УДК 504.5.06; 504.54.062.4

Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов

Т.А.ПЕТРОВА, Э.РУДЗИШ ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Петрова Т.А. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов / Т.А.Петрова, Э.Рудзиш // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 767-776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16

Аннотация. При рекультивации техногенно-нарушенных территорий объектов горной промышленности из-за недостатка органического вещества и питательных компонентов, требуемых для восстановления почвенно-растительного слоя, необходимо внесение удобрений, мелиорантов или почвенных добавок. Одним из актуальных направлений в рекультивации земель объектов горной промышленности является использование нетрадиционных удобрений (мелиорантов), сформированных на основе осадков сточных вод. Цель работы – обобщить и проанализировать актуальную информацию об эффективности применения осадка сточных вод для рекультивации техногенно-нарушенных земель объектов горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности. Анализ основан на обзоре исследований последних лет, направленных на оценку воздействия внесенного осадка на почвы, растительные сообщества и рекультивируемые территории. Внесение осадка сточных вод оказывает положительное воздействие на физические и химические показатели почвы (оптимизирует плотность, агрегированность), насыщает питательными элементами N, P, K, Ca, Mg, Na, чем улучшает показатели роста растений, однако, может содержать набор тяжелых металлов и патогенов, поэтому необходимы исследования каждого осадка и условий рекультивируемых территорий.

Ключевые слова: осадок сточных вод; рекультивация; нарушенные земли; тяжелые металлы; отходы; мелиорант; утилизация отходов

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта на выполнение государственного задания в области научной деятельности на 2021 г. № FSRW-2020-0014.

Введение. Почвенный слой выполняет роль одного из ключевых компонентов биосферы, осуществляя целый ряд функций по поддержанию наземных экосистем – предоставление среды обитания, сохранение биоразнообразия, регулирования качества воды и воздушного бассейна. Интенсивные процессы деградации почв, вызванные масштабными работами по разработке месторождений полезных ископаемых, приводят к снижению продуктивности экосистем и плодородия, общему нарушению взаимодействия компонентов окружающей среды [18, 27, 29, 40]. Скорость истощения почвы и, как следствие, окружающей среды (вызванная антропогенным воздействием) преобладает над скоростью самовосстановления. Без должного внимания и проведения мероприятий по рекультивации техногенно-нарушенных земель проблема деградации почвенного слоя обретет глобальный уровень.

Сложность восстановления техногенно-нарушенных земель объектов горнодобывающей промышленности обусловлена главным образом нарушением и полным снятием почвенно-растительного слоя, который является источником органического вещества, необходимого для процессов почвообразования и самовосстановления среды. Оголенные горизонты почв и пород мало пригодны для формирования растительных сообществ и плодородных слоев почвы.

Вмешательство человека может ускорить процесс восстановления среды путем создания техноземов при внесении требуемых органических удобрений и других питательных добавок. Недостаток органического вещества восполняется органическими удобрениями, мелиорантами или почвенными добавками.

Постановка проблемы. Увеличение масштабов нарушений и развитие способов проведения работ по восстановлению почвенно-растительных покровов привели к поискам наиболее эколого-

экономически успешных подходов и технологий в области рекультивации техногенно-нарушенных земель. Одним из актуальных направлений в рекультивации земель объектов горной промышленности является использование нетрадиционных удобрений (мелиорантов), сформированных на основе осадков сточных вод (ОСВ) [37] для восстановления – карьеров [9, 21], отвалов [15, 20], хвостохранилищ [12].

Возможность применения ОСВ в качестве органических почвенных добавок уже доказана и активно используется в сельском хозяйстве разных стран [22]. Согласно статистической службе Европейского союза Eurostat за 2018 г. Польша использует 20 % ОСВ на сельскохозяйственных землях (из 583,07 тыс. т), Австрия – 21 % (из 234,481 тыс. т), Швеция – 39 % (из 210,9 тыс. т), Норвегия – 44 % (из 147,6 тыс. т).

Разработан ряд нормативной документации в области сельского и лесного хозяйства по применению ОСВ в качестве удобрений и почвенных добавок для контроля и регулирования поступающих в почву экологически опасных компонентов осадка (патогены, тяжелые металлы) – Директива Совета 86/278/ЕЭС от 12 июня 1986 г., ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, СанПиН 2.1.7.573-96.

Методология. Методы исследований заключались в обобщении и анализе актуальной информации об эффективности применения осадка сточных вод для рекультивации техногенно-нарушенных земель объектов горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности на основе оценок воздействия на почвенно-растительные комплексы восстанавливаемых или облагораживаемых территорий. Для работы были использованы результаты последних аналитических и экспериментальных исследований по оценке применимости ОСВ в качестве почвоулучшителя отечественных и зарубежных специалистов.

Обсуждение. Осадок сточных вод – это конечный продукт, либо отход биологической очистки сточных вод, который по своему виду, химическому составу и физико-химическим свойствам может существенно отличаться в зависимости от очищаемых сточных вод, системы водоочистки и процессов обработки [5].

Происхождение ОСВ. Сточные воды, поступающие на очистные сооружения, делятся на бытовые, промышленные и поверхностные («ливневые стоки») [19]; различные соотношения видов поступающих вод влияют на характеристику образуемых ОСВ. Характерные отличия можно наблюдать при сравнении осадков от городских систем очистки вод, очистных сооружениях различных производственных объектов и даже при резкой смене годовых или сезонных распределений атмосферных осадков.

ОСВ образуется на очистных сооружениях в системе очистки сточных вод, что представляет собой комплекс мероприятий по удалению загрязняющих веществ. В зависимости от целей и требований система водоочистки комплектуется из аппаратов и сооружений на основе различных методов воздействия (механическая очистка, биологическая, физико-химическая). Таким образом, совокупность процессов водоочистки является одним из определяющих факторов состава и характеристики образующегося осадка [8].

По завершению всех этапов водоочистки осадок удаляется из очистных сооружений для обработки перед складированием, утилизацией или захоронением. Обработка ОСВ (уплотнение, обезвоживание, стабилизация, кондиционирование и обезвреживание) влияет на его объем, влажность, плотность и состав.

Существуют различные классификации ОСВ в зависимости от происхождения, этапов очистки сточных вод и его обработки. В данной работе рассматривается обобщенное понятие «осадок сточных вод», которое подразумевает совокупную массу сырого осадка, избыточного активного ила и его усредненные показатели.

Характеристика ОСВ. В обобщенном понятии ОСВ – это твердые, полутвердые или илоподобные образования, которые в различных пропорциях состоят из тяжелых примесей (песка), сырого осадка (в основном, взвешенных веществ) и активного ила (избыточного количества различных популяций микроорганизмов).

Осадок сточных вод широко используется в качестве удобрений, мелиорантов и других почвенных добавок, является источником высокого содержания органического вещества (от 20 до 80 %, см. таблицу), обладает рядом питательных элементов, необходимых растениям, а также может регулировать почвенные режимы [22, 48].

Органическое вещество играет одну из ключевых ролей при восстановлении техногенно-нарушенных земель, поскольку оказывает воздействие почти на все физические, химические и

биологические свойства почвы, чем улучшает ее структуру, повышает почвенную устойчивость к эрозии, способствует удержанию питательных веществ и содержит значительную часть активаторов роста растений [25]. Таким образом, наличие достаточного количества органического вещества определяет экологическую эффективность рекультивационных мероприятий, скорость восстановления почвенно-растительного комплекса и стабильность поддержания продуктивности техногенной экосистемы.

Усредненные состав и характеристика ОСВ

Характеристика	Осадок городских сточных вод	Источник
pH	~ 6,0-7,5	[11, 16, 29, 33, 38, 41]
Электропроводность, мкСм/см	1,39-2,83	[29,33, 38, 41]
Органическое вещество, %	26,6-83,5	[11, 16, 32, 33, 41]
C (общий), %	Нет точных данных	–
N (общий), %	~ 5-20	[16, 29, 32, 38]
P (P ₂ O ₅), %	~ 2-20	[16, 32, 35]
K (K ₂ O), мг/кг	Нет точных данных	–
Mn, мг/кг	Нет точных данных	–
Zn, мг/кг	~ 500-1000	[14, 16, 32, 33, 41]
Cu, мг/кг	~ 90-800	[11, 14, 32, 33, 41]
Cr, мг/кг	~ 16-288	[11, 14, 16, 33]
Ni, мг/кг	~ 10-140	[11, 14, 16, 33]
Pb, мг/кг	~ 1,5-190	[11, 14, 16, 32]
Cd, мг/кг	~ 0,5-2	[11, 14, 16, 32, 33]

Согласно исследованиям, из-за высоких концентраций P и N ОСВ может быть причислен к фосфорным и азотным удобрениям [45]. Полевые исследования и формирование моделей почвенно-растительных комплексов доказали значительное увеличение концентраций азота и фосфора [14, 16, 27]. Кроме того, при очистке сточных вод методами биоремедиации образуются излишние (отработанные) водные растения, которые, как и ОСВ, являются отходами систем водоочистки и, обладая большим содержанием азота [24, 30], имеют потенциал азотных почвенных добавок.

В рекультивации техногенно-нарушенных земель азот и фосфор существенно влияют на положительную динамику роста растений: улучшают рост клеток, процессы метаболизма, участвуют в формировании корневой системы [36, 46]. Однако, вследствие неоднородности происхождения и процессов образования осадков, у ОСВ могут отмечаться и обратные результаты с понижением концентрации азота, что показано в результатах исследования шлама кварцевой промышленности [48].

К существенному преимуществу ОСВ относится наличие питательных компонентов, таких как K, Ca, Mg, Na [48]. Стоит учитывать, что осадки сточных вод из-за различия состава, происхождения и характеристики не всегда обладают высокими концентрациями питательных элементов или их наличием в целом. При восстановлении бедных и малоплодородных почвогрунтов необходимо учитывать количество питательных веществ вносимого осадка во избежание их дефицита в почве и последующего угнетения нормального роста и развития растений. Расхождение по содержанию питательных элементов в осадках городских сточных вод отмечено в таблице.

Наблюдается расхождение результатов воздействия вносимого осадка на кислотность и электропроводность почвы. По мере постановки и проведения экспериментов на почвенно-растительных площадках получены результаты по повышению [48] и снижению [6, 8, 47] кислотности почвы с увеличением дозировки внесенного осадка, что также объяснимо различием осадка и исходной кислотностью почвы. Без внесения критических объемов осадка значение кислотности почвы отмечалось в диапазоне 6,0-7,5.

Применение осадков сточных вод в качестве почвенной добавки также оказывает значительное влияние на изменение электропроводности, которое в основном повышается в исследуемых почвах после внесения осадков [5, 14, 48]. При изменении состава осадка, засоленности почв или методов обработки может возникать обратный эффект – понижение электропроводности, например, при замораживании-оттаивании ОСВ, перед внесением в солонцеватые почвы [13]. Изменение проводимости является индикатором засоленности почв, увеличение значения при внесении осадка может быть

связано с растворением солей из осадка [28, 42, 45]. Нарушение водно-солевого режима оказывает неблагоприятное воздействие на жизнедеятельность растений, поэтому при составлении проекта работ по мелиорации и рекультивации необходимо учитывать такие параметры, как кислотность и электропроводность.

Результаты исследований применения осадков сточных вод в качестве почвенных добавок подтверждают положительное воздействие на состав и свойства почв. Внесение осадка сточных вод в почвы увеличивает содержание воды, улучшает структуру почвы, оптимизирует ее режимы, повышает содержание органических веществ, азота, фосфора и в некоторых случаях ряд других питательных элементов: К, Са, Mg, Na.

Воздействие ОСВ на растительные сообщества. Экологически эффективное формирование почвенно-растительного комплекса на рекультивируемых территориях горных производств – сложный процесс, ведущий к долговременному самовосстановлению среды. Стабилизация изменений экосистемы может достигать десятков лет, в зависимости от состояния техногенной экосистемы. Для скорейшего восстановления и снижения негативного воздействия нарушенного земельного объекта рекомендуется ускоренное зарастание растительностью. Почвенно-растительный покров снижает негативную нагрузку путем восстановления естественных функций экосистемы, а также буферных свойств почвенного покрова, предотвращает эрозийные процессы и при успешном восстановлении возвращает земли в хозяйственное использование.

Для оценки воздействия ОСВ на растительные сообщества чаще применяются методы оценки внешних признаков и физических размеров органов растений. Воздействие анализируется как на основе визуальных показателей – пигментации растений, хлороза, некроза, так и на измеряемых величинах роста и развития растений – всхожести, динамике роста, высоте стебля, длине листа, диаметре цветков, биомассе. Оценка биомассы осуществляется измерениями всего растения, раздельно по системам (наземная и корневая) или по растительным органам (стеблям, листьям, корням и др.). Для расчетов эколого-экономической эффективности проведенных земельных работ и продуктивности экосистемы оценивается урожайность: биомасса, структура урожая и ценность растительной продукции. В зависимости от тест-объектов растений эти параметры могут изменяться, например, длина, диаметр, масса початка кукурузы [5], выход масла от подсолнечника [41] или теплотворность в культурах, используемых в биоэнергетике. Кроме того, для оценки воздействия на растительные культуры проводят анализ фотосинтеза и измерения содержания хлорофилла [14, 32, 46].

Осадок сточных вод оказывает благоприятное воздействие на процессы фотосинтеза и на содержание хлорофилла [14, 32, 34]. При сравнении хвои лиственницы, выращенной на почве с внесенным осадком и на контрольной почве, отмечается значительное увеличение хлорофилла (при внесении осадка 30 и 60 т/га) [32]. При оценке хлорофилла в подсолнечнике, выращенном на почвах, удобренных осадком (15, 30 и 60 т/га) и классическим удобрением (добавка NPK) существенных различий не наблюдается [34]. Рекультивация земель ОСВ с такими показателями улучшает фотосинтез, не уступая классическим удобрениям, что дает как экологический эффект, так и экономическое преимущество применения.

В исследованиях воздействия внесенного осадка на рост растений отмечается общая тенденция, небольшие концентрации осадка дают лучшую динамику роста растений (злаковых [48], травянистых [2, 16, 39], подсолнечников [34, 41, 48], бобовых [43]), чем контрольные почвы, при этом увеличение количества добавляемого ОСВ до критических значений дает ингибирующий эффект и приводит к торможению роста [42, 43, 46]. Подобные результаты подавления роста растений после увеличения доз внесения осадка можно объяснить достижением пороговых значений без фитотоксичного воздействия [11]. Поэтому необходим разумный подход в использовании осадка с расчетом доз внесения на основе всех факторов воздействия.

Корни растений в рекультивации техногенно-нарушенных земель выполняют весомые функции, они закрепляют почвенный слой, улучшают его структуру, препятствуют процессам эрозии. Добавление осадка улучшает корневую систему, способствует увеличению биомассы и разрастанию корневой системы [28, 35].

Почвы с внесенным осадком дают лучшие результаты по продуктивности биомассы растений – злаков [2, 21] и кустарников [33]. Биологическая продуктивность почвенно-растительных комплексов

отражает состояние плодородия почвы и ее ресурсов. Органические удобрения (или органические нетрадиционные добавки, например, осадки сточных вод) способны восстановить баланс органических и минеральных компонентов, необходимых растениям и тем самым обеспечить восстановление техногенно-нарушенных земель [25].

В рассматриваемых литературных источниках отмечено, что от внесения ОСВ в почву индикаторов болезней, пигментных изменений, хлороза или некроза у растений не отмечалось [2, 14].

Обработанные почвы ОСВ дают лучшие результаты роста растений и прироста биомассы при внесении 15–45 % осадка [2, 14, 16]. Оптимальная доза внесения обусловлена усиленной доступностью питательных компонентов для растений в сравнении с контрольными площадками необработанных почв [16, 41].

Экологическая безопасность применения ОСВ. Осадки сточных вод могут содержать потенциально опасные компоненты – тяжелые металлы [5, 13, 38, 48], органические загрязнители, патогены [5] и другие фитотоксичные вещества [14], которые могут накапливаться в организмах и окружающей среде, препятствуя развитию и восстановлению почвенно-растительных участков. Для стабилизации и снижения токсичности осадка проводят мероприятия по обработке и обезвреживанию осадка: компостирование, термическое воздействие (тепловая сушка, сжигание, замораживание – оттаивание), анаэробное сбраживание и другие методы. Но это не устраняет вероятность загрязнения экосистемы тяжелыми металлами, что делает их основным лимитирующим фактором применения ОСВ в земельных работах [46, 48].

При внесении в почву ОСВ с высокими концентрациями тяжелых металлов (ТМ), отмечается увеличение концентраций в почве Cu и Zn [7, 38], Pb [7, 12, 38], Mn, Cr, Cd [13]. Эти химические элементы при попадании в почвенные растворы аккумулируются в верхних почвенных горизонтах, мигрируют в нижние горизонты, переходят на ближайшие территории, а также накапливаются в растительном покрове и живых почвенных организмах. Миграция, трансформация и биоаккумуляция соединений ТМ зависят от химического состава и реакции среды [3, 26], органического вещества, режимов почвы и геохимических барьеров [4, 6]. Чрезмерное накопление ТМ в почве, растениях может привести к нарушению функций экосистемы и негативным последствиям для живых организмов. Несмотря на наличие ТМ в ОСВ и даже при высоких концентрациях ТМ в рассматриваемых исследованиях не обнаружено превышений установленных нормативов концентраций от разового внесения осадка [38, 48].

Для рационального внесения ОСВ и для предотвращения загрязнения почв металлами каждый осадок необходимо оценивать применительно к облагораживаемой почве и условиям среды, проводить комплексное исследование химического состава и физико-химических свойств вносимого ОСВ и обрабатываемой почвы с расчетом гарантировано безопасных доз внесения осадка [19].

Существует и обратная сторона вопроса. При рассмотрении концентраций тяжелых металлов в почве стоит учитывать, что недостаток некоторых металлов также может привести к угнетению или гибели растений, так как некоторые металлы являются питательными микроэлементами для растений [5, 13]. Например, наличие меди и магния в почве необходимо для регуляции процессов фотосинтеза и транспорта белков, цинк – для окислительно-восстановительных процессов. При применении осадков различного происхождения наиболее часто повторяющимися элементами, повышающими концентрации в почве, являются Cu и Zn [5, 7, 38], что может быть как преимуществом осадка, так и недостатком, в зависимости от их концентраций.

Потребность в количестве питательных элементов, как и толерантность к повышенным содержаниям тяжелых металлов, у разных растительных культур отличается. Следовательно, при расчете доз и оценке безопасности внесения ОСВ в рекультивируемые земельные территории следует проводить исследования почв, используемого осадка, а также мониторинг состояния восстанавливаемой растительности и необходимых оптимальных условий для обеспечения нормального роста и развития растений.

Экологическая опасность биоаккумуляции тяжелых металлов в растениях заключается в увеличении их токсичных концентраций на более высоких трофических уровнях живых организмов. В рассматриваемых исследованиях по оценке воздействия внесенного ОСВ на растительные культуры, выращенные на обработанных почвах, не было зафиксировано негативных последствий при росте и развитии представителей травянистых [2] и сельскохозяйственных культур [7, 48].

Отмеченное торможение роста растений от чрезмерных внесений ОСВ может быть реакцией на повышенные концентрации ТМ [41]. Зафиксировано повышение содержания тяжелых металлов в различных органах растений по сравнению с растениями, выращенными на контрольных почвенных участках без добавления ОСВ [43]. Эти данные еще раз подтверждают, что использование ОСВ в земельных работах обязует контролировать концентрации тяжелых металлов в почве, и не исключают экологически токсичное воздействие всех видов осадков.

Несмотря на эффективность действия преобразованного осадка сточных вод, его применение наиболее рационально в восстановительных работах на техногенно-нарушенных и лесотехнических земельных территориях. Рекомендуются ограничить их использование на сельскохозяйственных территориях из-за потенциального риска загрязнения окружающей среды и для предотвращения увеличения концентраций тяжелых металлов в пищевой промышленности.

Применительно к техногенно-нарушенным землям и лесохозяйственным вероятность загрязнения тяжелыми металлами при рекультивации земель имеет меньший масштаб последствий для человека, так как не влияет на производство продуктов питания и в случае риска повышения концентраций ТМ выше установленных нормативами значений приведет к меньшему экологическому ущербу [41].

Одним из этапов планирования рекультивационных мероприятий техногенно-нарушенных земель является выбор растительных культур. При внесении ОСВ с высокими концентрациями ТМ рекомендуется выбирать растения-фиторе медианты, которые позволят снизить потенциальный риск загрязнения окружающей среды от внесенного осадка [34, 46]. При рациональном выборе осадка, его доз внесения и метода обработки улучшение почвогрунта путем внесения осадков не окажет фитотоксичного воздействия на восстанавливаемые почвенно-растительные покровы при рекультивации техногенно-нарушенных земель.

ОСВ в рекультивации техногенно-нарушенных земель. Препятствием успешной рекультивации техногенно-нарушенных земель объектов горной промышленности является значительный дефицит органического материала [1, 9, 21]. Стандартный вариант мероприятий подразумевает нанесение плодородного (ПСП) или потенциально плодородного слоя почвы (ППСП) на восстанавливаемые территории, однако такой подход не всегда гарантирует экологически эффективное формирование техногенной экосистемы. Из-за недостатка питательных элементов и органического вещества необходимо неоднократное внесение химических и органических удобрений, что повышает стоимость восстановительных работ. Альтернативным вариантом является внесение нетрадиционных удобрений – осадков сточных вод, которые по сути являются экономически доступным [41, 45] вторичным материальным ресурсом [23].

Облагороженные почвы сельскохозяйственного назначения и рекультивируемые земли горных производств могут быть улучшены за счет внесения ОСВ в качестве почвенных добавок [9, 10], удобрений [32, 43] или мелиорантов, которые повышают содержание органического вещества, питательных элементов [23, 31, 44] – фосфора и азота, а также ряда других микрокомпонентов, необходимых растениям. По физико-химическим свойствам почвогрунта осадок способен улучшить плотность, агрегированность, структуру почвы, водно-воздушный режим и повысить устойчивость к процессам эрозии [1]. Согласно результатам исследований, полученным на основе облагораживания сельскохозяйственных почв, внесение ОСВ благоприятно воздействует на рост и развитие растений. Наблюдается ускорение роста растений, увеличение прироста наземной биомассы и корневой системы, положительное воздействие на процессы фотосинтеза и на содержание хлорофилла.

При обеспечении всех оптимальных режимов для рекультивационных работ на техногенно-нарушенных территориях внесение осадка может улучшить скорость формирования почвенно-растительного покрова, т.е. скорость стабилизации и восстановления техногенной экосистемы. Это позволит в скорейшем времени снизить негативное воздействие от нарушенных земель на окружающую среду и вернуть земли в хозяйственное использование.

Примеры положительных результатов по применимости ОСВ на техногенно-нарушенных территориях горных производств можно встретить в исследованиях восстановления карьеров [9, 21], отвалов [15, 20], хвостов золотодобычи [12] и на нарушенных территориях бокситовых месторождений [46].

Добавление ОСВ при рекультивации нарушенных территорий объектов горной промышленности увеличивает содержания органического вещества, доступного фосфора, меди и цинка как микроэлементов, необходимых растениям [9, 21, 46], но также увеличивает содержание ТМ (без превышений фоновых значений) и снижает кислотность рекультивируемых земель [15, 46]. Схожие результаты воздействия на почвогрунт были получены на участках рекультивации хвостов золотодобычи – увеличение содержания фосфора и азота, однако вследствие высоких концентраций ТМ в площадке рекультивируемых отходов повышений концентраций ТМ от внесения ОСВ нет [12].

Отмечаются работы по оценке воздействия не только при внесении ОСВ в рекультивируемые земли, но и полная замена ПСП и ППСП на метод формирования техногенного грунта на основе отходов горной промышленности и ОСВ [17, 21].

Основными препятствиями распространения метода являются: вопросы доступности, транспортировки, метода внесения и недостаток исследований воздействия осадка на окружающую среду.

Преимущества использования ОСВ в рекультивации:

- низкая стоимость субстрата как отхода вторичного материального ресурса;
- высокие концентрации азота и фосфора, что потенциально относит осадок к группе азотных, фосфорных удобрений;
- высокое содержание органического вещества, необходимого для рекультивации полигонов отходов горной промышленности;
- улучшение физических свойств почвы – плотности, агрегированности, которые улучшают структуру почвы и повышают устойчивость к развитию эрозии;
- наличие питательных элементов, необходимых растениям – К, Са, Mg, Na;
- улучшение условий для роста растений;
- снижение количества применяемых химических удобрений и аналогичных субстратов, необходимых в сельскохозяйственной промышленности;
- способствование восстановлению экосистемы путем ускорения формирования почвенно-растительного покрова.

Недостатки использования ОСВ в рекультивации:

- необходимость проведения предварительной обработки с целью обезвоживания, стабилизации, улучшения физико-механических свойств;
- присутствие тяжелых металлов Zn, Cu, Cr, Pb, Ni; чтобы не допустить загрязнение почвы данными элементами, необходимо строго рассчитывать дозу каждого внесения ОСВ;
- низкая кислотность осадка, что может негативно отразиться в миграции тяжелых металлов;
- при отсутствии обработки осадка – потенциальная экологическая опасность наличия загрязняющих органических соединений и патогенной микрофлоры.

Заключение. Горная промышленность играет одну из ключевых ролей в развитии государства, воздействуя на экономические, экологические и социальные изменения. Крупномасштабные работы по добыче и переработке полезных ископаемых меняют рельеф местности с образованием техногенно-нарушенных земель, которые в результате деградации выходят из хозяйственного использования и оказывают негативное воздействие на компоненты окружающей среды.

Восстановление техногенно-нарушенных территорий объектов горной промышленности осуществляется путем проведения рекультивационных мероприятий, заключающих в себе комплекс работ по формированию ландшафта, территорий и земель для возобновления экологической системы, приближенной к естественным условиям местности. Для воспроизводства плодородного почвенного слоя необходимо внесение органических удобрений, мелиорантов или почвенных добавок для формирования почвенных агрегатов, укрепления структуры почвы и улучшения условий роста растительного покрова земель.

Одним из потенциальных источников органических веществ и питательных элементов являются нетрадиционные мелиоранты – удобрения, сформированные на основе осадков сточных вод. Осадок сточных вод – это твердый, полутвердый или илоподобный отход очистки сточных вод (преимущественно биологической), который в различных пропорциях состоит из тяжелых примесей (песка), сырого осадка (в основном, взвешенных веществ) и активного ила (избыточного

количества различных популяций микроорганизмов). По своему виду, химическому составу и физико-химическим свойствам может существенно отличаться в зависимости от очищаемых сточных вод, системы водоочистки и процессов его обработки. Усредненный состав осадка представляет собой ~ 25-80 % органического вещества, ~ 5-20 % азота, ~ 2-20 % фосфора, набор питательных элементов, необходимых растениям – К, Са, Mg, Na, а также тяжелые металлы Zn, Cu, Cr, Pb, Ni.

Как почвенная добавка, ОСВ улучшает физические свойства почвы – плотность, агрегированность, что помогает почве противостоять процессам эрозии, а также увеличивает содержание питательных элементов в почве. Это способствует лучшему росту растительного покрова восстанавливаемых территорий путем воздействия на повышение содержания хлорофилла, улучшения процессов фотосинтеза, ускорения роста и прироста биомассы растений.

Для рекультивации техногенно-нарушенных объектов горной промышленности это позволит в скорейшем времени стабилизировать техногенный ландшафт, сформировать почвенно-растительный комплекс, снизить негативное воздействие и вернуть земли в хозяйственное использование.

Из недостатков субстрата отмечается существенное содержание тяжелых металлов, возможное наличие патогенной микрофлоры, радионуклидов и других экологически небезопасных составляющих. Проблема потенциальной опасности загрязнения экосистемы от внесения осадков сточных вод в основном решается обработкой и обеззараживанием. Необходимо проводить оценку каждого осадка сточных вод на применимость в качестве почвенной добавки. Оценка применимости должна учитывать условия земельных территорий, куда планируется внесение осадка. При оценке учитываются: климат региона, рекультивируемые территории, восстанавливаемые почвы, растительные культуры местности и другие факторы. На основе анализа всех факторов составляется расчет доз и план внесения добавки-осадка.

Таким образом, при рациональном подходе к мелиорации и удобрению рекультивируемых территорий горных предприятий осадок сточных вод может не только потенциально заменить часть вносимых удобрений, но и улучшить процессы восстановления среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ объемной плотности и агрегатной устойчивости в перколяционных колоннах / М.М.Хордан, Д.Бек, Э.Гарсия-Санчес, Ф.Гарсия-Оренес // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 877-881. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.877
2. Пашкевич М.А. Оценка потенциальной возможности использования лигнин-шламов для лесохозяйственной рекультивации нарушенных земель / М.А.Пашкевич, Т.А.Петрова, Э.Рудзиш // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 106-112. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.106
3. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 388-392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388
4. Сарапулова Г.И. Эколого-геохимическая оценка почв в зоне техногенных объектов // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 658-662. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.65
5. Alayu E. Brewery sludge quality, agronomic importance and its short-term residual effect on soil properties / E.Alayu, S.Leta // International Journal of Environmental Science and Technology. 2020. Vol. 17. P. 2337-2348. DOI: 10.1007/s13762-020-02630-2
6. Alekseenko V.A. Metallisation and environmental management of mining site soils / V.A.Alekseenko, M.A.Pashkevich, A.V.Alekseenko // Journal of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 174. P. 121-127. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.06.010
7. Benefits and risks of long-term recycling of pharmaceutical sewage sludge on agricultural soil / M.Cucina, A.Ricci, C.Zadra et al. // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 695. № 133762. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133762
8. Bıyıklı M. Effects of food industry wastewater treatment sludge on corn plant development and soil properties / M.Bıyıklı, S.Dorak, B.Bülent Aşık // Polish Journal of Environmental Studies. 2020. Vol. 29. № 4. P. 2565-2578. DOI: 10.15244/pjoes/112897
9. Carabassa V. Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: Effects on soil and vegetation / V.Carabassa, O.Ortiz, J.M.Alcañiz // Land Degradation and Development. 2018. Vol. 29. Iss. 8. P. 2568-2574. DOI: 10.1002/ldr.3071
10. Carabassa V. Soil restoration using compost-like-outputs and digestates from non-source-separated urban waste as organic amendments: Limitations and opportunities / V.Carabassa, X.Domene, J.M.Alcañiz // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 255. № 109909. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109909
11. Capability of the invasive tree *Prosopis glandulosa* Torr. to remediate soil treated with Sewage Sludge / A.M.Abbas, S.K.Abd-Elmabod, S.M.El-Ashry et al. // Sustainability. 2019. Vol. 11. Iss. 9. № 2711. DOI: 10.3390/su11092711
12. Combined effects of green manure returning and addition of sewage sludge compost on plant growth and microorganism communities in gold tailings / Yan-Jun Ai, Fu-Ping Li, Hai-Hong Gu et al. // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 31686-31698. DOI: 10.1007/s11356-020-09118-z
13. Chu Liqian. Toxic metals in soil due to the land application of sewage sludge in China: Spatiotemporal variations and influencing factors / Liqian Chu, Wei He // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 757. № 143813. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143813

14. *Dong Xue*. The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties / Dong Xue, Xiangdong Huang // *Chemosphere*. 2013. Vol. 93. Iss. 4. P. 583-589. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2013.05.065](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.065)
15. Establishment, Growth, and Yield Potential of the Perennial Grass *Miscanthus × Giganteus* on Degraded Coal Mine Soils / S.Jeżowski, M.Mos, S.Buckby et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. № 0076. DOI: [10.3389/fpls.2017.00726](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00726)
16. Effects of sewage sludge amendments on the growth and physiology of sweet basil / M.Burducea, A.Lobiuc, M.Asandulesa et al. // *Agronomy*. 2019. Vol. 9. Iss. 9. № 548. DOI: [10.3390/agronomy9090548](https://doi.org/10.3390/agronomy9090548)
17. *Firpo B.A.* A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts / B.A.Firpo, J.R.Do Amaral Filho, I.A.H.Schneider // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 76. P. 81-86. DOI: [10.1016/j.mineng.2014.11.005](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.005)
18. *Gendler S.G.* Evaluation Principles of the Dust Influence of Mining Enterprises on the Environment / S.G.Gendler, M.L.Rudakov, V.S.Kuznetsov // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. Vol. 56. Iss. 3. P. 62-69. DOI: [10.2478/lpts-2019-0020](https://doi.org/10.2478/lpts-2019-0020)
19. *Ghouthi M.A.* Potential benefits and risk assessments of using sewage sludge on soil and plants: a review / M.A.Al Ghouthi, M.Ali, T.Ahmed // *International Journal of Environment and Waste Management*. 2019. Vol. 23. Iss. 4. P. 352-369. DOI: [10.1504/ijewm.2019.10020556](https://doi.org/10.1504/ijewm.2019.10020556)
20. *Halecki W.* Application of Soil Productivity Index after Eight Years of Soil Reclamation with Sewage Sludge Amendments / W.Halecki, S.Klatka // *Environmental Management*. 2021. Vol. 62. P. 822-832. DOI: [10.1007/s00267-020-01422-1](https://doi.org/10.1007/s00267-020-01422-1)
21. Integrated use of sewage sludge and basalt mine waste as soil substitute for environmental restoration / M.Artico, B.A.Firpo, L.L.Artico, R.M.C.Tubino // *Revista Escola de Minas*. 2020. Vol. 73. Iss. 2. P. 225-232. DOI: [10.1590/0370-44672019730045](https://doi.org/10.1590/0370-44672019730045)
22. *Kelessidis A.* Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries / A.Kelessidis, A.S.Stasinakis // *Waste Management*. 2012. Vol. 32. Iss. 6. P. 1186-1195. DOI: [10.1016/j.wasman.2012.01.012](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012)
23. *Kicińska A.* Evaluating Potential for Using Municipal Sewage Sludge in the Rehabilitation of Ground Degraded by the Sodium Processing Industry / A.Kicińska, J.Gucwa, B.Kosa-Burda // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019. Vol. 102. P. 399-406. DOI: [10.1007/s00128-018-2517-z](https://doi.org/10.1007/s00128-018-2517-z)
24. *Korotaeva A.* Wastewater treatment of mining enterprises from nitrogen compounds in the Arctic // *SHS Web of Conferences*. 2020. Vol. 84. № 04001. DOI: [10.1051/shsconf/20208404001](https://doi.org/10.1051/shsconf/20208404001)
25. *Larney F.J.* The role of organic amendments in soil reclamation: A review / F.J.Larney, D.A.Angers // *Canadian Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 92. № 1. P. 19-38. DOI: [10.4141/CJSS2010-064](https://doi.org/10.4141/CJSS2010-064)
26. *Lobacheva O.* Method for removing valuable components from technogenic solutions by the example of rare earth elements / O.Lobacheva, N.Dzhevaga // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1679. № 042016. DOI: [10.1088/1742-6596/1679/4/042016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042016)
27. *Lytaeva T.A.* Environmental impact of the stored dust-like zinc and iron containing wastes / T.A.Lytaeva, A.E.Isakov // *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. Iss. 3. P. 37-42. DOI: [10.12911/22998993/69355](https://doi.org/10.12911/22998993/69355)
28. Organic wastes as alternative sources of phosphorus for plant nutrition in a calcareous soil / M.Grigatti, E.Boanini, D.Bolzonella et al. // *Waste Management*. 2019. Vol. 93. P. 34-46. DOI: [10.1016/j.wasman.2019.05.028](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.028)
29. *Pashkevich M.A.* Technogenic Impact of Sulphide-Containing Wastes Produced by Ore Mining and Processing at the Ozerne Deposit: Investigation and Forecast / M.A.Pashkevich, T.A.Petrova // *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. Iss. 6. P. 127-133. DOI: [10.12911/22998993/76700](https://doi.org/10.12911/22998993/76700)
30. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds / D.S.Petrov, V.S.Kuznetsov, I.K.Suprun et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. Iss. 5. № 055044. DOI: [10.1088/1742-6596/1399/5/055044](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055044)
31. *Przydatek G.* Analysis of the comprehensive management of sewage sludge in Poland / G.Przydatek, A.K.Wota // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2020. Vol. 22. P. 80-88. DOI: [10.1007/s10163-019-00937-y](https://doi.org/10.1007/s10163-019-00937-y)
32. Sewage sludge fertilization in larch seedlings: Effects on trace metal accumulation and growth performance / M.Bourrioug, L.Alaoui-Sehmer, X.Laffray et al. // *Ecological Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 216-224. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2015.01.031](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.031)
33. Sewage Sludge Application Enhances the Growth of *Corchorus olitorius* Plants and Provides a Sustainable Practice for Nutrient Recirculation in Agricultural Soils / E.M.Eid, A.A.Hussain, M.A.Taher et al. // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2020. Vol. 20. P. 149-159. DOI: [10.1007/s42729-019-00113-z](https://doi.org/10.1007/s42729-019-00113-z)
34. Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: Effects on certain soil properties, growth and yield components / B.Mohamed, K.Mounia, A.Aziz et al. // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 627. P. 681-688. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.01.258](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.258)
35. Sewage Sludge Application Effects to First Year Willows (*Salix viminalis* L.) Growth and Heavy Metal Bioaccumulation / J.Žaltauskaitė, S.Judeikytė, G.Sujetovienė, R.Dagiliūtė // *Waste and Biomass Valorization*. 2017. Vol. 8. P. 1813-1818. DOI: [10.1007/s12649-016-9691-1](https://doi.org/10.1007/s12649-016-9691-1)
36. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land / Wengang Zuoa, Chuanhui Gub, Wenjie Zhang // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 654. P. 541-549. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.127](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.127)
37. *Smirnov Y.D.* Development of the beneficial utilisation of urban sewage sludge using modern analysis methods / Y.D.Smirnov, M.V.Suchkova // *International Conference «Complex equipment of quality control laboratories»*, 14-17 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1384. № 012049. DOI: [10.1088/1742-6596/1384/1/012049](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012049)
38. Soil aggregation in a semiarid soil amended with composted and non-composted sewage sludge – A field experiment / C.Nicolás, J.N.Kennedy, T.Hernández et al. // *Geoderma*. 2014. Vol. 219-220. P. 24-31. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.12.017](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.017)
39. Soil influences on uptake and transfer of pharmaceuticals from sewage sludge amended soils to spinach / R.Kodešová, A.Klement, O.Golovko et al. // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 250. № 109407. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.109407](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109407)
40. *Strizhenok A.* Ecology-Economical Assessment of new Reclamation Method for Currently Working Technogenic Massifs / A.Strizhenok, P.Tcvetkov // *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18. Iss. 1. P. 58-64. DOI: [10.12911/22998993/66251](https://doi.org/10.12911/22998993/66251)

41. Sunflower growth and yield response to sewage sludge application under contrasting water availability conditions / S.D.Koutroubas, V.Antoniadis, C.A.Damalas, S.Fotiadis // *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 154. № 112670. DOI: [10.1016/j.indcrop.2020.112670](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112670)
42. The effects of different sewage sludge amendment rates on the heavy metal bioaccumulation, growth and biomass of cucumbers (*Cucumis sativus* L.) / E.M.Eid, S.A.Alrumman, A.F.El-Bebany et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. P. 16371-16382. DOI: [10.1007/s11356-017-9289-6](https://doi.org/10.1007/s11356-017-9289-6)
43. The evaluation of sewage sludge application as a fertilizer for broad bean (*Faba sativa* Bernh.) crops / E.M.Eid, S.A.Alrumman, A.F.El-Bebany et al. // *Food and Energy Security*. 2018. Vol. 7. Iss. 3. № e00142. DOI: [10.1002/fes3.142](https://doi.org/10.1002/fes3.142)
44. Technosols designed for rehabilitation of mining activities using mine spoils and biosolids. Ion mobility and correlations using percolation columns / M.M.Jordán, E.García-Sánchez, M.B.Almendo-Candel et al. // *Catena*. 2017. Vol. 148. Part 1. P. 74-80. DOI: [10.1016/j.catena.2016.02.027](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.027)
45. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality / W.Melo, D.Delarica, A.Guedes et al. // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 643. P. 1493-1501. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.06.254](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254)
46. The effect of sewage sludge application on soil properties and willow (*Salix* sp.) cultivation / M.Urbaniak, A.Wyrwicka, W.Tołoczko et al. // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 586. P. 66-75. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.02.012](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.012)
47. Utilization of coal fly ash and municipal sewage sludge in agriculture and for reconstruction of soils in disturbed lands: results of case studies from Greece and China / C. D. Tsadilas, Zhenqi Hu, Yinli Bi, Thomai Nikoli // *International Journal of Coal Science and Technology*. 2018. Vol. 5. P. 64-69. DOI: [10.1007/s40789-018-0202-9](https://doi.org/10.1007/s40789-018-0202-9)
48. Valorization of sludge from the quartz industry as soil amendment and crop production / M.Delgado, F.J.Maeso, J.V.Martín et al. // *Soil and Tillage Research*. 2019. № 194. № 104320. DOI: [10.1016/j.still.2019.104320](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104320)

Авторы: Т.А.Петрова, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-5914-6395> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Э.Рудзиш, аспирант, rudzisha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6728-4576> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 18.10.2021.

Выход в свет 16.12.2021.