

## КОММУНАЛЬНЫЕ СТОКИ В ОПЫТАХ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД

Красавцева Е. А., Горбачева Т. Т., Иванова Л. А., Максимова В. В.

## MUNICIPAL WASTEWATER IN EXPERIMENTS ON RECLAMATION OF LOPARITE ORE DRESSING TAILINGS

Krasavtseva E. A., Gorbacheva T. T., Ivanova L. A., Maksimova V. V.

### Аннотация

**Введение.** Обсуждается эффективность применения осветленных коммунальных стоков (ОКС) и осадка сточных вод (ОСВ) для создания устойчивых фитоценозов на хранилищах отходов редкометаллической промышленности Мурманской области. Восстановление растительного покрова на хвостохранилищах лимитируется низким содержанием органического вещества и связанного с ним азота, незначительной биодоступностью элементов питания растений (К, Са, Mg, P). Применение ОСВ и других мелиорантов органической природы является разновидностью химической мелиорации, направленной, прежде всего, на улучшение эдафических свойств техногрунта. **Методы.** Объектом исследований являлись отходы рудообогащения лопаритовых руд, отобранные на действующем поле хвостохранилища предприятия редкометаллической промышленности в центре Кольского полуострова. Определена пригодность техногрунта к рекультивации. Для формирования сеяного фитоценоза в лабораторном эксперименте применяли семена овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.). Схема лабораторного опыта включала внесение в грунт ОКС, ОСВ, смеси ОСВ с опокой и контрольный вариант. Анализ грунта и растений проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Оценка качества сеянного ценоза осуществлялась по следующим параметрам: зеленая биомасса, высота растений, проективное покрытие. **Результаты.** Предварительная оценка пригодности техногрунта к рекультивации показала, что отходы рудообогащения лопаритовых руд имеют неблагоприятные характеристики как для естественного возобновления растительного покрова, так и для биологической рекультивации. Внесение мелиорантов оказало стимулирующий эффект на прирост наземной биомассы при формировании фитоценоза в лабораторных условиях. Результаты листовой диагностики подтвердили эффективность поверхностного внесения добавок органической природы на отходы рудообогащения лопаритовых руд. **Заключение.** В условиях лабораторного опыта с имитацией поверхностного внесения подтвержден стимулирующий эффект нетрадиционных мелиорантов (осветленных коммунальных стоков, осадка сточных вод и его композиции с кремнистой породой (опокой)) на питательный режим рекультивируемых отходов обогащения лопаритовых руд. Исследуемые мелиоранты могут быть признаны пригодными для биорекультивации отходов обогащения редкометаллической промышленности без проведения затратных работ по землеванию и нанесению защитных полимерных покрытий. **Ключевые слова:** химическая мелиорация, осветленные коммунальные стоки, осадок сточных вод, рекультивация хвостохранилищ.

### Abstract

**Introduction.** This paper discusses the effectiveness of using clarified municipal wastewater (CMW) and wastewater sludge (WS) to form stable phytocenoses at the waste storage facilities of the rare metal industry in Murmansk Region. The restoration of the vegetation cover at tailing dumps is limited by the low content of organic matter and associated nitrogen, and the low bioavailability of plant nutrients (K, Ca, Mg, P). The use of WS and other ameliorants of organic nature is a type of chemical amelioration aimed primarily at improving the edaphic properties of man-made soils. **Methods.** We examined the loparite ore dressing tailings sampled in the operating field of the tailing dump of a rare metal industry enterprise in the center of the Kola Peninsula. In the course of the study, we determined the suitability of the man-made soil for reclamation. To form seeded phytocenosis in a laboratory experiment, seeds of meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.) were used. The laboratory experiment involved the introduction of CMW, WS, a mixture of WS with silica clay into the soil, and a check. Analysis of the soil and plants was performed using inductively coupled plasma mass spectrometry. The quality of seeded cenosis was assessed according to the following parameters: green biomass, plant height, and projective cover. **Results.** The preliminary assessment of the man-made soil suitability for reclamation showed the following: the loparite ore dressing tailings have unfavorable characteristics both for the natural regeneration of the vegetation cover and biological reclamation. The introduction of ameliorants had a stimulating effect on the growth of terrestrial biomass during the formation of phytocenosis under laboratory conditions. The results of leaf analysis confirmed the effectiveness of the surface application of organic additives with regard to the loparite ore dressing tailings. **Conclusion.** In the laboratory experiment with the simulation of surface application, the stimulating effect of unconventional ameliorants (clarified municipal wastewater, wastewater sludge, and its mixture with silica clay) on the supply of nutrients to the reclaimed loparite ore dressing tailings was confirmed. The investigated ameliorants can be recognized as suitable for the biological reclamation of the dressing tailings of the rare metal industry, which does not require costly earthing and the application of protective polymer coatings. **Keywords:** chemical amelioration, clarified municipal wastewater, wastewater sludge, reclamation of tailing dumps.

## Введение

Общее количество горной массы, ежегодно перемещаемой на планете, превышает 100 млрд т, при этом более 8 млрд т твердых отходов в техногенных массивах (отвалах и гидроотвалах, хвостохранилищах, шлако- и шламоотвалах) складывают горнопромышленные предприятия РФ [7]. Помимо негативного влияния на окружающую среду, следствием размещения отходов горнопромышленного комплекса, в частности, отходов рудообогатения, накапливаемых в хвостохранилищах, является постоянное расширение площади нарушенных земель. Реабилитация техногенных ландшафтов, формирующихся при разработке полезных ископаемых, — одна из важнейших задач рационального недропользования.

В редких случаях отходы рудообогатения, называемые хвостами, имеют благоприятные характеристики, способствующие активному самозарастанию нарушенных территорий. Как правило, грунт, депонируемый в хвостохранилищах, характеризуется экстремально низкими либо экстремально высокими значениями pH, высокой засоленностью (минерализацией) поровых вод, слабой водоудерживающей способностью, высоким содержанием тяжелых металлов, ограниченным банком семян. Факторами, препятствующими восстановлению растительного покрова на хвостохранилищах, являются также близкое к нулевому содержание в техногрунте органического вещества и связанного с ним азота, низкая доступность элементов питания растений (K, Ca, Mg, P), зачастую при их весьма высоком валовом содержании в самом техногрунте [23].

Восстановление растительного покрова на хвостохранилищах из-за жестких эдафических условий становится затяжным, многоступенчатым и не обеспечивающим того биоразнообразия местной флоры, которое характерно для ее естественных мест произрастания. Нами сделано предположение, что одной из мер создания и поддержания устойчивости растительного покрова на хвостохранилищах (фитостабилизации) может стать их поверхностное орошение осветленными коммунальными стоками (ОКС) либо фрагментарное нанесение осадка сточных вод (ОСВ), изъятых с иловых площадок регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ). Метод является разновид-

ностью химической мелиорации, направленной прежде всего на улучшение эдафических свойств техногрунта. Мелиорирующий и удобрительный эффект связан с наличием в коммунальных стоках органического вещества, легкодоступного для микробиоты, лабильностью азота, фосфора, калия и других элементов питания, обуславливающей их ассимиляцию растениями, а также высокой степенью гумификации ОСВ при длительном хранении на иловых площадках.

Применение муниципальных сточных вод для выращивания растений с различной целевой направленностью (заготовка и переработка кормовых и технических культур, овощеводство, садоводство) признано международной практикой эффективным и экономически целесообразным еще в прошлом столетии, что объясняется многокомпонентным составом стоков с соотношением макро- и микроэлементов, благоприятным для удобрительных поливов [12, 27].

В мировой практике существенно расширяется область применения коммунальных стоков в горной промышленности, главным образом на месторождениях сульфидных руд [14, 19–21, 25]. Повышенное внимание к таким водам связано с их высокой кислотонейтрализующей и комплексообразующей способностью. Смешение с ними высокоагрессивных дренажных вод позволяет существенно снизить экологическую опасность побочных продуктов добычи в местах разработки руд.

Патентный поиск показал, что и в отечественной практике предлагалось внедрение технологий орошения хозяйственно-бытовыми стоками территорий, нарушенных хвостохранилищами и золошлакоотвалами [3]. При этом основным направлением признавалась активизация почвообразовательных процессов для эффективного задернения нарушенных территорий, однако широкого распространения в РФ такой способ не получил.

Эффективность применения ОСВ и других мелиорантов органической природы многократно подтверждена и лабораторными, и полевыми испытаниями по фитостабилизации хвостохранилищ [10, 17, 24], в том числе в редкоземельной промышленности [11, 16, 28, 29]. Внесение органических мелиорантов улучшает питательный режим техногрунтов и их водоудерживающую способность, активизирует биологическую ак-

тивность и в целом первичные почвообразовательные процессы на территориях складирования отходов недропользования [18, 22, 26].

На территории Мурманской области инициатором использования ОСВ для рекультивации объектов накопленного экологического ущерба выступил «Мончегорскводоканал», впервые применивший ОСВ для восстановления растительного покрова на техногенных пустошах вблизи г. Мончегорска. Рекультивационные работы в промышленных масштабах проводились начиная с 2003 г. силами Мончлеспхоза под научным руководством ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН при финансовой поддержке Кольской ГМК. К настоящему времени проведена экспертная оценка принятых мер с подтверждением их эффективности [2, 15] и признанием альтернативой традиционным методам рекультивации, в частности, землеванию.

Позднее нами было показано, что и при многократном внесении ОКС в качестве мелиоранта можно существенно повысить биогенность отходов обогащения апатит-нефелиновых руд Мурманской области и достичь высоких показателей качества одновидового сеяного фитоценоза без изъятия почвенных ресурсов [1].

Цель данной работы — оценка эффективности применения ОКС и ОСВ для создания устойчивого растительного покрова на отходах обогащения лопаритовых руд Мурманской области как модельного объекта редкометалльной промышленности.

#### Методы и материалы

Объектом исследований являлись отходы рудообогащения лопаритовых руд, отобранные на втором (действующем) поле хвостохранилища предприятия редкометалльной промышленности в виде усредненной пробы поверхностного слоя. Предприятие расположено в центре Кольского полуострова, занимается получением ниобия, тантала и редкоземельных элементов цериевой группы (Ce, Pr, Nd, Pm) из лопаритовых руд. Основными минералами отходов обогащения руд являются калий-натриевые полевые шпаты (свыше 40 %), нефелин, амфибол, пироксен (эгирин). В Государственный реестр объектов размещения отходов (ОРО) хвостохранилище занесено под наименованием «Хвостохранилище «Карнасурт-2» ООО «Ловозерский ГОК» и номером 51-00042-Х-00592-250914. Назначением ОРО обозначено не захоронение, а хранение отходов.

Отсюда наработка опыта создания растительного покрова на грунте действующего хвостохранилища будет целесообразной и для консервации уже выведенного из эксплуатации первого поля хвостохранилища, и для создания планов на перспективу в случае ликвидации действующего ГТС. Отсутствие устойчивого растительного покрова на большинстве хвостохранилищ Мурманской области, выведенных из эксплуатации, способствует разубоживанию складированных отходов, которые в настоящее время признаются перспективным техногенным сырьем [6]. Далее отходы обогащения лопаритовых руд для краткости изложения обозначены нами как *техногрунт*.

Для определения валового содержания макроэлементов (Si, Al, Fe, Na, Ca, Mg, K, P) образец техногрунта массой 200 мг подвергали открытому кислотному разложению смесью  $\text{HNO}_3$ , HF, HCl в стеклоуглеродных тиглях. Для удаления плавиковой кислоты добавляли серную кислоту и отгоняли полученную смесь до густых белых паров. Кислоты квалификации «о.с.ч.» (кроме серной) предварительно подвергали изотермической перегонке на установке Berghof (Berghof, Германия). Растворы после разложения переводили в полипропиленовые пробирки вместимостью 50 или 100 мл, до метки доводили 2 %-ным раствором  $\text{HNO}_3$ . Для разбавления растворов также использовали 2 %-ный раствор  $\text{HNO}_3$ . Деионизованную воду получали с помощью системы очистки воды «Millipore Element» (Millipore, США).

Измерения проводили на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 DRC-e (Perkin Elmer, США). Для настройки прибора использовали стандартный образец Multi-element ICP-MS Calibration Standard STD 1 (Perkin Elmer), для градуировки прибора применяли стандартные растворы ICP-MS Calibration Standard IV-STOCK-21 и IV-STOCK-29 (Inorganic Ventures, США) с массовой концентрацией определяемых элементов 10 мг/дм<sup>3</sup>. Погрешность измерений не превышала 0,5 % при  $P = 0,95$ .

Оценка техногрунта по его пригодности к рекультивации проводилась согласно ГОСТ 17.5.1.03–86<sup>1</sup> на основании следующих показателей: гранулометрический состав, pH водной

<sup>1</sup> ГОСТ 17.5.1.03–86. Охрана природы (ССОП). Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель. Охрана природы. Земли: сб. ГОСТ. М.: Изд-во стандартов, 2002.

вытяжки, содержание подвижных форм Al. При оценке дополнительно учитывался такой показатель, как гигроскопическая влажность.

Лабораторный эксперимент по оценке эффективности внесения мелиорантов на поверхность отходов обогащения лопаритовых руд проводился в период с 7 марта по 8 апреля 2019 г. В качестве мелиорантов использованы ОКС и ОСВ КОС-3 АО «Апатитыводоканал». Основным способом обработки ОСВ на данных очистных сооружениях является подсушка и выдержка на иловых площадках на естественном основании в течение трех и более лет. ОСВ отобран на иловой площадке АО «Апатитыводоканал», выведенной из эксплуатации в 2017 г. Согласно испытаниям, проведенным в 2017 г. специализированным предприятием ООО «Бифар-Экология», контрольный образец ОСВ относился к отходу V класса опасности и полностью соответствовал требованиям ГОСТ Р 54534–2011<sup>2</sup>, предъявляемым к ОСВ при его использовании в качестве почвогрунтов для биологической или технической рекультивации. Валовое содержание тяжелых металлов в ОСВ было значительно ниже нормативов, установленных ГОСТ Р 54534–2011<sup>2</sup> для его применения при технической рекультивации нарушенных территорий, а именно Ni < 30 мг/кг, Cu < 30 мг/кг, Pb < 30 мг/кг, Zn < 186 мг/кг при нормативах 800 мгNi/кг, 1500 мгCu/кг, 1000 мгPb/кг, 7000 мгZn/кг.

Для кондиционирования ОСВ в одном из вариантов опыта был использован осадок водоподготовки — отработанный сорбент АС на основе модифицированной опоки (кремнистой породы, продукция ООО «Алсис»). Сорбент отработан на пилотной установке фильтрации воды «АкваТех-Филс FR-V/20» на водозаборе «Центральный» АО «Апатитыводоканал». Задачей пилотных экспериментов было удаление избыточного алюминия из воды подземного источника питьевого водоснабжения — в этом случае модифицированная опока использовалась и как фильтрующая загрузка, и как сорбент. Состав кондиционера и описание пилотного эксперимента представлены в работе [8].

ОКС перед началом опытов отобраны после первичных отстойников КОС-3 АО «Апатитыво-

<sup>2</sup> ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. М.: Стандартинформ, 2019.

доканал» — на промежуточной стадии водоочистки коммунальных стоков. Средний химический состав оросительной воды приведен в работе [1]. Относительно высокие значения ХПК и БПК<sub>5</sub> коммунальных стоков позволяют предполагать инокуляцию техногрунта после орошения ОКС, сопровождающуюся повышением его биогенности за счет роста микробиологической активности [13].

Схема лабораторного опыта включала пять вариантов, каждый в четырех повторностях (табл. 1).

В эксперименте использовали пластиковые емкости 132,3 см<sup>2</sup> (высота 3,0 см, длина 11,5 см, ширина 11,5 см). В каждом варианте опыта 100 мл отходов рудобогащения помещали в пластиковые емкости без дренажных отверстий, что позволило создать в них односантиметровый насыпной слой техногрунта.

Для формирования сеяного фитоценоза применяли семена многолетнего травянистого злакового растения овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.), норма высева на поверхность техногрунта 100 г/м<sup>2</sup>. После увлажнения семян емкости с посевами укрывали пластиковой пленкой для сохранения влаги до начала появления первых зеленых всходов, затем пленку снимали и в дальнейшем не использовали.

Для более полной имитации условий полевого эксперимента все мелиоранты в лабораторном опыте были использованы только после завершения первой фазы развития овсяницы луговой — процесса прорастания семян. Это обусловлено тем, что *Festuca pratensis* является однодольным злаковым растением с подземным типом прорастания семян. Первая фаза его развития включает несколько последовательных этапов: *набухание, наклеывание семени, период гетеротрофного питания* (только за счет запасных веществ эндосперма семени) и *переход к автотрофному питанию*. На завершающем этапе у проростков формируется первый зеленый лист и придаточные корни, способствующие поглощению питательных веществ из почвы [4].

Периодическое орошение грунта талой водой или ОКС проводилось согласно схеме полива, указанной в табл. 2. Начало орошения техногрунта ОКС в вариантах 1 и 2 — 19 марта (на 12-й день после начала эксперимента). Суммарная

Таблица 1

Схема лабораторного опыта

№ варианта	Мелиорант	Вариант
1 (опытный)	ОКС	ОКС без разбавления, однократное орошение грунта в начале эксперимента, <b>далее полив талой водой</b>
2 (опытный)		ОКС без разбавления, однократное орошение грунта в начале эксперимента, <b>далее полив только ОКС</b> в течение всего эксперимента
3 (опытный)	ОСВ	ОСВ — 8 фрагментов по поверхности, <b>полив только талой водой</b>
4 (опытный)	Смесь ОСВ+сорбент АС (опока), ОСВ : опока 2 : 1 по объему	Смесь ОСВ+сорбент (опока) — 8 фрагментов по поверхности, <b>полив только талой водой</b>
5 (контрольный)	Без мелиорантов	Без мелиорантов, <b>полив только талой водой</b>

норма орошения по каждому варианту за весь период эксперимента составила 27,2 л/м<sup>2</sup> (272 т/га).

ОСВ (отдельно или в составе композиции с опоккой) наносился на поверхность субстрата восемью фрагментами из расчета 2 л/м<sup>2</sup>. Дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе опыта не проводилась.

Интенсивность освещения в период проведения опыта составляла в пасмурные дни 6, в солнечные — 20 кЛк, температура воздуха в помещении не превышала 22–23 °С, влажность воздуха — 60 %.

Таблица 2

Схема орошения техногрунта

Дата полива	Объем оросительной жидкости, мл
07.03	50 мл талой воды (все варианты)
13.03	40 мл талой воды (все варианты)
19.03	10 мл*
20.03	20 мл
22.03	15 мл
23.03	15 мл
25.03	15 мл
26.03	15 мл
27.03	10 мл
28.03	20 мл
29.03	20 мл
30.03	20 мл
31.03	15 мл
01.04	15 мл
02.04	20 мл
03.04	15 мл
05.04	15 мл
06.04	20мл
07.04	10 мл
Итого:	<b>360 мл</b>

\* Здесь и далее указан объем ОКС либо талой воды в зависимости от варианта опыта (см. табл. 1).

Камеральные исследования включали регулярные наблюдения за ростом и развитием растений, формированием травостоя. Влияние мелиорантов оценивалось по высоте растений в травостое, накоплению зеленой массы и проективному покрытию. Измерения биометрических показателей проводились каждые 5 дней после появления массовых всходов одновременно во всех повторностях (не менее 10 замеров высоты растений в каждой из них); наземную биомассу растений измеряли в сыром состоянии. Для обработки результатов, полученных по окончании опыта, применяли методы описательной статистики и однофакторного дисперсионного анализа. Достоверность различий между вариантами принималась при значениях  $p < 0,05$  «на уровне тенденций», высокий уровень значимости различий признавался при  $p < 0,001$ . При  $p > 0,05$  различия по вариантам считались недостоверными.

По окончании опыта наземная биомасса растений полностью срезалась, высушивалась до воздушно-сухого состояния и размалывалась. Образцы растений массой 500 мг помещали в полипропиленовые пробирки, добавляли концентрированную азотную кислоту и выдерживали в закрытых пробирках в течение 12 часов. Затем содержимое пробирок переносили в лайнеры автоклавов DAC-100, помещали в микроволновую систему MW 4 и проводили разложение проб за один цикл (90 мин). Растворы возвращали в пробирки, доводили до метки 2 %-ным раствором HNO<sub>3</sub>. Измерения проводили на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 DRC-е аналогично процедуре, примененной в анализе техногрунта.

**Результаты исследования и обсуждение**  
**1. Химический состав техногрунта**

В составе грунта доминируют кремний и алюминий, отмечается высокое содержание натрия и железа (рис. 1). По сравнению с почвообразующими породами региональных почв [5] техногрунт существенно обогащен калием и фосфором, но обеднен кальцием и магнием. Валовое содержание натрия и алюминия в техногрунте также выше фоновых значений, отмеченных в горизонте С почв Мурманской области [5]. Последнее обстоятельство позволяет предполагать возможное нарастание токсичности рекультивируемого грунта из-за повышения лабильности Na

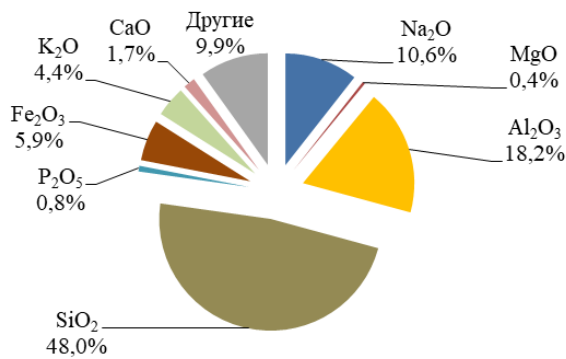


Рис. 1. Результаты валового анализа техногрунта

и Al при высоких дозах внесения водорастворимых форм органического вещества в ходе мелиорации.

**2. Оценка пригодности грунта к рекультивации**

**2.1. Гранулометрический состав**

По гранулометрическому составу грунт, использованный для опытов, относится к песчаной фракции, кумулятивная кривая приведена на рис. 2.

В соответствии с ГОСТ 17.5.1.03–86 породы признаются пригодными в биологической рекультивации без улучшения физических свойств, если содержание фракции < 0,01 мм (глинистой) составляет от 10 до 75 %. Исследуемый техногрунт характеризуется очень низкой долей фракции, благоприятной для рекультивации, что свидетельствует о необходимости его кондиционирования.

**2.2. Влажность**

Гигроскопичность техногрунта около 1 % — это значение, близкое к влажности завядания растений на техногенных землях Европейского Севера, лимитированной значениями 0,54–2,85 % [9]. Грунт нуждается в кондиционировании водоудерживающими материалами.

**2.3. pH водной вытяжки рекультивируемого грунта составляет 8,2–8,4 при допустимых пре-**

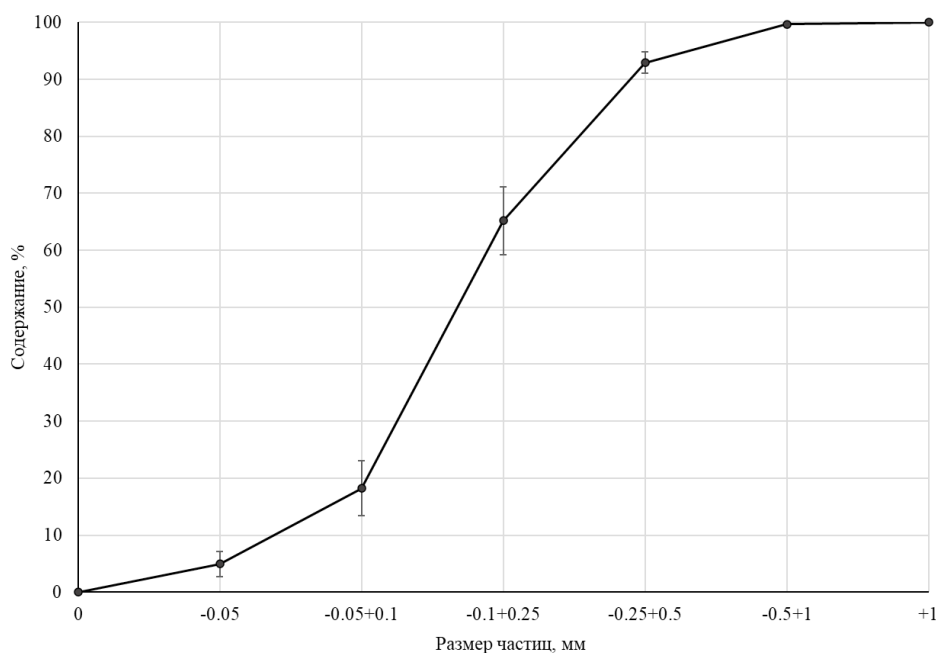


Рис. 2. Кумулятивная кривая гранулометрического состава отходов обогащения лопаритовых руд

делах варьирования 5,5–8,4 согласно требованиям ГОСТ 17.5.1.03–86.

#### 2.4. Подвижные формы Al

В соответствии с ГОСТ 17.5.1.03–86 признание техногенного грунта пригодным к биологической рекультивации возможно при содержании подвижных форм Al не выше 0–30 мг/кг. Содержание алюминия в лимоннокислой вытяжке (0,1 н.) техногрунта 753 мг/кг, и по этому показателю грунт можно признать непригодным к рекультивации.

Проведенная предварительная оценка показала, что отходы рудообогатения лопаритовых руд имеют неблагоприятные характеристики как для естественного возобновления растительного покрова на хвостохранилищах, так и для биологической рекультивации. Это подтверждается фактом слабого (очагового) появления растительности на территории первого поля хвостохранилища «Карнасурт», выведенного из эксплуатации в 1985 году (рис. 3).

#### 3. Формирование сеяного фитоценоза в условиях лабораторного опыта

Появление первых всходов в опыте зафиксировано во всех вариантах одновременно — на 4-й день после посева семян. Массовые зеленые всходы овсяницы луговой отмечены 18.03.2019 г. (на 11-й день после начала эксперимента). На следующий день после появления всходов проведено внесение мелиорантов.



Рис. 3. Естественное возобновление растительности на первом (выведенном из эксплуатации) поле хвостохранилища «Карнасурт»

Многократное орошение техногрунта в течение месяца способствовало повышению его токсичности, наиболее вероятной причиной можно считать высокую лабильность натрия из-за доминирования в техногрунте Na-полевых шпатов, в частности, альбита. Это привело к гибели значительной части всходов в контрольном варианте и в обоих вариантах с внесением ОКС. Тем не менее, по окончании опыта проективное покрытие во всех опытах достигло 75–76 %, но с существенным отличием качества растительного покрова по вариантам (рис. 4).

#### 3.1. Рост растений

Наблюдения за ростом растений в эксперименте выявили слабую вариабельность высоты растений между вариантами до внесения добавок. В ходе опыта после мелиорации отмечено опережение роста растений по сравнению с контрольным вариантом. Вариабельность высоты растений по окончании опыта показана на рис. 5. Даже однократное внесение ОКС (вариант 1) оказало стимулирующий эффект на высоту травостоя ( $p < 0,001$ ).

#### 3.2. Прирост биомассы

Внесение мелиорантов оказало в целом стимулирующий эффект и на прирост наземной биомассы (рис. 6), но статистически значимые различия с контрольным вариантом отмечены только в вариантах 3 и 4 (применение ОСВ отдельно и в смеси с кондиционером,  $p < 0,001$  в обоих случаях). При многократном орошении грунта ОКС отмечено в среднем двукратное превышение зеленой биомассы по сравнению с контролем (см. рис. 6), но при существенной вариабельности параметра в этом варианте. Как показано выше, на начальном этапе внесения ОКС



Рис. 4. Состояние одновидового сеяного фитоценоза по окончании опыта

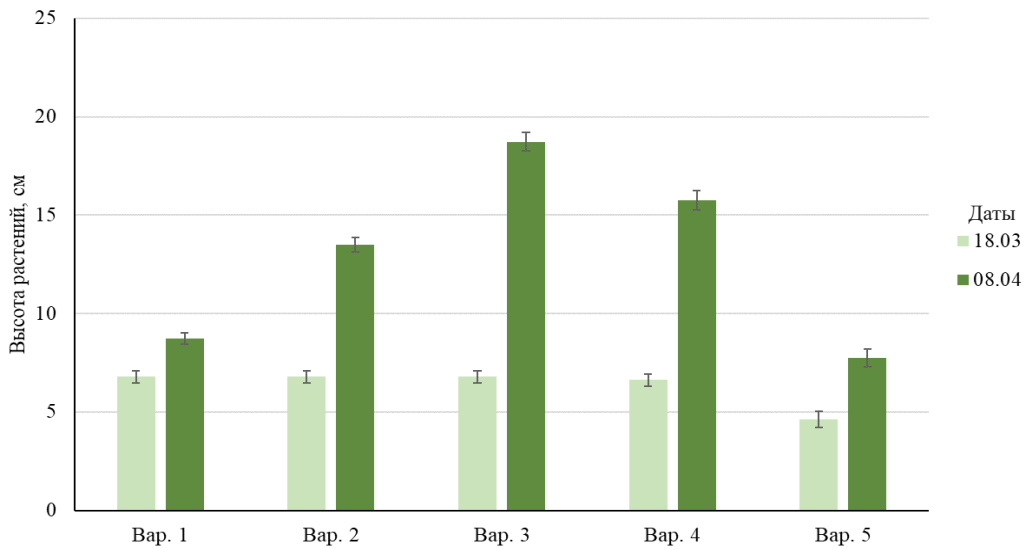


Рис. 5. Влияние мелиорантов на высоту травостоя

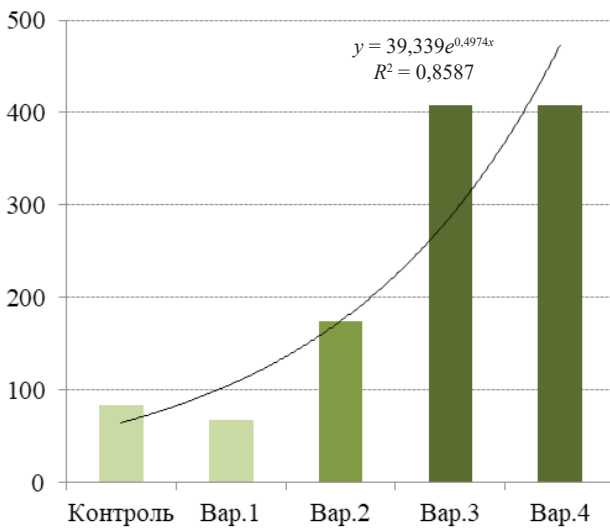


Рис. 6. Наземная зеленая биомасса по окончании опыта

отмечена значительная гибель всходов, что не могло не сказаться на различиях количественных характеристик зеленой биомассы по окончании опыта. Это указывает на необходимость увеличения числа повторностей для подтверждения статистической значимости полученного эффекта.

### 3.3. Листовая диагностика по окончании опыта

Результаты листовой диагностики показали, что в ходе эксперимента отмечено активное накопление всех основных элементов питания (фосфора, калия, кальция, магния) в назем-

ной части растений одновидового фитоценоза (табл. 3). Довольно высокая обеспеченность полевой культуры указанными элементами отмечена даже в контрольном варианте, что указывает на высокий пул доступных для растений форм элементов питания в исходном техногрунте. При этом накопление элементов питания в биомассе росло с увеличением количества внесенного ОКС, а также добавок ОСВ, но линейной зависимости не наблюдалось. Такой быстрый отклик растений на принятие мелиоративных мер можно объяснить высокой экстрагирующей способностью водорастворимого органического вещества, вносимого в составе жидких и твердых добавок.

Полученные результаты сопоставлены с валовым содержанием элементов питания в луговике извилистом — типичном представителе злаковых, отобранном в местах его естественного произрастания на территории Мурманской области [5]. Сравнительный анализ свидетельствует о превышении фонового уровня накопления К, Р и Mg в биомассе сеяного фитоценоза при почти трехкратном дефиците Са. Вероятно, при постановке полевых экспериментов по рекультивации хвостохранилищ, сформированных при переработке лопаритовых руд, понадобится внесение кальцийсодержащих добавок в виде легкорастворимых кальциевых солей органических кислот.

Внесение органического вещества способствовало повышению в целом растворимости мине-

Таблица 3

**Валовое содержание элементов в исходном грунте и наземной биомассе растений**

Элемент	Валовое содержание, мг/кг					
	Исходный грунт	Наземная биомасса растений				
		Вар.1	Вар.2	Вар.3	Вар.4	Вар.5 (контроль)
Na	78 726	17 707	10 680	3906	3469	10 085
Mg	2291	676	791	1232	1209	742
Al	96 437	18 072	5073	486	141	6436
Si	224 640	453	373	147	123	363
P	3575	4095	4663	5350	5738	4460
K	36 686	13 177	14 989	17 168	17 244	12 677
Ca	12 155	1061	662	1295	1276	647
Fe	41 381	530	152	90	50	204

ральной (алюмосиликатной) основы техногрунта, на что указывает активная фитоэкстракция Na, Al и Fe (но не Si) в опытах с внесением жидких мелиорантов. Валовое содержание Al и Fe в биомассе превысило средние фоновые значения, отмеченные для злаковых, произрастающих в регионе [5]. Следует подчеркнуть, что внесение ОСВ, особенно совместно с кремнистой породой (опоккой), позволило снизить доступность Al и Fe для растений, доведя их содержание в наземной биомассе до фоновых значений. Это же отмечено и для Na: внесение ОСВ способствовало снижению его содержания в овсянице луговой с 10 до 3,5 г/кг. Вероятно, биоаккумуляция Na и Al в проведенных опытах тесно связана с динамикой Si в грунте, что требует дальнейшего более детального изучения причин слабой лабильности кремния при высоких показателях этого параметра для натрия и алюминия. Нельзя исключать, что это связано с формированием стабильных комплексов кремния с органическим веществом мелиорантов.

Результаты листовой диагностики подтвердили эффективность поверхностного внесения добавок органической природы на отходы рудообогащения лопаритовых руд для улучшения питательного режима, снижения токсичности, обусловленной высокой лабильностью Na и Al, что способствовало устойчивой фитостабилизации техногрунта.

**Заключение**

1. В условиях лабораторного опыта с имитацией поверхностного внесения подтвержден стимулирующий эффект нетрадиционных мелиорантов (осветленных коммунальных стоков, осадка сточных вод и его композиции с кремнис-

той породой (опокой)) на питательный режим рекультивируемых отходов обогащения лопаритовых руд.

2. Осадок сточных вод и его композиция с кремнистыми природными материалами могут быть признаны наиболее пригодными для биорекультивации отходов обогащения редкометалльной промышленности без проведения затратных работ по землеванию и нанесению защитных полимерных покрытий.

3. По причине промывного водного режима песчаных техногрунтов эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента.

**Благодарности.**

*Работа выполнена в рамках тем НИР № 0226-2019-0011, 0226-2019-0047 и частично поддержана из средств гранта РФФИ № 19-05-50065 Микромир.*

**Литература**

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

2. Копчик, Г. Н., Смирнова, И. Е., Копчик, С. В., Захаренко, А. И. и Турбаевская, В. В. (2015). Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» на Кольском полуострове. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, № 2, сс. 42–48.

3. Кордаков, И. А. (1976). Способ рекультивации золоотвалов и хвостохранилищ. Авторское свидетельство № SU515482A1.

4. Кузнецов, В. В. и Дмитриева, Г. А. (2006). Физиология растений. М.: Высшая школа, 736 с.

5. Лукина, Н. В., Полянская, Л. М. и Орлова, М. А. (2008). Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 342 с.
6. Макаров, Д. В., Белобородов, В. И. и Суворова, О. В. (2008). Техногенные минеральные ресурсы Кольского полуострова и перспективы их использования. Минералогия техногенеза, Т. 9, сс. 158-180.
7. Мосейкин, В. В., Гальперин, А. М., Ермолов, В. А. и Круподеров, В. С. (2013). Анализ ситуации с горнопромышленными отходами (геоэкологические аспекты). Горный информационно-аналитический бюллетень, № S1, сс. 7–23.
8. Падалкин Н. В. и Евшин П. Н. (2019). Модифицированные сорбенты на основе опоки для очистки вод. Труды Кольского научного центра РАН, Т. 10, № 1–3, сс. 262–269. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.262-269.
9. Федорец, Н. Г., Соколов, А. И., Шильцова, Г. В., Германова, Н. И., Крышень, А. М. и Антипина, Г. С. (1999). Начальные стадии формирования биогеоценозов на техногенных землях Европейского Севера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 74 с.
10. Asensio, V., Covelo, E. F. and Kandeler, E. (2013). Soil management of copper mine tailing soils — Sludge amendment and tree vegetation could improve biological soil quality. *Science of The Total Environment*, Vol. 456–457, pp. 82–90. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.061.
11. Chen, Y. Y., Liu, W. S., Ding, K. B., Tang, Y. T. and Qiu, R. L. (2018). Effects of organic amendments and biochar on ecological remediation of ionic rare earth mine tailing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, Vol. 38, No. 12, pp. 4769–4778. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0295.
12. Harder, R., Peters, G. M., Svanström, M., Khan, S. J. and Molander, S. (2017). Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, Issue 5, pp. 731–743. DOI: 10.1007/s11367-016-1182-x.
13. Kauppinen, A., Martikainen, K., Matikka, V., Veijalainen, A.-M., Pitkänen, T., Heinonen-Tanski, H. and Miettinen, I. T. (2014). Sand filters for removal of microbes and nutrients from wastewater during a one-year pilot study in a cold temperate climate. *Journal of Environmental Management*, Vol. 133, pp. 206–213. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.12.008.
14. Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M. and Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 151, pp. 475–493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
15. Koptsik, G. N., Koptsik, S. V. and Smirnova, I. E. (2016). Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the Kola subarctic. *Eurasian Soil Science*, Vol. 49, Issue 11, pp. 1294–1309. DOI: 10.1134/S1064229316090088.
16. Li, M. S. (2006). Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. *Science of the Total Environment*, Vol. 357, Issues 1–3, pp. 38–53. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.05.003.
17. Santibáñez, C., Verdugo, C. and Ginocchio, R. (2008). Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. *Science of the Total Environment*, Vol. 395, Issue 1, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.033.
18. Sheoran, V. and Choudhary, R. P. (2021). Phytostabilization of mine tailings. In: Bauddh, K., Korstad, J. and Sharma, P. (eds.) *Phytoremediation of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites*. Amsterdam, Netherlands; Oxford, United Kingdom; Cambridge, MA: Elsevier, pp. 307-324. DOI: 10.1016/B978-0-12-821200-4.00016-9.
19. Smyntek, P. M., Chastel, J., Peer, R. A. M., Peer, E. A., Anthony, E., McCloskey, J., Bach, E., Wagner, R. C., Bandstra, J. Z. and Strosnider, W. H. J. (2017). Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 18, Issue 1, pp. 76–84. DOI: 10.1144/geochem2017-001.
20. Strosnider, W. H. J., Winfrey, B. K., Peer, R. A. M. and Nairn, R. W. (2013). Passive co-treatment of acid mine drainage and sewage: Anaerobic incubation reveals a regeneration technique and further treatment possibilities. *Ecological Engineering*, Vol. 61, Part A, pp. 268–273. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.037.
21. Tapia, A., Cornejo-La Torre, M., Santos, E. S., Arán, D. and Gallardo, A. (2019). Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings. *Journal of Environmental Management*, Vol. 244, pp. 154–160. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.040.
22. Tordoff, G. M., Baker, A. J. M. and Willis, A. J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, Vol. 41, Issues 1–2, pp. 219–228. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00414-2.
23. Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R. and Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, Vol. 184, pp. 594–600. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.025.
24. Wong, J. W. C. and Ho, G. (1994). Sewage sludge as organic ameliorant for revegetation of fine bauxite refining residue. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 11, Issues 1–4, pp. 297–309. DOI: 10.1016/0921-3449(94)90097-3.
25. Younger, P. L. and Henderson, R. (2014). Synergistic wetland treatment of sewage and mine water: pollutant removal performance of the first full-scale system. *Water Research*, Vol. 55, pp. 74–82. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.024.
26. Zanuzzi, A., Arocena, J. M., van Mourik, J. M. and Faz Cano, A. (2009). Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma*, Vol. 154, Issues 1–2, pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.09.014.
27. Zema, D. A., Bombino, G., Andiloro, S. and Zimbone, S. M. (2012). Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*, Vol. 115, pp. 55–65. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.08.009.
28. Zhang, L., Liu, W., Liu, S., Zhang, P., Ye, C. and Liang, H. (2019). Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27, Issue 2, pp. 2107–2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2.
29. Zhou, L., Li, Z., Liu, W., Liu, S., Zhang, L., Zhong, L., Luo, X. and Liang, H. (2015). Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22, Issue 21, pp. 17151–17160. DOI: 10.1007/s11356-015-4875-y.

## References

1. Gorbacheva, T. T., Ivanova, L. A., Rummyantseva, A. V. and Maksimova, V. V. (2020). Increasing the biogenicity of technical soils when creating vegetation cover as a method of conservation tailing dumps from mining waste. *Vestnik of*

- SSUGT, Vol. 25, No. 4, pp. 159–171. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-159-171.
2. Koptsik, G. N., Smirnova, I. E., Koptsik, S. V., Zakharenko, A. I. and Turbaevskaya, V. V. (2015). Efficiency of remediation of technogenic barrens around the “Severonikel” works in the Kola Peninsula. *MSU Vestnik. Series 17. Soil Science*, No. 2, pp. 42–48.
3. Kordakov, I. A. (1976). *The method of reclamation of ash dumps and tailings*. Inventor’s certificate No. SU515482A1.
4. Kuznetsov, V. V. and Dmitrieva, G. A. (2006). *Plant physiology*. Moscow: Vysshaya Shkola, 736 p.
5. Lukina, N. V., Polyanskaya, L. M. and Orlova, M. A. (2008). *Supply of nutrients to soils in northern taiga forests*. Moscow: Nauka, 342 p.
6. Makarov, D. V., Beloborodov, V. I. and Suvorova, O. V. (2008). Technogenic mineral resources of the Kola Peninsula and their potential uses. *Mineralogy of Technogenesis*, Vol. 9, pp. 158–180.
7. Moseykin, V. V., Galperin, A. M., Ermolov, V. A. and Krupoderov, V. S. (2013). The analysis of the situation with mining and industrial wastes (geo-ecological aspects). *Mining Informational and Analytical Bulletin*, No. S1, pp. 7–23.
8. Padalkin, N. V. and Evshin, P. N. (2019). Modified sorbents based on silica clay for water treatment. *Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 10, No. 1–3, pp. 262–269. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.262-269.
9. Fedorets, N. G., Sokolov, A. I., Shiltsova, G. V., Germanova, N. I., Kryshen, A. M. and Antipina, G. S. (1999). *Initial stages of the formation of biogeocenoses in the technogenic soils of the European North*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 74 p.
10. Asensio, V., Covelo, E. F. and Kandeler, E. (2013). Soil management of copper mine tailing soils — Sludge amendment and tree vegetation could improve biological soil quality. *Science of The Total Environment*, Vol. 456–457, pp. 82–90. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.061.
11. Chen, Y. Y., Liu, W. S., Ding, K. B., Tang, Y. T. and Qiu, R. L. (2018). Effects of organic amendments and biochar on ecological remediation of ionic rare earth mine tailing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, Vol. 38, No. 12, pp. 4769–4778. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0295.
12. Harder, R., Peters, G. M., Svanström, M., Khan, S. J. and Molander, S. (2017). Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, Issue 5, pp. 731–743. DOI: 10.1007/s11367-016-1182-x.
13. Kauppinen, A., Martikainen, K., Matikka, V., Veijalainen, A.-M., Pitkänen, T., Heinonen-Tanski, H. and Miettinen, I. T. (2014). Sand filters for removal of microbes and nutrients from wastewater during a one-year pilot study in a cold temperate climate. *Journal of Environmental Management*, Vol. 133, pp. 206–213. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.12.008.
14. Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M. and Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 151, pp. 475–493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
15. Koptsik, G. N., Koptsik, S. V. and Smirnova, I. E. (2016). Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the Kola subarctic. *Eurasian Soil Science*, Vol. 49, Issue 11, pp. 1294–1309. DOI: 10.1134/S1064229316090088.
16. Li, M. S. (2006). Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. *Science of the Total Environment*, Vol. 357, Issues 1–3, pp. 38–53. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.05.003.
17. Santibáñez, C., Verdugo, C. and Ginocchio, R. (2008). Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. *Science of the Total Environment*, Vol. 395, Issue 1, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.033.
18. Sheoran, V. and Choudhary, R. P. (2021). Phytostabilization of mine tailings. In: Baudh, K., Korstad, J. and Sharma, P. (eds.) *Phyto restoration of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites*. Amsterdam, Netherlands; Oxford, United Kingdom; Cambridge, MA: Elsevier, pp. 307–324. DOI: 10.1016/B978-0-12-821200-4.00016-9.
19. Smyntek, P. M., Chastel, J., Peer, R. A. M., Peer, E. A., Anthony, E., McCloskey, J., Bach, E., Wagner, R. C., Bandstra, J. Z. and Strosnider, W. H. J. (2017). Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 18, Issue 1, pp. 76–84. DOI: 10.1144/geochem2017-001.
20. Strosnider, W. H. J., Winfrey, B. K., Peer, R. A. M. and Nairn, R. W. (2013). Passive co-treatment of acid mine drainage and sewage: Anaerobic incubation reveals a regeneration technique and further treatment possibilities. *Ecological Engineering*, Vol. 61, Part A, pp. 268–273. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.037.
21. Tapia, A., Cornejo-La Torre, M., Santos, E. S., Arán, D. and Gallardo, A. (2019). Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings. *Journal of Environmental Management*, Vol. 244, pp. 154–160. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.040.
22. Tordoff, G. M., Baker, A. J. M. and Willis, A. J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, Vol. 41, Issues 1–2, pp. 219–228. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00414-2.
23. Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R. and Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, Vol. 184, pp. 594–600. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.025.
24. Wong, J. W. C. and Ho, G. (1994). Sewage sludge as organic ameliorant for revegetation of fine bauxite refining residue. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 11, Issues 1–4, pp. 297–309. DOI: 10.1016/0921-3449(94)90097-3.
25. Younger, P. L. and Henderson, R. (2014). Synergistic wetland treatment of sewage and mine water: pollutant removal performance of the first full-scale system. *Water Research*, Vol. 55, pp. 74–82. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.024.
26. Zanuzzi, A., Arocena, J. M., van Mourik, J. M. and Faz Cano, A. (2009). Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma*, Vol. 154, Issues 1–2, pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.09.014.
27. Zema, D. A., Bombino, G., Andiloro, S. and Zimbone, S. M. (2012). Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*, Vol. 115, pp. 55–65. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.08.009.
28. Zhang, L., Liu, W., Zhang, P., Ye, C. and Liang, H. (2019). Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27, Issue 2, pp. 2107–2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2.

29. Zhou, L., Li, Z., Liu, W., Liu, S., Zhang, L., Zhong, L., Luo, X. and Liang, H. (2015). Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22, Issue 21, pp. 17151–17160. DOI: 10.1007/s11356-015-4875-y.

**Авторы**

**Красавцева Евгения Андреевна**

Лаборатория природоподобных технологий и техноферной безопасности Арктики Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), Апатиты, Россия

E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

**Горбачева Тамара Тимофеевна**, канд. биол. наук

Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), Апатиты, Россия

E-mail: podzol\_gorby@mail.ru

**Иванова Любовь Андреевна**, д-р биол. наук

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук (ПАБСИ КНЦ РАН), Апатиты, Россия

E-mail: ivanova\_la@inbox.ru

**Максимова Виктория Вячеславовна**

Лаборатория природоподобных технологий и техноферной безопасности Арктики Федерального

исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), Апатиты, Россия

E-mail: v.maksimova@ksc.ru

**Authors**

**Eugenia Andreevna Krasavtseva**

Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

**Tamara Timofeevna Gorbacheva**, PhD in Biology

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: t.gorbacheva@ksc.ru

**Liubov' Andreevna Ivanova**, DSc In Biology

Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: ivanova\_la@inbox.ru

**Victoria Vyacheslavovna Maksimova**,

Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

E-mail: v.maksimova@ksc.ru