ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(9):36-52
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.53.062.4, 504.064.45 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_36

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННЫХ ПОЧВОГРУНТОВ НА ОСНОВЕ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.В. Быкова[1], Д.М. Малюхин[2]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Bykova_MV@pers.spmi.ru
[2] ООО «НПК ЭкоДрайв», Ленинградская область, г.п. Тайцы, Россия

Аннотация: Представлен анализ проблемы рекультивации нарушенных земель, обоснована необходимость наращивания объема работ по восстановлению качества земель и расширения ассортимента плодородных почв и смесей, в частности, на основе осадков сточных вод. В качестве объекта исследований использовался разработанный ранее авторами техногенный почвогрунт, для которого проведено фитотестирование по оценке качественной и количественной реакции растений. В процессе проведения долгосрочного вегетационного опыта (210 сут) выявлено, что средние показатели всхожести семян райграса пастбищного (Lolium perenne) на техногенном почвогрунте по сравнению с контрольными почвами (дерново-подзолистой и искусственной стандартной) выше на 13,5 и 5,5% соответственно, суммарный прирост зеленой биомассы достигает 41 и 26% соответственно, а содержание тяжелых металлов в сухом веществе полученных образцов растений находится в пределах нормальных колебаний. При исследовании процентного изменения прорастания семян, роста корней и ростков относительно стандартной почвы с использованием в качестве тест-растений сорго двуцветного (Sorghum saccharatum (L.) Moenc), кресс-салата (Lepidium sativum L.) и горчицы белой (Sinapis alba L.) для всех тест-растений в совокупности выявлено увеличение всхожести семян в среднем на 13%, стимулирование процессов роста корней на 48%, а ростков на 31%. Таким образом, доказано, что разработанный техногенный почвогрунт потенциально пригоден для рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: рекультивация нарушенных земель, ресурсосберегающий подход, осадки сточных вод, вторичное использование отходов, плодородный слой почв, фитотестирование, продуктивность растений, фитотоксичность.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

Для цитирования: *Быкова М. В., Малюхин Д. М.* Оценка потенциала техногенных почвогрунтов на основе осадка сточных вод для рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 36–52. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_36.

© М.В. Быкова, Д.М. Малюхин. 2025.

Manmade soil created using waste water mud: The potential for reclamation of mining-disturbed land

M.V. Bykova[1], D.M. Malyukhin[2]

[1] Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: Bykova_MV@pers.spmi.ru

[2] Limited Liability Company «RPC EcoDrive», Leningrad region, Taitsy settlement, Russia

Abstract: The article analyzes the issues of the disturbed land reclamation and justifies the need to boost the land rehabilitation activities and to increase the stock of types of fertile soil and mixed soil, in particular, created using waste water mud. The subject of research was the manmade soil created by the authors earlier. It was subjected to qualitative and quantitative phytotesting. The long-term plant growth experiment (210 days) shows that germination capacity of perennial ryegrass (Lolium perenne) on the manmade soil as compared with the reference types of humic pod and standard artificial soil is higher by 13.5 and 5.5%, respectively, the total green biomass buildup is 41 and 26%, respectively, and the content of heavy metals in the dried test plants is within the standard variation limit. The comparative seed germination, root elongation and sprouting with the proposed and standard soil types using test plants of sorghum (Sorghum saccharatum (L.) Moenc), garden cress (Lepidium sativum L.) and white mustard (Sinapis alba L.) shows the increase by 13% in germination capacity, by 48% in root elongation and by 31% in sprouting. On this basis, it is proved that the proposed manmade soil has a potential for the reclamation of land disturbed by the mining production.

Key words: disturbed land reclamation, resource-saving approach, waste water mud, waste recycling, fertile soil layer, phytotesting, plant productivity, phytotoxicity.

Acknowledgements: The study was carried out under state contract with the Ministry of Science and Higher Education, contract no. FSRW-2024-0005.

For citation: Bykova M. V., Malyukhin D. M. Manmade soil created using waste water mud: The potential for reclamation of mining-disturbed land. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(9): 36-52. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_36.

Введение

Согласно официальной информации, представленной в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году», нарушение земель в процессе добычи полезных ископаемых является одной из основных причин снижения уровня плодородия почв. Разрушение почвенного покрова и значительная антропогенная нагрузка в виде загрязнения территорий приводит к целому ряду негативных последствий, проявляющихся изменением гидрологического режима и качественного состава земель, при этом не только в зоне непосредственной деятельности горнодобывающих предприятий, но и на прилегающих участках [1—3]. Деградированные территории со временем становятся более восприимчивы к ветровой и водной эрозиям, что приводит к формированию техногенных ландшафтов [4—6]. Следует отметить, что отличительной особенностью дегенеративных процессов в почвах при добыче и переработке полезных ископаемых является резкий переход от ненарушенного состояния до очень высокой степени деградации по сравнению с естественными процес-

сами истощения, протекающими последовательно [7—9]. Наиболее устойчивые негативные последствия отмечаются на крайне уязвимых территориях Арктических зон Российской Федерации, где помимо высокой скорости деградации существует проблема ее низкой обратимости из-за короткого вегетационного периода, низких показателей адаптационных, буферных и регенерационных свойств экосистемы, обуславливающих способность к самовосстановлению [10—12].

Добывающая промышленность имеет огромное значение для государства, оказывая влияние на различные аспекты его эффективного функционирования в сфере экономики, политики, безопасности и социального обеспечения. Таким образом, несмотря на негативные последствия для компонентов природной среды, наблюдается постоянное развитие и наращивание темпов производства в горнодобывающей промышленности для удовлетворения нужд государства и населения, что ежегодно приводит к отчуждению и нарушению значительных площадей плодородных земель.

Согласно официальным данным, опубликованным Федеральной службой государственной статистики в Статистическом сборнике «Охрана окружающей среды в России, 2024», в сфере разработки месторождений полезных ископаемых за период с 2019 по 2023 гг. количество нарушенных земель увеличилось на 504,6 тыс. га, при этом рекультивировано было всего 252,3 тыс. га. Становится очевидным, что скорость образования нарушенных земель значительно превышает темпы их рекультивации, что способствует увеличению накопленного экологического вреда окружающей среде и требует наращивания объема работ, связанных с восстановлением качества земель.

Основной целью при проведении рекультивации нарушенных земель является создание благоприятных условий для формирования устойчивой наземно-почвенной экосистемы, способной обеспечить непрерывное микробно-растительное взаимодействие, аккумуляцию биофильных элементов и поддержание буферной функции почв в долгосрочной перспективе [13—15]. Важную роль для достижения этой цели играет подготовка нарушенных территорий к биологическому этапу рекультивации, а именно — нанесение плодородного слоя почв (далее — ПСП). Согласно ГОСТ 17.4.3.02-85, при производстве земляных работ обязательным требованием является снятие и рациональное использование ПСП для дальнейшего нанесения на малопродуктивные территории и для восстановления плодородия рекультивируемых земель. Несмотря на это, зачастую наблюдается дефицит плодородного слоя почв в тех количествах, которые необходимы для реализации полноценного комплекса мер по восстановлению отработанных участков и оздоровления прилегающих деградированных земель, что может быть связано с наличием значительных площадей, подвергшихся антропогенному воздействию в результате деятельности горнодобывающей промышленности без предварительного снятия и складирования ПСП [16, 17].

Таким образом, с учетом того, что почвенный слой является ценным и медленно возобновляющимся природным ресурсом, одним из аспектов, положительно влияющих на темпы восстановления нарушенных земель, является расширение ассортимента материалов, пригодных для использования при подготовке территорий и в процессе биологического этапа рекультивации, а также позволяющих нормализовать водные, воздушные, тепловые, питательные и др.

почвенные режимы [18, 19]. При этом все больше внимания уделяется ресурсосберегающему подходу, позволяющему рационально использовать для этих целей вторичные материалы. Современные исследования в данной области направлены в первую очередь на ресурсный потенциал отходов различного происхождения, из которых могут быть получены органоминеральные удобрения и мелиоранты [20—22], питательные добавки и полноценные почвогрунты [23, 24].

Широкий перечень отходов, образующихся ежедневно, позволяет разработать различные варианты питательных смесей, однако зачастую состав отходов ограничивает их применимость по качественному или количественному содержанию полезных компонентов. С данной точки зрения наиболее перспективное направление исследований связано с переработкой осадков сточных вод (далее — ОСВ), которые являются источником комплекса основных макроэлементов (минерального азота, подвижного фосфора, обменного калия, подвижной серы, кальция и магния), мезоэлементов и микроэлементов (металлов, в т.ч. тяжелых) для растений, способных обеспечить устойчивое формирование ПСП при соблюдении установленных санитарно-эпидемиологических норм для почв [25—27]. Существующие исследования по использованию переработанных ОСВ в качестве питательных добавок подтверждают эффективность их внесения на малопродуктивные территории [28, 29].

Данные факты свидетельствуют об экологической и экономической целесообразности использования ОСВ. При комплексном подходе к их переработке с использованием технологий, позволяющих получить безопасный в санитарно-эпидемиологическом отношении продукт, может быть реализован ресурсосберегающий подход при проведении рекультивации. Следует отметить, что при восстановлении качества земель крайне важно, чтобы используемые плодородные смеси и добавки обеспечивали питание растений в течение всего вегетационного периода для формирования устойчивого ПСП и предотвращения эрозийных процессов, а также чтобы отсутствовало проявление фитотоксичности в виде замедленного роста и, как следствие, уменьшения продуктивности. Таким образом, целью данного исследования является оценка полученного ранее техногенного почвогрунта на основе ОСВ [27, 30] на предмет его потенциальной пригодности для рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследований использовался полученный ранее авторами техногенный почвогрунт, представляющий собой смесь биокомпоста (органической части) и кварцевого песка (минеральной части) в соотношении (20—60):(80—40) мас.%. Биокомпост представляет собой продукт пассивного компостирования отходов различного происхождения (ОСВ, опилки чистой древесины, кормовые отходы, торф, отходы грунта) при массовом соотношении компонентов 32,5:35:6,5:13:13 соответственно. В табл. 1 представлена характеристика полученного ранее биокомпоста [27, 30].

Массовое содержание биокомпоста в конечном продукте может варьироваться в зависимости от целей использования и необходимой степени плодородия, при этом полученный техногенный почвогрунт, в соответствии с МУ 2.1.7.730-99, относится к категории чистых почв и может быть использован на территориях зон рекреации (парки,

Таблица 1

Характеристика полученного биокомпоста
Characteristics of the obtained biocompost

Определяемый показатель	Единицы измерения	Значение
Санитарно-гигиенические показатели		
Цинк	мг/кг	265
Свинец	мг/кг	35
Медь	мг/кг	123
Кадмий	мг/кг	0,7
Ртуть	мг/кг	менее 0,02
Марганец	мг/кг	639
Молибден	мг/кг	4,4
Железо	мг/кг	30 900
Алюминий	мг/кг	48 500
Магний	мг/кг	11 200
Кальций	мг/кг	38 700
Нефтепродукты	мг/кг	160
Фенолы летучие	мг/кг	1,8
Цианиды	мг/кг	менее 0,5
Бактериологические и паразитологические показатели		
Лактозоположительные кишечные палочки	КОЕ/г	10
Энтерококки (фекальные стрептококки)	КОЕ/г	10
Патогенные бактерии, в том числе сальмонеллы	–	не обнаружено
Яйца и личинки гельминтов (жизнеспособных)	–	не обнаружено
Цисты кишечных патогенных простейших	–	не обнаружено
Личинки и куколки синантропных мух	–	не обнаружено
Агрохимические показатели		
Органическое вещество	%	60
Минеральный азот (аммонийный и нитратный)	мг/кг	145
Подвижный фосфор (в пересчете на P_2O_5)	мг/кг	3500
Обменный калий (в пересчете на K_2O)	мг/кг	1700
Реакция среды (обменная кислотность)	ед. pH	6,8

скверы и др.), зон санитарной охраны водоемов, санитарно-защитных зон и др. [27, 30].

Для оценки потенциала техногенного почвогрунта в качестве материала для формирования ПСП при проведении рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности был проведен ряд исследований.

Одним из основных аспектов, обуславливающих потенциал плодородных смесей для рекультивации, является их способность обеспечивать питание растений на протяжении всего вегетаци-

онного периода. В первую очередь на продуктивность и качественное состояние растительных сообществ влияет наличие макро- (N, P, K), мезо- (S, Ca, Mg) и микроэлементов в почвенных субстратах. Среди микроэлементов, необходимых для роста и развития растений, особую роль занимают тяжелые металлы, которые способствуют усваиванию макро- и мезоэлементов, формированию здоровых растений и высокой продуктивности [28, 31, 32].

Таким образом, показатели продуктивности биомассы и здорового состояния растений можно рассматривать как основополагающие при оценке достаточности содержания питательных веществ в техногенном почвогрунте в течение длительного промежутка времени, что было реализовано посредством постановки долгосрочного вегетационного опыта. В соответствии с Методическими указаниями по количественному определению объема поглощения парниковых газов (утв. Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р) максимальная длительность вегетационного периода на территории РФ составляет порядка 7 месяцев.

Исходя из этого, период проведения долгосрочного вегетационного опыта составил 210 дней, так как в случае выявления высокой продуктивности в течение максимального периода можно говорить о данных тенденциях и на территориях, где длительность вегетационного периода ниже.

В качестве опытных субстратов были использованы составы техногенного почвогрунта, в качестве контрольных почв (субстратов сравнения) — дерново-подзолистые почвы (подтип подзолистых почв, распространенных на территории Ленинградской обл., незагрязненные) и стандартная искусственная почва, приготовленная в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Каждый субстрат закладывался в вегетационные сосуды в трехкратной повторности. В качестве тест-культуры использовался райграс пастбищный (Lolium perenne), засеивалось равное количество семян с учетом нормы высадки согласно рекомендациям производителя.

Для создания и поддержания однородных условий долгосрочного вегетационного опыта использовался фитостеллаж 79-03-04 LD (НЛО), влажность субстратов поддерживалась на уровне 60% от полной водоемкости. Внешний вид засеянных семенами опытных субстратов и субстратов сравнения представлен на рис. 1.

В качестве оцениваемого показателя продуктивности использовалась величина биомассы надземной части растений (зеленой биомассы) в каждом из исследуемых вегетационных сосудов. Срезание зеленой биомассы проводилось через каждые 30 сут идентичным образом на уровне 2 см от поверхности субстратов (рис. 2, *а*) с последующим определением массы при помощи лабораторных весов CP 153 (Sartorius), при этом перед первым срезом дополни-

БК – биокомпост; П – кварцевый песок; ДПП – дерново-подзолистая почва; СП – стандартная почва

Рис. 1. Внешний вид опытных субстратов и субстратов сравнения

Fig. 1. External appearance of experimental substrates and comparison substrates

тельно оценивались показатели максимальной высоты зеленой биомассы и всхожести семян.

Несмотря на отсутствие превышения ПДК по тяжелым металлам в исследуемых субстратах, дополнительно было проведено определение их содержания в зеленой биомассе для оценки процесса биоаккумуляции и доступности микроэлементов для растений. После фиксации максимальной высоты и величины зеленой биомассы каждого среза полученный материал промывался в дистиллированной воде, высушивался до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу LF-60/350-VS2 (LOIP) при температуре 60—65 °C, измельчался в шаровой мельнице 8000D (SPEX SamplePrep) (рис. 2, *б*) и подвергался процедуре мокрого озоления в системе разложения проб Digiblock ED36S (LabTech). Определение содержания тяжелых металлов проводилось при помощи спектрометра эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 (Shimadzu) или атомно-абсорбционного спектрометра AA-7000 (Shimadzu) [33].

Ввиду того, что исследуемые субстраты имеют техногенное происхождение, крайне важно дополнительное проведение их оценки по показателю фитотоксичности, которая могла не проявиться в процессе долгосрочного вегетационного опыта при использовании в качестве текст-объекта райграса пастбищного, а также с учетом того, что оценивалось образование только зеленой биомассы и не оценивалось влияние на корневую систему. Исходя из этого, были реализованы исследования по определению возможного токсического воздействия составов техногенного почвогрунта на всхожесть и рост на ранних стадиях развития высших растений в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Тест-растениями являлись семена сорго двуцветного (Sorghum saccharatum (L.) Moenc), кресс-салата (Lepidium sativum L.) и горчицы белой (Sinapis alba L.) (рис. 3). Тестирование субстратов выполнялось в трехкратной повторности для каждого вида семян. Исследуемые субстраты аналогичные, как и при проведении долгосрочного вегетационного опыта, в качестве контрольной почвы использована стандартная почва, приготовленная в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763-2019. По истечении 72 ч проращивания семян тест-растений были получены их изображения путем цифровой съемки для дальнейшей обработки при помощи программного обеспечения Image J.

При обработке изображений фиксировались такие показатели, как количество проросших семян (NS), длина кор-

Рис. 2. Подготовка зеленой биомассы к лабораторным исследованиям: срезание для оценки продуктивности (а); измельчение для определения содержания тяжелых металлов (б)

Fig. 2. Preparation of green biomass for laboratory research: cutting to assess productivity (a); grinding to determine the content of heavy metals (b)

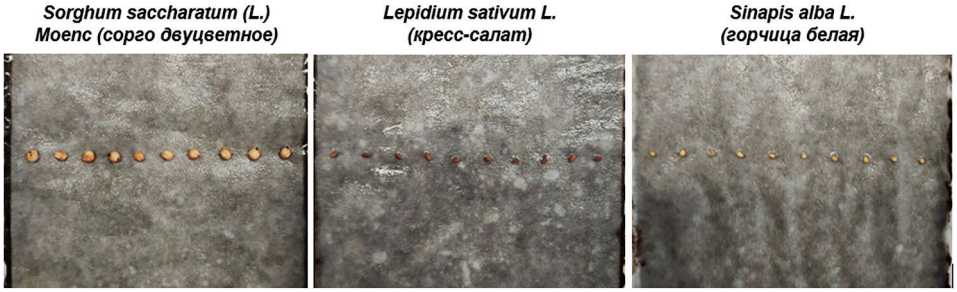


Рис. 3. Пример подготовленных планшетов с семенами тест-растений
Fig. 3. Example of prepared containers with test plant seeds

ня каждого проросшего семени (LR), средняя длина корня проросших семян (MLR), длина самого длинного корня (LLR), длина ростка каждого проросшего семени (LS), средняя длина ростка проросших семян (MLS), длина самого длинного ростка (LLS). На рис. 4 представлен пример цифровой обработки.

Для расчета процентного изменения прорастания семян, роста корней и ростков на исследуемых субстратах в сравнении с контрольной почвой для каждых трех повторений каждого тест-растения использовались следующие показатели: среднее количество проросших семян (MS), средняя длина корней (MMLR) и ростков (MMLS), средняя длина самого длинного корня (MLLR) и ростка (MLLS).

Результаты исследований и обсуждение

Результаты, полученные после среза зеленой биомассы на 30-е сутки проведения долгосрочного вегетационного опыта (рис. 5), позволили установить общие положительные тенденции по показателям всхожести семян, величины зеленой биомассы и ее максимальной высоты в исследуемых субстратах. При увеличении содержания биокомпоста в исследуемых субстратах наблюдается повышение всхожести (20 масс.% всхожесть составляет 94,7%; 30 масс.% —

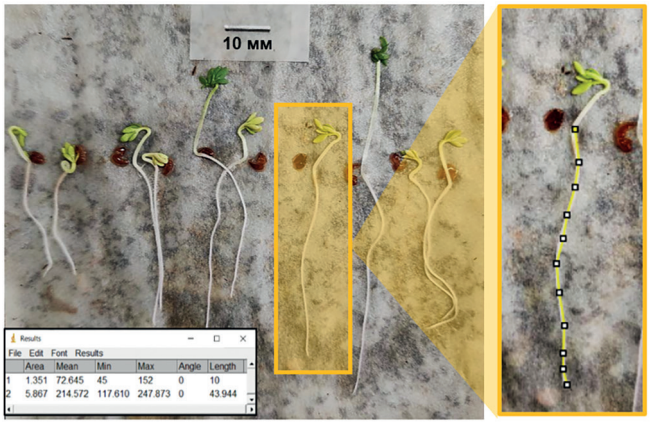
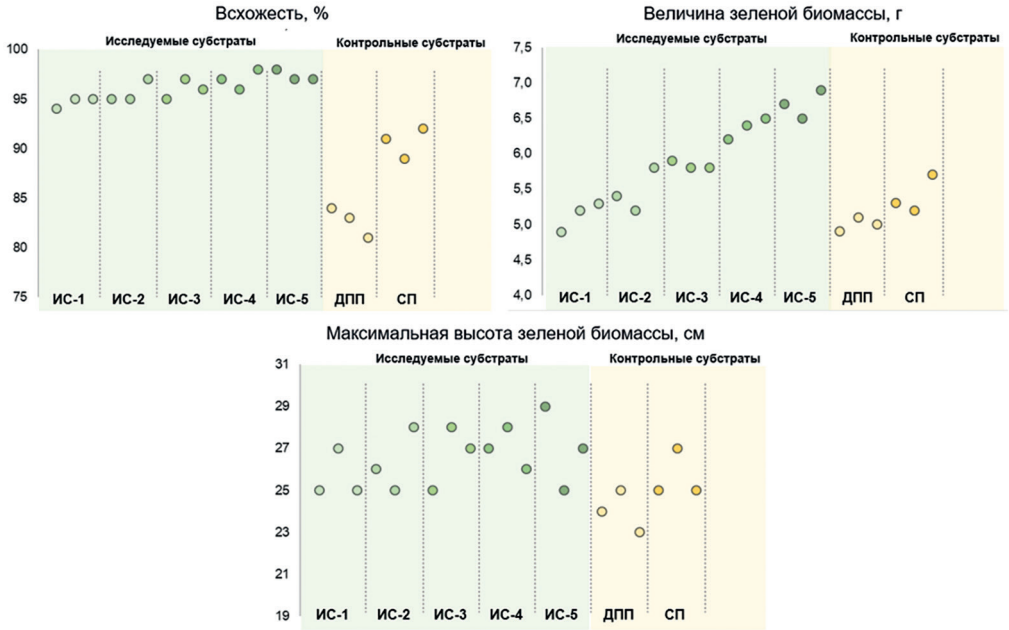


Рис. 4. Пример цифровой обработки длины корней проросших семян горчицы белой (Sinapis alba L.) на подготовленном субстрате БК:П (20:80)
Fig. 4. An example of digital processing of the root length of germinated white mustard seeds (Sinapis alba L.) on a prepared substrate BC:S (20:80)

95,7%; 40 масс.% — 96,0%; 50 масс.% — 97,0%; 60 масс.% — 97,3%). Средняя всхожесть на всех исследуемых субстратах выше, чем на контрольных (на 13,5% по отношению к ДПП, на 5,5% — к СП). Отмечено значительное увеличение зеленой биомассы при содержании биокомпоста 60 масс.% (на 34% по отношению к ДПП, на 24% — к СП), при содержании 20—40 масс.% показатель величины зеленой биомассы близок к значениям на контрольных субстратах. Что касается показателя максимальной высоты, отмечается незначительная разница между исследуемыми и контрольными субстратами. Полученные результаты в каждой повторности исследуемых и контрольных субстратов характеризуются низкими значениями рассеяния (всхожесть: S^2 варьируется в пределах 0,3—2,3 (СКО от 0,6 до 1,5%); величина зеленой биомассы: S^2 в пределах 0,05—0,15 (СКО от 0,1 до 0,3 г); максимальная высота зеленой биомассы: S^2 в пределах 1,0—3,9 (СКО от 1,0 до 2,0 см)).

Величина зеленой биомассы, полученной в течение всего долгосрочного вегетационного опыта, показала общую тенденцию к снижению продуктивности от среза к срезу, что является ожидаемым результатом в условиях ограниченного вегетационными сосудами пространства и отсутствия питательного режима почв (процессы поступления, накопления и трансформации питательных веществ), который формируется в естественных природных условиях в результате взаимодействия почв с другими компонентами природной среды. Однако, несмотря на это, при сравнении ве-



1 – БК:П (20:80); 2 – БК:П (30:70); 3 – БК:П (40:60); 4 – БК:П (50:50); 5 – БК:П (60:40);
ДПП – дерново-подзолистая почва; СП – стандартная почва

Рис. 5. Результаты оценки показателей продуктивности после первого среза зеленой биомассы на 30-е сутки: ИС (исследуемые субстраты)

Fig. 5. Results of the evaluation of productivity indicators after the first cut of green biomass on the 30th day: TS (tested substrates)

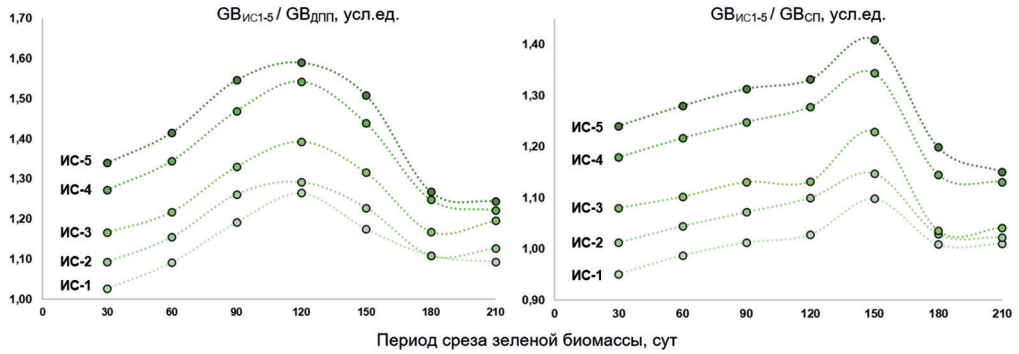


Рис. 6. Результаты оценки продуктивности по величине зеленой биомассы на протяжении всего периода долгосрочного вегетационного опыта

Fig. 6. Results of the assessment of the productivity of average green biomass over the period of a long-term vegetation experiment

личины зеленой биомассы каждого среза на исследуемых субстратах ($GB_{ИС1–5}$) и на контрольных субстратах ($GB_{ДПП}$ и $GB_{СП}$) были выявлены положительные тенденции (рис. 6). На протяжении всего долгосрочного вегетационного опыта $GB_{ИС1–5}$ / $GB_{ДПП}$ больше 1, при этом максимальные значения установлены на 120-е сутки (от 1,2 до 1,6 раз в зависимости от содержания биокомпоста в исследуемых субстратах). Восходящий характер значений с 30-х по 120-е сутки обуславливается незначительным снижением $GB_{ИС1-5}$ в отличие от $GB_{ДПП}$, при этом, несмотря на последующую тенденцию к спаду во второй половине вегетационного опыта, сохраняется $GB_{ИС1–5}$ / / $GB_{ДПП}$ > 1.

При аналогичном сравнении с $GB_{СП}$ установлены схожие тенденции, за исключением того, что максимум $GB_{ИС1–5}$/ / $GB_{СП}$ приходится на 150-е сутки (от 1,1 до 1,4 в зависимости от содержания биокомпоста в исследуемых субстратах), величина зеленой биомассы на исследуемых субстратах с содержанием биокомпоста 20 и 30 масс.% на 30-е сутки приближена к значению GBСП, а отношение $GB_{ИС1–5}$ / $GB_{СП}$ в среднем ниже, чем $GB_{ИС1–5}$ / $GB_{ДПП}$, что обуславливается тем фактом, что величина биомассы на СП в течение всего вегетационного опыта больше, чем на ДПП (в среднем в 1,2 раза). Таким образом, в идентичных условиях проведения долгосрочного вегетационного опыта исследуемые субстраты показывают более высокие показатели по продуктивности зеленой биомассы в сравнении с контрольными субстратами.

В табл. 2 представлены диапазоны колебания содержания тяжелых металлов в сухом веществе зеленой биомассы в течение всего периода долгосрочного вегетационного опыта для каждого из исследуемых субстратов. Установлено, что минимальные значения наблюдаются в растениях, выращенных на исследуемом субстрате с содержанием биокомпоста 20 масс.%, а максимальные — с содержанием биокомпоста 60 масс.%. Во всех образцах зеленой биомассы, выращенных на одном исследуемом субстрате на протяжении всего долгосрочного вегетационного опыта, не наблюдается тенденций увеличения или снижения концентрации тяжелых металлов со временем (колебание в пределах 7 — 20% от среднего содержания). Говоря о допустимом содержании тяжелых металлов в растениях, следует отметить, что данные нормативные показатели отсутствуют, требования предъявляются только к почвам (в соответствии с СанПиН

Таблица 2

Колебания содержания основных тяжелых металлов в сухом веществе зеленой биомассы на протяжении всего периода долгосрочного вегетационного опыта
Variations in the content of major heavy metals in dry matter of green biomass throughout the entire period of a long-term vegetation experiment

Исследуемый субстрат	Al	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn
	мг/кг						
БК:П (20:80)	25,6–28,1	0,06–0,09	4,8–6,1	83–101	6,7–8,8	0,21–0,25	20,0–26,7
БК:П (30:70)	26,7–28,4	0,06–0,09	5,0–6,0	88–110	6,7–9,0	0,20–0,28	22,1–26,9
БК:П (40:60)	28,4–31,2	0,08–0,10	5,3–6,7	93–113	7,1–9,6	0,23–0,29	23,8–28,7
БК:П (50:50)	28,9–32,1	0,08–0,10	5,8–6,6	94–123	7,7–10,2	0,23–0,30	23,5–29,9
БК:П (60:40)	30,4–35,5	0,08–0,11	5,7–7,4	116–134	8,2–10,9	0,24–0,31	24,3–30,8
нормальное содержание	⩽ 200	⩽ 2	0,4–45,8	15–330	нет данных	0,05–14,0	1–160

1.2.3685-21). Однако существует ряд данных, научно обосновывающих пределы нормальных колебаний содержания тяжелых металлов в растениях, при которых отсутствует проявление токсического воздействия [34, 35]. При сравнении полученных результатов было установлено, что содержание тяжелых металлов в изученных образцах растений находится в пределах нормальных колебаний.

На рис. 7 представлена тепловая карта, полученная в результате оценки процентного изменения прорастания семян,

	Изменение всхожести относительно СП, %	Изменение ср.длины корней относительно СП, %	Изменение самого длинного корня относительно СП, %	Изменение ср.длины ростков относительно СП, %	Изменение самого длинного ростка относительно СП, %
	Sorghum saccharatum (L.) Moenc - Сорго двуцветное				
БК:П (20:80)	8	36	8	25	56
БК:П (30:70)	8	55	16	38	56
БК:П (40:60)	12	68	47	50	98
БК:П (50:50)	30	91	49	50	110
БК:П (60:40)	50	105	45	50	100
	Lepidium sativum L. - Кресс-салат				
БК:П (20:80)	0	17	25	22	17
БК:П (30:70)	0	22	15	22	15
БК:П (40:60)	4	26	11	23	15
БК:П (50:50)	8	60	10	17	10
БК:П (60:40)	12	65	10	15	10
	Sinapis alba L. - Горчица белая				
БК:П (20:80)	5	14	10	24	18
БК:П (30:70)	12	22	10	30	24
БК:П (40:60)	12	22	16	30	25
БК:П (50:50)	14	50	19	30	31
БК:П (60:40)	18	74	25	38	31

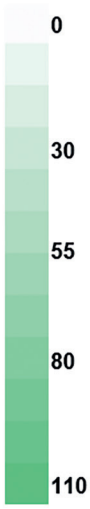


Рис. 7. Тепловая карта оценки исследуемых субстратов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763-2019
Fig. 7. Heat map of the assessment of the studied substrates in accordance with GOST R ISO 18763-2019

роста корней и ростков для каждых трех повторений каждого из тест-растений на исследуемых субстратах при сравнении с контрольной почвой. В процессе расчета было установлено, что во всех тестовых планшетах с исследуемыми субстратами отсутствуют проявления фитотоксичности, наблюдаются процессы стимулирования роста корней и ростков. В зависимости от содержания биокомпоста в техногенном почвогрунте при сравнении с СП выявлено увеличение процента всхожести семян (для сорго двуцветного от 8 до 50%, кресс-салата — от 0 до 12%, горчицы белой — от 5 до 18%), а также длины корней (для сорго двуцветного от 36 до 105%, кресс-салата — от 17 до 65%, горчицы белой — от 14 до 74%) и ростков (для сорго двуцветного от 25 до 50%, кресс-салата — от 15 до 22%, горчицы белой — от 24 до 38%). Наиболее интенсивное ускорение процессов роста корней и ростков наблюдается для сорго двуцветного (Sorghum saccharatum (L.) Moenc).

Заключение

Проведенные исследования позволили оценить пригодность разработанного ранее техногенного почвогрунта на основе ОСВ для рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности с точки зрения обеспечения благоприятных условий для роста и развития растений, что крайне важно при формировании устойчивого ПСП и предотвращения процессов эрозии.

Установлены положительные тенденции по показателю продуктивности зеленой биомассы при сравнении исследуемых субстратов с контрольными почвами на протяжении всего периода проведения долгосрочного вегетационного опыта (210 сут): суммарный прирост от 14 до 41%, в зависимости от содержания биокомпоста в техногенном почвогрунте, при сравнении с ДПП и от 1 до 26% — при сравнении с СП. Всхожесть семян райграса пастбищного на исследуемых субстратах в среднем выше на 13,5% при сравнении с ДПП и на 5,5% — со СП, а содержание тяжелых металлов в сухом веществе растений находится в пределах нормальных колебаний. При внешней оценке зеленой биомассы установлено отсутствие признаков снижения их иммунитета к болезням (например, пожелтение или потемнение, появление сухих участков, преждевременное увядание и пр.).

В процессе тестирования возможного токсического воздействия составов техногенного почвогрунта на всхожесть и рост на ранних стадиях развития высших растений было выявлено отсутствие проявления фитотоксичности, при этом для всех тест-растений в совокупности выявлено увеличение всхожести семян в среднем на 13%, стимулирование процессов роста корней на 48%, а ростков на 31%.

Таким образом, можно говорить о том, что разработанный ранее техногенный почвогрунт служит источником основных питательных веществ (макро-, мезо- и микроэлементов) для растений на протяжении длительного периода и является перспективной альтернативой используемым на сегодняшний день материалам в процессе подготовки территорий и при биологическом этапе рекультивации. Внедрение подобных ресурсосберегающих технологий позволит не только увеличить долю рекультивируемых земель за счет расширения ассортимента плодородных смесей, но и решить проблемы накопленного экологического вреда, связанные со складированием различных отходов, что в перспективе является эффективным с экономической и экологической точек зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Семина И. С.*, *Андроханов В. А.*, *Шипилова А. М.* Температурный режим рекультивированных почв с использованием отходов углеобогащения в Кузбассе // Уголь. — 2022. — № 7. — С. 60—65. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-7-60-65.

2. *Siromlya T., Mandzhieva S., Minkina T., Chaplygin V.* Changes in the fractional composition of heavy metals in soils under the influence of the mining and metallurgical industry (based on the example of the Novosibirsk agglomeration) // Sustainable Development of Mountain Territories. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1474—1490. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1474-1490.

3. *Пашкевич М. А.*, *Дука А. А.* Оценка экологического состояния почвенно-растительного покрова, загрязненного угольной пылью // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 68—74. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.10.

4. *Wang Z., Wang G., Ren T., Wang H., Xu Q., Zhang G.* Assessment of soil fertility degradation affected by mining disturbance and land use in a coalfield via machine learning // Ecological Indicators. 2021, vol. 125, article 107608. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107608.

5. *Nainiva S. P.*, *Sajadi J. Sh., Mohammadrezaei M., Parichehreh M.* Soil erosion risk prediction: an assessment of qualitative and quantitative modeling approaches // Journal of Sedimentary Environments. 2025, pp. 1—20. DOI: 10.1007/s43217-025-00228-7.

6. *Осипов С. В.*, *Гуров А. А.* Геоэкологические оценка и мониторинг территории: технология на основе ландшафтного картографирования антропогенных геокомплексов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. — 2022. — № 4. — С. 631—651. DOI: 10.21638/spbu07.2022.405.

7. *Хабиров И. К.*, *Сайфуллин Р. Р.* Факторы деградации при оценке состояния почв // Международный научно-исследовательский журнал. — 2021. — № 4-2(106). — С. 68—71. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.037.

8. *Li Q., Guo J., Wang F., Song Z.* Monitoring the characteristics of ecological cumulative effect due to mining disturbance utilizing remote sensing // Remote Sensing. 2021, vol. 13, no. 24, article 5034. DOI: 10.3390/rs13245034.

9. *Мысин А. В.*, *Ковалевский В. Н.* Моделирование состояния сложноструктурного массива с учетом динамического нагружения // Горный журнал. — 2024. — № 5. — С. 38—47. DOI: 10.17580/gzh.2024.05.03.

10. *Юркевич Н. В.*, *Ельцов И. Н.*, *Гуреев В. Н.*, *Мазов Н. А.*, *Юркевич Н. В.*, *Еделев А. В.* Техногенное воздействие на окружающую среду в российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332. — № 12. — С. 230—249. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207.

11. *Евсеев А. В.*, *Шахпендерян Е. А.*, *Султыгова Х. С.* Аэрозольное поступление техногенных поллютантов в компоненты природной среды в Центрально-Кольском импактном районе // Экосистемы: экология и динамика. — 2021. — Т. 5. — № 1. — С. 74—93. DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10078.

12. *Харько П. А.*, *Данилов А. С.* Оценка эффективности нейтрализации и очистки кислых вод от металлов золой при использовании альтернативного топлива из коммунальных отходов // Записки Горного института. — 2024. EDN CGGRHJ.

13. *Семенов А. М.*, *Глинушкин А. П.*, *Соколов М. С.* Здоровье почвенной экосистемы: от фундаментальной постановки к практическим решениям // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. — 2019. — № 1. — С. 5—17.

14. *Smirnov Y. D.*, *Suchkov D. V.*, *Danilov A. S.*, *Goryunova T. V.* Artificial soils for restoration of disturbed land productivity // Eurasian Mining. 2021, vol. 36, no. 2, pp. 92—96. DOI: 10.17580/em.2021.02.19.

15. *Delgado-Baquerizo M., Eldridge D. J., Liu Y. R., Liu Z. W., Coleine C., Trivedi P.* Soil biodiversity and function under global change // PLOS Biology. 2025, vol. 23, no. 3, article e3003093. DOI: 10.1371/journal.pbio.3003093.

16. *Гуркова Е. А.*, *Андроханов В. А.*, *Лавриненко А. Т.* Ресурсы и специфика рекультивации отвалов угледобывающей промышленности Хакасии // Почвы и окружающая среда. — 2020. — Т. 3. — № 4. — С. 1—13. DOI: 10.3125 l/pos.v3i4.127.

17. *Лавриненко А. Т.*, *Килин А. Б.*, *Остапова Н. А.*, *Сафронова О. С.*, *Евсеева И. Н.*, *Моршнев Е. А.* Реализация инновационных технологий рекультивации переуплотненных автомобиль-

ных отвалов угледобывающих предприятий Хакасии // Уголь. — 2021. — № 5. — С. 80—83. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-80-83.

18. *Семина И. С., Андроханов В. А.* Почвенно-экологическое обследование участков, рекультивированных отходами углеобогащения, на примере Кемеровской области — Кузбасса // Уголь. — 2021. — № 7. — С. 57—62. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-57-62.

19. *Vasilyeva M., Kovshov S., Zambrano J., Zhemchuzhnikov M.* Effect of magnetic fields and fertilizers on grass and onion growth on technogenic soils // Journal of Water and Land Development. 2021, no. 49, pp. 55—62. DOI: 10.24425/jwld.2021.137096.

20. *Монастырский Д. И., Куликова М. А., Шабельская Н. П., Ульянова В. А., Егорова М. А.* Возможность переработки фосфогипса с получением подщелачивающего реагента // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335. — № 9. — С. 183—190. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488.

21. *Матвеева В. А., Лукьянова А. В.* Оценка эффективности использования флюсового известняка Сокольско-Ситовского месторождения в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв // Геология и геофизика Юга России. — 2023. — Т. 13. — № 3. — С. 153—166. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012.

22. *Белаш М. Ю., Веприкова Е. В., Соболев А. А., Романов В. Н., Козулина Н. С., Сныткова Т. А., Василенко А. В., Михайлец М. А., Липшин А. Г., Таран О. П.* Получение, свойства и ростостимулирующая активность гранулированных азотсодержащих органоминеральных удобрений на основе опилок осины // Химия растительного сырья. — 2022. — № 4. — С. 353—360. DOI: 10.14258/jcprm.20220411955.

23. *Муха В. Д., Пигорев И. Я., Ачкасов А. Л., Недбаев В. Н., Мирошниченко О. Н. Худяков С. И., Бельчиков Е. В.* Дефекат — перспективное удобрение-мелиорант // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. — 2011. — № 6. — С. 47—49.

24. *Шатрова А. С., Богданов А. В., Шкрабо А. И., Алексеева О. В.* Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — № 8. — С. 153—162. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658.

25. *Sverchkov I., Gvozdetskaya M.* Quantitative determination of sulfate sulfur in soils and sediments using the S-Kα and S-Kβ X-ray spectra and PLS regression // Spectrochimica Acta — Part B Atomic Spectroscopy. 2024, vol. 218, article 106992. DOI: 10.1016/j.sab.2024.106992.

26. *Якимова Т. С.* Химический состав осадков городских сточных вод и их влияние на плодородие светло-серой лесной почвы // Агрохимический вестник. — 2012. — № 5. — С. 46—48.

27. *Быкова М. В., Малюхин Д. М., Нагорнов Д. О., Дука А. А.* Комплексная утилизация осадков городских сточных вод с получением техногенного почвогрунта // Записки Горного института. — 2024. — Т. 267. — С. 453—465.

28. *Петрова Т. А., Рудзиш Э.* Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 767—776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.

29. *Межевова А. С., Беляев А. И.* Нетрадиционные элементы технологии возделывания сельскохозяйственных культур с использованием удобрений-мелиорантов // Юг России: экология, развитие. — 2022. — Т. 17. — № 3. — С. 187—196. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-187-196.

30. *Сверчков И. П., Быкова М. В., Смирнов Ю. Д., Малюхин Д. М.* Патент РФ № 2818839, 02.04.2024. Техногенный почвогрунт. 2024. Бюл. № 13.

31. *Ugbune U., Edo G. I., Avwenaghegha J. O., Oghoje U.* Production, characterization and application of charcoal on soil nutrients enhancement and remediation of soil toxic metals / Proceedings of the Indian National Science Academy. 2025. DOI: 10.1007/s43538-025-00397-z.

32. *Ray S. K., Hossain Md. A., Islam N., Hasan M. A. F. M. R.* Enhanced plant health monitoring with dual head CNN for leaf classification and disease identification // Journal of Agriculture and Food Research. 2025, vol. 21, article 101930. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101930.

33. *Чукаева М. А., Пухальский Я. В., Лоскутов С. И., Сидорова В. Р., Воропаева Е. В., Матвеева В. А.* Оценка изменения фитоэкстракции тяжелых металлов бархатцами прямостоячими (Tagetes erecta) из загрязненных почв Норильска при использовании гуминовых добавок // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14. — № 1. — С. 90—102. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102.

34. *Ziad A. B.* S, *Wati E. I. H.*, *Sakinah M. A. M.* Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of stevia rebaudiana plant // Procedia Environmental Sciences. 2014, vol. 20, pp. 386—393. DOI: 10.1016/j.proenv.2014.03.049.

35. *Позняк С. С.* Содержание некоторых тяжелых металлов в растительности полевых и луговых агрофитоценозов в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова // Вестник Томского государственного университета. Биология. — 2011. — № 1(13). — С. 123—137. ГИАБ

REFERENCES

1. Semina I. S., Androkhanov V. A., Shipilova A. M. Temperature regime of reclaimed soils using coal enrichment waste in Kuzbass. *Ugol'*. 2022, no. 7, pp. 60—65. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-7-60-65.

2. Siromlya T., Mandzhieva S., Minkina T., Chaplygin V. Changes in the fractional composition of heavy metals in soils under the influence of the mining and metallurgical industry (based on the example of the Novosibirsk agglomeration). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1474—1490. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1474-1490.

3. Pashkevich M. A., Duka A. A. Ecological evaluation of top soil polluted with coal dust. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 68—74. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.10.

4. Wang Z., Wang G., Ren T., Wang H., Xu Q., Zhang G. Assessment of soil fertility degradation affected by mining disturbance and land use in a coalfield via machine learning. *Ecological Indicators*. 2021, vol. 125, article 107608. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107608.

5. Nainiva S. P., Sajadi J. Sh., Mohammadrezaei M., Parichehreh M. Soil erosion risk prediction: an assessment of qualitative and quantitative modeling approaches. *Journal of Sedimentary Environments*. 2025, pp. 1—20. DOI: 10.1007/s43217-025-00228-7.

6. Osipov S. V., Gurov A. A. Geoecological assessment and monitoring of the territory: technology based on landscape mapping of anthropogenic geocomplexes. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2022, no. 4, pp. 631—651. [In Russ]. DOI: 10.21638/spbu07.2022.405.

7. Khabirov I. K., Sayfullin R. R. Degradation factors in the assessment of soil condition. *International Research Journal*. 2021, no. 4-2(106), pp. 68—71. [In Russ]. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.037.

8. Li Q., Guo J., Wang F., Song Z. Monitoring the characteristics of ecological cumulative effect due to mining disturbance utilizing remote sensing. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, no. 24, article 5034. DOI: 10.3390/rs13245034.

9. Mysin A. V., Kovalevskiy V. N. Modeling behavior of complex-structured rock mass with regard to dynamic impact. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 5, pp. 38—47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.05.03.

10. Yurkevich N. V., Yeltsov N. N., Gureev. V. N., Mazova N. A., Yurkevich N. V., Edelev A. V. Technogenic effect on the environment in the Russian arctic by the example of the Norilsk industrial area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 12, pp. 230—249. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207.

11. Evseev A. V., Shakhpenderyan E. A., Sultygova H. S. Aerosol intake of technogenic pollutants into the components of the natural environment in the Central Kola impact region. *Ecosystems: ecology and dynamics*. 2021, vol. 5, no. 1, pp. 74—93. [In Russ]. DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10078.

12. Kharko P. A., Danilov A. S. Evaluation of the effectiveness of neutralization and purification of acidic waters from metals with ash when using alternative fuels from municipal waste. *Journal of Mining Institute*. 2024. EDN CGGRHJ. [In Russ].

13. Semenov A. M., Glinushkin A. P., Sokolov M. S. Health of the soil ecosystem: from fundamental formulation to practical solutions. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2019, no. 1, pp. 5—17. [In Russ].

14. Smirnov Y. D., Suchkov D. V., Danilov A. S., Goryunova T. V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. *Eurasian Mining*. 2021, vol. 36, no. 2, pp. 92—96. DOI: 10.17580/em.2021.02.19.

15. Delgado-Baquerizo M., Eldridge D. J., Liu Y. R., Liu Z. W., Coleine C., Trivedi P. Soil biodiversity and function under global change. *PLOS Biology*. 2025, vol. 23, no. 3, article e3003093. DOI: 10.1371/journal.pbio.3003093.

16. Gurkova E. A., Androkhanov V. A., Lavrinenko A. T. Resources and specificity of reclamation at the coal mining spoils. *Pochvy i okruzhayushhaya sreda*. 2020, vol. 3, no. 4, pp. 1—13. [In Russ]. DOI: 10.3125 l/pos.v3i4.127.

17. Lavrinenko A. T., Kilin A. B., Ostapova N. A., Safronova O. S., Evseeva I. N., Morshnev E. A. Implementation of innovative technologies for reclamation of reclaimed automobile dumps of coal mining enterprises in Khakassia. *Ugol'*. 2021, no. 5, pp. 80—83. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-80-83.

18. Semina I. S., Androkhanov V. A. Soil-ecological survey of areas reclaimed with coal enrichment waste, using the example of the Kemerovo region — Kuzbass. *Ugol'*. 2021, no. 7, pp. 57—62. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-57-62.

19. Vasilyeva M., Kovshov S., Zambrano J., Zhemchuzhnikov M. Effect of magnetic fields and fertilizers on grass and onion growth on technogenic soils. *Journal of Water and Land Development*. 2021, no. 49, pp. 55—62. DOI: 10.24425/jwld.2021.137096.

20. Monastyrsky D. I., Kulikova M. A., Shabelskaya N. P., Ulyanova V. A., Egorova M. A. Possibility of processing phosphogypsum to obtain an alkalizing reagent. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024, vol. 335, no. 9, pp. 183—190. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488.

21. Matveeva V. A., Lukyanova A. V. Evaluation of the effectiveness of the use of fluxing limestone of Sokol-Sitov deposit as an ameliorant for the neutralization of acidic soils. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2023, vol. 13, no. 3, pp. 153—166. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012.

22. Belash M. Y., Veprikova Y. V., Sobolev A. A., Romanov V. N., Kozulina N .S., Snytkova T. A., Vasilenko A. V., Mikhaylets M. A., Lipshin A. G., Taran O. P. Obtaining, properties and growth-stimulating activity of granular nitrogen-containing organo-mineral fertilizers based on aspen sawdust. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*. 2022, no. 4, pp. 353—360. [In Russ]. DOI: 10.14258/jcprm.20220411955.

23. Mukha V. D., Pigorev I. Ya., Achkasov A. L., Nedbaev V. N., Miroshnichenko O. N., Khudyakov S. I., Belchikov E. V. Defecate — promising fertilizer-meliorant. *Vestnik of Kursk state agricultural academy*. 2011, no. 6, pp. 47—49. [In Russ].

24. Shatrova A. S., Bogdanov A. V., Shkrabo A. I., Alekseeva O. V. Technology for processing waste of the pulp and paper industry into soil ground using natural processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, no. 8, pp. 153—162. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658.

25. Sverchkov I., Gvozdetskaya M. Quantitative determination of sulfate sulfur in soils and sediments using the S-Kα and S-Kβ X-ray spectra and PLS regression. *Spectrochimica Acta — Part B Atomic Spectroscopy*. 2024, vol. 218, article 106992. DOI: 10.1016/j.sab.2024.106992.

26. Yakimova T. S. The chemical composition of sediments of urban waste water and their effect on the fertility of the light-gray forest soil. *Agrochem herald*. 2012, no. 5, pp. 46—48.

27. Bykova M. V., Malyukhin D. M., Nagornov D. O., Duka A. A. Comprehensive utilization of urban wastewater sludge with production of technogenic soil. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 453—465. [In Russ].

28. Petrova T. A., Rudzisha E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 767—776. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.

29. Mezhevova A. S., Belyaev A. I. Non-traditional elements of technology for cultivating crops using fertilizers and ameliorants. *South of Russia: ecology & development*. 2022, vol. 17, no. 3, pp. 187—196. [In Russ]. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-187-196.

30. Sverchkov I. P., Bykova M. V., Smirnov Yu. D., Malyukhin D. M. *Patent RU 2818839*, 02.04.2024. [In Russ].

31. Ugbune U., Edo G. I., Avwenaghegha J. O., Oghoje U. Production, characterization and application of charcoal on soil nutrients enhancement and remediation of soil toxic metals. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2025. DOI: 10.1007/s43538-025-00397-z.

32. Ray S. K., Hossain Md. A., Islam N., Hasan M. A. F. M. R. Enhanced plant health monitoring with dual head CNN for leaf classification and disease identification. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025, vol. 21, article 101930. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101930.

33. Chukaeva M. A., Puhalsky Y. V., Loskutov S. I., Sidorova V. R., Voropaeva E. V., Matveeva V. A. Assessment of changes in the heavy-metal phytoextraction by Tagetes erecta from contaminated soils of Norilsk using humic additives. *Arctic: Ecology and Economy*. 2024, vol. 14, no. 1, pp. 90—102. [In Russ]. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-90-102.

34. Ziad A. B. S, Wati E. I. H., Sakinah M. A. M. Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of stevia rebaudiana plant. *Procedia Environmental Sciences*. 2014, vol. 20, pp. 386—393. DOI: 10.1016/j.proenv.2014.03.049.

35. Poznyak S. S. Heavy metals concentration in plants of field and poic agrophytocenoses in conditions of anthropogenic contamination of soil cover. *Tomsk state university journal of biology*. 2011, no. 1(13), pp. 123—137. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Быкова Марина Валерьевна — канд. техн. наук,
научный сотрудник, Санкт-Петербургский
горный университет императрицы Екатерины II,
e-mail: Bykova_MV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9150-4201,
Малюхин Дмитрий Михайлович — канд. геогр. наук,
генеральный директор, ООО «НПК ЭкоДрайв»,
e-mail: info@ecodrive.su,
ORCID ID: 0009-0003-7057-910X,
Для контактов: Быкова М.В., e-mail: Bykova_MV@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Bykova, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, 199106, Russia,
e-mail: Bykova_MV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9150-4201,
D.M. Malyukhin, Cand. Sci. (Geogr.),
Limited Liability Company «RPC EcoDrive»,
Leningrad region, Taitsy settlement,
188340, Russia, e-mail: info@ecodrive.su,
ORCID ID: 0009-0003-7057-910X,
Corresponding author: M.V. Bykova, e-mail: Bykova_MV@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 29.03.2025; получена после рецензии 05.05.2025; принята к печати 10.08.2025.
Received by the editors 29.03.2025; received after the review 05.05.2025; accepted for printing 10.08.2025.