



ПОРА ВОССТАНАВЛИВАТЬ АРКТИКУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ПОЛЯРНО-АЛЬПИЙСКИЙ БОТАНИЧЕСКИЙ САД-ИНСТИТУТ ИМ. Н. А. АВРОРИНА
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА

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

**ПОРА ВОССТАНАВЛИВАТЬ АРКТИКУ.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА
И ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ
ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ХОЗЯЙСТВ
ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ**

Апатиты
Издательство ФИЦ КНЦ РАН
2023

УДК 502.37
ББК 20.19
П59

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

Коллектив авторов:

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

Ответственные редакторы:

доктор биологических наук Л. П. Капелькина,
кандидат биологических наук Е. А. Боровичев

П59 **Пора** восстанавливать Арктику. Использование отходов производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств для реабилитации нарушенных ландшафтов / Л. А. Иванова, А. В. Лусис, Т. Т. Горбачева, Е. А. Красавцева; отв. ред. докт. биол. наук Л. П. Капелькина, канд. биол. наук Е. А. Боровичев. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2023. — 77 с.: ил.

ISBN 978-5-91137-494-5

В книге представлены результаты многолетних исследований по разработке технологии реабилитации подверженных ветровой эрозии техногенных массивов хвостовых отвалов и карьерных выработок в Мурманской области без проведения землевания и нанесения защитных полимерных реагентов. В её основе — использование отходов производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ): осадка сточных вод (ОСВ) и осветленных коммунальных стоков (ОКС). Широкая доступность, дешевизна, низкие эксплуатационные расходы и затраты на проведение фитореабилитационных работ с их участием — отличительные достоинства ОКС и ОСВ. Наделенные высоким содержанием легкодоступного для микробиоты органического вещества, а также лабильностью азота, фосфора и калия, они являются эффективными мелиорантами, повышающими биогенность (НРК-статус) песчаных грунтов в зоне рискованного земледелия, создающими благоприятные эдафические условия для интенсификации начального этапа восстановительной сукцессии на песчаных грунтах и для формирования устойчивых противозерозионных растительных сообществ.

Технология будет способствовать решению актуальных экологических проблем — накопления, эффективного вторичного использования муниципальных отходов в народном хозяйстве, восстановления экосистемного потенциала нарушенных арктических ландшафтов, преобразования их в состояние, пригодное для дальнейшего применения, и предотвращения отрицательного воздействия на окружающую среду в регионе.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области рационального природопользования и рекультивации нарушенных земель.

УДК 502.37
ББК 20.19

Научное издание
Редактор Е. Н. Еремеева
Технический редактор В. Ю. Жиганов
Подписано в печать 07.09.2023. Формат бумаги 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 4,48. Заказ № 49. Тираж 500 экз.



Электронная версия: <https://inep.ksc.ru>

Методические рекомендации изданы при финансовой поддержке экспертного центра «Проектный офис развития Арктики (ПОРА)».

ISBN 978-5-91137-494-5
doi:10.37614/978.5.91137.494.5

© Коллектив авторов, 2023
© ФИЦ КНЦ РАН, 2023
© ПАБСИ КНЦ РАН, 2023
© ИППЭС КНЦ РАН, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Агроклиматические условия Мурманской области.....	8
Особенности песчаных техногрунтов на объектах накопленного ущерба в Мурманской области.....	11
Способы стабилизации и закрепления песчаных техногрунтов.....	16
Адаптированные технологии биорекультивации нарушенных ландшафтов Мурманской области.....	22
Улучшение биогенности малопродуктивных песчаных техногрунтов.....	27
Требования к свойствам и содержанию загрязняющих веществ в отходах водопроводно-канализационных хозяйств.....	31
Отходы производства и потребления регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства акционерного общества «Апатитыводоканал».....	34
Мелиорация песчаных техногенных грунтов отходами производства и потребления регионального водоканализационного хозяйства.....	38
Особенности формирования противозрозионного растительного покрова на песчаном карьере с помощью осадка сточных вод.....	51
Экономическая оценка способа фиторекультивации на основе использования отходов региональных водопроводно- канализационных хозяйств.....	59
Заключение.....	63
Литература.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодное увеличение масштабов использования минеральных ресурсов, осуществление геолого-разведочных и строительных работ горнорудными, нефте- и газодобывающими предприятиями, прокладка дорог, линий электропередач и другая хозяйственная деятельность приводят к нарушению природных экосистем (уничтожению почв, растительного покрова, уменьшению биоразнообразия) и возникновению новых техногенных форм ландшафта [Капелькина, 2012; Ермаков, Ермакова, 2014].

В Мурманской области активная эксплуатация месторождений полезных ископаемых способствовала формированию многочисленных малых и больших карьерных выработок (рис. 1) и 17 крупнейших техногенных массивов класса хвостовых отвалов, в том числе 9 техногенных месторождений (массивов), размещённых на территориях производственного предприятия АО «Апатит» (рис. 2) [Архипов, Решетняк, 2017]. Практически все они включены в перечень объектов накопленного экологического ущерба [Постановление..., 2013], так как являются источниками интенсивного негативного аэротехногенного влияния на окружающую среду и здоровье населения, проживающего в близлежащих городах [Кириллова, 2006]. Для снижения этого воздействия и обеспечения экологической устойчивости в регионе необходимы мероприятия, направленные на преобразование нарушенных земель в состояние, пригодное для дальнейшего их использования [Певзнер и др., 1990].

Одним из способов экологической реабилитации нарушенных территорий является отведение их части под самозаращение [Кондратюк и др., 1980]. Однако, в связи с неблагоприятным прогнозом естественного самовосстановления природных экосистем и сложностью создания растительного покрова на низкоплодородных песчаных отложениях, обусловленных индивидуальной и региональной спецификой [Капелькина, 1993], на первый план выдвигается проведение биорекультивационных работ (восстановление продуктивности нарушенных земель путем создания новых, целенаправленно синтезируемых, искусственных биогеоценозов) [ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие..., 2017].



*Рис. 1. Разработка карьера по добыче песка —
<https://vodoroy.ru/vidyrobot/dobycha-pgs/karer-po-dobyche-peska.html>*



*Рис. 2. Песчаный пляж одного из апатит-нефелиновых хвостохранилищ
АО «Апатит». Фото Л. А. Ивановой*

При принятии рекультивационных мер по формированию растительного покрова на нарушенных землях определяющим фактором является питательный режим его поверхностного слоя. Бесструктурность техногенного субстрата, низкая водоудерживающая способность, отсутствие в нем органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также недостаточная обеспеченность питательными веществами могут потребовать ежегодных инвестиций в дорогостоящие минеральные удобрения. Положительную роль в решении проблемы низкого содержания НРК-статуса малопродуктивных техногрунтов, создания на них и поддержания устойчивости противозерозионного растительного покрова может сыграть использование нетрадиционных дешевых и широкодоступных мелиорантов на основе отходов производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ) — осадка сточных вод (ОСВ) и осветленных коммунальных стоков (ОКС) [Копчик и др., 2016; Chen et al., 2008]. Они обладают потенциально полезными свойствами вследствие высокого содержания легкодоступного для микробиоты органического вещества [Kuipers et al., 2018], лабильности азота, фосфора и калия, обуславливающей их быструю ассимиляцию растениями [Горбачева и др., 2018; 2021], а также оказывают положительное воздействие на физические свойства (плотность и агрегированность) техногрунтов [Jones, 1998].

Однако данные мелиоранты характеризуются непостоянством состава, могут содержать набор вредных химических веществ и патогенов, поэтому для их внедрения необходимы исследования каждого из них в конкретных условиях рекультивируемых территорий [Петрова, Рудзиш, 2021].

На протяжении более чем тридцати лет сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ИППЭС КНЦ РАН) и Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина (ПАБСИ КНЦ РАН) проводятся работы по разработке технологий, способствующих уменьшению негативного воздействия на экосистемы Мурманской области, относящейся к Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). Настоящая брошюра является логическим продолжением методических рекомендаций «Пора озеленять Арктику. Инновационные

газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья» [2020], «Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота» [2021] и «Пора оздоравливать Арктику. Биологические способы очистки и восстановления нефтезагрязненных территорий» [2023].

В настоящем издании мы обобщили многолетние лабораторные, натурные и аналитические исследования по разработке технологий реабилитации песчаных поверхностей техногенных массивов отходов обогащения апатит-нефелиновых руд и карьерных выработок, подверженных ветровой эрозии в Мурманской области. В основе технологии — использование отходов производства и потребления региональных ВКХ: осадка сточных вод и осветленных коммунальных стоков.

В книге представлен обзор методов использования ОКС и ОСВ, применяемых в разных странах, а также разработки сотрудников Мончлеспхоза (Мурманская область), полученные при финансовой поддержке КГМК и научном руководстве ИППЭС КНЦ РАН.

Настоящая работа выполнена на двух основных типах техногенных грунтов: нефелиновых песках хвостохранилища АНОФ-2 ОАО «Апатит» и песчаном карьерном субстрате с применением в экспериментах 12 видов многолетних травянистых растений.

Основные результаты, изложенные в настоящих методических указаниях, получены при выполнении государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН и ПАБСИ КНЦ РАН, исследования также были поддержаны грантом РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области, проект 17-45-510205 «Дефосфотация коммунальных стоков в условиях снижения водопотребления». Издание подготовлено и опубликовано при финансовой поддержке экспертного совета «Проектный офис развития Арктики».

АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Климат Мурманской области определяется ее положением за полярным кругом, рельефом и влиянием Баренцева и Белого морей. Он относится к Атлантико-Арктической зоне умеренного климата с преобладанием тёплых воздушных потоков с Северной Атлантики и холодных из Атлантического сектора Арктики, для которой характерно увеличение повторяемости циклонов в холодное время года и антициклонов в тёплое [Справочник..., 1973–1976].

Заполярию присущи отрицательные среднегодовые температуры и избыточное увлажнение воздуха. Его климат резко меняется по сезонам года. Зима начинается при устойчивом падении средней суточной температуры воздуха ниже 0 °С в конце октября и заканчивается в начале или конце мая. Устойчивый снежный покров образуется в ноябре, его мощность редко превышает 60–75 см, число дней со снежным покровом в центральных районах составляет 200–210. В результате в годовом цикле более половины года приходится на зиму, продолжительность которой составляет от 6 до 6,5 месяцев. В течение всей зимы во время прихода теплых и влажных воздушных масс Атлантического океана наблюдаются оттепели, при которых температура воздуха может достигать 4–12 °С выше нуля. Морозы ниже -20 °С бывают редко. Однако в центре Мурманской области температура может опускаться ниже -40 °С. Средняя температура января составляет -13 ... -14 °С. Отличительными особенностями зимы являются частые туманы, метели, гололед, изморозь, обильные снегопады, большая облачность (7–8 баллов) и высокая относительная влажность воздуха (75–80 %). Лето короткое, как правило, холодное и влажное, начинается в середине июня и заканчивается в конце августа. Средняя температура воздуха в июле составляет +11 ... +15 °С, возможно снижение температуры до отрицательных значений с выпадением снега. Летние заморозки — характерное явление в климате субарктических и арктических районов, к которому вынуждены адаптироваться как местные, так и интродуцированные растения (более поздние сроки высадки растений в открытом грунте отрицательно сказываются на их приживаемости, сроках бутонизации и цветении, подготовке

к перезимовке). Заморозки могут повреждать всходы растений, семена которых высеваются в грунт. Осень короткая и дождливая, обычно начинается в конце августа и заканчивается в конце октября. Этот сезон характеризуется морозящими дождями, сильными ветрами, частыми туманами, высокой относительной влажностью воздуха, заморозками и кратковременными снегопадами. Уже в сентябре может установиться снежный покров [Справочник..., 1973–1976]. Годовая сумма осадков составляет 400–600 мм, в году в среднем насчитывается 230–260 дней с осадками.

Ветровой режим в регионе носит муссонный характер и сказывается на пылеобразовании. Он выражается в преобладании зимой ветров южного и юго-западного направлений, а летом — северного и северо-западного направлений [Архипов, Решетняк, 2017].

Наиболее специфичен в условиях Мурманской области световой режим. Полуденная высота солнца здесь изменяется в течение года от 0–0,5 ° в период зимнего и до 42,0–44 ° в период летнего солнцестояния. В связи с этим максимально возможная продолжительность дня колеблется от 0 (в период полярной ночи) до 24 (в период полярного дня) ч. Из-за значительной облачности среднегодовой приход солнечной радиации к поверхности почвы составляет немногим более половины ее возможного поступления для данной широты. Только в наиболее малооблачные месяцы (март, апрель) этот приход достигает 2/3 от возможного поступления. В среднем за год продолжительность солнечного излучения на территории региона составляет 1200–1600 ч [Зюзин, 2006].

Несмотря на хорошее увлажнение и длительный световой период, климатические условия региона неблагоприятны для растительности, так как сумма положительных температур воздуха выше 10 °С за вегетационный период изменяется от 870 °С на севере до 1127 °С на юге, продолжительность вегетационного периода составляет 80–130 дней [Головкин, 1973].

Наиболее распространенным типом почв в регионе являются подзолы, для которых характерна слабокислая реакция среды всего профиля, слабая насыщенность почвенно-поглощающего комплекса основаниями, крайне низкое количество важных питательных элементов в минеральных горизонтах и низкое содержание гумуса в подстилке.

Органогенный тип почв представляют торфяные олиготрофные почвы верховых и переходных болот, профиль которых состоит в основном из остатков сфагновых мхов. Они характеризуются неблагоприятным избыточным увлажнением, сильнокислой реакцией среды и низким содержанием питательных элементов [Переверзев, 2004]. Из-за сложного холмистого и среднегорного характера рельефа, площади почв, пригодных для сельскохозяйственного освоения в Мурманской области, не велики, окультуренные почвы составляют около 66 тыс. га, или 0,45 % от ее общей территории [Доклад..., 2021].

Таким образом, суровые климатические условия региона и низкое естественное плодородие местных почв не способствуют развитию здесь растениеводства.

ОСОБЕННОСТИ ПЕСЧАНЫХ ТЕХНОГРУНТОВ НА ОБЪЕКТАХ НАКОПЛЕННОГО УЩЕРБА В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Одной из часто встречающихся форм антропогенного типа ландшафтов в Мурманской области являются песчаные карьеры, в которых осуществляется добыча песка открытым способом. Они характеризуются отсутствием растительности, округлыми вершинами холмов, крутыми склонами, на которых можно наблюдать сползание песчаного субстрата.

Карьерный песок — сыпучий материал, образовавшийся в процессе естественного разрушения горных пород, состоящий из частиц кварца, слюды, полевого шпата и других минералов. Основной тип получаемого в регионе песка — строительный. Объемы его добычи измеряются миллионами кубометров в год. По крупности зерна он относится к тонко- и среднеразмерной разновидностям [ГОСТ 25100-2011..., 2011]. Из-за всевозможных включений (остатков растений, небольшого количества гравия, глинистых и пылевидных частиц, камней) большая часть карьерного песка используется как строительный материал (песок) для изготовления строительных штучных материалов, панелей, а также для засыпки траншей и планировки рельефа участков и т. п.

Еще одной широко распространенной в регионе формой нарушения ландшафтов являются хвостовые хозяйства (апатит-нефелиновые хвостохранилища). Они представляют собой сложный комплекс гидротехнических сооружений по гидротранспортировке и укладке хвостов обогащения, очистке и отвода воды, возврата ее в оборот после осветления [Маслобоев и др., 2018]. В настоящее время общая площадь хвостохранилищ обогатительных фабрик в регионе насчитывает более 5 тысяч гектаров.

Хвостохранилище АНОФ-2 АО «Апатит», предназначенное для складирования отвальных хвостов, поступающих с апатит-нефелиновой обогатительной фабрики № 2 (АНОФ-2), не является исключением. Данный объект введен в эксплуатацию в 1963 г., расположен в 8 км к северо-западу от г. Апатиты (Мурманская область) и занимает часть губы реки Белой, представляющей залив крупнейшего в регионе озера Имандра. Территория хвостохранилища вытянута с юго-востока на северо-запад,

ограничена с востока Хибинским горным массивом, а с запада – озером Имандра (рис. 3). Его тип по размещению — равнинный, площадь составляет 7,8 км², а периметр по дамбе обвалования — 11550 м. Это крупнейший намывной техногенный массив в РФ по высоте ограждающей дамбы (более 75 м) и по объему заскладированных в нем отходов (свыше 700 млн м³ хвостов). Ежегодно с обогатительной фабрики на хвостохранилище поступает более 6 млн м³ хвостов обогащения [Архипов, Решетняк, 2017].



Рис. 3. Карта расположения действующего апатит-нефелинового хвостохранилища (XX) АНОФ-2

Хвосты флотации апатит-нефелиновых руд АНОФ-2 представляют собой мелкий несвязный песок серого цвета (рис. 4) крупностью частиц от 0,2 до 1,1 мм и значительным содержанием в них пылеватых фракций. Объёмная плотность сухих хвостов в хвостохранилище составляет 1,54 г/см [Архипов, Решетняк, 2017].



Рис. 4. Внешний вид техногенного грунта хвостоотвалов апатит-нефелиновых руд АНОФ-2. Фото Л. А. Ивановой

С агротехнической точки зрения хвосты существенно отличаются от зональных песчаных почв [Переверзев, 2004]. Их химический состав (табл. 1) показывает наличие полезных компонентов, присущих первоначальным перерабатываемым рудам [Макаров и др., 2006], согласно приказу МПР России от 15 июня 2001 г. № 511, они считаются практически неопасными [Приказ МПР..., 1998].

Таблица 1

Среднее валовое содержание основных химических компонентов песчаного субстрата хвостоотвалов АНОФ-2

Субстрат	Компонент, содержание, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	SrO
Песок отвалов	40,95	21,17	2,63	5,85	6,01	1,19	10,13	5,85	0,27	2,53	0,22

Как и карьерные выработки, хвостохранилища подвержены деятельности ветровой и водной эрозии, оказывают негативное влияние на окружающую среду. Так, в сухие дни летнего периода, в связи с быстрой потерей влаги верхними песчаными слоями этих объектов и под воздействием ветра, происходит формирование значительного по контрастности химического загрязнения атмосферного воздуха, достигающего близлежащих населенных пунктов (рис. 5, 6). При этом на их территории может наблюдаться превышение среднесуточной предельно допустимой концентрации взвешенных частиц в 2,0–2,5 раза [Тимофеева, 2015]. В весенний период случаются размывы дамб хвостохранилищ с аварийными сбросами в близлежащие водоемы [Кириллова, 2006].

Следствием нарушения экологического состояния воздушного бассейна региона является ухудшение условий нормальной жизнедеятельности человека, организмов флоры и фауны [Кириллова, 2006], что требует проведения на объектах накопленного ущерба экологических мероприятий по пылеподавлению [Комонов, Комонова, 2008].



*Рис. 5. Пылеунос с хвостохранилища АНОФ-2.
Фото с сайта <https://www.opentown.ru/novosti/19359>*



Рис. 6. Пыление отвалов хвостохранилища АНОФ-2, достигающее г. Апатиты. Фото Л. А. Ивановой

СПОСОБЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ТЕХНОГРУНТОВ

Применяемые методы борьбы с уносом песков условно можно разделить на три основные группы: механические, физико-химические и биологические [Турчанинов и др., 1981; Месяц, Волкова, 2009].

Механический метод основан на засыпке песчаной поверхности инертным материалом (щебнем или гравием) слоем толщиной до 0,20 м. Его достоинством является отсутствие необходимости применения специализированной техники для предварительной подготовки поверхности и нанесения закрепителей, а недостатком — использование данного способа только на территориях, требующих закрепления на длительный период времени. В случае, когда необходимо консервативное закрепление, механический способ может сделать невозможным переработку складированных отходов в перспективе [Лычагин, Сеница, 2007].

Физико-химический метод рекультивации предполагает создание на песчаной поверхности противоэрозионного покрытия с помощью разного рода вяжущих и цементирующих химических составов (реагентов) как органического, так и неорганического происхождения либо поливы водой (гидрообеспыливание) [Пат. 2513786, 2014].

Гидрообеспыливание — орошение пылящей поверхности водой, является самым первым способом пылеподавления, издревле применяемым в мире и широко используемым в настоящее время в условиях эксплуатации отвалов и карьеров. Для технологической реализации предлагаемого способа предусмотрено применение разных передвижных, стационарных или плавучих мелководных оросительных установок. Однако его серьёзными недостатками является очень большой расход воды и расстояния транспортирования воды от хвостохранилищ до многоярусных отвалов, а также опасность усиления фильтрационных нагрузок на ограждающую дамбу, которые могут вызвать обрушение, сползание откосов и нарушение устойчивости сооружения в целом. Кроме того, орошение пылящих поверхностей в жаркую погоду признается малоэффективным, так как пески быстро высыхают, а постоянная работа дождевальных установок сопровождается значительными затратами. Поэтому среди физико-

химических методов предпочтение отдается использованию химреагентов, обеспечивающих не только смачивание твердых частиц песка и пыли, но и их обволакивание и закрепление в общей массе. Во многих случаях такой подход помогает закреплять пылящие поверхности на продолжительный срок [Кретинин и др., 1988].

В последнее десятилетие активно ведется научный поиск новых, наиболее экологически безопасных связующих и усовершенствование существующих с целью достижения оптимальных показателей прочностных и фильтрационных свойств [Тарасова и др., 2015]. Хорошие перспективы для внедрения в современные зеленые технологии пылеподавления имеют производные хитозана [Zhou et al., 2018], гуаровая камедь [Amato et al., 2010], модифицированный крахмал [Месяц, Волкова, 2009; Amato et al., 2018] и многофункциональные смеси на основе альгината натрия [<https://newsfinancialanalyst.com>]. Несмотря на это, в настоящее время по-прежнему одним из самых эффективных и широко применяемых во всем мире способов стабилизации и укрепления песчаных техногрунтов остается создание на их поверхности искусственных эрозиостойких покрытий из распыленных полимерных эмульсий на водной основе и сополимеров на основе винилацетата или акрила.

Проблеме подавления пылеуноса с отвалов отходов рудообогатения в Кировско-Апатитском районе уделяется огромное внимание. Природоохранной службой КФ АО «Апатит» постоянно ведется подбор и испытание наиболее эффективных связующих реагентов. Так, начиная с 2003 г. закрепление хвостов АНОФ-2 реализовывалось нанесением на их поверхность анионной битумной эмульсии (рис. 7).

В его основе — рабочий раствор товарной битумной эмульсии, имеющий достаточно широкий температурный интервал использования. В условиях Крайнего Севера данное связующее не теряет свои потребительские свойства при замораживании и обеспечивает закрепление пылящих поверхностей на протяжении 4–6 месяцев. Однако, как показала практика, из-за слабой адгезии битума к поверхности хвостов при неблагоприятных метеорологических условиях (скорость ветра ≥ 10 м/с) сформированная данным способом поверхностная пленка может разрушаться (рис. 8), также становясь источником мелкодисперсной пыли [Маслобоев и др., 2017].



Рис. 7. Закрепление дорожного полотна на хвостохранилище АНОФ-2 с помощью анионной битумной эмульсии. Фото Л. А. Ивановой



Рис. 8. Результат применения анионной битумной эмульсии для пылеподавления на резервном хвостохранилище АНОФ-2. Фото Л. А. Ивановой

Разработкой мероприятий по повышению эффективности пылеподавления и улучшению экологической обстановки в регионе активно занимаются и сотрудники ФИЦ КНЦ РАН. На территории хвостохранилища АНОФ-2 ими был испытан ряд новых, рекомендуемых как экологически безопасных (environmentally-friendly), полимерных связующих реагентов (лигносульфонат, Floset S44, Dustbind (NALCO), Alcotac DS1, PHX-1021), изучены их физико-механические свойства и устойчивость закрепления по отношению к агрессивным воздействиям, а также влияние поступающих в оборотную воду реагентов на технологические показатели флотации апатит-нефелиновой руды [Маслобоев и др., 2018; Горбачева и др., 2019]. В результате оптимальным связующим для промышленного применения был признан реагент Dustbind (NALCO). В настоящее время он успешно используется в КФ АО «Апатит» для пылеподавления на хвостохранилище АНОФ-2 вместо анионной битумной эмульсии [Маслобоев и др., 2017].

Недостатки применения физико-химических методов пылеподавления — неустойчивое состояние формируемых на долгосрочную перспективу покрытий и технически трудоемкий и энергоемкий, требующий повышенного расхода как воды, так и химреагентов технологический процесс создания. Более того, к физическо-химическим методам предъявляются повышенные требования: выбранные закрепители не должны быть токсичными, дорогостоящими и дефицитными. Желательно, чтобы они были биологически разлагаемыми, способными предотвращать ветровую эрозию при минимальном расходе, сохранять прочность закрепленной поверхности и после намокания быстро восстанавливать ее до первоначальной величины. Сама технология закрепления песков должна быть относительно простой и предусматривать полную механизацию работ [Михайлова, Хохряков, 1993; Немировский, 2016].

Биологический метод. В практике горнорудных предприятий РФ одним из способов закрепления пылящих поверхностей на обширных нарушенных территориях является отведение их части под самозарастание, основанное на процессах естественного самовосстановления природных экосистем. При превышении площади проективного покрытия участков самозарастания более чем на 50 % дополнительных мер для его стимулирования, как правило, не требуется. В противном случае прибегают к биологическому методу восстановления экологического состояния нарушенных земель (биорекультивации).

Согласно действующему ГОСТ Р 59060–2020 рекультивации подлежат нарушенные земли всех категорий — карьеров, выработок, складов, отвалов и т. п. Она выполняется по нескольким направлениям: сельскохозяйственное, лесохозяйственное, водохозяйственное, рекреационное, санитарно-гигиеническое (природоохранное) и строительное. Анализ существующей ситуации показывает, что в настоящее время для заполярных техногенно нарушенных ландшафтов наиболее приемлемыми направлениями рекультивации являются: природоохранное (укрепление откосов склонов от ветровой и водной эрозии, восстановление видовой разнообразия флоры, чистоты атмосферы и гидросферы) и санитарно-гигиеническое (консервация нарушенных земель, полноценная рекультивация которых нецелесообразна) направления [Архипов, Решетняк, 2017].

Биорекультивация обычно состоит из двух основных этапов — технического и биологического. На техническом этапе проводится корректировка ландшафта и нанесение плодородных пород или почв на поверхность рекультивируемого участка. Биологический этап включает проведение комплекса работ по возобновлению растительного покрова (рис. 9) [Капелькина, 2021].



а *б*

*Рис. 9. Пример биологической рекультивации хвостовых отвалов традиционным посевным способом с проведением выполаживания и нанесения на поверхность техногенного грунта слоя почвосмеси:
а — до начала проведения работ; б — результат после завершения.
Фото Л. А. Ивановой*

Биологические процессы, приводящие к развитию биогеоценоза, являются ведущими механизмами трансформации техногенных ландшафтов в естественные. Под воздействием растительности начинают протекать процессы, характерные для почвообразования, в частности, процесс накопления органического вещества не только на поверхности песков, но и в приповерхностном дерновом слое, густо заросшем травами и переплетенном их корнями, находящимися в симбиозе с почвенными микроорганизмами. Дерновый пласт способен удерживать влагу, хорошо аэрируется, а через некоторое время может привести к перемешиванию материала на технически рекультивированных поверхностях. Постепенно в нем начинает совершаться биологический круговорот веществ в системе субстрат — растение. В условиях Крайнего Севера задернение территории и опад являются признаками первичного почвообразовательного процесса, характерного для конкретных биоклиматических условий. Трансформация растительного опада, попадающего в дернину, приводит к увеличению содержания гумуса и формированию органогенного горизонта на рекультивируемой поверхности техногрунта и способствует повышению его плодородия [Никонов, 1985]. Поэтому на сегодняшний день биологический метод общепризнан лучшим способом закрепления пылящих техногрунтов [ГОСТ Р 57446-2017].

Техногрунты таких категорий нарушенных земель, как песчаные карьеры и отвалы апатит-нефелиновых хвостохранилищ, характеризуются отсутствием органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также пониженным содержанием полезных для растений питательных веществ и по этим причинам относятся к малопродуктивным угодиям. Поэтому при проведении рекультивационных работ на этих объектах определяющими факторами их успешности и эффективности являются поиск, разработка и быстрое использование малоэнергоёмких, упрощенных и природовосстановительных технологий, адаптированных к экологическим и экономическим особенностям региона, а также питательный режим их поверхностного слоя.

АДАПТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БИОРЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Апатит-нефелиновым хвостам, как и многим другим техногенным отвалам и карьерным выработкам, процессы естественного зарастания также свойственны [Капелькина и др., 2014], но в экстремальных природно-климатических условиях Заполярья они идут крайне медленно [Иванова и др., 2009]. Это обусловлено многими причинами, в том числе: случайностью заноса семян растений, способных произрастать в маргинальных условиях; невозможностью растений закрепиться на поверхности склонов из-за их крутизны, сильной выраженностью на поверхности холмов процессов смыва и размыва, с которыми связан вынос мелких частиц и диаспор растений поверхностными водами. На значительных массивах открытых пространств естественное восстановление растительного покрова еще в большей степени усугубляется ввиду часто повторяющихся переносов песка, препятствующего закреплению растительности на его поверхности [Капелькина, 2012].

На хвостохранилище АНОФ-2 процессы естественного зарастания и развития восстановительной сукцессии слабо выражены, характеризуются высокой разреженностью формирующихся группировок растений и небольшим по численности (21 вид) флористическим составом растений, адаптировавшихся к специфическим для них условиям произрастания. Участки из самостоятельно формирующихся группировок растений в основном сосредоточены у береговой линии искусственных и естественных водоемов. Там же, где наблюдается интенсивная ветровая эрозия или смыв верхнего слоя (ровная поверхность склонов, дороги), дикорастущая растительность вовсе отсутствует. Для большинства растений характерно поверхностное (до 5 см) залегание корневой системы, хрупкость и сильная изогнутость корней, вследствие чего их надземная биомасса слабо противостоит эрозионным процессам [Иванова и др., 2010] (рис. 10, 11), что требует проведения биорекультивационных мероприятий.



Рис. 10. Самозарастание территории резервного хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит». Фото Л. А. Ивановой



Рис. 11. Естественная группировка растений. Фото Л. А. Ивановой

Техногрунты таких категорий нарушенных земель, как песчаные карьеры и отвалы апатит-нефелиновых хвостохранилищ, характеризуются отсутствием органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также пониженным содержанием полезных для растений питательных веществ, и по этим причинам относятся к малопродуктивным угодиям. Поэтому при проведении рекультивационных работ на этих объектах одним из определяющих факторов успешности является питательный режим их поверхностного слоя.

Начиная с 1964 г. и по настоящее время Кольским филиалом АН СССР проводится активная наработка опыта по консервации апатит-нефелиновых хвостохранилищ КФ АО «Апатит». Валовой анализ техногрунта свидетельствовал о благоприятных предпосылках для выращивания растений, поэтому традиционное задержание тела этого хвостохранилища признавалось перспективным направлением не только для предотвращения его ветровой и водной эрозии, но и для создания продуктивных сельскохозяйственных угодий на отработанной территории [Переверзев, Подлесная, 1986]. Авторами были даны рекомендации по созданию устойчивого растительного покрова на нарушенных территориях в зависимости

от состава песков, характера рельефа, условий увлажнения грунта и предусматривалось обязательное проведение землевания путем нанесения плодородного слоя почвы либо потенциально плодородных пород. Последнее значительно осложняет проведение биорекультивационных работ в условиях Мурманской области, требует существенных материальных затрат, в частности, по причине отсутствия в регионе торфоразработок. Проблема еще более усугубляется дефицитом окультуренных и низким питательным статусом естественных почв, а также трудоемкостью и дороговизной мероприятий по повышению их плодородия [Экология..., 1994]. Данные обстоятельства зачастую имеют решающее значение при осуществлении восстановительных работ, требуют поиска нетрадиционных способов формирования растительного покрова на нарушенных землях.

В 2000-е гг. сотрудниками КНЦ РАН был разработан альтернативный подход к восстановлению нарушенных ландшафтов с помощью адаптированных к условиям Заполярья технологий ускоренного формирования растительного покрова [Иванова, 2009; Иванова и др., 2010; 2013]. В их основе лежит комплексное использование многолетних травянистых растений, в том числе присущих региону видов, в сочетании с одним из местных воздухо- и влагоемких субстратов-почвозаменителей (термовермикулитом, древесными опилками, корой, жмыхом хвои, водорослями и травой морских штормовых выбросов или сапропелем). Применение данных технологий для биорекультивации разных категорий техногенно нарушенных земель в Мурманской области, включая объекты со сложным рельефом, без проведения землевания и выполаживания участков способствовало ускорению восстановительной сукцессии и созданию на них высококачественного противэрозионного растительного покрова с мощной травяной дерниной (рис. 12–14) [Иванова и др., 2010, 2019; Ivanova et al., 2019].



а

б

Рис. 12. Биорекультивация пологого склона хвостоотвалов АНОФ-2 с помощью инновационного экспресс-способа — шевронного настила ковровой травяной дернины:

а — начало эксперимента (сентябрь 2006 г.); б — полное задернение экспериментального участка (август 2008 г.).

Фото Л. А. Ивановой



а

б

Рис. 13. Биорекультивация склонов на хвостоотвалах АНОФ-2 с помощью инновационного экспресс-способа — шахматного настила ковровой травяной дернины:

а — начало эксперимента (август 2014 г.); б — самораспространение и зарастание межфрагментарных оголенных пространств на склоне растительностью (август 2015 г.). Фото Л. А. Ивановой



а

б

Рис. 14. Внешний вид дернины одногодичного фитоценоза, сформированного с помощью экспресс-способа:

а — корневая система; б — керн.

Фото Л. А. Ивановой

УЛУЧШЕНИЕ БИОГЕННОСТИ МАЛОПРОДУКТИВНЫХ ПЕСЧАНЫХ ТЕХНОГРУНТОВ

Среди мелиоративных методов, направленных на повышение НПК-статуса малопродуктивных пылящих песчаных техногрунтов, ускорение процесса их зарастания и поддержание качества травостоя в искусственно создаваемых на них фитоценозах, широко используется внесение органических (навоз) и минеральных удобрений и мелиорантов, способствующих также удержанию влаги и развитию микробных сообществ, интенсифицирующих процессы почвообразования. Однако в настоящее время в РФ ощущается острый дефицит органических удобрений, обеспеченность навозом составляет не более 15 %. В среднем на поля вносится не менее 1,1–2,0 т этого удобрения на 1 га (в пересчете на подстилочный навоз). Несмотря на это, повсеместно отмечается отрицательный баланс по органическому веществу почвы [Мерзлая, 2005]. К тому же в навозе содержится недостаточное количество такого важного для питания растений макроэлемента, как фосфор, и некоторых других микроэлементов, что требует увеличения дополнительных затрат на приобретение и использование минеральных удобрений [Совещание..., 2017].

В Мурманской области, где существует такая проблема, как отсутствие животноводческих комплексов, с которых можно было бы собирать и вывозить навоз, актуален поиск альтернативных органических удобрений. В этой связи обращают на себя внимание отходы производства и потребления региональных водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ) — осветленные коммунальные стоки (ОКС) и осадок сточных вод (ОСВ). Это вещества, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с настоящим Федеральным законом [Закон № 89-ФЗ от 24.06.1998 г. с изменениями..., 1998]. Количество отходов производства и потребления ежегодно и неуклонно растет. Основной их объем в качестве отходов IV (большая часть после соответствующей обработки) или V классов опасности складывается на объектах размещения в городской черте или пригородной зоне,

представляя собой огромные залежи. За их размещение и негативное воздействие на окружающую среду организации ВКХ несут колоссальные транспортные расходы, осуществляют многомиллионные экологические платежи в бюджет.

Проблема накопления и переработки коммунальных отходов всегда была, есть и будет одной из самых серьезных и труднорешаемых для всех существующих в мире очистных сооружений. В этой связи формирование и стимулирование стабильного спроса на данное сырье и продукцию, проведение исследований, направленных на утилизацию и поиск путей их эффективного вторичного использования в народном хозяйстве, — крайне актуальные экологические проблемы как для России, так и для зарубежных стран [Данилович и др., 2015]. Их решение и получаемый при этом экономический эффект трудно поддаются оценке [Zema et al., 2012; Harder et al., 2017].

Отечественной и зарубежной наукой и практикой доказана целесообразность эффективного использования ОКС и ОСВ в качестве ценных удобрений, почвогрунтов и компостов для повышения биогенности малоплодородных грунтов [Капелькина, 2006]. Данный метод относят к нетрадиционной разновидности химической мелиорации [Лагутина и др., 2016; Сельмен, Ильинский, 2017; Виноградов и др., 2019]. Тем не менее, применение отходов ВКХ в отечественном растениеводстве не превышает 7 %, в то время как за рубежом оно достигает более 40 % [Совещание..., 2017].

Использование осветленных коммунальных стоков. Сточные воды удобрением обыватель считает, наверное, в последнюю очередь. Всё-таки в их составе может быть всё что угодно. Несмотря на это, применение должным образом обработанных сточных вод для выращивания растений с различной целевой направленностью (заготовка и переработка кормовых и технических культур, овощеводство, садоводство, озеленение) признано международной практикой эффективным и экономически целесообразным еще в прошлом столетии и рассматривается как метод повторного использования водных ресурсов и питательных веществ. Растущий интерес к ОКС обусловлен многокомпонентным составом стоков с соотношением макро- и микроэлементов, благоприятным для удобрительных поливов [Harder et al., 2017; Norton-Brandao et al., 2013].

Немаловажным фактором является и положительное влияние ОКС на повышение биологической активности почв/грунтов орошаемых территорий, связанное с высоким содержанием лабильных форм органического вещества [Chen et al., 2008], особенно микробного происхождения [Kunacheva, Stuckey, 2014].

Согласно оценке, приведенной в работе В. Jimenez и Т. Asano [2004], площадь сельскохозяйственных полей, орошаемых ОКС, достигает в мире 3,5 млн га. В последние годы существенно расширяется область их применения в горной промышленности, главным образом на месторождениях сульфидных руд [Kefeni et al., 2017; Smyntek et al., 2017; Tariiaa et al., 2019]. Это обусловлено высокой кислотонейтрализующей и комплексообразующей способностью стоков. Смешение с ними высокоагрессивных дренажных вод позволяет существенно снизить экологическую опасность побочных продуктов добычи и в местах разработки руд цветных металлов. Также предлагается внедрение технологий орошения хозяйственно-бытовыми стоками нарушенных территорий [Способ..., 1976; Красавцева и др., 2021]. При этом основным направлением признавалась активизация почвообразовательных процессов для эффективного задернения территорий, нарушенных золоотвалами и хвостохранилищами, однако широкого распространения в РФ такой способ не получил.

Использование осадка сточных вод. Большое внимание в мировой практике применения нетрадиционных удобрений привлекают осадки станций очистки хозяйственно-бытовых стоков [Капелькина и др., 2009; 2010]. Они являются широко распространенным видом твердых отходов, образующихся при очистке сточных вод перед их сбросом в водоёмы. Индустриальные методы их обработки сложны и энергоёмки. Наиболее распространенными способами обращения с этим видом коммунальных отходов являются сжигание и депонирование. Для использования их в качестве удобрений, столь необходимых сельскому хозяйству, обрабатываемые на иловых площадках ОСВ должны находиться там не менее трех лет и для полного их обеззараживания подвергаться соответствующей обработке.

В одной тонне сухого осадка сточных вод в среднем содержится 50–70 кг необходимых для растений питательных веществ. Из них 80 % приходится на легкодоступные для микробиоты органические и около

20 % на минеральные вещества [Аргунов и др., 2013]. Благодаря этому ОСВ могут служить дополнительным резервом для поддержания бездефицитного баланса гумуса в почве, оказывая положительное влияние на ее агрохимические показатели и продуктивность растений [Якимова, 2013; Chen et al., 2008].

Как и в случае с ОКС, в мировой и отечественной практике осуществлялись работы по использованию осадков сточных вод для реабилитации нарушенных территорий. В Мурманской области инициатором такого применения явился «Мончегорскводоканал», а в 2003 г. силами Мончлесхоза при финансовой поддержке Кольской горно-металлургической компании (дочернего предприятия ПАО ГМК «Норильский никель» в Мурманской области) и научном руководстве ИППЭС КНЦ РАН рекультивационные работы с применением ОСВ были выполнены в промышленных масштабах на техногенных пустошах вблизи г. Мончегорска. Экспертная оценка принятых мер подтвердила их эффективность и признала данный метод биорекультивации альтернативным традиционному [Копчик и др., 2015; Копчик и др., 2016].

ТРЕБОВАНИЯ К СВОЙСТВАМ И СОДЕРЖАНИЮ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ОТХОДАХ ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ХОЗЯЙСТВ

Источником коммунальных сточных вод и их осадков является город, в связи с чем они не имеют постоянного состава, могут содержать такие загрязнения, как разные металлсодержащие микрокомпоненты (тяжелые металлы, мышьяк), а также вирусы, сальмонеллы, яйца гельминтов, пестициды, бензопирены, фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества, нефтепродукты, а также аммоний, нитриты, нитраты, бром и другие химические вещества.

Известно, что в силу продолжающегося применения устаревших технологий на большинстве предприятиях ВКХ РФ средней мощности отсутствует стадия доочистки коммунальных стоков от азота и фосфора до уровня НДС (нормативов допустимых сбросов) [Приказ Министерства..., 2020]. Поэтому существует угроза их использования либо вообще без предварительной очистки, либо не полностью доведенных до установленных санитарно-гигиенических нормативов [Ahmed et al., 2017]. При отсутствии надлежащей обработки и экологически ненормированном применении отходы производства и потребления могут оказаться потенциальными источниками загрязнения почв, грунтовых вод и растениеводческой продукции [Чеботарев и др., 2016]. К тому же при попадании в водоприемники могут безвозвратно утратиться и все ценные компоненты, оставшиеся в них после недостаточной очистки [Kaushik et al., 2012; Терентьева и др., 2017].

Таким образом, существующая на сегодняшний день проблема утилизации и недостаточная изученность вопроса эффективного и безопасного использования отходов производства и потребления городских ВКХ не способствуют решению задач негативного влияния на окружающую природную среду и здоровье человека.

Во всем мире оценке риска применения коммунальных стоков в системах поверхностного и внутрипочвенного орошения и разработке агрономически эффективных и экологически безопасных технологий их утилизации уделяется пристальное внимание. В большинстве стран данная проблема экологической безопасности решается успешно

[Виноградов и др., 2019; Rana et al., 2011; Alikhasi et al., 2012; Ricart, Rico, 2019; Inyinbor et al., 2019].

В настоящее время в РФ разработан Типовой технологический регламент использования осадков сточных вод в качестве органического удобрения. По своему статусу Регламент является нормативным документом, уточняющим и дополняющим положения СанПиН 2.1.7.573-96–96 «Гигиенические требования ..., 1996 в соответствии с разработками последних лет, нашедшими отражение в проекте ГОСТ Р 17.4.3.07–2001 «Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений» [2000]. Согласно этим документам, экологически безопасное использование отходов ВКХ должно обеспечиваться контролем за содержанием в них нормируемых загрязнений, соблюдением определенных условий их обработки и применения в качестве удобрений и обязательно с учетом требований безопасности. Станции биологической очистки сточных вод на объектах ВКХ должны очищать воду, по качеству делая ее пригодной для сброса в местные акватории [Приказ комитета..., 2010] (табл. 2).

Таблица 2

Основные нормативы ПДК очищенной сточной воды, поступающей в водоем рыбохозяйственного назначения

Санитарно-гигиенический норматив	Показатель									
	рН	БПКл	ХПК	Взвешенные вещества	Азот аммонийный	Азот нитритов	Азот нитратный	Фосфор фосфатов	СПАВ	Нефтепродукты
ПДК, мг/л	6,0–9,0	3,0	30,0	6,42	0,39	0,04	9,02	0,15	0,5	0,05

Использованию подлежат осадки, прошедшие технологические стадии обработки на очистных сооружениях канализации в целях снижения массы, объема, влажности, улучшения физико-механических свойств, стабилизации органических веществ, снижения запаха, обеззараживания, придания благоприятного товарного вида. Кроме того, различные технологические схемы и методы обработки отходов, в том числе и их

дообработки после механического обезвоживания, предусмотрены Сводом правил СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85» [2012]. Многие из них включены в Информационно-технический справочник по НДТ ИТС 10–2015 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», утвержденный приказом Росстандарта от 15 декабря 2015 г. № 1580 [2015], включая наиболее эффективные в плане обеспечения гумификации органических веществ технологии, например, компостирование осадков с органическими наполнителями (торфом или с растительными остатками, опилками, корой или щепой, дождевыми червями), которые поглощают избыточные тяжёлые металлы, не давая им попасть в растения.

Недообработанные отходы, обладающие вязкой консистенцией, запахом, не вполне благоприятные в санитарном отношении, не подходят для использования, так как не соответствуют требованиям установленной нормативной документации и не могут быть внесены существующей сельскохозяйственной техникой.

ОТХОДЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ВОДОПРОВОДНО- КАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «АПАТИТЫВОДОКАНАЛ»

Проблема образования, накопления, хранения и экологически безопасного и экономически эффективного вторичного использования городских канализационных отходов производства и потребления является для России крайне острой. Она затрагивает практически все существующие предприятия ВКХ, в том числе региональное предприятие ВКХ АО «Апатитыводоканал» (Мурманская область) и требует экстренного решения, поскольку сброс его «проблемных» стоков производится в озеро Имандра — крупнейшее в регионе водохранилище, экосистема которого весьма уязвима к изменению трофического статуса [Герентьева и др., 2017]. Промедление в решении этих вопросов может стать для региона настоящим экологическим бедствием, в то время как местные почвы ждёт полное истощение и деградация. При правильном же научно обоснованном и экологически безопасном применении данное альтернативное удобрение может принести пользу.

Существующие городские очистные сооружения ВКХ АО «Апатитыводоканал» (рис. 15) построены по типовым проектам в 1970-х гг., предназначены для очистки всего объема поступающих сточных вод. Проектная производственная мощность канализационных очистных сооружений (КОС-3) данного предприятия составляет 47 000 м³ сточных вод в сутки, фактическая производительность (согласно письму № 2424/01 от 5 апреля 2018 г. АО «Апатитыводоканал») — 26 400 м³/сутки, ежегодно накапливается до 10–12 тысяч тонн канализационных отходов производства и потребления.

За последние несколько лет на некоторых узлах очистных сооружений АО «Апатитыводоканал» проведена частичная замена технологического оборудования. Так, традиционный метод обеззараживания очищенных сточных вод хлором заменен на ультрафиолетовое облучение. В перспективе планируется проведение реконструкции аэротенков с целью изменения схемы очистки сточных вод и постепенная замена остального существующего технологического оборудования.

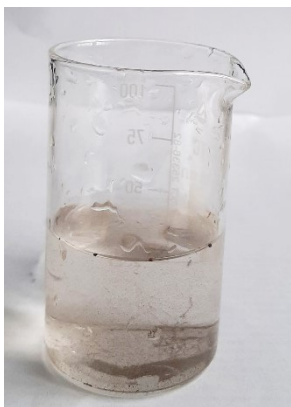


Рис. 15. Водопроводно-канализационное хозяйство АО «Апатитыводоканал»:
 а — осветление сточных вод на КОС-3 г. Апатиты;
 б — один из иловых накопителей ОСВ.
 Фото Л. А. Ивановой

Характеристика отходов регионального предприятия ВКХ АО «Апатитыводоканал». Отходами регионального предприятия ВКХ АО «Апатитыводоканал», представляющими интерес для использования в растениеводстве, являются осветленные коммунальные стоки и осадок сточных вод (рис. 16).

Осветлённые коммунальные стоки представляют собой прозрачную жидкость с резким специфическим запахом, отобранную после первичных отстойников на промежуточной стадии водоочистки. Затем очищенные сточные воды поступают в контактный резервуар для обеззараживания и далее по каналу на выпуск в реку Жемчужную, впадающую в озеро Имандра.

Состав ОКС относительно стабилен. По содержанию загрязняющих веществ они считаются средне загрязненными. Эффективность снижения показателей ОКС, поступающих на очистные сооружения, а также на сбросе в водоем составляет: БПКп (количество легкоокисляющихся органических загрязняющих веществ) — 98,46; ХПК — 94,4; взвешенные частицы — 97,0; азот общий — 98,8; азот нитратов — 24,0; фосфор — 40,8 %. Концентрация азота нитратов в сточной воде при прохождении механической и биологической очистки несколько увеличивается. Его концентрация в исходной воде составляет 0,19 мг/л, в очищенной — 42,04 мг/л.



а



б

Рис. 16. Внешний вид отходов регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал»:

а — жидкие ОКС; б — твердый ОСВ.

Фото Л. А. Ивановой

Осадок сточных вод — увлажненная сметанообразная масса коричнево-черного цвета со специфическим запахом. Основными способами его обработки на очистных сооружениях являются подсушка и выдержка на иловых накопителях в течение трех и более лет. Для этого на территории очистных сооружений имеются две иловые площадки (гидротехнические сооружения с герметичным дном) площадью примерно 1,8 га каждая. В настоящее время они переполнены ОСВ (см. рис. 15, б), нуждающимися в мероприятии по их обезвоживанию. Решение этой проблемы ограничено отсутствием на предприятии производственных площадей для дополнительного строительства.

Согласно испытаниям, проведенным специализированным предприятием ООО «Бифар-Экология», осадок сточных вод АО «Апатитыводоканал» относится к отходам V класса опасности и полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 54534–2011, предъявляемым к ОСВ при его использовании в качестве почвогрунтов для биологической или технической рекультивации [ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение..., 2011]. Валовое содержание тяжелых металлов в данных ОСВ значительно ниже установленных нормативов: Ni < 30 мг/кг,

Cu < 30 мг/кг, Pb < 30 мг/кг, Zn 186 мг/кг при нормативе 800 мг Ni/кг, 1500 мг Cu/кг, 1000 мг, Рb/кг, 7000 мг, Zn/кг.

О высокой продуктивности ОСВ, депонируемого АО «Апатитыводоканал» на иловых картах, также говорит и их активное самозарастание (рис. 17).



Рис. 17. Самозарастание иловых карт АО «Апатитыводоканал»: а — иван-чаем узколистным (*Chamaenerion angustifolium*); б — мать-и-мачехой обыкновенной (*Tussilago farfara*), бескильницей расставленной (*Puccinella distans*) и другими видами травянистых растений.

Фото Л. А. Ивановой

Территориально КОС-3 ВКХ АО «Апатитыводоканал» примыкают к хвостам АНОФ-2. Возможность их мелиорации отходами регионального ВКХ поднималась многократно. Бесспорно, что ее решение важно для обеих сторон, поможет обоим предприятиям и, самое главное, будет способствовать улучшению экологии в близлежащих городах Апатиты и Кировске.

МЕЛИОРАЦИЯ ПЕСЧАНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ВОДОКАНАЛИЗАЦИОННОГО ХОЗЯЙСТВА

В связи с неблагоприятным прогнозом естественного зарастания и сложностью восстановления растительного покрова на песчаных отложениях северных техногенно нарушенных ландшафтов, обусловленных индивидуальной и региональной спецификой, в 2018 г. сотрудниками ФИЦ КНЦ РАН были начаты исследования. Их целью была оценка эффективности и подтверждение пролонгированности действия химической мелиорации нефелиновых песков хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит» с помощью отходов местного муниципального предприятия ВКХ АО «Апатитыводоканал» — ОКС и ОСВ — для ускоренного создания высококачественного противоэрозионного фитоценоза.

Мелиорация техногрунта с использованием осветленных коммунальных стоков. С этой целью было проведено три лабораторных эксперимента с имитацией поверхностного орошения нефелинового песка, отобранного на объекте в виде усредненной пробы лежалых хвостов, осветленными стоками и их комбинацией с нефилтрованной дождевой водой. ОКС отбирались после первичных отстойников на промежуточной стадии водоочистки.

Первоначально *методом биотестирования* была проведена проверка ОКС на соответствие показателям СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения» в части оценки их токсичности в проращивании семян тимopheевки луговой (*Phleum pratense*). Данный злак является одним из основных высокопродуктивных компонентов в составе травосмесей, широко используемых для закрепления эродированных почв. Он относится к наиболее устойчивым видам трав, способным в условиях Крайнего Севера формировать высокий и густой травостой, образующим достаточное количество семян для его поддержания, отзывчивым на минеральные и органические удобрения [Наквасина и др., 2014].

Наблюдения показали, что стоки положительно влияют не только на проращивание семян, но и на дальнейший рост и развитие растений

в искусственно создаваемом фитоценозе. К концу эксперимента высота растительного покрова в опытном варианте по сравнению с контролем была в среднем на 2 см выше, а проективное покрытие — на 17–20 % больше (рис. 18).



*Рис. 18. Внешний вид сформированного фитоценоза:
а — опытный вариант (с использованием ОКС);
б — контрольный вариант (без использования ОКС).
Фото А. В. Лусис*

В отношении накопления надземной биомассы также были выявлены статистически значимые различия, что, наряду с выше обозначенной разницей в качественных показателях травостоя, свидетельствовало о стимулирующем эффекте ОКС на рост и развитие растений опытного варианта [Лусис и др., 2019].

Оценку пригодности ОКС для стимулирования самозарастания хвостохранилища АНОФ-2 проводили путем изучения химического состава стоков на содержание основных биогенных элементов (азота, фосфора, калия) и других показателей. Все они утверждены СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения для сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО)» [Гигиенические..., 1997].

Так, согласно нормативам СанПиН, удобрительная ценность стоков регионального предприятия ВКХ была низкой (N — 25,9 мг/л, P — 1,83 мг/л, K — 7,5 мг/л), поэтому они не могли быть признаны пригодными для удобрительных поливов на ЗПО, но для принятия стимулирующих мер на хвостохранилищах приемлемы (табл. 3).

Это также подтверждается сопоставлением отчетных данных местного предприятия ВКХ с составом питательных растворов, рекомендуемых, например, для гидропонного выращивания растений [Иванова, Котельников, 2006], а также обнадеживающими результатами предыдущего лабораторного опыта по биотестированию ОКС на тимофеевке луговой.

Таблица 3

Результаты оценки ОКС АО «Апатитыводоканал» на соответствие показателям СанПиН 2.1.7.573–96

Показатель	ОКС	Согласно СанПиН
Удобрительная ценность	N < 100 мг/л, P < 30 мг/л, K < 70 мг/л	Низкая
pH	7,21–7,85 (<i>n</i> = 39)	Соответствует для орошения кислых и щелочных почв
Содержание суммы легкорастворимых солей в прокаленном сухом остатке	85–204 мг/л (<i>n</i> = 39)	Характерна для слабо-минерализованных грунтов
Соотношение одно- и двухвалентных катионов Na:(Ca + Mg), мг-экв/л	1,3	Существенно ниже утвержденного СанПиН показателя (4) для песчаных некарбонатных почв, осолонцевание не актуально

Вариабельность химического состава ОКС оценивалась по ежегодным отчетным данным АО «Апатитыводоканал» за июнь 2005–2017 гг. Выбор периода для оценки обусловлен предположением, что орошение в начале вегетационного периода (июне) является наиболее рациональным для грунтов с промывным водным режимом из-за высокой доли пылевато-песчаной фракции, характерной для гранулометрического состава нефелиновых песков АНОФ-2 [Евдокимова и др., 2010].

Показатель такого важного для растений фактора, как pH ОКС, варьировал в пределах 7,21–7,85 (*n* = 39), что соответствует требованиям СанПиН для орошения и кислых, и щелочных почв ЗПО.

Содержание суммы легкорастворимых солей оценивалось по данным о прокаленном сухом остатке ОКС, пределы варьирования содержания остатка 85–204 мг/л (*n* = 39), что позволяет классифицировать стоки

как слабоминерализованные. В соответствии с требованиями СанПиН 2.1.7.573-96, солесодержание в оросительной воде не должно превышать 3 г/л для песчаных почв.

Соотношение одно- и двухвалентных катионов определялось по отношению нормальной концентрации натрия к сумме кальция и магния, выраженной в мг-экв/л. Величина отношения для ОКС варьирует в пределах 1,3, что существенно ниже утвержденного СанПиН показателя для песчаных некарбонатных почв, равного 4. Отсюда следует, что проблема осолонцевания грунта хвостохранилищ под действием ОКС не актуальна.

Таким образом, согласно результатам вышепроведенных оценок, было доказано, что ОКС ОА «Апатитыводоканал» по химическим показателям пригодны для стимулирования восстановительной сукцессии на апатитонефелиновом хвостохранилище.

Изучение возможности *химической мелиорации техногенного грунта хвостоотвалов с помощью ОКС* было начато с исследования его биогенности. Считается, что нефелиновые пески лишены органического вещества биогенного происхождения и связанного с ним азота [Евдокимова и др., 2010]. Однако в ходе химического анализа исходного грунта нами было определено низкое, но не нулевое среднее содержание в нем азота, а именно 9,77 мг/кг. Это можно объяснить остаточным содержанием в грунте азотсодержащих флотоагентов и возможной азотфиксацией в поверхностном слое лежалых грунтов. Установлено, что отходы рудообогатения, выходящие с предприятия АНОФ-2, содержат как сапротрофные бактерии, использующие азот органических соединений, так и бактерии, утилизирующие минеральный азот [Евдокимова и др., 2008]. В этой же работе отмечено возрастание численности микроорганизмов в самом технологическом процессе переработки руды, условия которого способствуют размножению бактерий. Сам техногенный грунт хвостохранилища также содержит микроорганизмы (бактерии, грибы), суммарная биомасса которых достигает в среднем 37 мг/кг в свеженамытых хвостах и 56 мг/кг в лежалых отходах. К тому же на хвостохранилище АНОФ-2 образуется поверхностная криптогамная корка, содержащая цианопрокариоты, являющиеся основными азотфиксаторами, повышающими азотный пул складированных песков [Шалыгина, Редькина, 2016].

Схема опыта по химической мелиорации техногрунта с помощью ОКС включала 3 варианта: 1 — контрольный, орошение дождевой водой на протяжении всего эксперимента; 2 — однократное орошение ОКС в начале эксперимента, затем только дождевой водой; 3 — орошение только ОКС в течение всего эксперимента. Наблюдения показали, что и без проведения химической мелиорации с применением ОКС (контрольный вариант) по окончании эксперимента отмечается высокий азотный пул техногенного грунта — остаточный уровень $N_{\text{общ}}$ в 11 раз превышает исходное содержание (табл. 4), что невозможно объяснить только привнесом соединений азота с дождевой водой. При вычислении массовых потоков N с учетом его изъятия зеленой биомассой выявлено, что вынос азота растениями существенно выше его поступления с ОКС, даже с учетом возможного содержания в них органических форм азота, не принимающихся во внимание в ходе производственного мониторинга состава стоков.

Таблица 4

Среднее остаточное содержание N, P, K в техногенном грунте
по окончании эксперимента

Показатель	$N_{\text{общ}}$, мг/кг			Доступный P, мг/кг			Доступный K, мг/кг		
	1*	2	3	1	2	3	1	2	3
Среднее	108,1	101,5	99,3	51,6	42,2	45,2	2130,2	2151,0	2417,6
% от валового содержания	—	—	—	0,98	0,80	0,86	5,13	5,18	5,83

* Здесь и далее номер соответствует номеру варианта опыта.

Следовательно, накопление азота в эксперименте связано не только с азотфиксирующей деятельностью микроорганизмов, присутствующих в грунте изначально и привнесенных с оросительной водой, в частности, в составе инокулированных взвесей. Вероятно, имеет место трансформация различных форм азота в пределах микробиологической пленки, формирующейся на нефелиновом субстрате, функционирующем, по сути, как медленный песчаный фильтр. Биогенная трансформация может как повысить, так и понизить остаточный уровень общего содержания азота. Многократное внесение легкодоступного органического вещества с ОКС в варианте 3 могло стимулировать

денитрификационную активность микробиоты песков, что способствовало удалению части азота из сферы реакции в молекулярной форме (N_2). Этим можно объяснить для варианта с многократным внесением ОКС самое низкое остаточное содержание общего азота в грунте при самом высоком поступлении в него соединений этого элемента (табл. 4). Так, например, в работе Kuypers et al. [2018] отмечено, что потеря азота в гидропонных системах, работающих на коммунальных стоках, за счет денитрификации признается одной из основных проблем, снижающих экономическую эффективность функционирования таких систем.

Высокое исходное валовое содержание калия и фосфора в нефелиновых песках обеспечило сохранение высокого уровня доступности для растений данных элементов питания и по окончании эксперимента (после изъятия зеленой биомассы) (табл. 4). Данные производственного мониторинга БПК₅ и ХПК коммунальных стоков (см. табл. 2), а также соотношение этих двух параметров свидетельствуют о высоком содержании в водах органического вещества, в частности, низкомолекулярных органических кислот. Эта фракция обладает высокой реакционной способностью, что способствует повышению подвижности/доступности калия и фосфора за счет их мобилизации из минеральных субстратов [Jones, 1998]. Однако если с увеличением привноса органического вещества возрастает и остаточное содержание калия в грунте, то относительно доступности фосфора картина иная: максимум остаточного содержания его доступных форм отмечен после орошения дождевой водой. Возможной причиной может являться побочные эффекты влияния ОКС на грунт, а именно: ассимиляция фосфора микробиотой, формирование труднорастворимых фосфатов Ca, Fe, Al за счет вытеснения указанных элементов из тонкодисперсной фракции песков, образование ассоциатов фосфат-ионов с органическим веществом, внесенным в составе ОКС. При этом следует отметить, что остаточное содержание доступных форм К и Р в техногрунте остаются величинами, сопоставимыми с их содержанием в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (табл. 5), что подтверждает пролонгированный эффект орошения на калий-фосфорный режим песков.

Таблица 5

Доступность К и Р в лимоннокислой вытяжке исходного грунта

Параметры	Валовое содержание, мг/кг [Masloboev et al., 2018]	0,01 М раствор лимонной кислоты	
		мг/кг	% извлечения
К	41500	1020	2,26
Р	5276	45,7	0,49

В ходе эксперимента отмечено активное накопление всех основных элементов питания (азота, фосфора, калия) в наземной части растений одновидового фитоценоза (табл. 6).

Таблица 6

Среднее валовое содержание N, P, K в наземной части *Phleum pratense*

Показатель	N _{общ} , мг/кг			P _{общ} , мг/кг			K _{общ} , мг/кг		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Среднее	23094	27980	30875	4048	4253	4774	26953	28488	32061
КПБ	—	—	—	0,77	0,81	0,90	0,65	0,69	0,77

Примечание. Коэффициент биологического поглощения (КПБ) — отношение содержания элемента в наземной части растений к его валовому содержанию в исходном грунте; для азота данный параметр не определяется.

Высокая обеспеченность посевной культуры указанными элементами выявлена и в контрольном варианте (с орошением дождевой водой). При этом коэффициент биологического поглощения всех элементов возрастал с увеличением количества внесенного ОКС, но линейной зависимости не наблюдалось. Такой быстрый отклик растений на оросительные поливы даже в условиях контрольного опыта нельзя объяснить возможным усилением микробиологической активности при благоприятных условиях проведения эксперимента. Высокая влажность грунта, оптимальные температура и освещенность, хорошая аэрация, поступление важных элементов питания (К, Р, Са, Mg, аммонийного и нитратного азота) с дождевой водой создают такие условия. Согласно данным государственного мониторинга [Семенец и др. 2017], средневзвешенный химический состав осадков, выпадающих в регионе, следующий, мг/л: калий — 0,6; ион аммония — 0,2; нитрат-ион — 0,9; кальций — 1,2; магний — 0,3.

Весьма важным фактором роста доступности К и Р может являться относительно высокая кислотность (низкие значения рН) атмосферных выпадений в виде дождя, что является характерной особенностью даже условно фоновых территорий крайнего Северо-Запада РФ [Першина и др., 2008].

По уровню накопления калия в сухой массе тимофеевки луговой, достигнутого в данной работе в опытах с применением ОКС, можно говорить о его соответствии вариантам с торфованием нефелиновых песков и выращиванием злаков на окультуренных подзолистых почвах региона [Переверзев, Подлесная, 1986]. Многократное орошение грунта дождевой водой обеспечило накопление фосфора в надземной фитомассе свыше 4000 мг/кг. Это превысило среднее содержание элемента в сухой массе тимофеевки луговой, выращенной на нефелиновых песках АНОФ-1 (2400 мг/кг в контроле, 2500 мг/кг при торфовании), а также предел 3300 мг/кг, достигнутый на окультуренных подзолистых почвах региона [Переверзев, Подлесная, 1986]. Орошение песков ОКС в максимально достигнутой норме 380 т/га способствовало повышению уровня содержания фосфора в сухой массе тимофеевки луговой до 4800 мг/кг. Содержание фосфора в растениях во всех вариантах опыта соответствует оптимальным значениям для злаковых растений [Haneklaus, Schnug, 2016].

Содержание общего азота в наземной части тимофеевки луговой в контрольном варианте данного эксперимента совпадает с результатами полевых экспериментов ее выращивания на хвостохранилище АНОФ-1 без принятия каких-либо мелиоративных мер [Переверзев, Подлесная, 1986]. В свою очередь, даже при однократном орошении нефелиновых песков коммунальными стоками накопление азота в растениях достигает уровня, отмеченного для данной культуры в международной практике повышения питательной ценности кормов за счет применения высоких доз минеральных удобрений, в том числе комплексных (НРК) [Bednarek et al., 2015]. В варианте с многократным внесением ОКС (суммарно 380 т/га) получены результаты накопления азота в сухой массе тимофеевки луговой, соизмеримые с результатами листовой диагностики в полевых опытах на нефелиновых песках при внесении 100 т/га навоза как традиционного мелиоранта [Переверзев, Подлесная, 1986].

Таким образом, была показана принципиальная возможность формирования искусственного фитоценоза на хвостохранилище апатитонепелинового производства без землевания с применением нетрадиционного мелиоранта ОКС АО «Апатитыводоканал».

Оценка ОКС АО «Апатитыводоканал» на соответствие показателям СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения кислых и щелочных почв ЗПО» [СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические...», 1996] (рН, содержание суммы легкорастворимых солей в прокаленном сухом остатке стоков и величина отношения одно- и двухвалентных катионов для ОКС) позволила классифицировать стоки как слабоминерализованные, соответствующие требованиям СанПиН, для которых проблема осолонцевания грунта хвостохранилищ под действием ОКС не актуальна.

Орошение ОКС песчаного апатитонепелинового субстрата положительно влияет на прорастание семян тимофеевки луговой и дальнейший рост и развитие растений в искусственно создаваемом фитоценозе, что свидетельствует о стимулирующем процессе самозарастания поверхности хвостохранилища эффекте ОКС.

В условиях лабораторного эксперимента с имитацией поверхностного орошения грунта подтвержден стимулирующий эффект применения нетрадиционных мелиорантов (нефильтрованной дождевой воды, ОКС и их комбинации) на питательный режим рекультивируемых нефелиновых песков.

Коэффициент биологического поглощения N, P, K надземной биомассой одновидового (*Phleum pratense*) сеянного фитоценоза при поверхностном орошении во всех вариантах соответствует оптимальным уровням накопления, определенных для злаковых растений в вариантах с торфованием и внесением комплексных минеральных удобрений.

Химическая мелиорации техногрунта с использованием ОСВ.

Схема данного опыта включала 2 варианта: (1) — опытный, однократное 8-фрагментарное нанесение ОСВ в начале эксперимента, затем периодическое орошение дождевой водой; (2) — контрольный, без применения ОСВ, только орошение дождевой водой на протяжении всего эксперимента. Анализ полученных данных показал, что ОСВ,

однократно примененный в эксперименте, и после изъятия растительной биомассы способствовал сохранению остаточного содержания азота в техногенном грунте, в 12,7 раз превышающего исходное (9,7 мг/кг) (табл. 7). В опытном варианте это может быть связано с внесением легкодоступного органического вещества и связанных с ним аммонийных форм азота с ОСВ. Содержание $N_{\text{общ}}$ в исходном ОСВ составляет 1918 мг/кг.

Таблица 7

Среднее остаточное содержание N, P, K в техногенном грунте
по окончании эксперимента

Вариант	Содержание биогенных элементов, мг/кг		
	$N_{\text{общий}}$	$P_{\text{доступный}}$	$K_{\text{доступный}}$
ОСВ + дождевая вода	122,8	45,4	2266,9
Контроль	108,1	51,6	2130,2

Следует сказать, что и в контрольном варианте отмечено высокое остаточное содержание азота, в 11 раз превышающее исходное. Такое увеличение может быть связано с азотфиксирующей деятельностью микроорганизмов, изначально присутствующих в грунте, а также привнесенных с оросительной водой в составе инокулированных взвесей, поскольку в опыте применялась дождевая вода без предварительной фильтрации.

Высокое валовое содержание в исходном техногенном грунте фосфора, обусловленное наличием апатита (2,9 %), не полностью извлеченного из руды при ее обогащении [Переверзев, Подлесная, 1986], а также калия [Маслобоев и др., 2018] обеспечило высокий уровень их доступности для питания растений в эксперименте (см. табл. 7). Однако если с внесением ОСВ, содержащего 3792,2 мг/кг калия в доступной для растений форме, возросло и остаточное содержание калия в грунте, то относительно доступности фосфора картина была иной. Максимум остаточного содержания его доступных форм был отмечен в контрольном варианте. Возможными причинами могут являться более интенсивный вынос фосфора с биомассой в опытном варианте, ассимиляция фосфора микробиотой, формирование труднорастворимых фосфатов Ca, Fe, Al за счет вытеснения указанных элементов из тонкодисперсной фракции песков, а также образование

ассоциатов фосфат-ионов с гумифицированным органическим веществом, входящим в состав ОСВ. Следует упомянуть, что содержание доступных форм Р в примененном мелиоранте невелико (146 мг/кг) и не может играть существенной роли при формировании фитоценоза, когда валовое содержание фосфора в самом грунте составляет 5276 мг/кг.

Появление первых всходов в эксперименте было зафиксировано в обоих вариантах одновременно — на 4-й день после посева семян. Самые дружные всходы отмечены при использовании ОСВ, что позволяет предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на прорастание семян тимофеевки луговой.

Высокое валовое содержание в исходном техногенном грунте фосфора и калия, а также доступных для растений форм азота в ОСВ оказало положительное влияние на рост растений. В начале эксперимента наблюдалась слабая вариабельность высоты растений. Однако при дальнейшем ходе опыта отмечено опережение роста растений в случае применения мелиоранта по сравнению с контролем, что может быть связано с постепенным вымыванием из ОСВ лабильных форм элементов питания. К завершению опыта средняя высота опытных растений составила 9,5 см, тогда как в контроле она была на 0,5 см ниже.

Из-за краткосрочности опыта максимально достигнутое проективное покрытие в эксперименте не превысило 65 %. При этом было отмечено снижение этого показателя при фрагментарном размещении ОСВ на техногенном грунте по сравнению с контролем (55 %). Вероятно, это было связано с формированием корки на центральных точках размещения ОСВ, что и оказало некоторое ингибирующее действие осадка на молодые проростки. Тем не менее, внесение ОСВ стимулировало статистически значимый прирост зеленой биомассы по сравнению с контрольным вариантом (1,5 г против 1,2 г).

Результаты листовой диагностики показали активное накопление всех основных элементов питания (азота, фосфора, калия) в наземной части растений одновидового фитоценоза в обоих вариантах (табл. 8). Такую реакцию растений даже в условиях контрольного варианта можно объяснить возможным усилением микробиологической активности при благоприятных условиях проведения эксперимента (высокая влажность грунта, оптимальные температура и освещенность, хорошая аэрация, поступление важных элементов питания (К, Р, Са, Mg,

аммонийного и нитратного азота) с дождевой водой). Согласно данным государственного мониторинга [Семенец и др., 2017], средневзвешенный химический состав осадков, выпадающих в регионе, содержит: калий — 0,6 мг/л, ион аммония — 0,2 мг/л, нитрат-ион — 0,9 мг/л, кальций — 1,2 мг/л, магний — 0,3 мг/л.

Таблица 8

Средние значения валового содержания N, P, K
в наземной части *Phleum pratense*

Вариант	Содержание питательных элементов, мг/кг		
	Nобщий	Pобщий	Kобщий
ОСВ + дождевая вода	29647	3773	25599
Контроль	23094	4048	26953

По уровню накопления калия в сухой массе опытных растений в обоих вариантах можно говорить о его соответствии вариантам с торфованием нефелиновых песков и выращиванием злаков на окультуренных подзолистых почвах в регионе [Переверзев, Подлесная, 1986]. Однократное внесение ОСВ обеспечило накопление фосфора в надземной фитомассе свыше 3000 мг/кг — таково среднее содержание элемента в сухой массе тимофеевки луговой, выращенной на нефелиновых песках АНОФ-1, и даже превышение предела 3300 мг/кг, достигнутого на окультуренных подзолистых почвах Мурманской области. Содержание фосфора в растении в обоих вариантах проведенного опыта соответствовало оптимальным значениям для злаковых растений, установленных в [Haneklaus, Schnug, 2016].

Содержание общего азота в наземной части тимофеевки луговой в контрольном варианте данной работы совпадает с результатами полевых экспериментов ее выращивания на хвостохранилище АНОФ-1 без принятия каких-либо мелиоративных мер [Переверзев, Подлесная, 1986]. В свою очередь, даже при однократном внесении ОСВ накопление азота в тимофеевке луговой достигает уровня, отмеченного для данной культуры в международной практике повышения питательной ценности кормов за счет применения высоких доз минеральных удобрений, в том числе комплексных (NPK) [Bednarek et al., 2014]. Полученные результаты валового содержания

азота в биомассе соизмеримы и с результатами листовой диагностики в полевых опытах на нефелиновых песках при внесении 100 т/га навоза как традиционного мелиоранта [Переверзев, Подлесная, 1986].

В результате исследований в условиях лабораторного эксперимента с имитацией однократного фрагментарного поверхностного нанесения мелиоранта на техногенный грунт подтверждены стимулирующий эффект ОСВ на питательный режим нефелиновых песков и возможность создания устойчивого растительного покрова из тимфеевки луговой при их рекультивации.

Накопление N, P и K надземной биомассой одновидового (*Phleum pratense*) сеянного фитоценоза при поверхностном нанесении ОСВ соответствует уровням накопления, определенным для злаковых растений в вариантах с торфованием, внесением навоза или комплексных минеральных удобрений в условиях длительных полевых опытов с грунтом близкого минерального состава (хвостах АНОФ-1).

Высокое остаточное содержание N, P и K после изъятия зеленой биомассы свидетельствует о пролонгированном действии ОСВ.

По причине промывного водного режима нефелиновых песков эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента для признания предлагаемого метода альтернативой традиционным методам рекультивации техногрунтов.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ПЕСЧАНОМ КАРЬЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД

В период с 2017 по 2020 г. были проведены многолетние полевые исследования по оценке возможности применения ОСВ регионального предприятия ВКХ для ускоренного формирования устойчивого противоэрозионного растительного покрова на песчаном карьере АО «Апатитыводоканал».

Исследование карьера показало, что песчаный грунт практически лишен позитивных качеств — по крупности зерна он относится к среднеразмерной разновидностям [ГОСТ 25100-2011], включает примесь гравия, небольшие валуны, содержит незначительную долю глинистых частиц и зачатков растений, что определяет его неустойчивость по отношению к ветровой эрозии, о чем свидетельствует округлость вершин холмов и сильное сползание грунта на склонах карьера.

В качестве модельного участка для проведения исследований был выбран песчаный склон (уклон 30 °) северо-западной экспозиции площадью 200 м², на котором предварительно нами было проведено выполаживание, террасирование и планировка поверхности [ГОСТ 17.5.3.04-83 (СТ СЭВ 5302-85) ..., 1984].

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 [McGill, 2010].

Схема мелкоделяночного полевого опыта включала 3 варианта (табл. 9). Нанесение ОСВ на поверхность грунта в опытных вариантах производилось двумя способами: фрагментарно (рис. 19, 20) и сплошным слоем, в контроле ОСВ не вносили. Покрытие песчаной поверхности плодородным слоем почвы и дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе эксперимента не проводились.

Таблица 9

Схема полевого опыта

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



Рис. 19. По периметру участка были сформированы 18 делянок, каждая площадью 1 м². Фото Л. А. Ивановой

Сложный посевной фитоценоз формировался с помощью подзимнего способа прямого посева травосмеси (рис. 21), разработанной нами на основании биологических характеристик видов многолетних травянистых растений. Она включала 3 вида злаков — овсяницу красную (*Festuca rubra*), волоснец песчаный (*Leymus arenarius*), пырей ползучий (*Elymus repens*) — и 2 вида бобовых растений — люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus*), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum*), 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 10-сантиметрового слоя ОСВ. Отдельно от травосмеси в нижний правый угол каждой делянки высевали по 6 штук семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*).



Рис. 20. Фрагментарное нанесение слоя из ОСВ на опытных делянках.
Фото Л. А. Ивановой



Рис. 21. Прямой посев травосмеси непосредственно на поверхность грунта. Фото Л. А. Ивановой

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. 10), что позволило предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на процесс прорастания семян.

Таблица 10

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

Показатель	2018 г.			2019 г.		
	Вариант и способ нанесения ОСВ					
	1*	2**	3 (К)	1*	2**	3 (К)
Количество ярусов, шт.	1	1	1	2	2	1
Средняя высота растений (по виду-доминанту), см	27,4	35,3	8,1	56,9	69,7	12,8
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.

Примечание. К — контроль.

В течение последующих 1,5 месяцев на экспериментальных площадках сформировались примитивные (одноярусные) растительные сообщества (см. табл. 10), 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 (см. табл. 10) за счет вселения с близлежащих территорий трех новых видов. Это аборигенные пионерные и сорные растения — мать-и-мачеха (*Tussilago farfara*), иван-чай узколистный (*Epilobium angustifolium*) и щавель малый (*Rumex acetosella*).

В 2019 г. на контрольных площадках травостой по-прежнему оставался низким, разреженным (проективное покрытие составляло всего 20 %), а образовавшееся сообщество осталось одноярусным (см. табл. 10, рис. 22). Опытные делянки отличались плотным травостоем сложного двуярусного строения, высотой, в 4–5 раз превышающей растения в контроле.

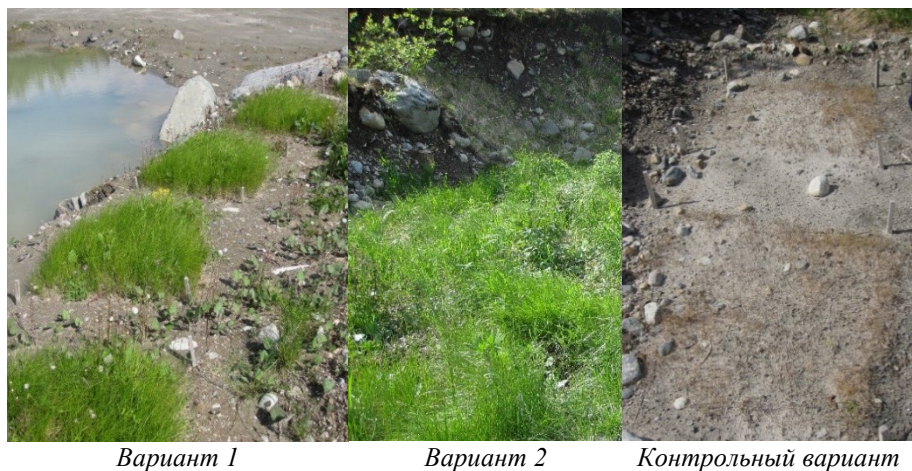


Рис. 22. Внешний вид опытных делянок в 2019 г. Фото Л. А. Ивановой

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 четыре вида из основной посевной травосмеси — волоснец песчаный (*Leymus arenarius*), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus*), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum*) и сосна обыкновенная, продолжилось заселение опытных делянок, а также их периметра шестью новыми видами

аборигенных растений — астрагалом субарктическим (*Astragalus norvegicus*), щучкой дернистой (*Deschampsia caespitosa*), жерушником болотным (*Rorippa palustris*), кульбабой осенней (*Scorzoneroidea autumnalis*), полевицей тонкой (*Agrostis capillaris*), кисличником двупестичным (*Oxyria digyna*). 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 [Скворцов, 2000], данный вид зафиксирован только на опытных делянках, где присутствовал ОСВ.

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 определяющие их высоту вида — овсяница красная и пырей ползучий. У растений опытных вариантов она достигла 95,2 (вариант 2) и 86,7 (вариант 1) см, в контроле данный показатель был в 6 раз меньше. 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 %-е 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 (вариант 1) и 9,6 (вариант 2) см. В контроле этот показатель был меньше в 1,4 и 3,7 раза соответственно. Высокое проективное покрытие и плотность травостоя в вариантах с применением ОСВ обусловили и существенное для Северо-Запада РФ накопление биомассы [Вихман и др., 2006]. В опытном варианте 1 она составила 2952 г/м², в варианте 2 — 5632,0 г/м² (в пересчете 29 и 56,3 т/га), что в 29 и 56 раз превысило данный показатель в контроле (всего 100,7 г/м²) (1 т/га). Сформированный на опытных делянках плотный травостой имел

сложное (дву- и трехярусное) строение, в контроле он по-прежнему оставался примитивным, разреженным, одноярусным. В течение третьего вегетационного периода видовой состав созданных растительных сообществ пополнился еще двумя новыми видами аборигенных растений — ивой филиколистной (*Salix phlylicifolia*), мятликом луговым (*Poa pratensis*), наблюдалось быстрое зарастание оголенных межделяночных участков и периметра площадок пионерными растениями, способствующее 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 [Третьякова, 2001].

Таким образом, в многолетних полевых исследованиях была сделана попытка разработки практических основ метода биорекультивации пескогрунтов без торфо- и землевания, дополнительного использования минеральных и органических удобрений. Рекомендуемый способ основан на натуральных наблюдениях экспериментального удобрения техногенного грунта песчаного карьера продуктом переработки региональных коммунальных сточных вод — ОСВ — с подтверждением стимулирующего эффекта их использования на прорастание 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 наноситься на техногрунт как сплошным слоем, так и фрагментарным — от 2 до 10 см, а подзимний посев семян производится непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ) или поверх осадка. Количество мелиоранта существенно

влияет на формирование более качественных искусственных посевных фитоценозов. Фрагментарное нанесение ОСВ на поверхность грунта слоем 2–3 см способствует увеличению высоты растений в создаваемом фитоценозе в 6,3, плотности травостоя в 1,7, биомассы в 29,3, проективного покрытия в 10 раз, а также мощности дернины в 1,4 раза по сравнению с контролем (вариант без внесения ОСВ).

При нанесении осадка сплошным слоем 5–10 см данные показатели в сравнении с контролем еще более возрастают: высота растений в 6,9, плотность травостоя в 4,4, биомасса в 55,9, мощность дернины в 3,7 раза.

Независимо от количества и 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.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СПОСОБА ФИТОРЕКУЛЬТИВАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ХОЗЯЙСТВ

В рамках представленных в книге исследований были подготовлены расчеты затрат на выполнение этапов создания посевного фитоценоза на песчаных техногенных грунтах (табл. 11). В целях уточнения перечня технологических операций, видов и стоимости работ были использованы: Прайс-лист на работы по озеленению и благоустройству территорий [<https://www.rolllawn.ru/rulonnyj-gazon-cena-za-m2.html>] и Технологический регламент 108-Р от 11.05.2017 г. по производству работ и содержанию территорий зеленых насаждений [2017].

Таблица 11

Стоимость выполнения этапов создания
посевного фитоценоза на песчаных техногенных грунтах

Услуга	Стоимость, руб/м ²		
	традиционным способом с землеванием	нетрадиционным с применением мелиоранта ОКС без землевания	нетрадиционным с применением мелиоранта ОСВ без землевания
1	2	3	4
Грунт растительный, слой 10 см	110	—	—
Семена (40–50 гр/м ²)	40	40	40
Минеральные удобрения	20	—	—
<i>Итого материалы</i>	170	40	40
Культивация, планирование и выравнивание существующего грунта планировщиком (трактором AVANT)	80	—	—

1	2	3	4
Разнос и планировка привозного плодородного грунта (слой 10 см) с уплотнением и выравниванием	100	—	—
Посев семян с заделкой граблями и прикатыванием	30	30	-
Посев семян без заделки граблями и прикатывания (под слой ОСВ или поверх влажного осадка)	—	—	10
Полив водой — 1 раз	20	—	—
Орошение ОКС методом дождевания	—	20	—
Нанесение жидкого ОСВ — 1 раз	—	—	20
Работа без материалов	230	50	30
<i>Итого</i>	400 руб/м ²	90 руб/м ²	70 руб/м ²
	4,0 млн руб/га	0,9 млн руб/га	0,7 млн руб/га

Расчет затрат на создание 1 м² посевного фитоценоза на техногенном грунте хвостохранилища показал, что себестоимость данной технологии во многом зависит от метода его создания и стоимости материалов. Так, в себестоимости технологии стоимость материалов при традиционном способе (с землеванием) с учетом всех эксплуатационных затрат (выравнивание поверхности грунта, семена и минеральные удобрения) составляет 42,2 %, при нетрадиционном способе (с внесением мелиорантов и без землевания), при котором затраты включают только стоимость семян, в случае использования ОКС — 44,4 % от их суммарной стоимости.

Основным ценообразующим фактором при традиционном способе создания посевного ценоза являются затраты на такие виды работ, как: выравнивание поверхности техногенного грунта, разнос, транспортировку, планировку и нанесение привозного плодородного грунта, формирование его 10-сантиметрового слоя, уплотнение и выравнивание, применение минеральных удобрений, посев семян

с заделкой граблями и прикатыванием, составляющие 57,8 % от их суммарной стоимости. При нетрадиционном способе с внесением мелиорантов и без землевания в случае использования ОКС, включающем только посев семян с заделкой граблями и прикатыванием, орошение грунта ОКС методом дождевания — 55,6 % от их суммарной стоимости (рис. 23).

Способ создания

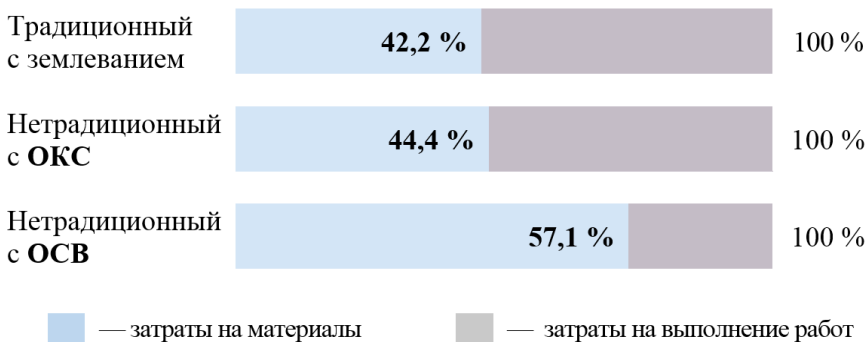


Рис. 23. Структура затрат на осуществление этапов создания посевного фитоценоза разными способами на техногенном грунте хвостохранилища

Необходимо подчеркнуть, что в случае использования мелиоранта ОСВ основным ценообразующим фактором являются затраты на приобретение семян, которые составляют 57,1 % от их суммарной стоимости. Затраты на работы без стоимости материалов, включающие посев семян без заделки граблями и прикатывания и нанесение самого мелиоранта (под слой ОСВ или поверх влажного осадка), составляют 42,9 % от их суммарной стоимости.

Согласно представленным расчетам итоговой стоимости, создание посевного фитоценоза на песчаных техногенных грунтах по предлагаемой технологии без землевания экономически более эффективно: при использовании ОКС в 4,4 раза, ОСВ — в 5,7 раза, а традиционным способом сопоставимо со стоимостью озеленительных работ на пустошах с применением привозного торфа, проводимых Мончегорским лесхозом (Мурманская область, РФ) (3,6 млн руб/га) (см. рис. 23), а также

со стоимостью проведения аналогичных работ в более благоприятных климатических и геохимических условиях.

Таким образом, предлагаемый метод создания посевного фитоценоза на техногенном грунте хвостохранилища на основе применения нетрадиционных мелиорантов местного предприятия ВКХ АО «Апатитыводоканал» — ОКС и ОСВ — экономически более эффективен по сравнению с традиционным, предполагающим проведение работ по землеванию, так как он не требует существенных капитальных вложений. Его достоинствами являются низкие эксплуатационные расходы и затраты на проведение работ.

Для дальнейшего повышения эффективности данного метода создания посевных фитоценозов и поддержания их устойчивости необходимо придерживаться разработанных направлений в его развитии, а именно: более широкого применения дешевых нетрадиционных мелиорантов, повышающих биогенность (NPK-статус) техногенного грунта, обогащения ассортиментов растений новыми, относительно толерантными к техногенному грунту видами, произрастающими в Мурманской области, проведения лабораторных и полевых исследований, направленных на определение оптимальных способов и доз внесения ОКС и ОСВ. При условии доработки технология, разработанная применительно к отходам апатитонепелинового производства, может быть использована в аналогичных производствах всей АЗРФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе на базе выполненных теоретических обобщений, комплекса лабораторных, натуральных и аналитических исследований получено новое решение актуальной научной проблемы предотвращения пылеобразования с песчаных поверхностей техногенных массивов отходов обогащения апатит-нефелиновых руд и карьерных выработок.

Одной из мер стимулирования восстановительных процессов, ускоренного создания и поддержания устойчивости противоэрозионного фитоценоза на техногенных песчаных субстратах северных нарушенных ландшафтов могут быть продукты производства и потребления регионального водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитводоканал» — осветленные коммунальные стоки (ОКС) и осадок сточных вод (ОСВ), которые отличаются высоким содержанием органического вещества, легкодоступного для микробиоты, а также лабильностью азота, фосфора и калия, обуславливающей их ассимиляцию растениями.

В результате проведенных исследований была показана принципиальная возможность ускоренного формирования искусственного посевного фитоценоза на техногенных грунтах хвостохранилища апатитнефелинового производства и песчаного карьера в условиях Крайнего Севера с использованием в качестве нетрадиционных мелиорантов ОКС и ОСВ регионального предприятия АО «Апатитводоканал» без проведения землевания и нанесения защитных полимерных реагентов.

Установлено, что осветленные коммунальные стоки местного предприятия по химическим показателям (рН, содержанию суммы легкорастворимых солей в прокаленном и сухом остатках стоков, величине отношения одно- и двухвалентных катионов для ОКС) классифицируются как слабоминерализованные и соответствующие требованиям СанПиН. Под их действием проблема осолонцевания грунта хвостохранилищ не актуальна, однако они могут положительно влиять на прорастание семян, рост и развитие растений в искусственно создаваемом фитоценозе, что свидетельствует о стимулирующем процесс самозарастания песчаных поверхностей нарушенных ландшафтов эффекте ОКС.

Осадок сточных вод АО «Апатитыводоканал» по содержанию в нем основных биогенных элементов (азота, фосфора, калия) также пригоден для стимулирования самозарастания хвостохранилища даже при его однократном и фрагментарном поверхностном нанесении на техногенный грунт.

Подтверждена пролонгированность действия химической мелиорации нефелиновых песков с применением ОКС и ОСВ для повышения биогенности (НРК-статуса) техногрунта хвостохранилища АНОФ-2 при создании растительного покрова как способа его консервации.

Использование обоих видов нетрадиционных мелиорантов способствует интенсивному росту растений и улучшению качества посевных фитоценозов, но зависит от количества и способа их применения.

Орошение нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками при соблюдении условий многократного равномерного распределения поливочной воды по площади имеет пролонгированный эффект на питательный режим грунта и достаточно для создания устойчивого растительного покрова на отходах рудообогачения без землевания. Однако по причине промывного водного режима песчаных нефелиновых песков эффект от применения ОКС, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента для признания предлагаемого метода альтернативой традиционным методам биорекультивации техногрунтов.

Способ сплошного нанесения на техногенный грунт ОСВ в отличие от одноразового фрагментарного его применения способствует формированию более качественного противоэрозионного фитоценоза.

Мелиорант ОСВ можно использовать как перед посевом семян нанесением исключительно вроссыпь на поверхность техногенного грунта, так и поверх произведенных посевов слоем от 2 и более см.

Предлагаемый в работе метод создания посевного фитоценоза на техногенно нарушенных территориях на основе использования мелиорантов ОКС и ОСВ местного предприятия ВКХ АО «Апатитыводоканал» экономически более эффективен по сравнению с традиционным (с землеванием) при использовании ОКС в 4,4 раза, ОСВ — в 5,7 раза, так как он не требует существенных капитальных вложений. Его достоинствами являются более низкие эксплуатационные расходы и затраты на проведение работ.

Значение полученных результатов для практики заключается в том, что на основании выполненных исследований в природоохранных целях предложен новый, экономически более эффективный и экологически безопасный, по сравнению с традиционным, способ создания высококачественных реабилитационных фитоценозов.

Основанный на использовании широкодоступных и дешевых, являющихся к тому же дополнительными источниками питательных веществ, влагоемких мелиорантов в виде продукта переработки региональных коммунальных сточных вод ОКС и ОСВ, он может сыграть положительную роль в решении проблемы низкой продуктивности песчаных техногрунтов и снижения пылеподавления. Предлагаемые в работе меры будут способствовать росту прибыли предприятий ВКХ за счет снижения штрафных санкций за сверхнормативный сброс отходов и возможности 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.

ЛИТЕРАТУРА

Аргунов Н. Д., Ватуева О. Б., Веселов В. М., Саломатина Н. А., Пильгун В. А. Некоторые свойства и особенности осадков сточных вод // *Агрохимический вестник*. 2013. № 4. С. 39–43.

Архипов А. В. Техногенные месторождения. Разработка и формирование: монография / А. В. Архипов, С. П. Решетняк; под науч. ред. акад. Н. Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.

Виноградов Д. В., Василева В. М., Макарова М. П., Кочуров Б. И., Лупова Е. И. 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.

Вихман М. И., Кислых Е. Е., Лисеенко Л. А. Урожайность и качество кормовых трав в зависимости от метеорологических факторов в условиях регулируемого плодородия почв // *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*. Москва: Изд-во ВНИИА, 2006. С.127–129.

Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения». М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 54 с.

Головкин Б. Н. Переселение травянистых многолетников на Полярный Север. Л.: Наука, 1973. 266 с.

Горбачева Т. Т., Иванова Л. А., Макаров Д. В., Лусис А. В. Оценка пригодности осветленных коммунальных стоков (ОКС) для стимулирования восстановительной сукцессии на хвостохранилищах // XVIII Международная молодежная научная конференция «Экологические проблемы недропользования. Наука и образование». Материалы конференции / под ред. проф. В. В. Куриленко. СПб.: Изд-во «ЛЕМА», 2018. С. 68–70. ISBN 978-5-00105-349-1.

Горбачева Т. Т., Иванова Л. А., Макаров Д. В., Максимова В. В. Биотестирование полимерных реагентов для пылеподавления поверхности хвостохранилищ нефелиновых песков // *Обогащение руд*.

2019. № 5. С. 52–56. ISSN 0202-3776. DOI: 10.17580/or.2019.05.10 — <https://www.rudmet.ru/catalog/journals/details/2/>.

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. Т. 24, № 1. С. 88–96. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>.

ГОСТ Р 17.4.3.07–2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.

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

ГОСТ 25100–2011. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. ГРУНТЫ. Классификация. 2013–01–01. Москва: Стандартинформ, 2011.

ГОСТ Р 59060–2020. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Охрана окружающей среды. ЗЕМЛИ. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации. Natureprotection. Lands. Classification of disturbed lands for the purpose of reclamation. ОКС 13.020.01. Введ. 2021–04–01 // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566283613>.

ГОСТ 17.5.3.04–83 (СТ СЭВ 5302-85). Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель. Москва: Стандартинформ, 1984.

ГОСТ Р 54534–201. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. Москва: Стандартинформ, 2019.

Данилович Д. А., Эпов А. Н., Канунникова М. А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов — основа для технологического нормирования // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2015. № 3–4. С. 18–28.

Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2021 году // Правительство Мурманской области: сайт. URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/>.

Евдокимова Г. А., Гершенков А. Ш., Воронина Н. В. Микробиологические процессы в системе добычи и переработки апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения. СПб.: Наука, 2008. 102 с.

Евдокимова Г. А., Переверзев В. Н., Зенкова И. В., Корнейкова М. В., Редькина В. В. Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности). Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2010. 146 с.

Ермаков А. С., Ермакова А. Я. Восстановление нарушенного почвенного покрова отрицательного воздействия от промышленных предприятий // Горные науки и технологии. 2014. № 1. С. 24–29.

Зюзин Ю. Л. Суровый лик Хибин. Мурманск: Рекламная полиграфия, 2006. 236 с.

Иванова Л. А. Перспективы гидропонного выращивания растений в условиях Мурманской области / Л. А. Иванова, В. А. Котельников. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2006. 106 с.

Иванова Л. А. Способ создания экологически чистого покрытия и питательная среда для его выращивания: пат. № 2393665; заявка № 2007126884 20.01.2009. Зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 10 июля 2010 г., Бюл. № 2. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2393665C2_20100710.

Иванова Л. А., Иноземцева Е. С., Кременецкая М. В. Способ создания газонной дернины на органоминеральной основе: пат. № 2477947; заявка № 2011127457/13 04.07.2011. Зарегистрировано в Госреестре изобретений РФ 20 марта 2013 г., Бюл. № 9.

Иванова Л. А., Костина В. А., Кременецкая М. В., Иноземцева Е. С. Биологическая рекультивация хвостохранилищ в Заполярье: проблемы и перспективы исследований // Ботанические сады в 21 веке: сохранение биоразнообразия, стратегия развития и инновационные решения: матер. междунар. науч.-практич. конф. (18–21 мая 2009 г.). Белгород: ИПЦ «ПОЛИТЕРРА», 2009 (а). С. 488–492.

Иванова Л. А., Костина В. А., Кременецкая М. В., Иноземцева Е. С. Ускоренное формирование противоэрозионных травостоев на техногенно нарушенных территориях Заполярья // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т. 13, № 4 (2). С. 977–983.

Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Макаров Д. В., Румянцева А. В., Лусис А. В., Кони́на О. Т. Применение ковровой дернины при биологической рекультивации хвостохранилищ в условиях Крайнего Севера // Гидротехническое строительство. 2019. № 7. С. 89–94.

Информационно-технический справочник по НДТ ИТС 10–2015 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», утвержденный приказом Росстандарта от 15 декабря 2015 года № 1580 (2015) // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128670>.

Капелькина Л. П. Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов. СПб., 1993. 191 с.

Капелькина Л. П. Использование отходов в качестве мелиорантов почв и удобрений: критерии пригодности // ЭКиП: Экология и промышленность России. 2006. № 4. С. 4–7.

Капелькина Л. П. Использование осадка сточных вод для рекультивации земель на полигонах ТБО / Л. П. Капелькина, Ю. И. Скорик, Л. С. Венцюлис // ЭКиП: Экология и промышленность России. 2009. № 9. С. 52–55.

Капелькина Л. П. Использование осадка сточных вод для рекультивации земель на полигонах ТБО / Л. П. Капелькина, Ю. И. Скорик, Л. С. Венцюлис // Ресурсосберегающие технологии. Экспресс-информация. ВИНТИ. 2010. № 8. С. 15–20.

Капелькина Л. П. О естественном зарастании и рекультивации нарушенных земель Севера // Успехи современного естествознания. 2012. № 11–1. С. 98–102.

Капелькина Л. П. Технологические аспекты рекультивации нарушенных земель на севере России // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 96–99.

Капелькина Л. П., Сумина О. И., Лавриненко И. А. Самозарастание нарушенных земель Севера: монография / авторы: Л. П. Капелькина, О. И. Сумина, И. А. Лавриненко, О. В. Лавриненко, Е. А. Тихменев, С. И. Миронова. СПб.: Изд-во ВВМ, 2014. 204 с.

Кириллова Е. Управляемые «хвосты» // Хибинский вестник. 2006. № 28. 1 с.

Комонов С. В., Комонова Е. Н. Ветровая эрозия и пылеподавление. Курс лекций. Красноярск: Изд-во СФУ, 2008. 192 с.

Кондратюк Е. Н. Промышленная ботаника / Е. Н. Кондратюк, В. П. Тарабрин, В. И. Бакланов, Р. И. Бурда, А. И. Хархота. Киев, 1980. 260 с.

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

Копцик Г. Н., Копцик С. В., Смирнова И. Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375–1391.

Красавцева Е. А., Горбачева Т. Т., Иванова Л. А., Максимова В. В. Коммунальные стоки в опытах по рекультивации отходов обогащения лопаритовых руд // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3 (87). С. 44–55. doi:10.23968/2305-3488.2021.26.3.44-55.

Кретинин А. В., Борисов В. Г., Жушман В. Н. Способ борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах // Цветная металлургия. 1988. № 3. С. 55–57.

Лагутина Т. Б., Попова Л. А., Шалагинова Л. Н. Влияние нетрадиционных органических удобрений на плодородие и агроресурсный потенциал аллювиальных дерновых почв Архангельской области // Агрехимический вестник. 2016. № 4. С. 19–22.

Лусис А. В., Горбачева Т. Т., Иванова Л. А. Применение осветленных коммунальных стоков (ОКС) и осадка сточных вод (ОСВ) в качестве мелиорантов для рекультивации отвалов отходов рудообогатения (хвостов) // Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2019» (Севастополь, 23–26 сентября 2019 г.) / под ред. Л. И. Лукиной, Н. В. Ляминой. Севастополь: СевГУ, 2019. С. 940–944.

Лычагин Е. В., Сеница И. В. Совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей // ГИАБ. 2007. № 8. С. 136–140.

Макаров Д. В., Нестерова А. А., Васильева Т. Н., Суворова О. В., Нестеров Д. П., Мазухина С. И., Маслобоев В. А. Геоэкологические исследования хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд

// Материалы международной конференции «Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О. И. Семенова-Гян-Шанского). Апатиты: КНЦ РАН, 2006. Ч. I. С. 25–26.

Маслобоев В. А., Макаров Д. В., Бакланов А. А., Амосов П. В., Кони́на О. Т., Светлов А. В., Туртанов А. В. Опыт применения и сравнительная оценка методов закрепления пылящих поверхностей хвостохранилища АНОФ-2 // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017). Материалы Международной научной конференции. Красноярск, 2017. С. 413–416.

Маслобоев В. А., Светлов А. В., Кони́на О. Т., Митрофанова Г. В., Туртанов А. В., Макаров Д. В. Выбор связующих реагентов для предотвращения пылеобразования на хвостохранилищах переработки апатит-нефелиновых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 161–171.

Мерзлая Г. Е. Использование органических отходов в сельском хозяйстве // Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. 2005. Т. XLIX, № 3. С. 48–54.

Месяц С. П., Волкова Е. Ю. Обоснование способов сохранения техногенного минерального сырья, складированного в отвалы отходов рудообогатения // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12, № 4. С. 735–741.

Михайлова Т. Л., Хохряков А. В. Рациональное землепользование в цветной металлургии // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1993. № 6. С. 97–137.

Наквасина Е. Н., Земцовская О. Н., Денисова А. И. Использование злаковых трав для биологической рекультивации нарушенных земель Севера // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия «Гуманитарные и социальные науки». 2014. № 4. С. 81–89.

Немировский А. В. Разработка метода формирования намывного хвостохранилища, устойчивого к ветровым потокам: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 19 с.

Никонов В. В. Общие особенности первичной биологической продуктивности и биогеохимических циклов на Крайнем Севере (на примере Кольского Севера) // Сообщества Крайнего Севера и человек. М.: Наука, 1985. С. 79–90.

Пат. 2513786 Рос. Федерация. Способ закрепления пылящих поверхностей / Ф. И. Лобанов, Е. М. Чукалина, Л. Н. Козлов, Е. Ю. Глоба, Ю. В. Каплунов; опубли. в БИ. 2014. № 11.

Певзнер М. Е. Экология горного производства / М. Е. Певзнер, В. П. Костовецкий и др. М.: Недра, 1990. 235. С. 2.

Переверзев В. Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.

Переверзев В. Н., Подлесная Н. И. Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1986. 103 с.

Першина Н. А., Полищук А. И., Свистов П. Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // Труды ГГО. 2008. Т. 558. С. 211–232.

Петрова Т. А., Рудзиси 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>.

Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья: методические рекомендации / Л. А. Иванова, М. В. Слукотская, И. П. Кременецкая, Т. Т. Горбачева. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 37 с.

Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота / Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова, Н. В. Фокина, Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина; отв. ред. канд. биол. наук Е. А. Боровичев. Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2021. 88 с.

Пора оздоравливать Арктику. Биологические способы очистки и восстановления нефтезагрязненных территорий / В. А. Мязин, Л. А. Иванова, А. А. Чапоргина, Н. В. Фокина, М. В. Корнейкова, Г. А. Евдокимова; отв. ред. канд. биол. наук Е. А. Боровичев. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 94 с.

Постановление Правительства Мурманской области от 29 марта 2013 г. № 139-ПП/5 // Консорциум Кодекс. Электронный фонд

правовых и нормативно-технических документов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/465600568>.

Прайс-лист на работы по озеленению и благоустройству территорий в Московской области // Rolllawn.ru: сайт. URL: <https://www.rolllawn.ru/rulonnyj-gazon-cena-za-m2.html>.

Приказ МПР РФ от 15.06.2001 № 511 «Об утверждении Критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1998. № 26. Ст. 3009.

Приказ комитета РФ по рыболовству № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения // Российская газета. 2010. 5 марта.

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 января 2020 г. № 12-47/2081 «О разъяснении положений Методики разработки НДС веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей, утвержденную приказом» // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573275596>.

Российская Федерация. Законы. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон № 89-ФЗ : Принят Государственной Думой 22 мая 1998 года : одобрен Советом Федерации 10 июня 1998 года : с изм. и доп., вступ. в силу с 14 июня 2020 года. Текст : электронный. URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12555> (дата обращения : 23.01.2023).

СанПиН 2.1.7.573–96. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения от 31.10.1996 г. // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000109>.

Свод правил СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03–85» // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094155>.

Сельмен В. Н., Ильинский А. В. Перспективы использования органоминеральных удобрений, полученных на основе осадков сточных вод // Экологические аспекты мелиорации, гидротехники и водного хозяйства

АПК. Материалы международной научно-практической конференции. М.: Изд-во ВНИИГиМ, 2017. С. 225–228.

Семенец Е. С., Свистов П. Ф., Талаш А. С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 3. С. 27–36.

Скворцов В. Э. Атлас-определитель сосудистых растений таежной зоны Европейской России. М.: Гринпис России, 2000. 587 с.

Совещание «О практических аспектах утилизации прошедших обработку осадков сточных вод». Текст : электронный // Комитет Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию : официальный сайт. 2017. URL : http://agrarian.council.gov.ru/activity/activities/other_activities/79450/ (дата обращения : 23.01.2023).

Способ рекультивации золоотвалов и хвостохранилищ: а. с. / И. А. Кордаков // Бюллетень изобретений. 1976. № 20.

Справочник по климату СССР. Вып. 2. Мурманская область, метеорологические данные за отдельные годы / Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Ч. 1. Температура воздуха. Мурманск, 1973; ч. 2. Осадки. Мурманск, 1975; ч. 3. Снежный покров. Мурманск, 1975; ч. 4. Ветер. Мурманск, 1976.

Тарасова Н. П., Ингель Ф. И., Макарова А. С. Зеленая химия как инструмент снижения рисков, обусловленных воздействием химически опасных объектов на окружающую среду // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 6. С. 5–11.

Терентьева И. А., Кацулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20, № 1–2. С. 197–204.

Технологический регламент 108-Р от 11.05.2017 г. по производству работ и содержанию территорий зеленых насаждений в Санкт-Петербурге // Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга. URL: <https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/07/12/pdf>.

Тимофеева Ю. Р. Влияние горно-обогатительного комбината на динамику площадей нарушенных земель // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование — 2. Материалы Международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 2. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Information

and Analytical (Scientific and Technical Journal). 2015. № 11 (специальный выпуск 60-2). 648 с.

Третьякова А. С. Синантропная флора Среднего Урала / А. С. Третьякова, В. А. Мухин. Екатеринбург, 2001. 147 с.

Турчанинов И. А., Красносельский Э. Б., Ключникова А. М., Талалаев С. М. Проблемы закрепления пылящей поверхности действующих хвостохранилищ Заполярья // Инженерная геология. 1981. № 5. С. 107–110.

Чеботарев Н. Т., Найденов Н. Д., Юдин А. А. Агроэкологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрения сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственная науки. 2016. № 1–2. С. 31–36.

Шалыгина Р. Р., Редькина В. В. Предварительные результаты анализа таксономического состава водорослей и цианобактерий в хвостах обогащения апатит-нефелиновых руд АНОФ-2 // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения Г. М. Крепса и 110-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тян-Шанского. Апатиты, 2016. С. 163–165.

Экология и охрана природы Кольского севера. Апатиты, 1994. С. 54–70.

Якимова Т. С. Влияние осадков городских сточных вод на качество растениеводческой продукции // Агрехимический вестник. 2013. № 2. С 25–26.

Ahmed W., Staley C., Hamilton K. A., Beale D. J., Sadowsky M. J., Toze S., & Haas C. N. (2017). Amplicon-based taxonomic characterization of bacteria in urban and peri-urban roof-harvested rainwater stored in tanks. *Science of the Total Environment*, 576, 326–334. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.090.

Alikhasi M., Kouchakzadeh M., Baniani E. The effect of treated municipal wastewater irrigation in non-agricultural soil on cotton plant // *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012. Vol. 14. P. 1357–1364.

Amato F., Nava S., Lucarelli F., Querol X., Alastuey A., Baldasano J. M., Pandolfi M. A. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods // *The Science of the Total Environment*. 2010. Vol. 408. P. 3070–3084.

Bednarek W., Dresler S., Tkaczyk P. Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleumpratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers // *Journal of Elementology*. 2015. Vol. 20 (1). pp. 49–58.

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. Vol. 37. P. 36–42.

Haneklaus S. H., Schnug E. (2016). Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero. Dordrecht: Springer. P. 95–125. doi: 10.1007/978-94-017-7612-7.

Harder R., Peters G. M., Svanström M., Khan S. J., Malander S. Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices // *International Journal of Life Cycle Assess.* 2017. Vol. 22 (5). P. 731–743.

Inyinbor A. A., Bello O. S., Ohuyori A. P., Inyinbor H. E., Fadiji A. E. Wastewater conservation and reuse in quality vegetable cultivation: Overview, challenges and future prospects // *Food Control*. 2019. Vol. 98. P. 489–500.

Ivanova L. A., Gorbacheva T. T., Makarov D. V., Rumyantseva A. V. Some aspects of physicochemical and biological methods for the conservation of apatite-nepheline tailings in the Far North // *Power Technology and Engineering*. 2019. Vol. 53, no. 1. P. 47–50.

Jimenez B., Asano T. Acknowledge all approaches: the global outlook on reuse // *Water* 21. December 2004. P. 32–37.

Jones D. L. Organic acids in the rhizosphere — a critical review // *Plant and Soil*. 1998. Vol. 205. P. 25–44.

Kaushik R., Balasubramanian R., & de La Cruz A. A. (2012). Influence of air quality on the composition of microbial pathogens in fresh rainwater. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, 2813–2818. doi: 10.1128/AEM.07695-11.

Kefeni K. K., Msagati T. A. M., Mamba B. B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 151. P. 475–493.

Kunacheva C., David C. Stuckey D. C. Analytical methods for soluble microbial products (SMP) and extracellular polymers (ECP) in wastewater treatment systems: A review // *Water Research*. 2014. Vol. 61. P. 1–18.

Kuypers M. M. M., Marchant H. K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network // *Nature Review Microbiology*. 2018. Vol. 16. pp. 263–276.

Masloboev V. A., Svetlov A. V., Konina O. T., Mitrofanova G. V., Turtanov A. V., Makarov D. V. Selection of binding agents for dust prevention at tailings ponds at apatite–nepheline ore processing plants // *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54, no. 2. pp. 329–338.

McGill B. J. Towards a unification of unified theories of biodiversity // *Ecology Letters*. 2010. No. 13 (5). P. 627–642.

Nava Amato F., Nava S., Lucarelli F., Querol X., Alastuey A., Baldasano J. M., Pandolfi M. A. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods // *The Science of the Total Environment*. 2018. 408. P. 3070–3084.

Norton-Brandao D., Scherrenberg S. M., van Llier J. B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes. A review of treatment technologies // *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 122. P. 85–98.

Rana S., Bag S. K., Golder D., Mukherjee (Roy) S., Pradhan C., Jana B. B. Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants // *Journal of Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37 (6). P. 981–988.

Ricart S., Rico A. M. Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor // *Agricultural Water Management*. 2019. Vol. 217. P. 426–439.

Smyntek P. M., Chastel J., Peer R., Anthony E., McCloskey J., Bach E., Wagner R., Bandstra J., Strosnider W. 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*. 2017. Vol. 18 (1). P. 76–84.

Tapiaa A., Cornejo-La Torre M., Santosc E. S., Aránd D., Gallardoe A. Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 244. P. 154–160.

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. Vol. 115. P. 55–65.

Zhou G., Ma Y., Fan T., Wang G. Preparation and characteristics of a multifunctional dust suppressant with agglomeration and wettability performance use in coal mine // *Chemical engineering research and design*. 2018. Vol. 132. P. 729–742.

ISBN 978-5-91137-494-5



9 785911 374945

