



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-73>

УДК 502.132



Формирование противозерозийного растительного покрова на песчаном карьере в условиях Арктики с помощью осадка сточных вод

А. В. Лусис^{1,2} , Л. А. Иванова^{2,3} , Т. Т. Горбачева³ ,

А. В. Румянцева⁴

¹ ГК «Эвобласт», г. Москва, Российская Федерация

² Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ПАБСИ КНЦ РАН), г. Кировск, Российская Федерация

³ Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Российская Федерация

⁴ Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация

adelisrab@gmail.com

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты многолетних полевых исследований по оценке возможности применения ОСВ регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства для ускоренного формирования устойчивого противозерозийного растительного покрова на песчаных карьерах в Арктической зоне РФ с подтверждением оказания им стимулирующего эффекта на прорастание семян, дальнейший рост и развитие растений. Показано, что ОСВ может применяться двумя способами: нанесением на поверхность грунта сплошным слоем высотой от 5 до 10 см, и фрагментарно – слоем 2–3 см, а подзимний посев семян – непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ) либо поверх осадка сточных вод. В обоих случаях отмечено ежегодное улучшение качественных и количественных показателей искусственно созданного травостоя – многократное, по сравнению с контролем, увеличение его высоты и плотности, биомассы, проективного покрытия и мощности сформированной дернины. Исследованы особенности формирования флористического состава созданных в песчаном карьере фитоценозов. Установлено, что независимо от количества и способа нанесения применение ОСВ способствует ускорению восстановительной сукцессии на песчаном карьере, а мощный травостой опытных вариантов путем привлечения пионерной растительности – усложнению его структуры и видового состава, быстрому зарастанию внутренних оголенных участков и возникновению элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительности, а также стабилизации процессов эрозии на объекте исследования. Все это позволяет характеризовать сформированное в эксперименте с помощью ОСВ растительное сообщество как экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию и дальнейшему развитию. Результаты таких исследований могут послужить основой для организации мониторинга и разработки мероприятий по оптимизации растительности подобных экотопов.

Ключевые слова

песчаный карьер, фиторекультивация, осадок сточных вод (ОСВ), мелиорант, травосмесь, растительный покров

Благодарности

Проведенные исследования были поддержаны грантом РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области. Проект 17-45-510205: «Дефосфотация коммунальных стоков в условиях снижения водопотребления» в 2017–2019 гг.

Для цитирования

Lusis A.V., Ivanova L.A., Gorbachyova T.T., Rumyantseva A.V. Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions using sewage sludge. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):223–231. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-73>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions using sewage sludgeA. V. Lusis^{1,2} , L. A. Ivanova^{2,3} , T. T. Gorbachyova³  ,A. V. Rumyantseva⁴ ¹ SC Evoblast, Moscow, Russian Federation² Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of N.A. Avrorin, KSC RAS, Kirovsk, Russian Federation³ Institute of North Industrial Ecology Problems, KSC RAS, Apatity, Russian Federation⁴ Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation adelisrab@gmail.com**Abstract**

This paper presents the findings of a prolonged field studies that aimed to assess the feasibility of using the sewage sludges (SS) from a regional water and wastewater services enterprise to expedite the establishment of a resilient erosion-control plant cover in sand pits located in the Arctic region of the Russian Federation. The study confirms the beneficial impact of the SS on the seed germination, subsequent growth, and development of plants. The study shows that SS can be used in two ways: first, by applying a continuous layer measuring 5 to 10 cm thick on the soil surface or by fragmentarily applying a layer 2–3 cm thick. Second, through early-winter sowing of seeds directly on the soil surface (under the SS layer) or on top of the sewage sludge. In both cases, an annual enhancement of the qualitative and quantitative parameters of the artificially formed stand of grass was observed. This included a significant increase in its height and density, biomass, foliage cover, and thickness of the formed sod, in contrast to the reference sample. The present study investigates the characteristics of the floristic composition of the phytocenoses formed in a sand pit. The findings demonstrate that the use of sewage sludge (SS), regardless of the quantity and application method, accelerates the restorative succession in the sand pit. The thick stand in the experimental variants, resulting from the attraction of pioneer vegetation, promotes the complexity of its structure and species composition, rapid vegetation of inner bare areas, and the emergence of natural phytocenoses elements that are specific to the zonal type of vegetation. Additionally, the use of SS stabilizes erosion processes in the study area. Consequently, the plant community formed in the experiment using SS can be classified as ecologically sustainable, with the potential for independent existence and further development. These results can serve as a foundation for monitoring efforts and the development of measures to optimize the vegetation of such ecotopes.

Keywords

sand pit, phytoremediation, sewage sludge (SS), ameliorant, grass mixture, plant cover

Acknowledgements

This research received funding from the Russian Foundation for Basic Research and the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region. The project, titled “Dephosphorization of municipal wastewater under the conditions of reduced water consumption” (Project 17-45-510205), was conducted between 2017 and 2019.

For citation

Lusis A.V., Ivanova L.A., Gorbachyova T.T., Rumyantseva A.V. Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions using sewage sludge. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):223–231. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-73>

Введение

Ежегодное увеличение масштабов использования минеральных ресурсов, осуществление геологоразведочных и строительных работ горнорудными и нефте-, газодобывающими предприятиями, прокладка дорог, линий электропередач и других приводят к нарушению природных экосистем (уничтожению почв, растительного покрова, уменьшению биоразнообразия) и возникновению новых техногенных форм ландшафта [1].

На территории Мурманской области карьеры, возникающие после изъятия песка для строитель-

ных и иных целей, являются одной из часто встречающихся форм техногенного изменения арктических ландшафтов. Для их восстановления необходимы мероприятия, направленные на преобразование нарушенных земель в состояние, пригодное для дальнейшего использования, и предотвращение отрицательного воздействия на окружающую среду [2].

Одним из способов экологической реабилитации депрессивных территорий является отведение их части под самозарастание [3]. Однако в связи с неблагоприятным прогнозом естественного зарастания и сложностью восстановления растительного покрова



на песчаных отложениях, обусловленных индивидуальной и региональной спецификой, на первый план выдвигается проведение рекультивационных работ (восстановление продуктивности нарушенных земель путем создания новых, целенаправленно синтезируемых, искусственных биогеоценозов) [4]¹.

При принятии рекультивационных мер по формированию растительного покрова на песчаном грунте одним из определяющих факторов является питательный режим его поверхностного слоя. Бесструктурность такого субстрата, низкая водоудерживающая способность, отсутствие в нем органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также недостаточная обеспеченность питательными веществами – вот причины неизбежности ежегодных инвестиций в дорогостоящие минеральные удобрения [5]. Положительную роль в решении проблемы низкого НРК-статуса песчаных грунтов, создания на них и поддержания устойчивости растительного покрова может сыграть использование мелиоранта на основе продуктов переработки региональных коммунальных сточных вод – осадка сточных вод (ОСВ) [6–8]. Он обладает потенциально полезными свойствами вследствие высокого содержания легкодоступного для микробиоты органического вещества [9], а также лабильности азота, фосфора и калия, обуславливающей их быструю ассимиляцию растениями [10, 11]. ОСВ оказывает положительное воздействие на физические свойства песчаных почв (оптимизирует плотность и агрегированность), однако может содержать набор тяжелых металлов и патогенов, поэтому необходимы исследования каждого осадка в конкретных условиях рекультивируемых территорий [12].

Цель исследования – оценка возможности применения ОСВ местного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) АО «Апатитыводоканал» для ускоренного формирования высококачественного противозерозионного растительного покрова на песчаных карьерах в арктической зоне РФ.

Задачи исследования:

1. Изучить влияние ОСВ на рост растений и качество искусственно создаваемых посевных фитоценозов.
2. Апробировать способы нанесения ОСВ на поверхность грунта песчаного карьера при проведении рекультивационных мероприятий.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в период с 07.10.2017 по 10.10.2020 г. в Мурманской области (РФ, Кольский полуостров) на локальной нарушенной территории – песчаном карьере АО «Апатитыводоканал» по добыче строительных материалов, глубина которого варьирует от 3 до 5 м.

Район, в котором находится объект исследования, относится к подзоне северотаежных хвойных лесов,

их флористическая насыщенность сосудистыми растениями составляет около 250 видов [13]. По результатам исследований модельный участок представлял собой вторичный экотоп, содержащий в поверхностном слое грунта незначительное количество зачатков растений. Анализ состава растительных сообществ, произрастающих в карьере, выявил наличие в нем небольших микрогруппировок из одно-, дву- и многолетних пионерных видов растений с небольшой степенью покрытия его поверхности данной растительностью. Растительный покров вокруг карьера представлен естественными лесными сообществами, главным образом березняками, лишайниково-разнотравными и лишайниково-травянисто-моховыми ельниками, на открытых участках – луговыми растениями. В общей сложности непосредственно на территории карьера и в ближайших окрестностях было зафиксировано 56 видов, характерных для сухих и бедных почв. При благоприятных условиях произрастания они могли бы участвовать в естественном зарастании карьерного пескогрунта, повышении биоразнообразия рекультивируемой территории. Это способствовало бы формированию значительно более устойчивого искусственного фитоценоза [14].

В карьере видны следы деятельности ветровой и водной эрозии (сползание грунта, округлость вершин холмов). Модельный участок представлял собой песчаный склон (уклон 30°) северо-западной экспозиции площадью 200 м², свободный от растительности, с предварительно проведенным на нем выполаживанием, террасированием и планировкой поверхности².

Объектом исследований являлся песчаный карьерный грунт с примесью гравия и небольших валунов. Согласно Государственному стандарту 25100–2011³ по крупности зерна он относится к среднеразмерной разновидности с содержанием незначительной доли глинистых частиц.

В качестве мелиоранта для повышения биогенности данного грунта использовался осадок сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС-3) г. Апатиты (Мурманская область), представляющий собой увлажненную пластилинообразную массу черно-коричневого цвета с резким специфическим запахом. Основным способом обработки ОСВ на данных очистных сооружениях является его подсушка и выдержка на иловых площадках в течение трех и более лет. Контрольный образец ОСВ относится к отходам V класса опасности и полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 54534–2011⁴, предъявляемым к ОСВ при использовании в качестве почвогрунта для биологической рекультивации. Валовое содержание

² ГОСТ 17.5.3.04–83 (СТ СЭВ 5302–85). Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель. М.: Стандартинформ; 1984.

³ ГОСТ 25100–2011. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. 2013-01-01. М.: Стандартинформ; 2011.

⁴ ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель (издание официальное). М.: Стандартинформ; 2012.

¹ ГОСТ Р 57446–2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. М.: Стандартинформ; 2017.



тяжелых металлов в ОСВ значительно ниже нормативов [12], установленных ГОСТ Р 54534–2011⁵.

Схема полевого опыта включала 3 варианта, каждый выполнялся в 6 повторностях. С этой целью на модельном участке было заложено 18 экспериментальных делянок, каждая размером 1×1 м, расположенных через 0,5 м друг от друга. Нанесение ОСВ на поверхность грунта в опытных вариантах производилось двумя способами: фрагментарно и сплошным слоем, в контроле ОСВ не вносили. Особенности схемы полевого опыта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Схема полевого опыта

Вариант	Способ нанесения ОСВ
1 – опытный (n = 6)	Фрагментарно слоем высотой 2–3 см с посевом семян по поверхности грунта (под слой ОСВ)
2 – опытный (n = 6)	Сплошным слоем высотой 5–10 см с посевом семян поверх слоя ОСВ
3 – контрольный (n = 6)	Без использования ОСВ с посевом семян по поверхности грунта

Покрытие песчаной поверхности плодородным слоем почвы и дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе эксперимента не проводились.

Сложный посевной фитоценоз формировался с помощью подзимнего способа прямого посева травосмеси, разработанной нами на основании биологических характеристик видов многолетних травянистых растений. Она включала 3 вида злаков – овсяницу красную (*Festuca rubra* L.), волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), пырей ползучий (*Elymus repens* (L.) Gould) – и 2 вида бобовых растений – люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.), взятые в соотношении 5 : 1 : 1 : 0,1 : 0,1 (по объему). Норма высева семян составляла 27,5 г/м². В опытном варианте №1 семена высевались непосредственно на поверхность грунта (под слой ОСВ), в варианте №2 – поверх сплошного слоя ОСВ. Отдельно от травосмеси в нижний правый угол каждой делянки высевали по 6 штук семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Дальнейшие полевые работы включали в себя регулярные наблюдения за ростом и развитием растений, формированием травостоя. Влияние мелиоранта на качество создаваемых фитоценозов оценивалось по высоте растений в травостое (см), проективному покрытию (%) на делянках, изменению структуры и видового состава фитоценоза [15, 16] и – в завершение эксперимента – по мощности дернины (см), плотности травостоя (количество побегов на 1 м²) и накоплению сырой биомассы (г/м²). Измерения биометрических показателей проводили одновременно во всех повторностях, определение биомассы – в лабораторных условиях с использованием аналитических весов.

Латинские названия растений приводятся в соответствии с общепринятыми международными названиями World Flora Online⁶.

Для обработки полученных данных применяли однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) в Excel.

Результаты исследований

2018 г. Появление первых всходов посеянных растений в эксперименте было зафиксировано во всех трех вариантах одновременно сразу после схода снежного покрова в мае 2018 г. Однако самые дружные и качественные всходы отмечены в вариантах с использованием ОСВ (табл. 2), что позволило предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на процесс прорастания семян.

В течение последующих 1,5 мес на экспериментальных площадках сформировались примитивные (одноярусные) растительные сообщества (табл. 2), на июль 2018 г. состоящие только из двух посеянных видов – овсяницы красной и пырея ползучего. Качество травостоя на опытных делянках сильно отличалось от контрольных. В обоих опытных вариантах это был густой, хорошо развитый травостой яркого изумрудно-зеленого цвета с высоким проективным покрытием. На делянках со сплошным нанесением ОСВ и верховым посевом травосмеси (вариант 2) оно составило 100 %, с фрагментарным (вариант 1) – 87 %, во втором случае прорастание семян наблюдалось главным образом на свободных от слоя ОСВ участках опытных делянок, и в меньшей степени – на участках, покрытых слоем мелиоранта. В контроле (без внесения ОСВ) сформированный травостой был разреженным желто-красного цвета, покрывающим всего 15 % площади делянки. Растения в нем находились в угнетенном состоянии и к завершению вегетационного сезона практически не прибавили в высоту.

В первый вегетационный период увеличение (до пяти видов) состава сформированных фитоценозов отмечалось только на опытных делянках (табл. 2) за счет вселения с близлежащих территорий трех новых видов. Это аборигенные пионерные и сорные растения – мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), иван-чай узколистный (*Epilobium angustifolium* L.) и щавель малый (*Rumex acetosella* L.).

В **2019 г.** на контрольных площадках травостой по-прежнему оставался низким, разреженным (проективное покрытие составляло всего 20 %), а образовавшееся сообщество осталось одноярусным (табл. 2, рис. 1). Опытные делянки отличались плотным травостоем сложного двоярусного строения высотой, в 4–5 раз превышающей высоту растения в контроле.

Растения на контрольных площадках только вегетировали, а на опытных – находились в фазе цветения. Все шесть посеянных видов, включая сеянцы сосны обыкновенной, были зафиксированы только на опытных делянках. В этот период видовой состав созданного растительного сообщества пополнили

⁵ ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. М.: Стандартинформ; 2013.

⁶ The WFO Plant List. Snapshots of the taxonomy. URL: <https://wfo.plantlist.org/plant-list>

четыре вида из основной посевной травосмеси – волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.) и сосна обыкновенная, продолжилось заселение опытных делянок, а также их периметра шестью новыми видами аборигенных растений – астрагалом субарктическим (*Astragalus norvegicus* Grauer), щучкой дернистой (*Deschampsia caespitosa* (L.) P. Beauv.), жерушником болотным (*Rorippa palustris* Besser), кульбабой осенней (*Scorzoneroide autumnalis* (L.) Moench), полевицей тонкой (*Agrostis capillaris* L.), кисличником двупестичным (*Oxyria digyna* Hill.). На контрольных площадках, чаще всего в травостое, не удавалось обнаружить волоснец песчаный и сосну обыкновенную, что может быть обусловлено качеством собранных в природных условиях семян и их незначительной объемной долей при посадке. Несмотря на то что люпин многолистный приурочен к местообитаниям с песчаными почвами и вполне может развиваться на бедных питательными веществами субстратах [17], данный вид зафиксирован только на опытных делянках, где присутствовал осадок сточных вод.

2020 г. За три вегетационных периода благодаря применению ОСВ на лишенном растительного и почвенного покрова модельном откосе карьера, без землевания и использования удобрений были сформированы сообщества растений, обладающих интенсивным ростом и развитием, в которых по-прежнему доминировали два, определяющих их высоту, вида: овсяница красная и пырей ползучий.

У растений опытных вариантов она достигла $95,2 \pm 1,4$ см (вариант 2) и $86,7 \pm 3,3$ (вариант 1), в контроле данный показатель был в 6 раз меньше (табл. 3). В отличие от контроля, растения опытного варианта по-прежнему сохраняли красивый интенсивно зеленый цвет и блестящую поверхность листьев и стеблей. Плотность травостоя в опытных вариантах превосходила контроль в 1,7–4,4 раза. 100%-ное проективное покрытие делянок было отмечено только в опытных вариантах. На контрольных делянках этот показатель составил всего 10 %, это ниже, чем в первый и второй вегетационные периоды на 5–10 %. Корни растений в опытных вариантах хорошо освоили песчаный субстрат и сформировали плотную травяную дернину мощностью $3,6 \pm 0,03$ см (вариант 1)

Таблица 2

Средние показатели искусственного фитоценоза в 2018–2019 гг. в песчаном карьере АО «Апатитыводоканал»

Показатель	Вариант и способ нанесения ОСВ					
	2018 г.			2019 г.		
	1*	2**	3 (контроль)	1*	2**	3 (контроль)
Количество ярусов, шт.	1	1	1	2	2	1
Средняя высота растений (по виду-доминанту), см	$27,4 \pm 1,5$	$35,3 \pm 1,2$	$8,1 \pm 0,3$	$56,9 \pm 1,7$	$69,7 \pm 1,9$	$12,8 \pm 0,5$
Среднее количество видов из числа высеванных, шт.	2	2	2	4,5	5,6	4,0
Среднее количество вселившихся видов, шт.	3	3	–	3,8	3,8	2,3
Проективное покрытие, %	87	100	15	100	100	20

* – фрагментарное нанесение ОСВ;

** – нанесение ОСВ сплошным слоем.



Вариант 1



Вариант 2



Контрольный вариант

Рис. 1. Внешний вид опытных делянок в 2019 г.



и $9,6 \pm 0,02$ см (вариант 2). В контроле этот показатель был меньше в 1,4 и 3,7 раза соответственно (табл. 4). Высокое проективное покрытие и плотность травостоя в вариантах с применением ОСВ обусловили и существенное для северо-запада РФ накопление биомассы [18]. В опытном варианте 1 она составила $2952,0 \pm 52,5$ г/м², в варианте 2 – $5632,0 \pm 28,9$ г/м² (в пересчете 29 и 56,3 т/га), что в 29 и в 56 раз превысило данный показатель в контроле (всего $100,7 \pm 3,2$ г/м²) (1 т/га) (табл. 3).

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа влияния способа нанесения ОСВ на основные качественные показатели искусственного фитоценоза (2020 г.)

Вариант, источники вариации	Показатель		
	Высота растений (по виду-доминанту), см	Плотность травостоя, количество стеблей/1 м ²	Зелёная биомасса, г/м ²
1	$86,7 \pm 3,3$	$12\,830 \pm 123,14$	$2952 \pm 52,5$
2	$95,2 \pm 1,4$	$32\,589,7 \pm 546,7$	$5632 \pm 28,9$
3	$13,7 \pm 0,9$	$7431,7 \pm 20,9$	$100 \pm 3,2$
SS	120 538	2 105 022 787	76 295 880,9
df	2	2	2
MS	60 269	1 052 511 394	38 147 940,5
F	13 452,6	10 040	39 119,4
p-значение	< 0,001	< 0,001	< 0,001
F критическое*	7,4	3,7	3,9

* F критическое – табличное значение критерия принятого уровня – достоверность различий между вариантами принималась при значениях $p < 0,05$ ($n = 6$). Варианты считались недостоверными при значениях $p > 0,05$.

Таблица 4

Влияние способа нанесения ОСВ на качественные показатели искусственного фитоценоза (2020 г.)

Показатель	Вариант		
	1*	2**	3 (контроль)
Количество ярусов, шт.	2	3	1
Среднее количество видов из числа высеванных, шт.	6,0	6,0	4,5
Среднее количество вселившихся видов, шт.	11,7	12,0	3,0
Проективное покрытие, %	100	100	10
Мощность дернины (по керну, $n = 3$), см	$3,6 \pm 0,03$	$9,6 \pm 0,02$	$2,6 \pm 0,2$

* – фрагментарное нанесение ОСВ;

** – нанесение ОСВ сплошным слоем.

Исследование изменения основных качественных показателей созданного за три вегетационных периода растительного покрова под влиянием ОСВ (табл. 3) показало, что средние выборки для трех основных показателей качества искусственного фитоценоза статистически значимо отличаются ($p < 0,05$). Вычисленное для них F больше уровня значимости (F критическое), поэтому выдвинутая нами нулевая гипотеза, а именно – *высота, накопление зелёной биомассы растений и плотность травостоя не зависят от применения ОСВ* – была отклонена и принята альтернативная, согласно которой наше предположение о зависимости основных качественных показателей от применения ОСВ статистически обоснованно. Таким образом, с вероятностью 95% было доказано, что использование ОСВ оказало положительное влияние на качественные показатели созданного за три вегетационных периода растительного покрова на песчаном карьере.

Сформированный на опытных делянках плотный травостой имел сложное (дву- и трехъярусное) строение, в контроле он по-прежнему оставался примитивным, разреженным, одноярусным (табл. 4). В 2020 г. видовой состав созданных растительных сообществ пополнился еще двумя новыми видами аборигенных растений – ивой филиколистной (*Salix phylicifolia* L.), мятликом луговым (*Poa pratensis* L.), наблюдалось быстрое зарастание оголенных межделяночных участков и периметра площадок пионерными растениями, способствуя тем самым ускорению восстановительной сукцессии в карьере. Общее число видов (с учетом входящих в основной посевной состав) на модельном участке, адаптировавшихся к специфическим для них условиям, в 2020 г. увеличилось до 21, у семи из них наблюдался полный цикл развития. Отмеченное при этом возникновение элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительного покрова, позволил характеризовать искусственно созданное растительное сообщество как экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию и дальнейшему развитию [19].

Практическое применение

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что на основании выполненных исследований впервые в природоохранных целях предложен инновационный, экономически более эффективный, по сравнению с традиционным, способ создания высококачественных реабилитационных фитоценозов.

Основанный на использовании широкодоступного и дешевого, являющегося к тому же дополнительным источником питательных веществ, влагоемкого компонента в виде продукта переработки региональных коммунальных сточных вод – ОСВ, он может сыграть положительную роль в решении проблемы низкой продуктивности песчаных техногрунтов. Предлагаемые в работе меры будут способствовать росту прибыли предприятий ВКХ за счет снижения штрафных санкций за сверхнормативный сброс отходов и возможно-



сти совершенствования технологических процессов, позволят вовлечь в хозяйственный оборот большой объем требующих утилизации отходов и тем самым добиться существенного снижения их негативного воздействия на окружающую среду. Получаемый при этом экономический эффект от защиты окружающей среды трудно поддается оценке [20, 21].

Направление дальнейших исследований

Полученные в исследованиях результаты требуют верификации при их внедрении на объектах накопленного экологического ущерба, в частности, для закрепления пылящих поверхностей разных типов хвостохранилищ на территории Мурманской области для признания предлагаемого способа альтернативой традиционным методам рекультивации техногрунтов.

Заключение

В многолетних полевых исследованиях сделана попытка разработки практических основ инновационного метода биорекультивации пескогрунтов без торфо- и землевания, дополнительного использования минеральных и органических удобрений.

Способ основан на натурных наблюдениях экспериментального орошения техногенного грунта песчаного карьера продуктом переработки региональных коммунальных сточных вод – ОСВ с подтверждением стимулирующего эффекта их использования на проращение семян, дальнейший рост и развитие растений, улучшение качества искусственно создаваемых посевных фитоценозов, что может способствовать

частичному решению таких важных экологических проблем, как рациональное применение ОСВ региональных ВКХ для восстановления объектов накопленного экологического ущерба и улучшения окружающей среды на Крайнем Севере.

Показано, что ОСВ может применяться двумя способами – сплошным и фрагментарным нанесением на техногрунт слоем толщиной от 2 до 10 см, а подзимний посев семян – непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ) либо поверх осадка.

Способ нанесения мелиоранта существенно влияет на качество формируемого посевного фитоценоза. Фрагментарное нанесение ОСВ на поверхность грунта способствует увеличению высоты растений в создаваемом фитоценозе в 6,3, плотности травостоя – в 1,7, биомассы – в 29,3, проективного покрытия – в 10 раз и мощности дернины в 1,4 раза по сравнению с контролем (вариант без внесения ОСВ). При нанесении осадка сплошным слоем данные показатели в сравнении с контролем еще больше возрастают: высота растений – в 6,9, плотность травостоя – в 4,4, биомасса – в 55,9, мощность дернины – в 3,7 раза.

Независимо от способа нанесения применение ОСВ способствует ускорению восстановительной сукцессии и увеличению биоразнообразия на песчаном карьере, а мощный травостой – заселению пионерных видов, быстрому зарастанию внутренних оголенных участков, возникновению элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительности, закреплению, а также стабилизации процессов эрозии.

Список литературы

1. Капелькина Л.П. О естественном зарастании и рекультивации нарушенных земель Севера. *Успехи современного естествознания*. 2012;(11):98–102. URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2012/11-1/29.pdf>
2. Певзнер М.Е., Костовецкий В.П. *Экология горного производства*. М.: Недра; 1990. 235 с.
3. Кондратюк Е.Н., Тарабрин В.П., Бакланов В.И. и др. *Промышленная ботаника*. Киев: Наук. думка; 1980. 260 с.
4. Капелькина Л.П. *Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов*. М.: Наука; СПб.: ПРОПО; 1993. 191 с.
5. Евдокимова Г.А., Переверзев В.Н., Зенкова И.В. и др. *Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности)*. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН; 2010. 146 с.
6. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской субарктике. *Почвоведение*. 2016;(11):1375–1391. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082> (Перев. вер.: Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the kola subarctic. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(11):1294–1309. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090088>)
7. Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В. и др. Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» на Кольском полуострове. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2015;(2):42–48.
8. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A.C. Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008;37(5):36–42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
9. Kuypers M.M.M., Marchant H.K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*. 2018;16:263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
10. Jones D.L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*. 1998;205:25–44. <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312>
11. Горбачева Т.Т., Лусис А.В., Иванова Л.А. Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осадка сточных вод регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства. *Вестник МГТУ*. 2021;24(1):88–96. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>



12. Петрова Т.А., Рудзиш Э. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов. *Записки Горного института*. 2021;251:767–776. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.16>
13. Раменская М.Л. *Анализ флоры Мурманской области*. Л: Наука; 1983. 216 с.
14. McGill B.J. Towards a unification of unified theories of biodiversity. *Ecology Letters*. 2010;13(5):627–642. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01449.x>
15. Лавренко Е.М., Корчагин А.А. (ред.). *Полевая геоботаника*. Т. 3. М.-Л.: Наука; 1964. 530 с.
16. Тиходеева М.Ю., Лебедева Т.Х. *Практическая геоботаника (анализ состава растительных сообществ)*. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та; 2015. 166 с.
17. Скворцов В.Э. *Атлас-определитель сосудистых растений таежной зоны Европейской России*. М.: Гринпис России; 2000. 587 с.
18. Вихман М.И., Кислых Е.Е., Лисеенко Л.А. Урожайность и качество кормовых трав в зависимости от метеорологических факторов в условиях регулируемого плодородия почв. В: *Материалы 40-й Международной научной конференции «Агрохимические приёмы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтных системах земледелия» ВНИИА им. Д. Н. Прянишникова*. М.: Изд-во ВНИИА; 2006. С. 127–129.
19. Третьякова А.С., Мухин В.А. *Синантропная флора Среднего Урала*. Екатеринбург; 2001. 147 с.
20. Harder R., Peters G.M., Svanström M., et al. Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices. *International Journal of Life Cycle Assess.* 2017;22(5):731–743. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1182-x>
21. Zema D.A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S.M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*. 2012;115:55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.009>

References

1. Kapelkina L.P. Natural revegetation and remediation of disturbed lands of the north. *Advances in Current Natural Sciences*. 2012;(11):98–102. (In Russ.) URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2012/11-1/29.pdf>
2. Pevzner E.M., Kostovetsky V.P. *Ecology of mining*. Moscow: Nedra; 1990. 235 p. (In Russ.)
3. Kondratyuk E.N., Tarabrin V.P., Baklanov V.I., et al. *Industrial botany*. Kyiv: Naukova Dumka; 260 p. (In Russ.)
4. Kapelkina L.P. *Ecological aspects of optimization of man-made landscapes*. Moscow: Nauka; St. Petersburg: PROPO; 1993. 191 p. (In Russ.)
5. Evdokymova G.A., Pereverzev V.N., Zenkova I.V., et al. *Evolution of technogenic landscapes (on the example of waste from the apatite industry)*. Apatity: Publ. House of the Kola National Center of the Russian Academy of Sciences; 2010. 146 p. (In Russ.)
6. Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the kola subarctic. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(11):1294–1309. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090088> (Orig. ver.: Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the kola subarctic. *Pochvovedenie*. 2016;(11):1375–1391. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082>)
7. Koptsik G.N., Smirnova I.E., Koptsik S.V., et al. Efficiency of remediation of technogenic barrens around the “Severonikel” works in the Kola peninsula. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2015;(2):42–48. (In Russ.)
8. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A.C. Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008;37(5):36–42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
9. Kuypers M.M.M., Marchant H.K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*. 2018;16:263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
10. Jones D.L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*. 1998;205:25–44. <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312>
11. Gorbacheva T.T., Lusi A.V., Ivanova L.A. Chemical amelioration of nepheline sands using sewage sludge from a regional wastewater treatment plant. *Vestnik of MSTU*. 2021;24(1):88–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>
12. Petrova T.A., Rudzisha E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands. *Journal of Mining Institute*. 2021;251:767–776. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.16>
13. Ramenskaya M.L. *Analysis of the flora of the Murmansk region*. Leningrad: Nauka; 1983. 216 p.
14. McGill B.J. Towards a unification of unified theories of biodiversity. *Ecology Letters*. 2010;13(5):627–642. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01449.x>
15. Lavrenko E.M., Korchagin A.A. (eds.) *Field geobotany*. Moscow-Leningrad: Nauka Publ. House; 1964. 530 p. (In Russ.)



16. Tikhodeeva M. Yu., Lebedeva T. Kh. *Practical geobotany (analysis of the composition of plant communities)*. St. Petersburg: Saint Petersburg University Publ. House; 2015. 166 p. (In Russ.)
17. Skvortsov V. E. *Atlas-determiner of vascular plants of the taiga zone of European Russia*. Moscow: Greenpeace of Russia; 2000. 587 p. (In Russ.)
18. Vikhman M. I., Kislykh E. E., Liseenko L. A. Yield and quality of fodder grasses depending on meteorological factors under controlled soil fertility. In: *Proceedings of the 40th International Scientific Conference "Agrochemical Methods for Increasing Soil Fertility and Productivity of Agricultural Crops in Adaptive Landscape Farming Systems" of All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov*. Moscow: Publishing house VNIIA; 2006. Pp. 127–129. (In Russ.)
19. Tretyakova A. S., Mukhyn V. A. *Synanthropic flora of the Middle Urals*. Yekaterinburg; 2001. 147 p. (In Russ.)
20. Harder R., Peters G. M., Svanström M., et al. Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices. *International Journal of Life Cycle Assess.* 2017;22(5):731–743. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1182-x>
21. Zema D. A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S. M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*. 2012;115:55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.009>

Информация об авторах

Аделина Вадимовна Лусис – специалист, группа компаний «Эвобласт», г. Москва, Российская Федерация; специалист по охране труда, промышленной безопасности и охране окружающей среды, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ПАБСИ КНЦ РАН), г. Кировск, Российская Федерация; ORCID [0009-0004-0114-5372](https://orcid.org/0009-0004-0114-5372); e-mail adeliysrab@gmail.com

Любовь Андреевна Иванова – доктор биологических наук, заведующая лабораторией декоративного цветоводства и озеленения, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ПАБСИ КНЦ РАН), г. Кировск, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7994-5431](https://orcid.org/0000-0002-7994-5431); e-mail ivanova_la@inbox.ru

Тамара Тимофеевна Горбачева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5014-4385](https://orcid.org/0000-0001-5014-4385), Scopus ID [6602532642](https://orcid.org/6602532642); e-mail podzol_gorby@mail.ru

Анжелла Владимировна Румянцева – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7918-1857](https://orcid.org/0000-0002-7918-1857); e-mail a-v-rum@yandex.ru

Information about the authors

Adelina V. Lusis – Specialist, Evoblast Group, Moscow, Russian Federation; Leading Specialist in Labor Protection, Industrial Safety and Environmental Protection, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N. A. Avrorin of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Russian Federation; ORCID [0009-0004-0114-5372](https://orcid.org/0009-0004-0114-5372); e-mail adeliysrab@gmail.com

Lubov A. Ivanova – Dr. Sci. (Biol.), head of the laboratory of decorative floriculture and landscaping, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N. A. Avrorin of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Russian Federation; Leading Researcher, Institute for Problems of Industrial Ecology of the North of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7994-5431](https://orcid.org/0000-0002-7994-5431); e-mail ivanova_la@inbox.ru

Tamara T. Gorbacheva – Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Institute for Problems of Industrial Ecology of the North of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5014-4385](https://orcid.org/0000-0001-5014-4385), Scopus ID [6602532642](https://orcid.org/6602532642); e-mail podzol_gorby@mail.ru

Anzhella V. Rumyantseva – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Department of Biology, Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7918-1857](https://orcid.org/0000-0002-7918-1857); e-mail a-v-rum@yandex.ru

Поступила в редакцию

12.01.2023

Received

12.01.2023

Поступила после рецензирования

17.02.2023

Revised

17.02.2023

Принята к публикации

09.03.2023

Accepted

09.03.2023