckoj kotloviny* [Agrophytocenoses on dumps in the southern part Kuznetsk Basin]. Novosibirsk, Publishing house "Offset". 226 p. (in Russian)

31. Litvinenko, V., Pashkevich, N. and Shuvalov, Yu., 2008. Ekologicheskaya emkost' prirodnoj sredy Kemerovskoi oblasti. Perspektivy razvitiya promyshlennosti [Ecological capacity of the natural environment of the Kemerovo region. Industrial development prospects]. *Eco bulletin InEka-consulting*, 3(128), pp. 28–34. Available from: <https://ineca.ru/index.php?dr=library&library=bulletin/2008/0128/009> (Accessed: 20 Marth 2023). (in Russian)

32. Maksimovich, N. and Khmurchik V., 2012. Vliyanie mikroorganizmov na mineral'nyj sostav i svojstva gruntov [The influence of microorganisms on the mineral composition and properties of soils]. *Bulletin of the Perm University. Geology series*, 3(16), pp. 47–55. (in Russian)

33. Nikovskaya, G. and Garbara S., 1984. *Coagulation of bacterial dispersions using montmorillonite*. In: Collection of materials of VI Congress of the Ukrainian Microbiological Society June 1984, Donetsk. Kiev: Naukova Dumka, Part 1, p. 167. (in Russian)

34. Ovchinnikov, V., 1975. O snyatii plodorodnogo sloya pochv i ispol'zovanii ego dlya povysheniya produktivnosti sel'skohozyajstvennyh ugodij [On removing the fertile soil layer and using it to increase the productivity of agricultural land]. *Sovremennye metody izucheniya, ohrany i izpol'zovaniya zemel*. Moscow, GIZR, 1975, pp. 72–77. (in Russian)

35. Potapov, V., Mazikin, V., Shchastyantsev E. and Vashlaeva N., 2005. *Geoekologiya ugledobyvayushchih rajonov Kuzbassa* [Geoecology of coal mining areas of Kuzbass]. Novosibirsk, Nauka. 660 p. (in Russian)

36. Prosyannikov, V. and Prosyannikova, O., 2010. Agroekologicheskaya ozenka agrogennyh pochv stepnogo yadra lesostepi Kuzneckoj kotloviny po sodержaniyu tyazhelyh metallov [Agroecological assessment of agrogenic soils of the steppe core of the forest-steppe of the Kuznetsk basin on the content of heavy metals]. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 12, pp. 28–30. (in Russian)

37. Reimers, N., 1994. *Ekologiya: teorii, zakony, pravila, principy i gipotezy* [Ecology: theories, laws, rules, principles and hypotheses]. Moscow, Young Russia, 367 p. (in Russian)

38. Rikhvanov, L., Yazikov, E. Arbuzov, S., Shatilov, A., Yazikov, V. and Khudyakov V., 2012. *Putevoditel' po rajonu geologicheskoy praktiki v Hakasii* [Guide to the area of geoecological practice in Khakassia]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 91 p. (in Russian)

39. Rodmin, M., Reva, I., Yakich, T., Soktoev, B., Buyakov, A., Tabakaev, R. and Ibraeva, K., 2021. Monmorillonit kak perspektivnyj kompozitnyj mineral dlya sozdaniya sovremrnyh udobrenij [Montmorillonite as a promising composite mineral for the creation of modern fertilizers]. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, 332 (10), pp. 14–22. (in Russian)

40. *Savostyanov, V., 2012. The use of the lands of Khakassia and adjacent territories for Farming. Savostyanov, V. (ed.). Soils of Khakassia, their use and protection: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of M.G. Tanzybayev, 19–20 January 2012, Abakan, Russia. Abakan: LLC "Cooperative Journalist", pp. 199–209. (in Russian)*

41. Salata, O., 1984. *Comparative assessment of the adsorption properties of natural sorbents in relation to enteroviruses. Smirnov, V. (ed.). VI Congress of the Ukrainian Microbiological Society: Proceedings, Junio 1984, Donetsk, SSSR. Kiev: Nauk. Dumka, 1. pp. 171–172. (in Russian)*

42. Seredina, V., 2015. *Zagryaznenie pochv* [Soil pollution]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk University. 346 p. (in Russian)

43. Seredina, V., Ovsyannikova, S., 2019. Ozenka gumusnogo sostoyaniya pochv estestvennyh ekosistem osnovnyh pochvenno-geograficheskikh zon Repbassa [Assessment of the humus state of soils of natural ecosystems of the main soil-geographical zones of Kuzbass]. *Bulletin of KrasGAU*, 12, pp. 32–37. (in Russian)

44. Tomilin, K., 2016. Ozenka effektivnosti ispol'zovaniya zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya regiona [Evaluation of the efficiency of the use of agricultural land in the region]. *Economics and entrepreneurship*, 8 (73), pp. 536–541. (in Russian)

45. Trofimov, S., 1975. *Ekologiya pochv i pochvennye resursy Kemerovskoy oblasti* [Soil ecology and soil resources of the Kemerovo region]. Novosibirsk, Nauka, 300 p. (in Russian)
46. Ufimtsev, V., 2017. Opyt i sovremennoe sostoyanie lesnoj rekul'tivacii [Experience and current state of forest reclamation in Kuzbass]. *Siberian Forest railway*, 4, pp. 12–27. (in Russian)
47. Ufimtsev, V., Androkhanov V., Kupriyanov O. and Ufimtsev F., G. 2019. Plodorodnyj sloj pochvy kak factor vosstanovleniya zonal'nyh fitozonozov na otvalah ugol'noj promyshlennosti [Fertile soil layer as a factor of restoration of zonal phytocenoses on coal industry dumps]. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 6. pp. 64–71. (in Russian)
48. Ufimtsev, V. and Kupriyanov A., 2021. Karbonovye fermy – otvaly ugol'nyh predpriyatij Kuzbassa [Carbon farms – dumps of coal enterprises of Kuzbass]. *Coal*, 11, pp. 56–69. (in Russian)
49. Ufimtsev V., Manakov, Yu. and Kupriyanov A., 2017. Metodicheskie rekomendacii po lesnoj rekul'tivacii narushennyh zemel' na predpriyatiyah ugol'noj promyshlennosti v Kuzbasse [Methodological recommendations on forest reclamation of disturbed lands at coal industry enterprises in Kuzbass]. Kemerovo, "Irbis". 44 p. (in Russian)
50. Farkhodov, Yu., 2022. Molekulyarnyj sostav labil'nogo i stabil'nogo organicheskogo veshchestva tipichnyh chernozemov raznogo vida ispol'zovaniya [Molecular composition of labile and stable organic matter of typical chernozems of different types of use]: Ph. D. (Soil science) Abstract. Moscow: MSU, 24 p. (in Russian)
51. Filisyuk G., 2004. Poluchenie i effektivnost' primeneniya novoj formy kapsulirovannoj mocheviny pod kartofel' na vyshchelochennom chernozrme Tyumenskoj oblasti [Obtaining and efficiency of application of a new form of encapsulated urea for potatoes on leached chernozem of the Tyumen region]. Ph. D. (Agrochemistry) science: Abstract. Tyumen, 17 p. (in Russian)
52. Filisyuk, G., 2004. Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya kapsulirovannoj mocheviny s inhibitorami ureazy pri vyrashchivanii kartofelya na vyshchelochennom chernozeme Tyumenskoj oblasti [Economic efficiency of the use of encapsulated urea with urease inhibitors when growing potatoes on leached chernozem of the Tyumen region]. *Agrarnaya nauka na sovremennom etape*. Tyumen, 2004, pp. 178–181. (in Russian)
53. Kharionovsky, A. and Danilova, M., 2017. Rekul'tivaciya zemel' v ugol'noj promyshlennosti. [Land reclamation in the coal industry]. *Industrial Safety*, 3, pp. 72–77. (in Russian)
54. Khmelev, V. and Tanasiyenko, A., 1983. Chernozemy Kuznezkoj kotloviny. [Chernozems of the Kuznetsk basin]. Novosibirsk, Nauka. 256 p. (in Russian)
55. Cheskidov, V. and Bobylsky, A., 2017. Tehnologo-ekologicheskie aspekty otvaloobrasovaniya vskryshnyh porod na razresah Kuzbassa [Techno-ecological aspects of overburden formation in Kuzbass sections]. *Physico-technical problems of mineral development*, 5, pp. 96–104. (in Russian)
56. Shapovalenko, G., 2021. Itogi raboty razreza "Chernogorskiy" OOO "SUEK-Hakasiya" za 2020 god i perspektivy na 2021 god [Results of the work of the Chernogorsky section of SUEK-Khakassia LLC for 2020 and prospects for 2021]. *Coal*, 8, pp. 23–25. (in Russian)
57. Shvabenland, I., Karpukhina I., 2011. K voprosu o rekul'tivacii otvalov gornodobyvayushchego predpriyatiya "Chernogorskaya ugol'naya kompaniya" [On the issue of recultivation of dumps of the mining enterprise "Montenegrin coal Company". *Young scientist*, 1, 11(34), pp. 94–98. (in Russian)
58. Shvabenland, I. and Majorsky, Yu., 2011. Gtologo-pochvennaya harakteristika Minusinskogo progiba na primere Chernogorskogo kamennougol'nogo mestorozhdeniya [Geological and soil characteristics of the Minusinsk trough on the example of the Montenegrin coal deposit]. *Agrochemical Bulletin*, 6. pp. 2–6. (in Russian)
59. Shvabenland, I., 2012. Reserves of labile organic matter in the soils of Khakassia. In: Gerasjko, L. (ed.). *Geoecological problems of soil science and land assessment: Proceedings of the International Scientific Conference, 2012, Tomsk, Russia. Tomsk: TSU. Bd.1, pp. 210–211. (in Russian)*
60. Shutko, L. and Samorodova, L., 2022. Uglerodnyj sled i effekt dekaplinga v ugledobyche Kuzbassa [Carbon footprint and decoupling effect in Kuzbass coal mining]. *Coal*, 2, pp. 61–66. (in Russian)
61. Yazikov, E., Khudyakov, V. and Azarova S., 2003. Otvaly gornodobychnogo proizvodstva: kompleksnaya ocenka toksichnosti (na primtre obyektov Respubliki Hakaciya [Dumps of mining production: a comprehensive assessment of toxicity (on the example of objects of the Republic of Khakassia)]. *Izvestiya vuzov. Geology and exploration*, 3, pp. 93–97. (in Russian)
62. Anderson, D. 1977. Early stages of soil formation on glacial till mine spoils in semiarid climate. *J. Geoderma*. 19, pp. 11–19.
63. Baker, R., Pokem, D., Ilangumaran, G., Lamon, D., Praslikova, D., Richchi, E., Subramanian, S. and Svit D. 2018. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*. 9. 40 p. Available from: <https://www.frontiersin.org/>
64. Delgado, J., Dillon M., Sparks R. and Essah S., 2007. A decade of advances in cover crops. *Journal of Soil and Water Conservation*. 62. P. 110A-117A.
65. Delgado, J., Barrera, V., Alwang, J., Villacis, A., Ayala, Y., Neer, D., Monar, C. and López L. 2021. Potential use of cover crops for soil and water conservation, nutrient management and adaptation to climate change in the tropics. *Advances in agronomy*. 165. P. 175–247. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/346870410>; <https://www.sciencedirect.com/bookseries/advances-in-agronomy>
66. Delgado, J. and Gantzer, C. 2015. The 4Rs for cover crops and other advances in cover crop management for environmental quality. *Journal of soil and water conservation*. 70(6). P. 142A–145A.
67. Diagne, N., Ndour, M., Djighaly I., Ngom, D., Ngom, M., Ndong, G., Svistoonoff, S. and Silini H., 2020. Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Salt Stress

Tolerance of *Casuarina obesa* (Miq). *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 4. P. 1–8. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/346966925>

68. Ignatyeva, M., Yurak, V., Pustokhina, N., 2020. Recultivation of Post-Mining Disturbed Land: Review of Content and Comparative Law and Feasibility Study. *Resources*. 9(6). P. 1–17. Available from: https://mdpi-res.com/d_attachment/resources/resources-09-00073/article_deploy/resources-09-00073.pdf

69. Keestra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D. and Avelar D., 2018. The superior effect of nature based solu-

tions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*. 610. P. 997–1009. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>

70. Lambers, H., Mougel, C., Jaillard, B., Hinsinger Ph., 2009. Plant – microbe-soil interaction in the rhizosphere: an evolutionary perspective. *Plant Soil*. 321. P. 83–115.

71. Porwollik, V., Rolinski, S., Heinke, J., Werner von Bloh., Schaphof, S. and Müller C., 2021. The role of cover crops for cropland soil carbon, nitrogen leaching, and agricultural yields-A global simulation study with LPJmL (V. 5.0-tillage-cc). *Biogeosciences*. 9. 24 p. Available from: <https://doi.org/10.5194/bg-2021-215>

Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 22.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.

The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 22.04.2023; accepted for publication 28.04.2023.