ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

Разработка техногенных почвогрунтов на основе горнопромышленных отходов и осадков сточных вод

Т.К.Иванова[1,2], **Е.А.Красавцева**[3]✉
[1] *Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[2] *Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[3] *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, России*

***Как цитировать эту статью*:** Иванова Т.К., Красавцева Е.А. Разработка техногенных почвогрунтов на основе горнопромышленных отходов и осадков сточных вод // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 107-119. EDN IHDAES

Аннотация
Статья посвящена разработке эффективного метода рекультивации техногенно нарушенных территорий посредством оптимизации состава техногенных почвогрунтов, включающего промышленные минеральные отходы и осадки сточных вод. Актуальность исследования обусловлена необходимостью устранения негативных последствий добычи и переработки полезных ископаемых, приводящих к образованию значительных площадей хвостохранилищ, отрицательно влияющих на экологическую обстановку региона. Исследованы физико-химические свойства хвостов обогащения и различия в их характеристиках при добавлении осадка сточных вод трех горнопромышленных предприятий Мурманской обл.: лопаритовые хвостохранилища «Карнасурт-1» и «Умбозеро» (пгт Ревда), апатит-нефелиновое хвостохранилище «АНОФ-3» (Кировск). В лабораторных условиях определены пропорции компонентов техногенного почвогрунта, обеспечивающие снижение pH до нейтральных значений, повышение влагоудерживающей способности субстратов и доступности важнейших элементов питания для растений. Результаты фитотестирования подтвердили высокую биологическую активность сформированных почвогрунтов и положительное влияние внесенной добавки на развитие тестируемых культур: редиса (*Raphanus sativus* L.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.). Исследование позволило выявить оптимальный баланс между минеральными хвостами и осадком сточных вод, обеспечивающий наилучшую адаптацию растений и максимальную эффективность рекультивации нарушенных территорий. Полученные результаты обладают важным прикладным значением для восстановления земель в районах с повышенной нагрузкой от горнорудной отрасли, способствуя минимизации экологических рисков, стабилизации субстрата, формированию устойчивого растительного покрова и рациональному использованию промышленных и коммунальных отходов. Отмечена необходимость подтверждения эффективности предлагаемого подхода в условиях долгосрочного эксперимента. Практическое внедрение технологии обеспечит экологически устойчивое ведение хозяйственной деятельности в регионах с интенсивной эксплуатацией сырьевых запасов, включая северные регионы России.

Ключевые слова
рекультивация; техногенные почвогрунты; горнопромышленные отходы; осадки сточных вод; хвостохранилища

Финансирование
Исследование техногрунтов на основе лопаритовых хвостов выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20012 «Разработка научных основ комплексной переработки хвостов обогащения лопаритовых руд с одновременным снижением техногенной нагрузки на окружающую среду в Арктической зоне РФ», https://rscf.ru/project/25-17-20012/, исследование апатит-нефелиновых хвостов – в рамках темы НИР 1023032200158-7.

Поступила: 17.02.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 02.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Отходы, образующиеся при добыче и переработке полезных ископаемых – хвосты обогащения, техногенные пески и др. – занимают значительные территории и представляют собой один из наиболее важных факторов антропогенного воздействия на окружающую среду [1-3]. Эти

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

техногенные образования формируют искусственные геосистемы, характеризующиеся нарушением естественного рельефа, гидрологического режима и почвенно-растительного покрова [4].

Из-за отсутствия растительности и низкого содержания органического вещества такие территории подвержены интенсивным процессам ветровой и водной эрозии, а также пылеобразования [5-7], что ведет к ухудшению санитарно-гигиенических условий окружающей среды и представляет потенциальную угрозу здоровью человека [8-10]. Величина и характер негативного воздействия пылевых выбросов на организм человека во многом зависят от дисперсности частиц: частицы PM_{10} (PM – от англ. particulate matter) – пылевые частицы менее 10 мкм и 2,5 мкм ($PM_{2,5}$). PM_{10} ассоциируются с поражениями дыхательной системы, включая хроническую обструктивную болезнь легких [11], тогда как $PM_{2,5}$ – с анемией [12]. Частицы $PM_{2,5}$-PM_{10} способны вызывать иммунотоксические, цитотоксические и потенциально мутагенные эффекты, они также связаны с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний, астмы, артериальной гипертензии и инсульта [13]. Кроме того, хвостохранилища и отвалы нередко выступают источниками вторичного загрязнения водной среды за счет миграции тяжелых металлов, кислотных дренажей и токсичных соединений [7, 14, 15], что также может оказывать негативное воздействие на здоровье человека и состояние окружающей среды.

Особенностью хвостохранилищ является их крайне низкий потенциал к естественному восстановлению [16, 17]. В течение десятилетий на их поверхности не формируется устойчивый растительный покров, что обусловлено низким уровнем плодородия, слабой водоудерживающей способностью и дефицитом микроэлементного состава техногенных грунтов [18-20]. Совокупность указанных факторов приводит к длительной экологической нестабильности нарушенных территорий и усилению процессов деградации. Для северных территорий России малоприменимы основные положения в области рекультивации земель, где технический этап обычно включает снятие, складирование и последующее использование плодородного слоя почвы [21]. В субарктических и арктических условиях с крайне медленным процессом почвообразования выполнение таких действий практически невозможно. В связи с этим возникает необходимость в проведении специализированных рекультивационных мероприятий, направленных на ускоренное формирование растительного покрова, стабилизацию субстрата и восстановление экологических функций техногенно нарушенных земель.

Одним из перспективных направлений рекультивации является использование побочных продуктов промышленных и коммунальных предприятий – в частности осадков сточных вод (ОСВ) [22, 23], характеризующихся удобрительной ценностью, высокой влагоудерживающей способностью, содержанием полезных для растений макро- и микроэлементов, а также большим количеством органических веществ [24-26]. По своему виду, химическому составу и физико-химическим свойствам ОСВ могут существенно различаться в зависимости от очищаемых сточных вод, системы водоочистки и процессов его обработки. Усредненный состав осадка представляет собой ~ 25-80 % органического вещества, ~ 5-20 % азота, ~ 2-20 % фосфора, набор питательных элементов, необходимых растениям – K, Ca, Mg, Na, а также тяжелые металлы Zn, Cu, Cr, Pb, Ni [27]. Применение ОСВ в составе техногенных почвогрунтов позволяет не только ускорить процесс почвообразования и восстановления экосистем, но и решать задачи ресурсосбережения и утилизации отходов.

В российской нормативной практике одними из ключевых документов, регламентирующих условия подготовки, обезвоживания и оценки пригодности иловых и других осадков сточных вод к использованию в рекультивационных целях, является ГОСТ Р 54534-2011 «Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель» и ГОСТ Р 59748-2021 «Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования». При соблюдении положений данных нормативных документов ОСВ могут эффективно использоваться при проведении рекультивационных работ. Вместе с тем анализ патентной литературы свидетельствует о том, что разработка техногенных почвогрунтов сопровождается рядом ограничений, обусловленных сложностью компонентного состава и значительными технологическими затратами. Известные решения, представленные в патентах RU 2497784 [28] и

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

RU 2490240 [29], основаны на использовании многокомпонентных рецептур с применением иловых осадков, торфа и техногенных песчаных материалов и характеризуются длительными этапами подготовки, включая ферментацию. К основным недостаткам данных подходов относятся высокая технологическая сложность и ограниченная универсальность применения.

Цель настоящего исследования – разработать техногенные почвогрунты на основе местных горнопромышленных отходов и ОСВ, характеризующиеся нейтральной реакцией среды, повышенными влагоудерживающей способностью и содержанием элементов питания растений, которые обеспечат устойчивое формирование растительного покрова и минимизируют негативное экологическое воздействие накопленных отходов горнопромышленных предприятий Мурманской обл.

Методы

Характеристика района исследования. Мурманская обл. расположена на северо-западе европейской части России, на Кольском полуострове, граничит с Карелией, Финляндией и Норвегией. Почти полностью лежит к северу от полярного круга и омывается Баренцевым и Белым морями. Климат субарктический (Dfc по Кеппену – Гейгеру), морской, смягченный влиянием Гольфстрима. Рельеф представлен тундрой и тайгой. Средние температуры января составляют от –8 до –15 °С, июля – от +8 до +15 °С.

Несмотря на небольшую площадь (0,85 % территории России) регион имеет стратегическое значение и отличается высоким уровнем промышленного развития. На Кольском полуострове расположено около 60 крупных месторождений, включая медно-никелевые, апатит-нефелиновые, железные и редкоземельные руды. Область обеспечивает 100 % российского производства апатитового, нефелинового и бадделеитового концентратов, около 10 % железорудного и 7 % рафинированной меди. Концентрация горнодобывающих и металлургических предприятий формирует значительную антропогенную нагрузку на окружающую среду [30].

Характеристика исследуемых материалов. В работе использованы отходы хвостохранилищ Мурманской обл.: хвосты обогащения лопаритовых руд хвостохранилищ «Карнасурт-1» (ЛХ1) и «Умбозеро» (ЛХ2) (пгт Ревда), хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд хвостохранилища «АНОФ-3» (АНХ) (Кировск) (рис.1).

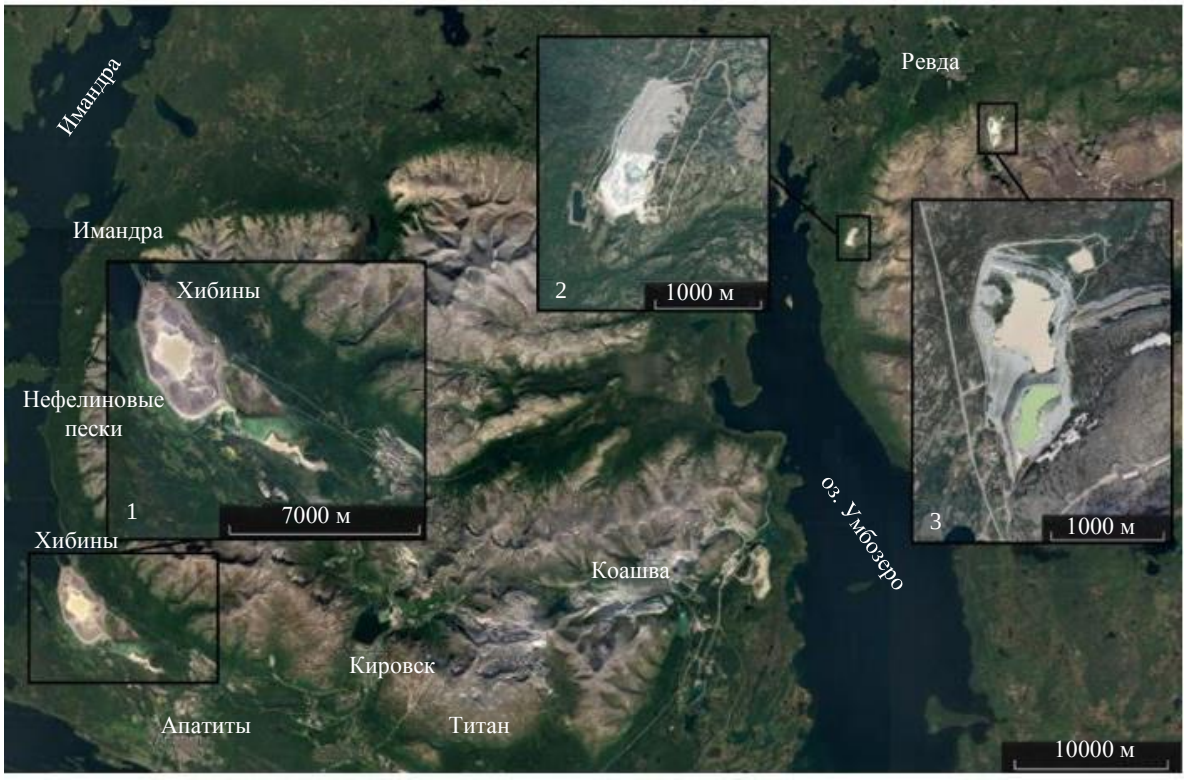


Рис.1. Хвостохранилища «АНОФ-3» (1), «Умбозеро» (2) и «Карнасурт-1» (3)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Образцы хвостов были отобраны и изучены ранее: определены инженерно-геологические характеристики (ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик») и вещественный состав [30, 31]. Хвосты характеризуются низким содержанием органики (< 1 %) и щелочным или нейтральным значением pH. Минеральный (рассчитан по методу Ритвельда, Геологический институт КНЦ РАН) и химический (силикатный анализ, ОАО «Кольский геолого-информационный лабораторный центр») составы усредненных проб представлены в табл.1 и 2.

Таблица 1

Минеральный состав хвостов обогащения, % по массе

Минерал	ЛХ1	Минерал	ЛХ2	Минерал	АНХ
Нефелин	59-60	Нефелин	38-44	Нефелин	59-60
Полевой шпат	16-20	Альбит	18-21	Полевые шпаты	9,2-12
Апатит	0,65-1,01	Микроклин	22-24	Апатит	5,1-6,1
Лопарит	0,63-0,94	Аннит	0,39-0,72	Пироксен	17-18
Эгирин	18-20	Арфведсонит	3,4-3,9	Сфен	3,5-3,9
Диопсид	0,012-0,038	Эгирин	7,0-7,3	Магнетит	2,1-2,4
Содалит	1,2-1,6	Лопарит	0,28-0,40	Кальцит	0,33-0,41
Ломоносовит	0,14-0,17	Натролит	2,4-3,4		
Лампрофиллит	0,03-0,21	Содалит	1,7-2,8		
Эвдиалит	0,011-0,023	Кварц	0,81-1,7		

Таблица 2

Химический состав хвостов обогащения, % по массе

Элемент	Содержание			Элемент	Содержание		
	ЛХ1	ЛХ2	АНХ		ЛХ1	ЛХ2	АНХ
SiO_2	~48	54-55	42-43	MgO	0,40-0,45	0,55-0,85	1,2-1,5
TiO_2	0,85-1,1	0,71-0,88	2,5-2,7	K_2O	4,2-4,5	5,5-6,4	6,0-6,2
Al_2O_3	22-24	20-21	21-23	Na_2O	13-14	9,6-10	9,1-9,8
Fe_2O_3	5,5-6,0	4,4-5,0	3,9-4,3	P_2O_5	0,54-0,79	0,029-0,047	2,1-2,6
FeO	0,52-0,66	0,46-0,62	2,1-2,6	SrO	0,24-0,35	< 0,10	0,24-0,31
MnO	0,20-0,23	0,18-0,21	0,11-0,23	F	0,072-0,081	0,050-0,058	0,21-0,30
CaO	1,3-1,6	2,6-2,8	5,6-6,0	S	0,064-0,085	0,019-0,030	0,11-0,18

Хвосты обогащения представляют собой минеральные материалы с низкой биологической активностью, умеренной влагоемкостью и нейтрально-щелочной реакцией. Их свойства позволяют рассматривать данные отходы как потенциальное сырье для рекультивации, технического озеленения и создания техногенных грунтов для биологического способа пылеподавления при условии дополнительного обогащения органическими и питательными компонентами, что отмечается в исследованиях [32, 33].

Образец побочного продукта биологической очистки сточных вод был предоставлен одним из предприятий Мурманской обл., на очистных сооружениях которого его предварительно выдерживали на иловых картах на открытом воздухе в течение 2-3 лет. Образец ОСВ передавали в аккредитованную лабораторию Центра лабораторных анализов и технических измерений по Мурманской обл. для проведения химического анализа и в Центр гигиены и эпидемиологии в Мурманской обл. для паразитологического и бактериологического анализа. Оценивали соответствие требованиям ГОСТ Р 54534-2011 и ГОСТ Р 59748-2021, предъявляемым к ОСВ при их использовании в качестве почвогрунтов для биологической или технической рекультивации.

Согласно ГОСТ Р 54534-2011, ОСВ могут быть применены для биологической или технической рекультивации, а, согласно ГОСТ Р 59748-2021, если содержание хотя бы одного из нормируемых элементов превышает допустимый уровень для группы I, то осадки относят к группе II.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Осадки групп I и II используют в промышленном цветоводстве, зеленом строительстве, лесных и декоративных питомниках, для биологической рекультивации нарушенных земель и полигонов для твердых бытовых отходов.

Для оценки дозозависимого эффекта внесения органической добавки на свойства техногенных почвогрунтов и для выявления оптимального соотношения компонентов в условиях рекультивации ОСВ смешивали с хвостами обогащения апатит-нефелиновых (АНХ) или лопаритовых (ЛХ1, ЛХ2) руд в соотношениях 1:9, 2:8 и 3:7 соответственно (табл.3). В качестве контрольных выступали хвосты обогащения без добавок ОСВ.

Таблица 3

Соотношение хвостов и ОСВ и маркировка почвогрунтов

Почвогрунт	ЛХ1:ОСВ				ЛХ2:ОСВ				АНХ:ОСВ			
	10:0	9:1	8:2	7:3	10:0	9:1	8:2	7:3	10:0	9:1	8:2	7:3
Маркировка	A0	A1	A2	A3	B0	B1	B2	B3	C0	C1	C2	C3

Выбор диапазона доз ОСВ (10-30 % или 1:9, 2:8, 3:7) обоснован практическими рекомендациями, приведенными в ГОСТ Р 54534-2011. Согласно п. 4.3 данного стандарта, разовая доза внесения почвогрунтов на основе ОСВ при рекультивации может достигать 200-300 т/га. С учетом насыпной плотности сухого ОСВ (~0,6 г/см^3) и нефелиновых хвостов (~1,8 г/см^3) объемные соотношения ОСВ и хвостов 2:8 и 3:7 позволяют сформировать рекультивационный слой высотой до 25 и 17-18 см соответственно, что согласуется со стандартной практикой создания корнеобитаемого слоя при биологической рекультивации хвостохранилищ.

Методы исследования. Для оценки свойств полученных техногенных почвогрунтов определяли их влагоудерживающую способность, потенциальную (pH солевой (KCl) вытяжки) и актуальную кислотности (pH водной вытяжки спустя семь суток), а также содержание элементов питания – кальция, магния, натрия, кремния, азота, фосфора и калия – в форме, доступной для растений. Содержание элементов питания определяли в вытяжке 0,01 М раствором лимонной кислоты, являющейся доминирующей органической кислотой в составе почвенных вод исследуемой территории [34].

Для определения pH водной вытяжки навески субстратов массой 5 г помещали в 50 мл дистиллированной воды, после чего спустя семь суток измеряли pH суспензий с использованием лабораторного иономера И-160МИ, оснащенного стеклянным электродом ЭС-10603 и электродом сравнения ЭСр-10103 (ГОСТ 26423-85 «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки»). Солевую (KCl) вытяжку для измерения pH готовили в соотношении Т:Ж 1:25, перемешивали на лабораторном шейкере в течение одного часа в соответствии с ГОСТ 26483-85 «Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО».

Согласно методике, описанной в работах [35, 36], для приготовления вытяжки к навеске грунта массой 25 г добавляли 250 мл 0,01 М раствора лимонной кислоты. Смесь перемешивали в течение шести часов на магнитной мешалке ES6120 (ЭКРОС) при температуре 20 °С. Полученную суспензию фильтровали через двойной бумажный фильтр типа «синяя лента». Химический анализ фильтрата на содержание доступных элементов питания проводили следующими методами: атомно-абсорбционной спектрометрией на спектрометре «Квант-2мт» (K, Na, Ca, Mg), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре Elan 9000 (P), фотометрическим методом на фотометре КФК 3-01 (Si), анализаторе общего азота и углерода «Топаз N» (N).

Для определения максимальной влагоудерживающей способности техногенных почвогрунтов (в соответствии с требованиями ГОСТ 32632-2014 «Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды») отбор пробы массой 5 г осуществляли пробоотборной трубкой, нижнюю часть которой закрывали фильтровальной бумагой и размещали на решетке в водяной бане. Трубку постепенно погружали в воду до уровня выше высоты почвенной пробы и выдерживали не менее трех часов для полного насыщения влагой. Затем проводили предварительное подсушивание в течение двух часов в закрытом контейнере с подложкой из влажного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

измельченного кварцевого песка. После кондиционирования пробу взвешивали, высушивали до постоянной массы при 105 °С и повторно взвешивали для определения потери влаги.

Методика проведения фитотестирования. Для оценки биологической эффективности разработанных техногенных почвогрунтов были проведены лабораторные посевные опыты с использованием двух тест-культур – редиса (*Raphanus sativus* L.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.). Выбор данных видов обусловлен их распространенностью в биотестировании: редис является высокочувствительной модельной культурой, быстро реагирующей на изменения свойств субстрата [37], а райграс широко применяется при биологической рекультивации нарушенных земель, в том числе Крайнего Севера, благодаря устойчивости, интенсивному росту и способности быстро формировать дерновый покров [38].

Семена редиса и райграса по 30 штук для каждого варианта опыта помещали в пластиковые контейнеры, заполненные увлажненными экспериментальными субстратами. Проращивание осуществляли при стабильной температуре 20-22 °С в течение 21 дня. Ежедневно семена проверяли на прорастание, а техногенный почвогрунт при необходимости смачивали водой комнатной температуры, не допуская переувлажнения. Оценка всхожести производилась на десятые сутки, а морфометрические параметры – высота и сырая биомасса надземной части – измерялись по итогам 21 сут выращивания.

Статистическая обработка результатов включала вычисление средних значений и стандартной ошибки; достоверность различий между вариантами определяли методом однофакторного дисперсионного анализа ANOVA при уровне значимости $p < 0,05$ в программе Microsoft Office Excel 2016, что соответствует требованиям биологических и агрохимических исследований [39].

Обсуждение результатов

Характеристика хвостов и ОСВ. В табл.4 представлены физико-химические свойства исследуемых хвостов обогащения. Влагоудерживающая способность колеблется в пределах от 110 до 123 %. Наибольшие значения зафиксированы для хвостов ЛХ2 (123 %) наименьшие наблюдаются у ЛХ1 (110 %), что, вероятно, обусловлено неоднородностью гранулометрического состава и минералогических компонентов, определяющих физические свойства материалов.

Таблица 4

Физико-химические свойства хвостов обогащения

Характеристики хвостов	ЛХ1	ЛХ2	АНХ
Влагоудерживающая способность, %	110±40	123±50	120±40
Актуальная кислотность	8,5±0,2	6,3±0,1	6,5±0,2
Потенциальная кислотность	7,9±0,2	6,1±0,1	6,3±0,1
Содержание доступной формы компонентов:			
K, г/кг	0,59±0,11	0,37±0,09	0,28±0,08
Na, г/кг	1,4±0,2	1,6±0,2	2,0±0,2
Ca, г/кг	0,31±0,04	0,09±0,02	0,13±0,01
Si, г/кг	0,99±0,21	0,86±0,19	0,81±0,18
Mg, мг/кг	1,5 ± 0,16	0,72 ± 0,10	0,65 ± 0,10
N, мг/кг	1,5 ± 0,30	1,4 ± 0,29	1,5 ± 0,33
P, мг/кг	1,7 ± 0,33	1,4 ± 0,22	2,1 ± 0,36

Актуальная кислотность образцов изменялась в диапазоне pH от 6,3 до 8,5. Хвосты ЛХ1 имеют наиболее щелочную реакцию (pH 8,5), что может быть связано с присутствием нефелина, полевых шпатов и содалита, содержащих щелочные и щелочноземельные элементы, которые при гидролизе дали щелочную среду. ЛХ2 и АНХ характеризуются значениями, близкими к нейтральным условиям. Значения pH создают благоприятные условия для использования хвостов в качестве минеральной основы для рекультивационных субстратов, поскольку не создают кислой среды, неблагоприятной для растений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Содержание доступных форм химических элементов существенно различается. Наибольшее количество калия (0,59 г/кг) и кальция (0,31 г/кг) отмечено в ЛХ1, тогда как максимальное содержание натрия (2,0 г/кг) характерно для АНХ. Концентрации магния, азота и фосфора крайне низкие (до 2,1 мг/кг), что подтверждает бедность хвостов биогенными элементами. Содержание кремния в пределах 0,81-0,99 г/кг указывает на преобладание силикатных соединений.

Краткое сравнение химического анализа пробы ОСВ с требованиями ГОСТ Р 59748-2021 и ГОСТ Р 54534-2011 приведено в табл.5.

Таблица 5

Сравнительный анализ химического состава ОСВ как сырья для рекультивации

Показатель	ОСВ	ГОСТ 59748-2021**	ГОСТ Р 54534-2011***
Органическое вещество, %	20,2±1,2	Не менее 20	Не указано
As, мг/кг	2,3±0,7	10 (I) -20 (II)	20 (Б)-40 (Т)
Cd, мг/кг	4,2±1,3	15 (I)-30 (II)	30 (Б)-60 (Т)
Pb, мг/кг	88±26	250 (I)-500 (II)	500 (Б)-1000 (Т)
Zn, мг/кг	530±160	1750 (I)-3500 (II)	3500 (Б)-7000 (Т)
Ni, мг/кг	160±50	200 (I)-400 (II)	400 (Б)-800 (Т)
Cu, мг/кг	640±190	750 (I)-1500 (II)	750 (Б)-1500 (Т)
Cr, мг/кг	440±130	500 (I)-1000 (II)	1000 (Б)-2000 (Т)
Hg, мг/кг	9,2±2,3	7,5 (I)-15 (II)	15 (Б)-30 (Т)
pH солевой вытяжки	5,5±0,1	5,5 (I)-8,5 (II)	5,0-8,5
Общий азот, %	1,1±0,2	Не менее 0,6	0,5 (Б)-не норм. (Т)
Общий фосфор, %*	0,73±0,05	Не менее 1,5	1,5 (Б)-не норм. (Т)

* Результат по общему фосфору выдан на P, пересчет на P_2O_5 – 1,67 %.
** I – первая группа отходов; II – вторая группа.
*** Б – при использовании для биологической рекультивации; Т – при использовании для технической рекультивации.

Предоставленный образец ОСВ относится к группе II (согласно ГОСТ 59748-2021) и может быть использован для технической рекультивации (согласно ГОСТ Р 54534-2011). Осадки группы II используют под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры. Паразитологические и бактериологические исследования не обнаружили присутствие яиц геогельминтов, бактерий группы кишечной палочки, патогенных микроорганизмов.

Характеристика техногенного почвогрунта. Реакция среды является одним из ключевых факторов, определяющих пригодность почвогрунта для роста и развития растений. Установлено, что pH водной вытяжки образцов через семь суток изменяется от 6,0 до 7,9 в зависимости от доли внесенного ОСВ (рис.2). При увеличении содержания органической добавки, характеризующейся слабокислой реакцией среды, наблюдается снижение pH как водной, так и солевой вытяжек, что, вероятно, связано с образованием слабокислых продуктов биохимического разложения органических веществ и снижением доли щелочных компонентов минеральных хвостов. Таким образом, добавление 20-30 % ОСВ способствует изменению pH от слабощелочной к нейтральной или слабокислой, что оптимально для большинства культурных растений и микробиологических процессов в почве.

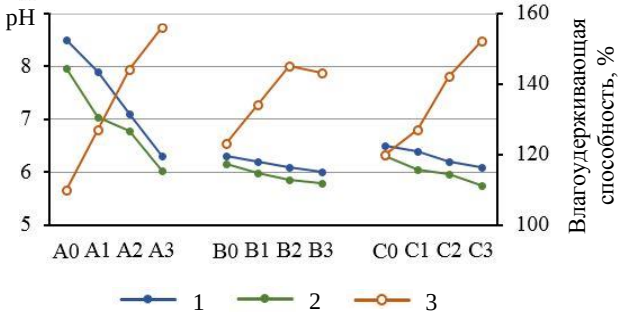


Рис.2. Значения актуальной и потенциальной кислотностей и влагоудерживающей способности техногенных почвогрунтов при разных дозировках ОСВ

1 – pH_{H_2O}; 2 – pH_{KCl}; 3 – влагоудерживающая способность, %

Добавление осадков сточных вод положительно сказалось на влагоудерживающей способности почвогрунта. При увеличении доли ОСВ от 10 до 30 % наблюдалось повышение данного показателя с 127 до 156 % (на примере

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

смесей с хвостами ЛХ1). Подобная зависимость характерна и для смесей с ЛХ2 и АНХ. Рост влагоудерживающей способности объясняется повышенным содержанием органического вещества, которое увеличивает общую пористость и влагоемкость материала [40-42]. Это свойство особенно важно для рекультивации сухих и бедных на гумус техногенных земель.

Добавление ОСВ в состав хвостов привело к существенным изменениям химического состава полученных техногенных почвогрунтов (табл.6). Наблюдается увеличение содержания биогенных элементов в зависимости от доли добавленного ОСВ. Концентрация азота значительно возросла при сравнении контрольных вариантов с техногенными почвогрунтами (соотношение хвосты : ОСВ 7:3) – от 24 (серия С) до 47 раз (серия В). Аналогичная тенденция характерна для фосфора – увеличение содержания составило от 9 (серия А) до 19 раз (серия В). Содержание кальция изменилось не столь существенно – от 1,5 (серия А) до 5,3 раз (серия В). Полученные данные свидетельствуют об улучшении агрохимических свойств почвогрунтов.

Таблица 6

Химический состав техногенных почвогрунтов

Содержание компонентов	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
K, г/кг	0,54±0,11	0,50±0,11	0,47±0,12	0,37±0,09	0,37±0,10	0,38±0,11	0,28±0,08	0,29±0,09	0,30±0,08
Na, г/кг	1,5±0,1	1,5±0,1	1,5±0,1	1,7±0,1	1,7±0,1	1,7±0,1	2,0±0,2	2,0±0,2	2,0±0,1
Ca, г/кг	0,35±0,04	0,40±0,02	0,46±0,03	0,25±0,02	0,33±0,02	0,48±0,03	0,20±0,01	0,30±0,03	0,38±0,02
Si, г/кг	0,81±0,03	0,71±0,04	0,60±0,03	0,76±0,04	0,68±0,04	0,61±0,03	0,80±0,05	0,71±0,04	0,70±0,04
Mg, мг/кг	2,8±0,37	5,1±0,82	7,0±0,70	2,5±0,25	4,6±0,64	6,6±0,86	1,8±0,35	2,4±0,50	3,4±0,58
N, мг/кг	20±3,4	48±16	62±18	24±3,1	45±9,9	66±17	24±3,8	31±5,9	36±6,8
P, мг/кг	5,4±0,86	8,9±1,2	15±1,7	6,5±1,0	19±3,6	27±4,9	7,4±1,1	20±2,6	28±6,4

Изменение соотношения хвостов и ОСВ оказало влияние на содержание кремния – при увеличении доли ОСВ наблюдалось небольшое снижение Si, что связано с разбавлением минеральной фазы органическим компонентом. Например, в серии А содержание Si уменьшилось в 1,7 раза, в серии В – в 1,4 раза, а в серии С – в 1,2 раза в сравнении с контрольным образцом. В некоторых исследованиях отмечались схожие тенденции. Внесение добавки ОСВ позволило снизить pH образцов грунта и повысить содержание биогенных элементов в доступной для растений форме после рекультивационных мероприятий [43-45].

Таблица 7

Всхожесть семян тест-культур в зависимости от содержания ОСВ в техногенных почвогрунтах

Субстрат	Содержание ОСВ, %	Тест-культура	
		Редис	Райграс
A0	0	18,3±1,5	51,7±6,2
A1	10	52,0±4,2	60,0±7,2
A2	20	58,0±4,6	62,0±7,4
A3	30	72,0±5,8	65,0±7,8
B0	0	33,3±2,7	47,2±5,7
B1	10	48,0±3,8	57,0±6,8
B2	20	51,0±4,1	73,0±8,8
B3	30	53,0±4,2	78,0±9,4
C0	0	47,3±3,8	53,7±6,4
C1	10	67,0±5,4	57,0±6,8
C2	20	78,0±6,2	62,0±7,4
C3	30	80,0±6,4	73,0±8,8

Фитотестирование является ключевым этапом биологической оценки качества полученных техногенных почвогрунтов и направлено на определение их способности обеспечивать прорастание и развитие растений, а также на выявление оптимального содержания органической добавки в виде ОСВ. Внешний вид растений по окончании эксперимента, всхожесть семян и изменение морфометрических параметров тест-растений в зависимости от дозировки внесенного ОСВ представлены в табл.7 и на рис.3, 4.

В результате эксперимента установлено, что всхожесть семян обеих тест-культур возрастала по мере увеличения доли ОСВ в составе техногенных почвогрунтов (табл.7).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Минимальные показатели всхожести для всех серий зафиксированы в контрольных вариантах (0 % ОСВ). Внесение 10 % ОСВ привело к заметному росту всхожести, а применение 20-30 % добавки обеспечило статистически значимое повышение показателя ($p < 0,05$). Так, всхожесть семян редиса в серии А увеличилась почти в четыре раза, а райграса пастбищного – в 1,7 раза (серия В). Наибольший эффект наблюдался при максимальной исследуемой дозе ОСВ (30 %) – для редиса максимальная всхожесть достигнута в серии С (80,0±6,4 %), для райграса – в сериях В (78,0±9,4 %) и С (73,0±8,8 %).Таким образом, увеличение доли ОСВ положительно влияет на всхожесть как редиса, так и райграса, что связано с поступлением органического вещества и доступных элементов питания для растений.

Высота растений в ходе эксперимента зависела от содержания мелиоранта в тестируемых субстратах. При увеличении доли органической добавки средняя высота редиса возрастала в два и более раза, райграса – до трех раз по сравнению с контрольными вариантами (рис.3). У райграса отклик на изменение количества внесенного ОСВ менее выражен – высота растений в опытных вариантах на основе лопаритовых хвостов составила 11,5-12 см, на основе апатит-нефелиновых хвостов – 10-11,5 см вне зависимости от количества внесенного ОСВ. Однако отмеченная умеренная тенденция к увеличению высоты райграса может также свидетельствовать о положительном влиянии ОСВ на рост растений.

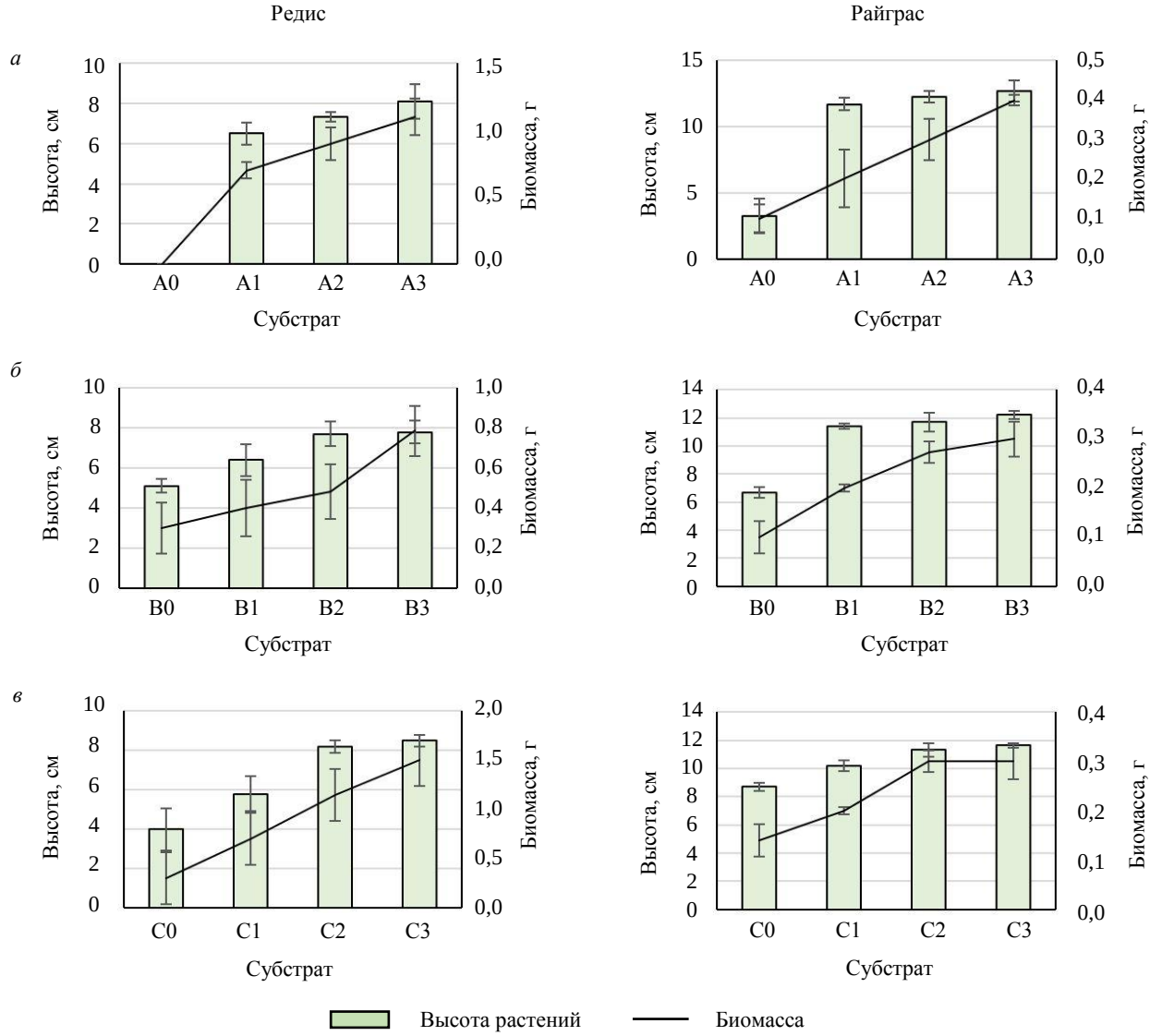


Рис.3. Высота и сырая биомасса надземной части растений редиса и райграса при разных дозировках ОСВ в техногенных почвогрунтах: *а* – ЛХ1; *б* – ЛХ2; *в* – АНХ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

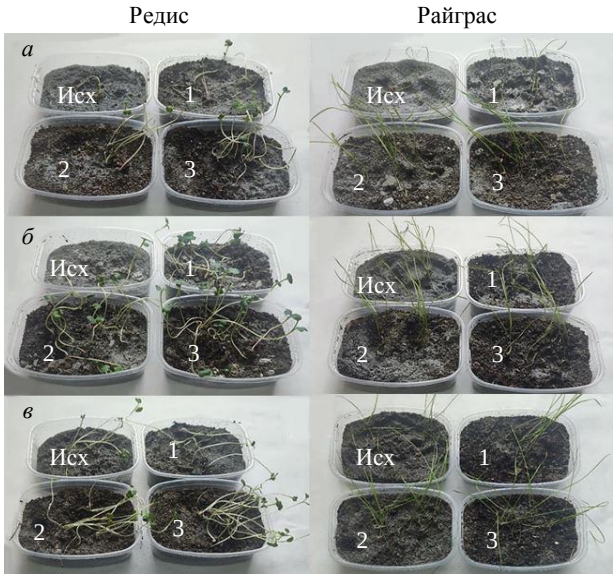


Рис.4. Внешний вид растений редиса и райграса по окончании фитотестирования: *а* – ЛХ1; *б* – ЛХ2; *в* – АНХ

Сырая биомасса надземной части растений, являющаяся интегральным показателем их физиологического состояния, также значительно возрастала при соотношениях хвосты : ОСВ – 8:2 и 7:3. В отдельных вариантах субстратов биомасса увеличивалась от трех до пяти раз в сравнении с контрольными вариантами опыта. Разницу в росте показателей у райграса по сравнению с редисом можно объяснить тем, что различные виды растений обладают разными потребностями в питательных веществах и условиями для оптимального роста. Редис, являясь чувствительной культурой, быстрее реагирует на изменения условий среды и активно поглощает питательные вещества из обогащенных субстратов. Райграс характеризуется большей устойчивостью к различным стрессорам, таким как засуха или низкая плодородность почв [46]. Вместе с тем, несмотря на менее выраженную реакцию райграса по сравнению с редисом, увеличение доли ОСВ положительно влияет на его рост и развитие, что подтверждается статистически значимым приростом биомассы и всхожести. Стимулирующее действие добавок на основе ОСВ также отмечалось рядом исследователей по результатам вегетационных опытов и полевых экспериментов [35, 47, 48].

Внешний вид растений. На рис.4 видно, что растения различаются по степени развитости от слабых, низкорослых до хорошо сформированных с относительно густой наземной частью. В серии А (ЛХ1) растения выглядят более угнетенными, встречается разреженность всходов. В серии В (ЛХ2) – средняя густота, растения более ровные. Серия С (АНХ) – растения наиболее жизнеспособные, густой и равномерный покров по сравнению с сериями А и В. Внешний вид растений согласуется с полученными результатами.

Различия в морфометрических показателях тест-культур для разных типов хвостов объясняются их исходными физико-химическими свойствами. В частности хвосты ЛХ1 характеризуются повышенной щелочностью (pH водной вытяжки 8,4-8,7), более высоким содержанием натрия (до 13,6 % Na_2O) и пониженным содержанием доступного фосфора и кальция по сравнению с хвостами ЛХ2 и АНХ. Для лопаритовых хвостов ЛХ1 в дальнейшем потребуется дополнительная корректировка рецептуры почвогрунта за счет увеличения доли ОСВ (что, впрочем, приведет к снижению высоты возможного слоя нанесения почвогрунта на хвосты обогащения) или внесения нейтрализующих добавок (например, небольшого количества торфа) для снижения pH от 8,4-8,7 до 7,0-7,5 и увеличения содержания элементов питания растений. После внесения 20-30 % ОСВ в вариантах А2 и А3 реакция среды уже близка к нейтральной (pH 6,9-7,3).

Анализ результатов лабораторного опыта позволяет сделать вывод о том, что внесение добавки ОСВ оказывает очевидное стимулирующее действие на всхожесть семян, высоту и биомассу растений за счет изменения физико-химических свойств грунтов – снижения щелочности, увеличения влагоудерживающей способности и содержания элементов питания [49]. Для практического применения на хвостохранилищах необходимо провести долгосрочные полевые эксперименты, на основе которых можно будет сделать расчет дозировки с учетом объемной массы смеси и проектной глубины рекультивационного слоя.

Заключение

В результате исследования впервые проведена комплексная сравнительная оценка техногенных почвогрунтов на основе нефелиновых хвостов обогащения Мурманской обл. с добавлением ОСВ, а также выявлена зависимость их физико-химических свойств и показателей фитотестирования от состава смеси. Установлено следующее:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Приготовление смеси ОСВ с хвостами обогащения улучшает агрохимические свойства формируемого почвогрунта. Внесение органической составляющей снижает pH среды апатит-нефелиновых и лопаритовых (хвостохранилище «Умбозеро») хвостов до нейтральных значений (6,5-7,2), способствующих лучшему развитию большинства культур.

• Увеличение дозы внесения ОСВ положительно влияет на влагоудерживающую способность почвогрунтов. При добавлении 20-30 % ОСВ влагоемкость возрастает в 1,4-1,8 раза по сравнению с контрольным образцом (от 18-22 до 32-38 % от массы почвогрунта), что обеспечивает улучшение водно-воздушного режима.

• Результаты фитотестирования (всхожесть семян, высота и биомасса растений) показали значительное улучшение этих показателей в опытных вариантах, демонстрируя стимулирующий эффект ОСВ на рост и развитие тестируемых культур.

• Химический анализ техногенных почвогрунтов показал, что внесение 20-30 % ОСВ увеличивает содержание обменного кальция в 2,1-3,4 раза, натрия – в 1,2-1,6 раза, подвижного фосфора – в 2,0-2,8 раза по сравнению с контрольным образцом, что способствует улучшению минерального питания растений и повышению их продуктивности.

• Для хвостов обогащения хвостохранилища «Карнасурт» требуется дополнительная корректировка рецептуры за счет увеличения доли ОСВ (что, впрочем, может привести к снижению высоты возможного слоя нанесения почвогрунта на хвосты обогащения) или внесения нейтрализующих добавок (например, небольшого количества торфа) для снижения pH от 8,4-8,7 до 7,0-7,5 и увеличения содержания элементов питания растений.

Полученные в лабораторных условиях результаты предварительно подтверждают целесообразность внедрения метода создания техногенных почвогрунтов на основе хвостов обогатительных производств и ОСВ. Вместе с тем необходимо проведение полевого эксперимента, а также мониторинг долгосрочного воздействия почвогрунтов на растительные сообщества и миграцию элементов. Особое внимание следует уделить подбору растений с развитой мочковатой корневой системой (например, райграс пастбищный, овсяница красная и др.), способствующей снижению эрозионных процессов и формированию плотного пионерного растительного покрова.

Данный подход обладает значительным прикладным значением для комплексного решения задач охраны окружающей среды и рационального использования ресурсов, позволяя минимизировать негативные последствия добычи полезных ископаемых и утилизации отходов промышленности. Практическое внедрение предлагаемой технологии обеспечит экологически устойчивое ведение хозяйственной деятельности в регионах с интенсивной эксплуатацией сырьевых запасов, включая северные регионы России.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН за проведение химических анализов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yujie He, Qian Zhang, Haisheng Li et al.* Heavy metal pollution characteristics and systemic risk assessment of the environment around the tailings site // Journal of Soils and Sediments. 2024. Vol. 24. Iss. 1. P. 217-229. DOI: 10.1007/s11368-023-03588-7

2. *Филатова М.Ю., Крупская Л.Т., Бубнова М.Б., Леоненко А.В.* Оценка экологической ситуации в границах влияния золотодобычи (для обоснования создания лесных плантаций) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 8. С. 27-44. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_27

3. *Sikdar A., Hossain S., Shulin Feng.* Heavy Metal Pollution of Environment by Mine Tailings and the Potential Reclamation Techniques: A Review // Journal of Biology, Agriculture and Healthcare. 2020. Vol. 10. № 16. P. 33-47. DOI: 10.7176/JBAH/10-16-05

4. *Яковенко Н.В., Сурина Е.А.* Технологии и способы восстановления нарушенных земель Крайнего Севера // Лесотехнический журнал. 2025. Т. 15. № 3 (59). С. 166-185. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.3/11

5. *Noble T.L., Parbhakar-Fox A., Berry R.F., Lottermoser B.* Mineral Dust Emissions at Metalliferous Mine Sites // Environmental Indicators in Metal Mining. Springer, 2017. P. 281-306. DOI: 10.1007/978-3-319-42731-7_16

6. *Цыдыпов В.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С. и др.* Влияние техногенных песков хвостохранилищ Джидинского вольфрамо-молибденового комбината на содержание мелкодисперсной и субмикронной фракции аэрозоля в атмосфере города Закаменска // Успехи современного естествознания. 2019. № 4. С. 81-86. DOI: 10.17513/use.37112

7. *Майорова Л.П., Черенцова А.А., Крупская Л.Т. и др.* Оценка техногенного загрязнения воздушного бассейна при пылении хвостохранилищ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 5-20. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-5-20

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

8. *Buikema N.D., Zwissler B.E., Seagren E.A. et al.* Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification // Environmental Geotechnics. 2018. Vol. 5. Iss. 2. P. 94-106. DOI: 10.1680/jenge.16.00006

9. *Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р.* Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

10. *Макаров Д.В., Светлов А.В., Горячев А.А. и др.* К проблеме пыления хвостохранилищ в связи с изменением климата на примере горного предприятия Крайнего Севера России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5. С. 122-133. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_122

11. *Cao L.M., Zhou Y., Zhang, Z. et al.* Impacts of airborne particulate matter and its components on respiratory system health // Chinese Journal of Preventive Medicine. 2016. Vol. 50. Iss. 12. P. 1114-1118. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2016.12.018

12. *Mehta U., Dey S., Chowdhury S. et al.* The Association Between Ambient $PM_{2.5}$ Exposure and Anemia Outcomes Among Children Under Five Years of Age in India // Environmental Epidemiology. 2021. Vol. 5. Iss. 1. № e125. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000125

13. *Thompson J.E.* Airborne Particulate Matter: Human Exposure and Health Effects // Journal of Occupational & Environmental Medicine. 2018. Vol. 60. Iss. 5. P. 392-423. DOI: 10.1097/JOM.0000000000001277

14. *Плохов А.С., Харько П.А., Пашкевич М.А.* Исследование влияния хвостового хозяйства медно-колчеданного месторождения на поверхностные воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 57-68. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_57

15. *Кременецкая И.П., Иванова Т.К., Гуревич Б.И. и др.* Раздельное осаждение металлов из высококонцентрированных растворов гранулированным магнезиально-силикатным реагентом. // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 1. С. 118-130. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-1-118-130

16. *Aili A., Yuguang Zhang, Tao Lin et al.* Optimizing Vegetation Restoration: A Comprehensive Index System for Reclaiming Abandoned Mining Areas in Arid Regions of China // Biology. 2025. Vol. 14. Iss. 1. № 23. DOI: 10.3390/biology14010023

17. *Миронова С.И., Капелькина Л.П.* Нормативные основы и региональные подходы к рекультивации земель, нарушенных при разработке алмазных месторождений Якутии // Проблемы региональной экологии. 2022. № 5. С. 49-53. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-5-49-53

18. *Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Кислицына А.П.* Формирование биоценоза на техногенных отходах // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 129-135. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-129-135

19. *Брагина П.С., Герасимова М.И.* Техногенные поверхностные образования на отвалах и хвостохранилищах в Кемеровской области: опыт классификации // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. 2017. № 89. С. 90-103. DOI: 10.19047/0136-1694-2017-89-90-103

20. *Меньшикова Е.А., Караваева Т.И., Хайрулина Е.А., Митракова Н.В.* Особенности грунтов и потенциал восстановления природно-технической системы «Хвостохранилище ЕВРАЗ КГОК» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 9. С. 54-66. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3353

21. *Пинаев В.Е., Касимов Д.В.* Вопросы рекультивации земель, пресноводных и морских объектов. М.: Мир науки, 2021. 125 с.

22. *Иванова Л.А., Слуковская М.В., Красавцева Е.А.* Оценка эффективности использования осадка сточных вод для рекультивации нарушенных территорий в Кольской субарктике (на примере песчаного карьера) // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452.

23. *Санникова Н.В., Шулепова О.В., Резниченко В.А.* Использование осадка сточных вод в составе почвогрунтов для рекультивации нарушенных земель в условиях Крайнего Севера // Вестник КрасГАУ. 2023. № 10. С. 30-40. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-10-30-40

24. *Chenyu Wang, Yujie Fan, Hornung U. et al.* Char and tar formation during hydrothermal treatment of sewage sludge in subcritical and supercritical water: Effect of organic matter composition and experiments with model compounds // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 242. № 118586. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118586

25. *Nkinahamira F., Suanon F., Qiaoqiao Chi et al.* Occurrence, geochemical fractionation, and environmental risk assessment of major and trace elements in sewage sludge // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 249. № 109427. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109427

26. *Fini E.H., Kazemi M., Poulikakos L. et al.* Perspectives on innovative non-fertilizer applications of sewage sludge for mitigating environmental and health hazards // Communications Engineering. 2024. Vol. 3. № 178. DOI: 10.1038/s44172-024-00298-x

27. *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

28. *Карев С.Ю., Прохоров И.С., Типцов А.А.* Патент № 2497784 РФ. Способ получения техногенного почвогрунта и техногенный почвогрунт. Опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31.

29. *Заручевных И.Ю., Корзова М.А.* Патент № 2490240 РФ. Почвогрунт для рекультивации нарушенных земель. Опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23.

30. *Krasavtseva E., Maksimova V., Makarov D.* Conditions Affecting the Release of Heavy and Rare Earth Metals from the Mine Tailings Kola Subarctic // Toxics. 2021. Vol. 9. Iss. 7. № 163. DOI: 10.3390/toxics9070163

31. *Красавцева Е.А., Максимова В.В.* Особенности состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд обогатительной фабрики «Умбозеро» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 4. С. 119-129. DOI: 10.15372/FTPRPI20240410

32. *Тимофеева Ю.Р., Степанова Е.А., Богданов В.Л.* Биологическая рекультивация нарушенных земель горно-промышленным комплексом (на примере ОАО «Апатит») // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. № 42. С. 294-299.

33. *Лусис А.В., Иванова Л.А., Горбачева Т.Т., Румянцева А.В.* Формирование противоэрозионного растительного покрова на песчаном карьере в условиях Арктики с помощью осадка сточных вод // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 3. С. 223-231. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-73

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

34. *Jones D.L.* Organic acids in the rhizosphere – a critical review // Plant and Soil. 1998. Vol. 205. Iss. 1. P. 25-44. DOI: 10.1023/A:1004356007312

35. *Лусис А.В., Горбачева Т.Т., Иванова Л.А.* Оптимизация арктических техногенных ландшафтов нетрадиционным методом биологической рекультивации // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 2 (124). С. 88-96. DOI: 10.56195/20793332_2023_2_88_96

36. *Горбачева Т.Т., Иванова Л.А., Румянцева А.В., Максимова В.В.* Повышение биогенности техногрунтов при создании растительного покрова как способа консервации хвостохранилищ горнопромышленных отходов // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 4. С. 159-171. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-159-171

37. *Mani V., Gurusamy A.K., Perumal V.* Toxicological effects of Mercury in Radish (*Raphanus Sativus*) plants – Biochemical Analysis // Scholars Academic Journal of Pharmacy. 2025. Vol. 14. Iss. 1. 8 p. DOI: 10.36347/sajp.2025.v14i01.001

38. *Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. et al.* Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 376. DOI: 10.3390/min12030376

39. *Шестаков Р.Б., Яковлев Н.А.* Экспериментальный процесс в воспроизводственом цикле агробизнеса // Вестник аграрной науки. 2022. № 4 (97). С. 153-157. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2022.4.153

40. *Мисников О.С., Гамаюнов С.Н., Тимофеев А.Е.* Увеличение гидрофильности торфяных гранулированных мелиорантов для обеспечения повышенной влагоудерживающей способности почв // Труды Инсторфа. 2020. № 22 (75). С. 12-19.

41. *Halecki W., Klatka S.* Aplication of Soil Productivity Index after Eight Years of Soil Reclamation with Sewage Sludge Amendments // Environmental Management. 2021. Vol. 67. Iss. 5. P. 822-832. DOI: 10.1007/s00267-020-01422-1

42. *Wengang Zuo, Chuanhui Gu, Wenjie Zhang et al.* Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 654. P. 541-549. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.127

43. *Artico M., Firpo B.A., Artico L.L., Tubino R.M.C.* Integrated use of sewage sludge and basalt mine waste as soil substitute for environmental restoration // REM. 2020. Vol. 73. Iss. 2. P. 225-232. DOI: 10.1590/0370-44672019730045

44. *Jeżowski S., Mos M., Buckby S.et al.* Establishment, Growth, and Yield Potential of the Perennial Grass *Miscanthus* × *Giganteus* on Degraded Coal Mine Soils // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. № 726. DOI: 10.3389/fpls.2017.00726

45. *Carabassa V., Ortiz O., Alcañiz J.M.* Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: Effects on soil and vegetation // Land Degradation & Development. 2018. Vol. 29. Iss. 8. P. 2568-2574. DOI: 10.1002/ldr.3071

46. *Jixiang Lin, Xiaoyu Hua, Xiaoyuan Peng et al.* Germination Responses of Ryegrass (Annual vs. Perennial) Seed to the Interactive Effects of Temperature and Salt-Alkali Stress // Frontiers in Plant Science. 2018. Vol. 9. № 1458. DOI: 10.3389/fpls.2018.01458

47. *Межевова А.С.* Практическое применение осадка сточных бытовых вод на примере возделывания сафлора красильного // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 2. С. 53-67. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-53-67

48. *Манжина С.А.* Влияние осадков сточных вод на тест-растения и агрохимические свойства почв // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14. № 1. С. 34-50. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-1-34-50

49. *Красавцева Е.А., Иванова Т.К.* Патент № 2849879 РФ. Техногенный почвогрунт. Опубл. 30.10.2025. Бюл. № 31.

***Авторы*: Татьяна Константиновна Иванова**, *канд. техн. наук, младший научный сотрудник* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *младший научный сотрудник* (*Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-8103-2279*, **Евгения Андреевна Красавцева**, *канд. техн. наук*, *научный сотрудник* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россиии*), *vandeleur2012@yandex.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-8821-4446*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0