ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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



Научная статья

Оценка эффективности использования осадка сточных вод для рекультивации нарушенных территорий в Кольской субарктике (на примере песчаного карьера)

Л.А.Иванова[1,2], **М.В.Слуковская**[3,4], **Е.А.Красавцева**[2,3]✉
[1] *Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А.Аврорина КНЦ РАН, Кировск, Россия*
[2] *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[3] *Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ЦНМ КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[4] *Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** 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. EDN FNAPXK

Аннотация. Дана оценка эффективности рекультивационных мероприятий с применением осадка сточных вод для ускоренного формирования устойчивого противоэрозионного растительного покрова на малопродуктивном техногрунте песчаного карьера в условиях Кольского Севера. Схема эксперимента, заложенного в 2017 г., включала три варианта: контрольный – без мелиоранта, опытный 1 – фрагментарное (50 %) нанесение осадка сточных вод, опытный 2 – сплошное нанесение. На шестой вегетационный сезон были проанализированы пробы техноземов и проведены измерения эмиссии CO_2. Показано, что использование осадка сточных вод оказывает положительный эффект на физико-химические и агрохимические свойства грунтов: снижаются pH и плотность в его естественном залегании, повышается гигроскопичность, растет содержание доступных фосфора и калия. Выявлены достоверные отличия ($p < 0,05$) между эмиссиями CO_2 в контрольном и опытных вариантах. Содержание органического углерода в контрольном было ниже, чем в опытных вариантах, при фрагментарном нанесении осадка сточных вод в три раза, при сплошном – в девять раз. Также выявлены достоверные ($p < 0,05$) различия в содержании углерода и азота в вытяжках холодной и горячей воды между образцами контрольного и опытного варианта со сплошным нанесением осадка сточных вод. Вместе с тем, путем расчета отношения C/N установлен очень низкий уровень обогащенности гумуса азотом. Определены основные факторы, обуславливающие изменчивость оцениваемых параметров – применение мелиоранта и способ его нанесения, вклад применения составил 60 %, вклад способа – 14 %. С учетом экономической составляющей рекомендуется фрагментарное нанесение осадка сточных вод на техногрунт песчаного карьера для создания устойчивого противоэрозионного фитоценоза.

***Ключевые слова*:** ландшафт; песчаный карьер; технозем; мелиорант; осадок сточных вод; эмиссия CO_2

Благодарность. Исследование проведено в рамках тем НИР FMEZ-2022-0022, FMEZ-2022-0010.

Поступила: 28.03.2024 ***Принята: 03.06.2024*** ***Онлайн: 04.07.2024*** ***Опубликована: 04.07.2024***

Введение. Активная деятельность горнопромышленных предприятий в Мурманской области по добыче полезных ископаемых открытым способом – песка, щебня, блочного камня и других, широко используемых в строительстве и производстве материалов, – привела к появлению многочисленных малых и больших карьеров. Такой подход оптимизирует экономику строительной отрасли в регионе, однако создает ряд экологических проблем, связанных с возникновением новых техногенных форм ландшафта с низкой биологической продуктивностью и специфическими геоморфологическими, гидрофизическими и геохимическими свойствами. Баланс запасов по Мурманской области учитывает 68 месторождений песчано-гравийной смеси с запасами 92690 тыс. м^3 по категориям А + В + С1, а запасы разрабатываемых месторождений составляют 48721 тыс. м^3. [1]

[1] Текущее состояние минерально-сырьевой базы Мурманской области. URL: https://mpr.gov-murman.ru/activities/napravleniya/10.mineral/00.current/ (дата обращения 28.03.2024).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452
© Л.А.Иванова, М.В.Слуковская, Е.А.Красавцева, 2024

Карьерные выработки наиболее востребованы вблизи городов и поселений, однако они приводят к загрязнению атмосферного воздуха, нарушению почвенного покрова и балансового режима поверхностных и подземных вод, биоты, что также отрицательно сказываются на здоровье людей [1-3].

В России, в соответствии с законом «О недрах»[2], по окончании освоения месторождения на нарушенных горными работами участках требуется обязательное проведение восстановительных мероприятий по предотвращению отрицательного воздействия на окружающую среду (рекультивации) и приведению в состояние, пригодное для дальнейшего использования. Однако непродуктивные карьерные техногрунты малопригодны для рекультивации как по физическим свойствам, так и по химическому составу (ГОСТ 17.5.1.03-86) [4-6], особенно в суровых климатических условиях Крайнего Севера. Рекультивация проблематична без дополнительных инвестиций в дорогостоящие материалы и удобрения, поэтому требуется поиск и разработка нетрадиционных научно обоснованных, адаптированных к экологическим и экономическим особенностям региона способов использования альтернативных мелиорантов, повышающих биогенность подобных грунтов [7, 8].

В связи с этим большой интерес вызывают продукты переработки региональных водоканализационных хозяйств – осадки сточных вод (ОСВ) [9, 10]. Многие российские и зарубежные исследователи изучают возможности применения ОСВ в качестве мелиорантов для восстановления растительного покрова на хвостохранилищах бокситовых [11], медных [12, 13] и редкометалльных рудников [14, 15]. Внесение ОСВ, характеризующихся значительным содержанием органического вещества и питательных элементов в биодоступных формах, способствует улучшению эдафических факторов рекультивируемых грунтов [16-18]. Однако изучать осадок необходимо в каждом случае из-за возможного наличия в нем тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов [19].

Применение органических мелиорантов для формирования противоэрозионных фитоценозов на песчаных поверхностях карьеров в арктических условиях без традиционного землевания может способствовать решению проблемы пылеподавления. Следует изучать комплекс показателей – доступные формы питательных элементов (азота, фосфора, калия), органического углерода, растворенного органического вещества, почвенного дыхания (эмиссии CO_2 из почвы) – широко используемых для оценки состояния и продуктивности создаваемых экосистем [20].

Цель работы – оценка эффективности рекультивационных мероприятий с применением ОСВ для ускоренного формирования устойчивого противоэрозионного растительного покрова на песчаном карьере. Практический аспект исследования заключается в разработке экономически эффективной экотехнологии восстановления нарушенных ландшафтов с применением нетрадиционного и требующего утилизации органоминерального мелиоранта.

Методы. *Характеристика опытных площадок и схема эксперимента*. В 2017 г. на модельном участке песчаного карьера регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал» сотрудниками ФИЦ КНЦ РАН был заложен мелкоделяночный полевой опыт по созданию противоэрозионных травостоев с применением ОСВ. Мелиорант был предоставлен тем же предприятием. Согласно проведенным ранее исследованиям, ОСВ АО «Апатитыводоканал» относились к отходам V класса опасности и полностью соответствовали требованиям ГОСТ Р 54534-2011, предъявляемым к ОСВ при использовании в качестве почвогрунтов для биологической или технической рекультивации (табл.1) [8, 21, 22]. Содержание органического вещества составляло 62 %, калия – 0,38 %. Ориентировочный возраст использованного ОСВ составлял 3-5 лет при хранении в аэротенках предприятия.

Эксперимент проводился на 18 делянках площадью по 1 м^2, заложенных на расстоянии 0,5 м друг от друга. Схема опыта предусматривала три варианта (n = 6): контрольный вариант (без использования ОСВ), опытный вариант 1 – фрагментарное нанесение ОСВ (50 % площади – точечно, в шахматном порядке в пределах каждой из площадок), опытный вариант 2 – сплошное применение ОСВ (100 % площади). Толщина слоя наносимого мелиоранта составляла около 5 см. Консистенция

[2] Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 № 2395-1. Статья 22. Основные права и обязанности пользователя недр. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/ed644f2f2ff8ea426789b6895057ff6ddd4807d3/ (дата обращения 28.03.2024).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ОСВ сметанообразная, исключающая возможность растекания осадка за пределы площадки. Влажность нанесенного мелиоранта составляла 95-97 %. В качестве посевного материала использовалась травосмесь, включающая районированные семена злаковых и бобовых видов растений. В течение первых трех лет ежегодно оценивалось качество созданных фитоценозов: высота растений, площадь проективного покрытия и плотность травостоя, запас надземной фитомассы, мощность травяной дернины, увеличение биоразнообразия растений в созданных фитоценозах, позднее оценивалась эффективность работы фотосинтетического аппарата [8, 21, 22]. Состояние растительности на экспериментальных делянках с 2019 по 2023 гг. представлено на рис.1.

Таблица 1

Сравнительный анализ химического состава ОСВ АО «Апатитыводоканал» и нормативов (ГОСТ Р 54534-2011)

Показатель	ОСВ	Условия использования	
		Техническая рекультивация	Биологическая рекультивация
Класс опасности для окружающей среды	V	IV, V	IV, V
Pb, мг/кг	< 30	1000	500
Zn, мг/кг	186	7000	3500
Ni, мг/кг	< 30	800	400
Cu, мг/кг	< 30	1500	750
pH_{KCl}	5,50	5,0-8,5	5,0-8,5
Общий азот, %	0,19	Не нормируется	0,5
Общий фосфор, %	0,02	Не нормируется	1,5



Рис.1. Состояние растительности на экспериментальных делянках в 2019 (*а*), 2020 (*б*) и 2023 (*в*) годах

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452
© Л.А.Иванова, М.В.Слуковская, Е.А.Красавцева, 2024

Отбор проб и анализ. Пробы грунта и техноземов на экспериментальном участке в карьере отбирались в шестой вегетационный сезон с помощью режущего кольца диаметром 10 см и высотой 5 см. Образцы отбирались по одному в каждой повторности, т.е. для каждого из вариантов имелось по 6 образцов $n = 6$. Плотность грунта рассчитывалась как отношение абсолютно сухой массы образца к объему пробоотборника.

Для определения pH водной и солевой (KCl) вытяжек использовался лабораторный иономер И-160МИ со стеклянным лабораторным электродом ЭС-10603 и электродом сравнения ЭСр-10103. Вытяжка для определения pH_{H_2O} готовилась при соотношении твердой и жидкой фазы (Т : Ж) – 1 : 5, перемешивалась в течение трех минут, отстаивалась пять минут в соответствии с ГОСТ 26423-85.

Вытяжка для определения pH_{KCl} готовилась при соотношении Т : Ж – 1 : 25, перемешивалась на лабораторном шейкере в течение одного часа в соответствии с ГОСТ 26490-85. Определение коэффициента гигроскопичности образцов проводилось в Центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН в соответствии с ГОСТ 28268-89.

Подвижный фосфор и обменный калий определяли по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ Р 54650-2011). К пробе грунта (Т : Ж – 1 : 5) добавлялся раствор HCl 0,2 н, смесь перемешивалась на лабораторном шейкере в течение 15 мин, затем фильтровалась через бумажный фильтр «синяя лента». Результирующие растворы анализировались в Центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН методами атомно-абсорбционной спектрометрии (атомно-абсорбционный спектрометр «Квант-2мт») и фотометрии (фотометр фотоэлектрический КФК 3-01).

Органический углерод в твердых образцах определяли по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91). Содержание лабильных форм углерода и азота анализировалось после экстракции холодной и горячей водой [23]. Экстракция холодной водой проводилась при комнатной температуре (экстрагент – дистиллированная вода, соотношение Т : Ж – 1 : 10, время экстракции 30 мин), растворы центрифугировались (лабораторная универсальная центрифуга Dlab DM0636, 3500 об/мин, 30 мин) и фильтровались через мембранный фильтр «Владипор» с размером пор 0,45 мкм. Для экстракции горячей водой к оставшейся твердой фазе добавлялась свежая порция дистиллированной воды и выдерживалась в термостате при 80 °С в течение 16 ч. Полученные вытяжки центрифугировались и фильтровались по описанной схеме. Концентрации азота и углерода в полученных фильтратах определялись с помощью анализатора элементного состава «Топаз NC».

Измерение эмиссии CO_2 грунтами проводились дважды за вегетационный сезон с использованием портативного газоанализатора EGM-5 с камерой SRC-2 (PP Systems). За один час до измерения открытые камеры были углублены в почву на 3-4 см с предварительным удалением живой биомассы. Одновременно с этим измерялась температура грунта на глубине 1 и 10 см термометром Checktemp-1 (Hanna Instruments) и влажность грунта – на глубине 10 см влагомером SM-150 (Delta-T Devices) [24].

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием MS Excel 2016, пакет StatPlus (версия v7, AnalystSoft Inc.). Достоверность различий параметров по вариантам оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA ($p < 0,05$).

Обсуждение результатов. Результаты определения основных физико-химических и агрохимических свойств образцов грунта, отобранных с экспериментальных делянок, и их статистической обработки представлены в табл.2.

Таблица 2

Физико-химическая и агрохимическая характеристики образцов

Показатель	Контрольный образец	Образец с фрагментарным нанесением ОСВ	Образец со сплошным нанесением ОСВ
Плотность, г/см^3	$1,48 \pm 0,07^a$	$1,11 \pm 0,04^b$	$0,99 \pm 0,04^b$
Коэффициент гигроскопичности	$1,006 \pm 0,0001^a$	$1,008 \pm 0,001^{ab}$	$1,012 \pm 0,002^b$
pH_{H_2O}	$6,37 \pm 0,05^a$	$6,40 \pm 0,03^a$	$6,20 \pm 0,04^b$
pH_{KCl}	$5,84 \pm 0,08^a$	$5,36 \pm 0,03^b$	$5,03 \pm 0,10^c$
K, мг/кг	$15,60 \pm 0,89^a$	$38,01 \pm 2,85^{ab}$	$59,35 \pm 11,12^b$
P, мг/кг	$81,28 \pm 15,32^a$	$72,13 \pm 1,50^{ab}$	$229,92 \pm 63,46^b$

Примечание. Приведены средние значения ± стандартная ошибка; буквы в надстрочных индексах означают достоверное наличие (буквы разные) или отсутствие (буквы одинаковые) различий между вариантами опыта при $p < 0,05$.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Внесение ОСВ и его длительное депонирование привело к значительному снижению плотности грунта и повышению гигроскопичности на экспериментальных площадках. Плотность образцов технозема в сравнении с контрольным участком снизилась в 1,3 и 1,5 раза для опытных площадок с фрагментарным и сплошным нанесением мелиоранта соответственно. Выявлены значимые различия ($p < 0,05$) плотности грунта между опытными и контрольным вариантами без существенного различия между способами нанесения мелиоранта. Коэффициент гигроскопичности статистически значимо отличался для образцов контрольных участков и участков со сплошным нанесением ОСВ. В работах [19, 25, 26] отмечалось положительное влияние ОСВ на физико-химические свойства грунтов, в частности плотность и водно-воздушный режим.

По pH водной вытяжки все образцы относятся к слабокислым, близким к нейтральным. Применение ОСВ достоверно ($p < 0,05$) снизило актуальную кислотность в образце со сплошным нанесением. Значения pH солевой вытяжки изменялись значительно: грунт карьера близок к нейтральной, а грунт опытных площадок – к слабокислой реакции среды. Не только факт нанесения, но и площадь покрытия ОСВ повлияли на величину потенциальной кислотности.

Результаты химического анализа показали закономерное увеличение содержания подвижного калия в ряду: контрольный участок < участок фрагментарным нанесением ОСВ < участок со сплошным нанесением ОСВ. Схожие результаты были получены в ходе эксперимента на апатит-нефелиновых хвостах обогащения [21]. Вместе с тем, содержание доступного фосфора было достоверно выше, чем в контрольном, только в варианте сплошного нанесения ОСВ.

При сопоставлении содержания подвижных фосфора и калия в грунте со шкалой обеспеченности почв питательными элементами, представленной в методических указаниях[3], установлено, что во всех вариантах техноземы относятся к классу очень высокой обеспеченности фосфором. По содержанию калия грунт в варианте со сплошным нанесением ОСВ соответствует очень высокому, в варианте с фрагментарным нанесением ОСВ – повышенному, в контрольном – среднему уровню обеспеченности. Таким образом, содержание подвижных форм питательных элементов в грунте по истечении шести лет после однократного использования ОСВ позволяет судить о пролонгированном действии данного мелиоранта.

Содержания углерода и азота в различных фракциях и результаты их статистической обработки представлены в табл.3. Количество органического углерода закономерно возрастало в ряду: контрольный < фрагментарное нанесение ОСВ < сплошное нанесение ОСВ. Достоверные различия выявлены между контрольным и опытным вариантом со сплошным нанесением мелиоранта ($p < 0,05$).

Таблица 3

Содержание углерода и азота в различных фракциях

Показатель	Контрольный образец	Образец с фрагментарным нанесением ОСВ	Образец со сплошным нанесением ОСВ
$C_{орг}$, %	$0,29 \pm 0,05^{a}$	$0,90 \pm 0,20^{ab}$	$2,89 \pm 0,93^{b}$
$C_{хол}$, мг/кг	$199,7 \pm 54,7^{a}$	$358,8 \pm 119,1^{ab}$	$556,1 \pm 60,5^{b}$
$N_{хол}$, мг/кг	$4,64 \pm 0,71^{a}$	$12,6 \pm 1,6^{ab}$	$27,4 \pm 10,1^{b}$
$C/N_{хол}$	$46,1 \pm 22,0^{a}$	$26,7 \pm 8,1^{a}$	$26,83 \pm 9,4^{a}$
$C_{гор}$, мг/кг	$811,5 \pm 92,2^{a}$	$1675,1 \pm 425,2^{ab}$	$2420,3 \pm 476,2^{b}$
$N_{гор}$, мг/кг	$19,9 \pm 4,3^{a}$	$36,4 \pm 1,1^{ab}$	$227,6 \pm 102,3^{b}$
$C/N_{гор}$	$51,0 \pm 12,7^{a}$	$45,1 \pm 10,3^{a}$	$21,0 \pm 7,2^{a}$

Содержание углерода, извлекаемого дистиллированной водой при комнатной температуре, характеризует содержание водорастворимого органического вещества, являющегося субстратом для почвенной микрофлоры и растительности [27-29]. Закономерно содержание углерода и азота возрастает с увеличением количества внесенного ОСВ. Выявлены достоверные ($p < 0,05$) различия в содержании водорастворимого углерода и азота между образцами контрольного и опытного варианта со сплошным нанесением ОСВ.

[3] Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ «Росинормагротех», 2003. 241 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452
© Л.А.Иванова, М.В.Слуковская, Е.А.Красавцева, 2024

Содержание углерода и азота в вытяжке, приготовленной с использованием горячей воды в качестве экстрагента, характеризует содержание углерода и азота микробной биомассы [30-32]. Как и в случае с холодными вытяжками, содержание углерода и азота в горячих вытяжках закономерно возрастает в ряду: контрольный участок < участок с фрагментарным ОСВ < участок со сплошным ОСВ. Достоверные различия также выявлены для содержания углерода и азота в опытном варианте со сплошным нанесением ОСВ в сравнении с контрольным.

Дополнительным показателем гумусного состояния почв является соотношение C/N. Согласно исследованию [33], почвы, величина отношения C/N которых превышает 14, соответствуют очень низкому уровню обогащенности гумуса азотом. Отношение водорастворимых форм C/N в холодной вытяжке изученных образцов значительно выше приведенного значения. Вместе с тем данный показатель для обоих опытных вариантов с применением мелиоранта в два раза ниже, чем в контрольном, что может быть обусловлено увеличением содержания азота совместно с углеродом и пропорционально способу нанесения ОСВ. Величина отношения углерода и азота в горячей вытяжке закономерно снижается в ряду: контрольный участок – – участок с фрагментарным ОСВ – участок со сплошным ОСВ.

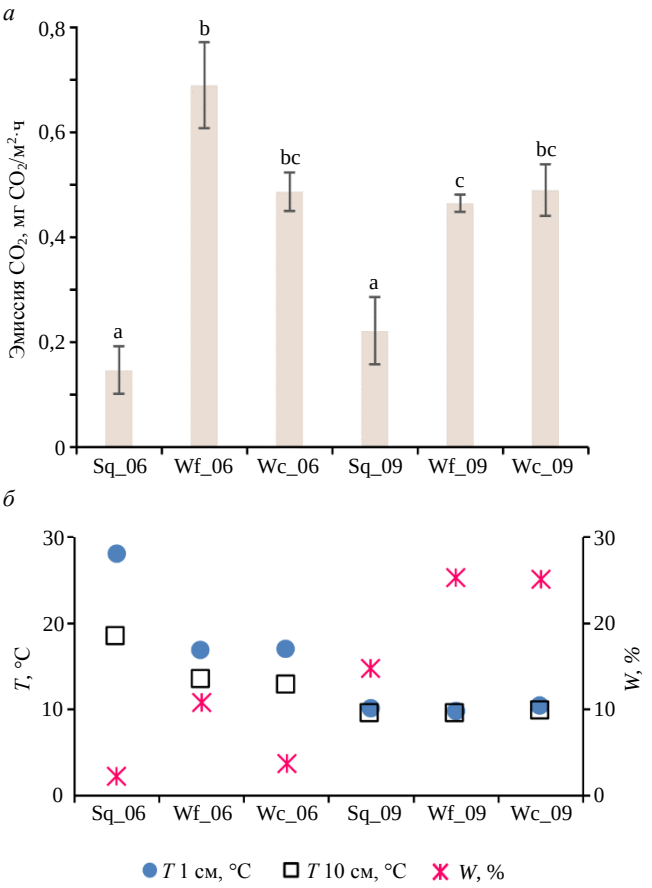


Рис.2. Эмиссия CO_2 почвой (*а*), влажность грунта и температура в поверхностном слое и на глубине 10 см (*б*) в июне и сентябре

Sq – контроль; Wf – фрагментарное нанесение ОСВ; Wc – сплошное нанесение ОСВ; 06 – июнь; 09 – сентябрь
Буквы над столбцами – достоверное наличие (буквы разные), отсутствие различий (буквы одинаковые) между вариантами опыта при $p < 0,05$

Наименьшие значения эмиссии CO_2 в июне отмечены на контрольных площадках – 0,15 ± ± 0,05 мг $CO_2/м^2 \cdot ч$ при средней влажности 2,2 % (рис.2). На участках с фрагментарным нанесением мелиоранта данный показатель был значительно выше – 0,69 ± 0,08 мг $CO_2/м^2 \cdot ч$ при средней влажности 10,7 %, а на участках со сплошным нанесением мелиоранта 0,49 ± 0,04 мг $CO_2/м^2 \cdot ч$ при средней влажности 3,8 %.

В конце вегетационного сезона значения эмиссии CO_2 на экспериментальных делянках составили 0,22 ± 0,06 мг $CO_2/м^2 \cdot ч$ (при влажности 14,7 %) для контрольного участка; 0,47 ± 0,02 мг $CO_2/м^2 \cdot ч$ (при влажности 25,3 %) для участков с фрагментарным нанесением ОСВ; 0,49 ± 0,05 мг $CO_2/м^2 \cdot ч$ (при влажности 25,2 %) со сплошным нанесением ОСВ. В контрольной серии достоверных различий между результатами, полученными в разные периоды измерений, не выявлено; при этом эмиссии в контрольной серии были значимо ($p < 0,05$) ниже по сравнению с опытными вариантами как в июне, так и в сентябре. В серии с фрагментарным нанесением ОСВ эмиссии CO_2 в июне были статистически значимо выше, чем в конце сезона, тогда как для серии со сплошным нанесением мелиоранта такой зависимости выявлено не было. Высокие значения эмиссии CO_2 в июне в серии с фрагментарным нанесением ОСВ обусловлены повышенной влажностью грунта в начале вегетационного сезона [34, 35].

Анализ взаимосвязи эмиссии CO_2 с другими лабильными почвенными параметрами показал высокий уровень корреляции между почвенным дыханием, влажностью и содержанием углерода и азота в горячей вытяжке (табл.4), такие закономерности были отмечены в работе [36].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Пирсона для некоторых параметров (n = 18)

Параметр	Эмиссия CO_2, мг $CO_2/м^2 \cdot ч$	Влажность W, %	Содержание азота в горячей вытяжке $N_{гор}$, мг/кг
W, %	**0,7147**	–	–
p	0,0013	–	–
$N_{гор}$, мг/кг	**0,5165**	**0,6712**	–
p	0,0338	0,0023	–
$C_{гор}$, мг/кг	**0,6145**	**0,6539**	**0,7814**
p	0,0087	0,0032	0,0001

На основании результатов факторного анализа выявлены два основных фактора, объясняющие свыше 74 % изменчивости рассматриваемых параметров – применение ОСВ и способ нанесения мелиоранта (рис.3, табл.5). Вклад первого фактора – применение ОСВ – составил 60 %. Наибольшую нагрузку на этот фактор оказали содержание биодоступных фосфора, калия, углерода, азота, эмиссия CO_2 почвой, потенциальная кислотность, плотность, влажность, коэффициент гигроскопичности. Почти все параметры имеют прямую зависимость и лишь плотность грунта и pH солевой вытяжки – обратную [35].

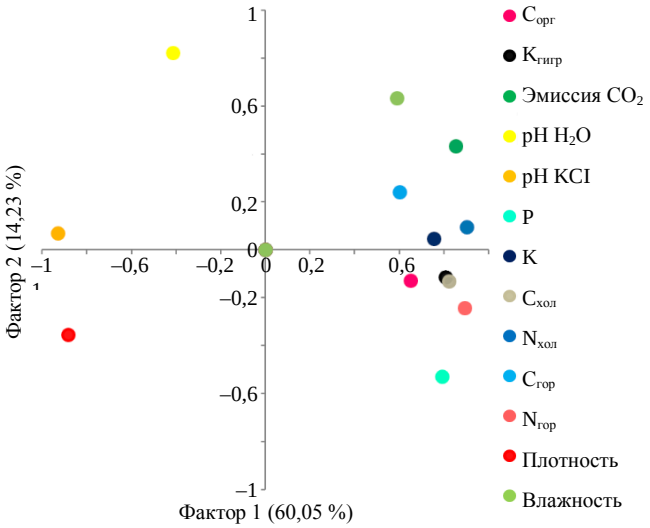


Рис.3. Диаграмма результатов факторного анализа

Таблица 5

Вклады компонентов в факторный анализ

Переменная	Фактор 1	Фактор 2
$C_{орг}$, %	**0,65**	–0,13
$K_{гигр}$	**0,81**	–0,11
Эмиссия CO_2, мг $CO_2/м^2 \cdot ч$	**0,85**	0,43
pH H_2O	–0,41	**0,82**
pH KCl	**–0,93**	0,07
P, мг/кг	**0,79**	**–0,53**
K, мг/кг	**0,75**	0,05
$C_{хол}$, мг/кг	**0,82**	–0,13
$N_{хол}$, мг/кг	**0,90**	0,09
$C_{гор}$, мг/кг	**0,60**	0,24
$N_{гор}$, мг/кг	**0,89**	–0,24
Плотность, г/см^3	**–0,88**	–0,35
Влажность, %	**0,59**	**0,63**

Наибольшую нагрузку на второй фактор – способ нанесения мелиоранта, вклад которого составляет 14,2 %, оказали pH водной вытяжки, объемная влажность и содержание подвижного фосфора. Обратная зависимость выявлена только для содержания подвижного фактора.

Наиболее важным условием является наличие слоя мелиоранта, приводящее к разрыхлению грунта и увеличению его гигроскопичности, снижению pH солевой вытяжки, повышению содержания биодоступных фосфора, калия, углерода, азота, росту эмиссии CO_2 почвой. Второй фактор соответствует площади нанесения ОСВ.

Анализ полученных в ходе исследования результатов позволяет рекомендовать ОСВ в качестве перспективного мелиоранта для ускоренного формирования устойчивого противоэрозионного растительного покрова на песчаных карьерах. С учетом экономической составляющей можно рекомендовать фрагментарное нанесение ОСВ для повышения биогенности грунта и создания устойчивого противоэрозионного фитоценоза на участках песчаного карьера.

Заключение. Внесение ОСВ оказало положительный эффект на физико-химические и агрохимические свойства грунта песчаного карьера, выраженное в снижении его плотности в естественном залегании, незначительном возрастании гигроскопичности, снижении pH водной и солевой вытяжек, повышении содержания доступных фосфора и калия даже по истечении шести лет депонирования.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452
© Л.А.Иванова, М.В.Слуковская, Е.А.Красавцева, 2024

Средние содержания углерода в образцах грунта контрольного варианта составили 0,29 ± 0,05 %, что в три раза ниже, чем в опытном варианте с фрагментарным нанесением ОСВ и в девять раз ниже, чем в варианте со сплошным применением мелиоранта. Отмечено увеличение содержания углерода и азота в холодных и горячих вытяжках в ряду: контрольный вариант – фрагментарное нанесение мелиоранта – сплошное нанесение мелиоранта. Вместе с тем рассчитанные значения отношения C/N соответствуют очень низкому уровню обогащенности гумуса азотом.

Установлены достоверные отличия ($p < 0,05$) между эмиссиями CO_2 в контрольном и опытных вариантах в оба периода измерений. Выявлен высокий уровень корреляции между почвенным дыханием, влажностью и содержанием углерода и азота в горячей вытяжке.

Результаты проведенного факторного анализа определили два основных фактора, обуславливающих изменение оцениваемых параметров – применение ОСВ и способ нанесения мелиоранта. При этом 60 % изменчивости физико-химических, агрохимических и лабильных почвенных параметров объясняется первым фактором.

Авторы выражают признательность сотрудникам Центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН за проведение химического анализа вытяжек и образцов, С.Э.Красавцеву и А.В.Тимохину – за помощь в отборе проб грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Даббаг А.* Изучение свойств растений песчаных карьеров Московской области для восстановления растительности песчаных карьеров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 3. С. 299-308. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-3-299-308

2. *Gentili R., Casati E., Ferrario A. et al.* Vegetation cover and biodiversity levels are driven by backfilling material in quarry restoration // CATENA. 2020. Vol. 195. № 104839. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104839

3. *Мосейкин В.В., Гальперин А.М., Ермолов В.А., Круподеров В.С.* Анализ ситуации с горнопромышленными отходами (геоэкологические аспекты) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № S1. С. 7-23.

4. *Li Wang, Bin Ji, Yuehua Hu et al.* A review on in situ phytoremediation of mine tailings // Chemosphere. 2017. Vol. 184. P. 594-600. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.025

5. *Иванова Н.А.* Биологическая рекультивация песчаных карьеров Марийского Заволжья созданием лесных культур сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.): Автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. 21 с.

6. *Осипенко Р.А., Зарипов Ю.В., Белов Л.А., Морозов А.Е.* Опыт рекультивации песчаных карьеров в северной подзоне тайги // Леса России и хозяйство в них. 2020. № 4 (75). С. 12-19. DOI: 10.51318/FRET.2020.40.90.002

7. *Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е.* Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375-1391. DOI: 10.7868/S0032180X16090082

8. *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

9. *Garbini G.L., Caracciolo A.B., Rolando L. et al.* Effects of municipal waste compost on microbial biodiversity and energy production in terrestrial microbial fuel cells // New Biotechnology. 2023. Vol. 78. P. 131-140. DOI: 10.1016/j.nbt.2023.10.009

10. *Asemaninejad A., Langley S., Mackinnon T. et al.* Blended municipal compost and biosolids materials for mine reclamation: Long-term field studies to explore metal mobility, soil fertility and microbial communities // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 760. № 143393. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143393

11. *Shengguo Xue, Feng Zhu, Xiangfeng Kong et al.* A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud) // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. Iss. 2. P. 1120-1132. DOI: 10.1007/s11356-015-4558-8

12. *Asensio V., Covelo E.F., Kandeler E.* Soil management of copper mine tailing soils – Sludge amendment and tree vegetation could improve biological soil quality // Science of The Total Environment. 2013. Vol. 456-457. P. 82-90. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.061

13. *Novo L.A.B., Covelo E.F., González L.* The use of waste-derived amendments to promote the growth of Indian mustard in copper mine tailings // Minerals Engineering. 2013. Vol. 53. P. 24-30. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.004

14. *Lingyan Zhou, Zhaolong Li, Wen Liu et al.* Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22. Iss. 21. P. 17151-17160. DOI: 10.1007/s11356-015-4875-y

15. *Lin Zhang, Wen Liu, Shenghong Liu et al.* 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. 2020. Vol. 27. Iss. 2. P. 2107-2119. DOI: 10.1007/s11356-019-06645-2

16. *Копцик Г.Н., Смирнова И.Е., Копцик С.В. и др.* Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» на Кольском полуострове // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2015. № 2. С. 42-48.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

17. *Виноградов Д.В., Василева В.М., Макарова М.П. и др.* Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 127-133. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-3-127-133

18. *Asensio V., Vega F.A., Andrade M.L., Covelo E.F.* Technosols Made of Wastes to Improve Physico-Chemical Characteristics of a Copper Mine Soil // Pedosphere. 2013. Vol. 23. Iss. 1. P. 1-9. DOI: 10.1016/S1002-0160(12)60074-5

19. *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

20. *Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Семаль В.А., Комачкова И.В.* Эмиссия углекислого газа из почв природных и антропогенных ландшафтов юга Приморья // Фундаментальные исследования. 2013. № 1. Ч. 3. С. 585-589.

21. *Иванова Л.А., Лусис А.В., Горбачева Т.Т., Красавцева Е.А.* Пора восстанавливать Арктику. Использование отходов производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств для реабилитации нарушенных ландшафтов. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2023. 77 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.494.5

22. *Шмакова Н.Ю., Иванова Л.А., Ермолаева О.В., Лусис А.В.* Фотосинтетическая продуктивность искусственно созданных фитоценозов с применением осадка сточных вод // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 3 (125). С. 60-68. DOI: 10.56195/20793332_2023_3_60_68

23. *Hamkalo Z., Bedernichek T.* Total, cold and hot water extractable organic carbon in soil profile: impact of land-use change // Zemdirbyste-Agriculture. 2014. Vol. 101. № 2. P. 125-132. DOI: 10.13080/z-a.2014.101.016

24. *Корнейкова М.В., Васенев В.И., Салтан Н.В. и др.* Анализ эмиссии CO_2 городскими почвами в условиях Крайнего Севера // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1385-1399. DOI: 10.31857/S0032180X23600373

25. *Mikha M.M., Benjamin J.G., Stahlman P.W., Geier P.W.* Remediation/Restoration of Degraded Soil: I. Impact on Soil Chemical Properties // Agronomy Journal. 2014. Vol. 106. Iss. 1. P. 252-260. DOI: 10.2134/AGRONJ2013.0278

26. *Хордан М.М., Бек Дж., Гарсия-Санчес Э., Гарсия-Оренес Ф.* Анализ объемной плотности и агрегатной устойчивости в перколяционных колоннах // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 877-881. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.877

27. *Matiasek S.J., Pellerin B.A., Spencer R.G.M. et al.* Water-soluble organic carbon release from mineral soils and sediments in an irrigated agricultural system // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 343. № 118184. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118184

28. *Бобрик А.А.* Закономерности эмиссии парниковых газов почвами северотаежных и лесотундровых экосистем Западной Сибири: Автореф. дис. … канд. биол. наук. М.: Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 2016. 26 с.

29. *Singh A.K., Kumar S., Kalambukattu J.G.* Assessing aggregate stability of soils under various land use/land cover in a watershed of Mid-Himalayan Landscape // Eurasian Journal of Soil Science. 2019. Vol. 8. Iss. 2. P. 131-143. DOI: 10.18393/ejss.514319

30. *Хлыстов И.А.* Углерод и азот органических соединений почвы в условиях загрязнения выбросами медеплавильного завода // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2015. № 5. С. 17-22.

31. *Šeremešić S., Milošev D., Sekulić P. et al.* Total and hot-water extractable carbon relationship in chernozem soil under different cropping systems and land use // Journal of Central European Agriculture. 2013. Vol. 14. Iss. 4. P. 1496-1504. DOI: 10.5513/JCEA01/14.4.1382

32. *Ortner M., Seidel M., Semella S. et al.* Content of soil organic carbon and labile fractions depend on local combinations of mineral-phase characteristics // SOIL. 2022. Vol. 8. Iss. 1. P. 113-131. DOI: 10.5194/soil-8-113-2022

33. *Шамрикова Е.В., Кубик О.С., Денева С.В., Пунегов В.В.* Состав водорастворимой фракции почв побережья Баренцева моря: органический углерод и азот, низкомолекулярные компоненты // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1322-1338. DOI: 10.1134/S0032180X19110108

34. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В. и др.* Межгодовые изменения ФАР и влажности почвы в теплый сезон могут быть важнее для направления годового углеродного баланса в тундрах, чем колебания температуры // Журнал общей биологии. 2013. Т. 74. № 1. С. 3-22.

35. *Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Матышак Г.В., Богатырев Л.Г.* Биологическая активность городских почв: пространственная вариабельность и определяющие факторы // Почвоведение. 2022. № 8. С. 1009-1022. DOI: 10.31857/S0032180X22080032

36. *Xiaomei Chen, Muying Liu, Zhanying Xu, Hui Wei.* Influences of temperature and moisture on abiotic and biotic soil CO_2 emission from a subtropical forest // Carbon Balance and Management. 2021. Vol. 16. № 18. DOI: 10.1186/s13021-021-00181-8

***Авторы*: Л.А.Иванова,** *д-р биол. наук, главный научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-7994-5431* (*Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А.Аврорина КНЦ РАН, Кировск, Россия*; *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **М.В.Слуковская,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/ 0000-0002-5406-5569* (*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ЦНМ КНЦ РАН, Апатиты, Россия*; *Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **Е.А.Красавцева,** *канд. техн. наук, научный сотрудник, vandeleur2012@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8821-4446* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*; *Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ЦНМ КНЦ РАН, Апатиты, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0