

## Рекультивация пострадавших земель с применением осадка промышленных сточных вод

Т.А. ПЕТРОВА<sup>1</sup>, Э. РУДЗИША<sup>1</sup>, А.В. АЛЕКСЕЕНКО<sup>1,2</sup>, Жауме БЕХ<sup>3</sup> ✉, М.А. ПАШКЕВИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт комплексного управления материальными потоками и ресурсами

Университета Организации Объединенных Наций (УООН-ФЛОРЕС), Дрезден, Германия

<sup>3</sup> Барселонский университет, Барселона, Испания

✉ jaumebechborras@gmail.com

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** Petrova, T.A.; Rudzisha, E.; Alekseenko, A.V.; Bech, J.; Pashkevich, M.A. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge. *Minerals* 2022, 12, 376. <https://doi.org/10.3390/min12030376>

**Аннотация:** Бросовые земли горнодобывающей промышленности являются одними из крупнейших нарушенных территорий, требующих рекультивации. Для снижения воздействия на окружающую среду и более рационального использования этих георесурсов важнейшими аспектами являются формирование устойчивых растительно-почвенных комплексов и возрождение функции самовосстановления почв. Для успешного восстановления растительного покрова на участках после добычи полезных ископаемых необходимо устранить дефицит органического вещества. Для этого мы оценили возможности использования нетрадиционных мелиорантов, чтобы лучше понять выгоду от взаимной зависимости экологических ресурсов. Для предотвращения потерь и замыкания ресурсных циклов мы изучили возможность использования осадка сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов (ОСВЦБК) в качестве добавки для противодействия деградации почв и восстановления нарушенных человеком земель. В качестве субстрата для внесения смеси осадка с торфом и последующего посева травы *in vitro* использовали отходы известняка, березита и фосфогипса с мест добычи полезных ископаемых. Сформированный растительный покров проанализировали для сравнения всхожести и прироста биомассы на реконструированных почвах. Эффективность комбинаций мелиорантов оценивали двумя методами: (1) традиционным методом срезания растительного материала для измерения полученной биомассы растений и (2) анализом цифровых изображений на RGB-фотографиях растительного покрова ( $r^2 = 0,75-0,95$ ). Влияние ОСВЦБК на биомассу растительного покрова и высоту травы показало схожие результаты: рекультивация земель с формированием 20-сантиметрового слоя почвы на отвалах шахт была экологически приемлемой при соотношении ОСВЦБК и почвы 1:3. Однако избыточное внесение (соотношение ОСВЦБК и почвы 1:1) негативно сказывалось на всхожести семян и вегетации растений.

**Ключевые слова:** устойчивое управление землепользованием; переработка отходов; восстановление почвы; производство биомассы; восстановление земель; развитие после добычи полезных ископаемых; взаимосвязь ресурсов.

## Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge

Tatyana A. PETROVA<sup>1</sup>, Edelina RUDZISHA<sup>1</sup>, Alexey V. ALEKSEENKO<sup>1,2</sup>, Jaume BECH<sup>3</sup> ✉, and Mariya A. PASHKEVICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources, United Nations University, Dresden, Germany

<sup>3</sup> University of Barcelona, Barcelona, Spain

✉ jaumebechborras@gmail.com

**Abstract:** Wastelands of the mining industry are among the largest of disturbed areas that demand revitalization. To reduce environmental impact and to better manage these geo-resources, the formation of sustainable plant and soil complexes and the restoration of self-recovery soil function are critical points. The successful return of vegetative cover at post-mining sites requires eliminating the deficiency of organic matter. For this, we assessed the usability of non-traditional ameliorants to provide a better understanding of benefits from mutual dependencies of environmental resources. To prevent losses and to close resource cycles, we studied the applicability of wastewater sludge from the pulp and paper (SPP) industry as an amendment to counteract soil degradation and rehabilitate human-disturbed lands. Waste rock limestone, beresite, and phosphogypsum substrates of postmining sites were used *in vitro* for the application of sludge and peat mixture and consequent grass seeding. The formed vegetative cover was analyzed to compare the germination and biomass growth on reconstructed soils. We assessed the efficiency of ameliorant combinations by two approaches: (1) the traditional technique of cutting-off plant material to measure the obtained plant biomass, and (2) digital image analysis for RGB-processed photographs of the vegetative cover ( $r^2 = 0.75-0.95$ ). The effect of SPP on plant cover biomass and grass height showed similar results: land rehabilitation with the formation of a 20 cm soil layer on mine waste dumps was environmentally suitable with an SPP:soil ratio of 1:3. However, excessive application (ratio 1:1 of SPP to the soil) negatively affected seed germination and plant vegetation.

**Keywords:** land revitalization; post-mining development; sustainable land-use management; resource nexus; waste recycling; soil restoration; biomass production.

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

## 1. Введение

### 1.1. Восстановление территорий после добычи полезных ископаемых

Участки после добычи полезных ископаемых относятся к землям, подвергшиеся техногенному воздействию, в связи с невозможностью их использования в соответствии с хозяйственным и административным назначением, высокой степенью деградации земель, а также неблагоприятными экологическими последствиями ветровой дефляции и водной эрозии [1, 2].

Основное воздействие оказывают подвергшиеся техногенному воздействию территории отвалов горнодобывающей промышленности [3]. Эти участки характеризуются комплексным нарушением ландшафта [4, 5], геохимической трансформацией и физическим нарушением почв. Улучшить местную экологическую ситуацию можно за счет устойчивого управления землепользованием путем проведения мероприятий по рекультивации и (или) консервации [6, 7]. Сочетание инженерных и биологических работ позволяет сформировать устойчивый почвенно-растительный комплекс [8, 9] и провести дальнейшую фитостабилизацию [10].

Согласно Всемирной справочной базе почвенных ресурсов Продовольственной и сельскохозяйственной организации (ПСО) ООН, исследуемые почвы относятся к техносолям, т.е. их техническое происхождение преобладает над их свойствами и почвообразовательным процессом. Для успешного развития растительного покрова на этих почвах необходимо устранить дефицит органического вещества [8, 11, 12]. Восстановление баланса минеральных и органических компонентов улучшает структуру техносолей [13-16], оптимизирует почвенные условия [17, 18] и обеспечивает местные биоценозы питательными веществами [19-21].

### 1.2. Осадок сточных вод как потенциальный мелиорант

Правильный выбор мелиорантов является одним из решающих моментов в восстановлении земель после добычи полезных ископаемых: приоритетными являются недорогие органические добавки с пролонгированным действием. В этом аспекте осадок сточных вод (ОСВ) изучается как нетрадиционный мелиорант для рекультивации нарушенных человеком земель [22].

Осадок сточных вод образуется как остаточный продукт биологического этапа очистки сточных вод, поэтому ОСВ может характеризоваться разнообразным набором продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. Осадок сточных вод содержит высокую концентрацию органических веществ и многочисленные питательные элементы, в том числе азот и фосфор. Это делает ОСВ потенциально недорогим органическим мелиорантом для рекультивации земель [23-25].

Высокое содержание фосфора позволяет классифицировать ОСВ как фосфорный мелиорант. В почвах, обработанных ОСВ, повышается доля доступного для растений Р [20, 26, 27] и N [28, 29]. Большое количество органического вещества в осадке повышает агрегатную устойчивость, что положительно сказывается на физических характеристиках почвы с точки зрения ее водоудерживающей способности [20], плотности и устойчивости к эрозии [14, 28, 29]. С другой стороны, в обработанной почве также отмечается повышенное содержание ряда других питательных веществ – К, Са, Mg и Na [20, 29], а также металлов – Cu, Zn, Pb, Mn, Cr и Cd [30-33].

В связи с повышенным содержанием металлов и экологическим риском их выщелачивания, миграции и накопления необходимо учитывать рН обработанной почвы [34, 35]. В основном рН ОСВ определяется в диапазоне 6,5-7,5 [20, 36-38]. Однако внесение осадка не одинаково влияет на кислотность и электропроводность почвы [29, 39]. Результаты исследований свидетельствуют как о повышении [30, 40], так и о снижении [24, 41] кислотности почвы после внесения осадка.

Внесение оптимальных доз осадка (не более 15-45 %) улучшает растительный покров [37, 42, 43], стимулирует производство биомассы [20, 43, 44] и положительно влияет на скорость роста растений [20, 30, 37, 43, 45]. Однако могут быть достигнуты и противоположные результаты. В работах [27, 46, 47] чрезмерное внесение ОСВ привело к ингибированию роста растений, что может быть связано с достижением порога фитотоксичности осадка.

Различия в воздействии ОСВ на почвенно-растительные комплексы можно объяснить неоднородностью состава осадков. Химический состав и физико-химические свойства осадка могут варьировать в зависимости от типа сточных вод, системы очистки и обработки осадка [31, 48].

Осадки муниципальных сточных вод (МОСВ) активно используются в качестве почвенной добавки в сельском и лесном хозяйстве, для восстановления земель и рекультивации неплодородных почв. Несмотря на то, что в состав МОСВ входят отходы жизнедеятельности микроорганизмов, в основном относящиеся к малоопасным веществам (например, по классификации Федерального закона РФ № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»), осадок может содержать значительное количество токсичных неорганических и органических соединений, опасных патогенов и высокие концентрации металлов [20, 31, 42, 49]. Чтобы предотвратить загрязнение почвы, осадок перерабатывается путем стабилизации и дезинфекции, а также оценивается на соответствие нормативным требованиям. В настоящее время нормирование осуществляется в основном по общим характеристикам: химическому составу, содержанию металлов и количеству патогенов (согласно ГОСТ Р 54534-2011, ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 и ГОСТ Р 54651-2011).

В связи с различиями в химическом составе и физико-химических свойствах осадков сточных вод промышленного происхождения требуется отдельная оценка их применимости [50]. В данной работе в качестве решения проблемы предлагается использовать осадки сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов (ОСВЦБК) для пополнения органического вещества и питательных веществ на рекультивационных отвалах. Семь из десяти крупнейших ЦБК Российской Федерации (рис. 1) находятся в Северо-Западном федеральном округе РФ. Объем производства составляет более трех тысяч тонн сухого ОСВЦБК в год (без обезвоживания влажность ОСВЦБК составляет более 80-90 %). В этом же округе 123,3 тыс. га нарушенных территорий нуждаются в рекультивации (по данным государственного доклада "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году").

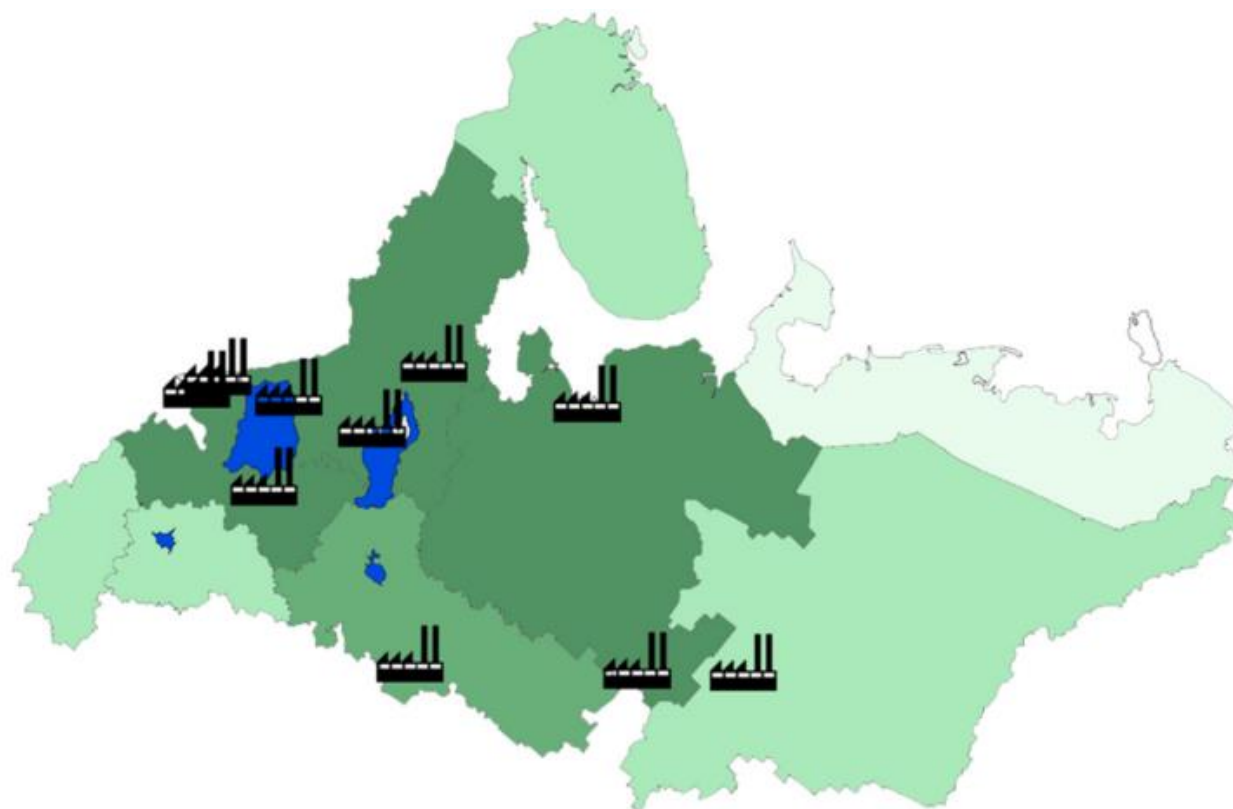


Рис. 1. Карта крупнейших целлюлозно-бумажных комбинатов в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации; зеленым цветом обозначены объемы производства, синим – водные объекты

Состав и физико-химические характеристики ОСВЦБК указывают на их мелиоративный потенциал. Отмечается высокое содержание органического вещества, фосфора, азота и питательных макро- и микрокомпонентов (таких как Ca, Fe и Mn), как и в МОСВ [51]. Однако есть и результаты с низким содержанием питательных веществ [52], что подтверждает необходимость оценки каждого осадка.

Осадки сточных вод целлюлозно-бумажных комбинатов (ОСВЦБК) и МОСВ отличаются наличием примесей лигнина и целлюлозного волокна [53], а также повышенным соотношением C: N, что может быть препятствием для доступного азота [54]. Что касается обрабатываемой почвы, то ОСВЦБК улучшает водоудерживающую способность [54], а наличие клетчатки улучшает структуру почвы и снижает эффект водной эрозии [55]. Это делает ОСВЦБК потенциально недорогим органическим мелиорантом.

Поэтому основной целью данной работы является оценка эффективности ОСВЦБК в качестве почвенной добавки для нарушенных после горных работ территорий, для чего необходимо решить следующие задачи: (1) определение ОСВЦБК и оптимального состава почвы для рекультивации пустыря, и (2) оценка эффективности роста и формирования растительного покрова на рекультивированных слоях почв с составом шахтных отходов.

### *1.3. Оценка пригодности нетрадиционных мелиорантов*

При оценке пригодности нетрадиционных мелиорантов рассматриваются два вопроса: (1) мелиоративный потенциал и (2) экологическая безопасность субстрата.

Оценка мелиорантов основывается на двух методах: прямой и косвенной оценке субстрата. Прямая оценка заключается в анализе химического состава и физико-химических характеристик мелиоранта и их соответствия регламентированным нормам. Косвенные методы предполагают оценку мелиоранта через оценку воздействия на: (1) растения – анализ роста и вегетации растений [56-58], и (2) почвенные организмы – качественный и количественный состав почвенных микроорганизмов.

Преимущество таких косвенных методов заключается в оценке воздействия мелиоранта на два наиболее влиятельных фактора экологически эффективного восстановления техносолой: (1) на растения, для снижения негативного воздействия на окружающую среду за счет формирования дернового слоя [59] и (2) на почвенные организмы, играющие существенную роль в основных процессах почвообразования. Данный метод позволяет сократить временные, трудовые и материальные затраты на определение всего спектра возможных компонентов и физико-химических характеристик анализируемого мелиоранта (токсичных органических соединений, пестицидов, металлов, различных солей и т.д.) [46,58].

## **2. Материалы и методы**

Основное внимание мы уделили оценке скорости формирования почвенно-растительного комплекса при мелиорации и рекультивации нарушенных земель. Формирование почвенно-растительного комплекса оценивали по анализу роста и развития травянистых растений на сформированных моделях слоев шахтных отходов. Для анализа роста и развития растительного покрова мы использовали два метода измерений: традиционный подход сбора и пересчета растительного материала и альтернативные цифровые методы обработки данных [60-63].

### *2.1. Материалы*

#### *2.1.1. Осадок сточных вод*

Осадок сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (ОСВЦБК) был взят с биологических очистных сооружений производства сульфитной целлюлозы. Осадок представлял собой отходы серой массы, состоящие в основном из избыточного активного ила с различными возможными включениями: лигнинные вещества, глинозем, целлюлозные волокна [43, 53, 55]. По данным Хечми и др. [64], осадок высушивали и оставляли на инкубационный период до 90 дней для снижения фитотоксичности осадка и стабилизации соединений. Основные свойства ОСВЦБК (рН, общее содержание C, N и K, металлов – Mn, Zn, Cu и Pb) определяли стандартными методами: содержание углерода, водорода и азота определяли в воздушно-сухом состоянии образцов ОСВЦБК на анализаторе LECO CHN628 (США); содержание фосфора – на спектрофотометре Nach Lange DR 5000 (Германия); качественный химический анализ металлов – на атомно-эмиссионном спектрометре Shimadzu ICPE 9000 (Япония). Состав осадка представлен в табл. 1.

**Результаты физико-биохимических свойств использованного ОСВЦБК  
в сравнении со средними составами осадков муниципальных сточных вод (МОСВ)  
и осадков целлюлозно-бумажной промышленности (ОСВЦБК)**

Характеристика	ОСВЦБК	МОСВ	ОСВЦБК
	Эта работа	Ref.	Ref.
pH	6.00 ± 0.50	6.6 [33], 6.86 [38] 6.96 [37], 6.98 [65] 7.05 [36] 7.03–7.12 [42]	6.11 [66] 6.56 ± 0.09 [67] 6.71 [68] 7.38 ± 0.09 [69]
Электропроводность, мкс/см	0.56	2.61 [36], 2.83 [26], 2.85 [33]	1.15 ± 1.44 [67] 1.70 [68]
Organic matter, %	96.00 ± 0.1	26.6 [37], 27.57 [38] 52.7 [36], 65.0 [65] 83.2 [26], 83.5 [70]	10.82 [66] 63.7 [68]
C, %	47.21 ± 0.15	Organic 47.7 ± 13.7 [71] Total 41.6 ± 3.5 [72]	6.28 [66] 26.0 [52] 41.2 [73]
N, %	0.36 ± 0.05	4.83 [37], 5.22 [26] 19.4 [42] 78 [33]	1.68 [52] 3.90 [68] 4.18 [73]
P, %	0.16 ± 0.05	2.43 [37], 3.9 [70] 20.2 [42]	0.29 [52] 0.867 [73] 2 [55], 3.83 [68]
Mn, mg/kg	Ниже предела обнаружения	210 [20] 560.70 [65]	109.7 ± 3.1 [69]
Zn, mg/kg	430 ± 50	534 [36], 592.8 [70], 667.62 [65] 952.1 [37], 1062 [20]	165 [52] 258.0 ± 7.2 [69]
Cu, mg/kg	210 ± 10	90.0 [36], 96.00 [38] 162.56 [65] 843.8 [70], 975 [42]	69 [52] 133 ± 15 [69]
Pb, mg/kg	Ниже предела обнаружения	13.53 [38], 15.9 [70] 48.2 [20] 186 [42]	33.5 ± 1.1 [69]

В зависимости от источника литературы, в котором проводился обзор, точность данных может быть не представлена авторами. Для параметров с существенно различающимися цифрами (например, органическое вещество) цифры были показаны в одном ряду, если значения были достаточно близки.

#### 2.1.2. Добыча горных пород для восстановительного слоя

В эксперименте использовались три типа горных отходов: (1) пустая порода из золотодобычи, (2) фосфогипс из хранилищ при производстве фосфорных удобрений и (3) дробленый известняк из шахтных отвалов. В (1) березит – это низкотемпературная метасоматическая порода, характеризующаяся наличием кварца, серицита и карбонатов, образовавшаяся в результате замещения как магматических, так и осадочных протолитов. Горнодобывающие предприятия России дают большие массы этих пустых пород; состав исследованных образцов приведен в таблице 2.

Средний состав пустой породы, минералы перечислены в порядке убывания

Углеродистые березиты, С (Всего) = 0,5–9,0 %				Аргиллизиты-березиты, С (Всего) ≤ 0,03–1,20 %			
Неизмененные	Мало измененные (5–15 %)	Повсеместное изменение (15–50 %)	Большие изменения (>50 %)	Мало измененные (5–15 %)	Повсеместное изменение (15–50 %)	Большие изменения (>50 %)	
						Серицитовые	Кварцитовые
кварц	кварц	кварц	кварц	гидросерицит	карбонатная порода	серицит	кварц
плагиоклаз	биотит	гидросерицит	сульфид (пирит, мышьяковистый пирит)	кварц	sericite	карбонатная порода	серицит
К-полевошпат	мусковит	карбонатная порода (анкерит)	карбонатная порода	sericite	кварц	кварц	карбонатная порода
биотит	гидросерицит	серицит	+/- серицит	каолинит	каолинит	каолинит	каолинит
мусковит	серицит	углеродистое вещество	гидросерицит	+/- карбонатная порода	+/- гидросерицит	pyrite	pyrite
углеродистое вещество	углеродистое вещество	pyrite		клинкстоун	клинкстоун	+/- клинкстоун	+/- клинкстоун
	карбонатная порода	+/- мусковит		мусковит	пирит		
	турмалин	турмалин		пирит			

В (2) фосфогипс – это гидрат сульфата кальция, образующийся как побочный продукт при производстве фосфорных удобрений и состоящий в основном из  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (>80 %). Объем отходов, захороненных на объектах утилизации и хранения гипса, может достигать десятков миллионов тонн [50]. В (3) дробленый известняк состоит в основном из минерала карбоната кальция (>97 %) из шахтных отвалов. Согласно анализу гранулометрического состава, диаметр щебня варьировал от 8 до 25 мм. Лабораторный анализ образцов шахтных отходов показал их близкую геохимическую близость к глобальным содержаниям элементов (табл. 3).

Таблица 3

Средний элементный состав отработанных шахтных отходов, мг/кг

Березит пустая порода		Фосфогипс		Известняк	
Mg	8300	S	236,600	Ca	387,604
Na	8770	Ca	280,202	Mg	17,000
Ca	8050	Si	3597	Mn	23.00
Ti	6000	P	3226	V	2.10
Mn	840	Al	1799	Zn	1.20
Ba	720	Fe	1747	Ni	1.20
V	180	F	1600	Cd	0.74
Sr	130	Na	297	Cu	0.47
Zn	102	K	249	Pb	0.10
Cr	99	Cl	181	As	0.10
Ni	75	Mg	200	Sb	0.10
Cu	49	Mn	77		
As	31				
Co	23				
Pb	14				
Cd	2				
Mo	1				

### 2.1.3. Почва

Почва естественного происхождения для контрольной группы была отобрана в Ленинградской области на полевозащитной территории как почва измененная человеком (рис. 2, N60.2811, E30.2342). Образцы почвы представляли собой верхний 30-сантиметровый плодородный слой деформированных песчаных подзолов (>80 % фракции 0,05-2,00 мм). Плотность почвы составляла  $1,3 \pm 0,05$  г/см<sup>3</sup>, рН воды –  $5,00 \pm 0,5$ , содержание органического вещества –  $6,85 \pm 0,7$  %. Почву высушивали на воздухе и пропускали через 2-миллиметровое сито.

### 2.1.4. Торфяная смесь

Торфяная смесь является альтернативным экспериментальным мелиорантом для сравнения и оценки степени применимости ОСВЦБК в качестве почвенной добавки. Торфяная смесь была исследована в связи с ее широким распространением в качестве добавки в почву при проведении работ по восстановлению почв. В качестве торфяной смеси использовался коммерческий продукт – просеянный и раскисленный торф средней степени разложения с добавлением извести (100-180 мг/л азота ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ), 135-255 мг/л фосфора ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), 115-215 мг/л калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ), рН~5-6).

### 2.1.5. Растительный материал

Влияние почвенных добавок оценивалось на смеси двух видов растений семейства злаковых: райграса *Lolium perenne* и овсяницы луговой *Festuca pratensis*. Райграс и овсяница являются местнораспространенными видами флоры, которые хорошо адаптируются к антропогенным условиям и рекомендуются для рекультивации земель. Норма высева травосмеси составляла 200 т/км<sup>2</sup> (20 ц/га), согласно ГОСТ Р 57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель. Восстановление биологического разнообразия».

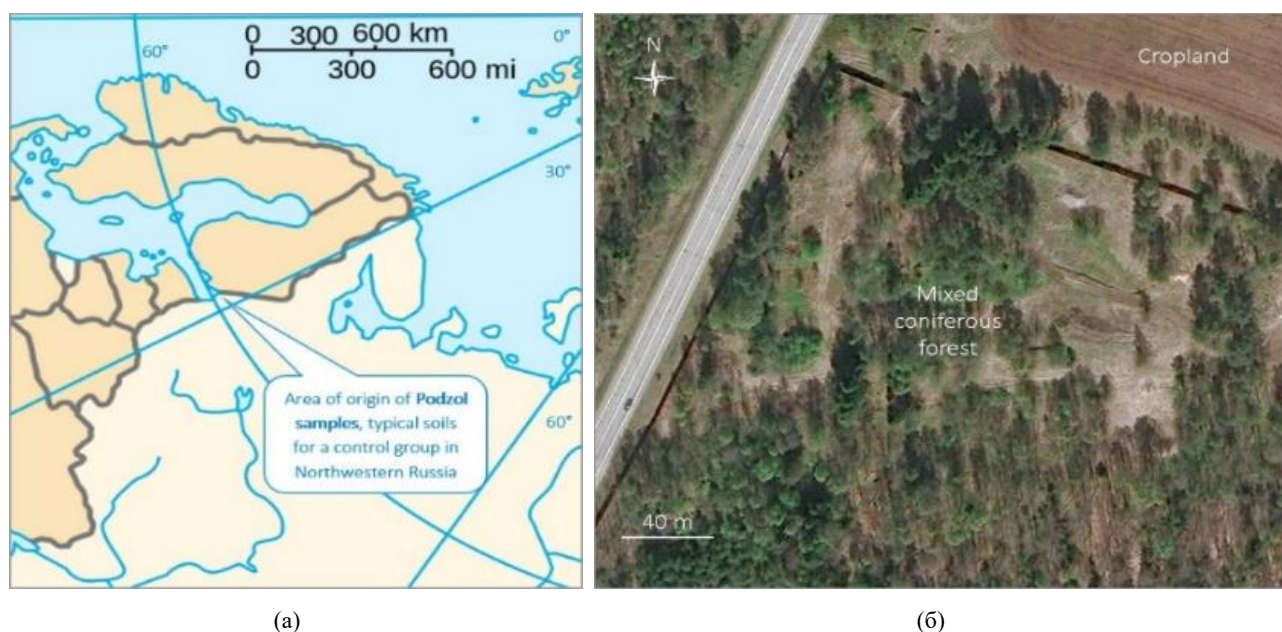


Рис. 2. Территория отбора почвенных образцов:  
 (а) происхождение типичных почв хвойных лесов Ленинградской области  
 (на основе бесплатной карты, commons.wikimedia.org);  
 (б) сельскохозяйственные угодья и лесозащитные полосы с нарушенными подзолами к западу и югу от расчищенного поля сельского поселения Агалатово (на основе спутникового снимка Яндекс)

## 2.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из моделей слоев шахтных отходов (поверхность отвала) и почвы с растительным покровом. Модели формировались на рабочей поверхности размером  $15 \times 15$  см по следующей схеме: слой отвальных отходов толщиной 15-20 см и 20 см окультуренной почвы с почвенными добавками, как минимально необходимая толщина слоя для рекультивации земель.

Сравнительная оценка проводилась по двум видам мелиорантов (почвенных добавок): осадку сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности и торфяной смеси как альтернативной почвенной добавке. Внесение почвенных добавок осуществлялось в трех установленных соотношениях на основе рекомендаций по внесению торфосмеси, рекомендаций по оптимальной плотности почвы для травянистых растений, литературного обзора научных работ в этой области и предварительных анализов субстратов. Для оценки эффективного соотношения почвенной добавки и почвы все остальные модели формировались с добавлением мелиорантов в соотношениях (по объему) 1:1, 1:2, 1:3 (ОСВЦБК/торф:почва).

После стабилизации комплексов (1 неделя) во всех моделях равномерно высевали семена травянистых растений. Общая схема модельных комплексов и принцип их формирования показаны на рисунке 3.

Комплекс моделей устанавливался в благоприятных микроклиматических условиях ( $T > 20^{\circ}\text{C}$ ;  $RH$  (атм)  $< 50\%$ ,  $W$  (почва)  $< 80\%$ ) со светодиодными фитосветильниками, обеспечивающими необходимые условия освещения (полный спектр свечения, 35 Вт/лампа).

Эксперимент проводился в течение 70 дней, чтобы завершить все вегетативные периоды трав (60-70 дней); результаты исследования представляют 40 дней, чтобы оценить стадию экспоненциального роста трав (райграс *Lolium perenne* и овсяница луговая *Festuca pratensis*). У растений измерялись следующие параметры: всхожесть семян, прирост биомассы и скорость роста.

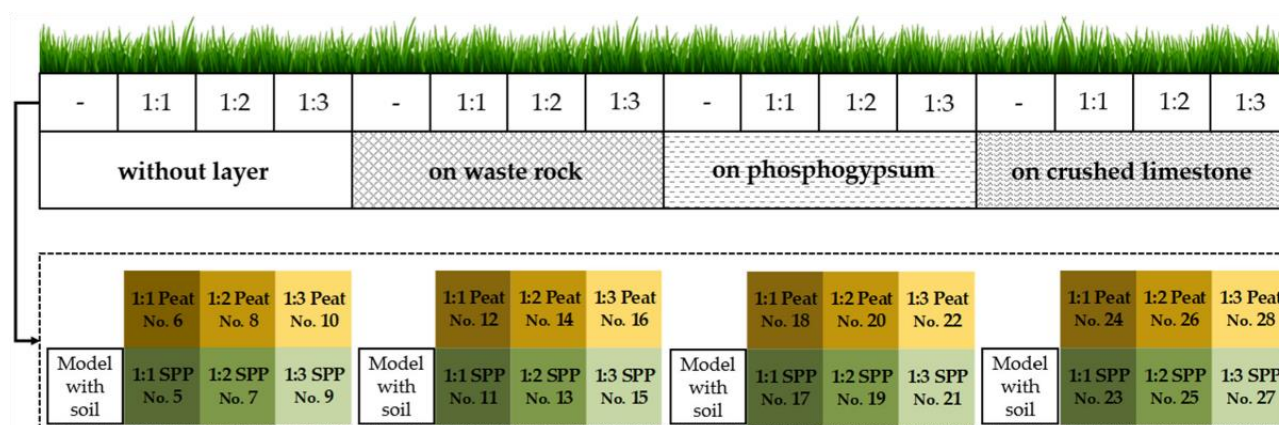


Рис. 3. Схема формирования 28 типов моделей с видами сбоку и сверху.

Модели состоят из: А – контрольные модели с почвой на разных слоях, В – шесть типов моделей с различными субстратами (ОСВЦБК, торф с почвой) и их соотношениями (1:1, 1:2, 1:3) без слоя рекультивации, С – шесть типов моделей на слое рекультивации из пустой породы, D – шесть типов моделей на слое рекультивации из фосфогипса, E – шесть типов моделей на слое рекультивации из дробленого известняка

### 2.3. Метод измерений с независимым получением данных (dia) для пробной оценки растительного покрова

Оценка применимости нетрадиционных мелиорантов для растительного покрова включает два подхода к измерениям: (1) традиционный метод измерения физических величин (всхожесть семян, высота травы) и среза растительного материала и (2) метод с использованием цифрового анализа изображений (DIA).

Метод DIA заключается в систематическом подходе к фотографированию растительного покрова после анализа растительного материала [60, 62, 74]. Преимущество этого метода (по сравнению с традиционным) заключается в получении данных без больших затрат материалов и времени (метод проводится без уничтожения анализируемого растительного материала) [60, 75, 76].

Метод измерения DIA заключался в сборе данных (съемка растительного материала) и обработке цифровых изображений с помощью RGB (аддитивной цветовой модели). Цифровая обработка изображений проводилась с помощью открытого программного обеспечения ImageJ на базе Java следующим образом: (1) удаление фона (почвы, камней, различных включений и т.д.) [62, 77, 78], подсчет [78], классификация [79], обработка информации на основе цветокоррекции [62, 75], измерение определяемых физических величин (количество единиц пикселей, округлость, линии для пересчета биомассы, семян и побегов) [62, 80].

#### 2.4. Анализ роста растений и вегетации

Растительный покров и накопление растительной биомассы необходимы для восстановления техногенной экосистемы [8]. Растительный покров предотвращает деградацию земель и загрязнение воздуха за счет ветровой дефляции и водной эрозии. Устойчивый растительный и почвенный покров благотворно влияет на экологическую безопасность и качество окружающей среды.

Оценка растительного покрова проводилась на всех стадиях роста травянистых растений: прорастание и стадия экспоненциального роста по биомассе и высоте растений. Для биомассы и скорости роста растений использовался анализ сигмоидальной функции Гомпертца [81].

##### 2.4.1. Прорастание

Анализ всхожести включал в себя сравнительную оценку процента всхожести семян в исследуемых моделях и контрольных группах моделей. Анализ всхожести проводился на двух видах травянистых растений – райграсе *Lolium perenne* и овсянице луговой *Festuca pratensis*. Расчет всхожести оценивался по количеству проросших семян (%) на 5-7 день со дня посева. Пересчет проводился с помощью цифровой обработки изображений.

##### 2.4.2. Биомасса растительного покрова

Биомассу растительного покрова анализировали двумя методами измерения: традиционным, с уничтожением растительного материала, и методом цифровой обработки данных. Оба метода измерения проводились в период экспоненциального роста травяного покрова:

Прямое визуальное измерение (традиционный метод): раз в две недели проводились трехкратные срезы надземной части растений (3 см от земли) для измерения прироста биомассы.

Цифровой анализ изображений (альтернативный метод): Этот метод основан на анализе цифровых RGB-изображений растительного покрова. Метод проводился на основе съемки RGB-изображений в течение 2-3 дней для оценки прироста биомассы через ИПЛ (индекс площади листьев). Индекс характеризует растительный покров как площадь растительного покрова на единицу площади поверхности (земли). Безразмерная величина отражает проективную площадь растительной единицы (ИПЛ = площадь листьев/площадь земли,  $m^2/m^2$ ) [62,75]. Пример результатов RGB-обработки изображения представлен на рисунке 4.

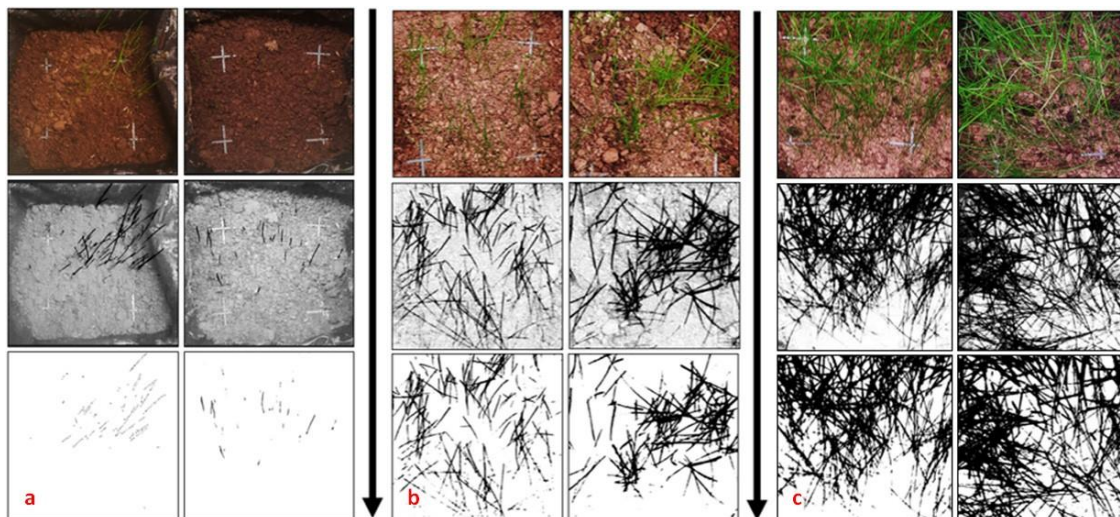


Рис. 4. Пример изображений для цифровой обработки RGB-изображений (поэтапно) для травяного покрова на разных стадиях вегетации (1, 2, 3 недели): (а) RGB-изображение до цифровой обработки; (б) цветокоррекция для удаления фона; (в) удаление фона (почвы, камней, различных вкраплений и т.д.)

##### 2.4.3. Показатель высоты растительного покрова

Скорость роста растительного покрова анализировали методом DIA, который основан на анализе цифровых RGB-изображений растительного покрова [82]. Метод заключался в 2-3-дневной съемке RGB-изображений травяного покрова по высоте на черном фоне с измерительной шкалой рядом с растительным покровом. Шкала выбиралась автоматически на изображении, и по ней рассчитывалось соотношение пиксель/мм. Фон отделялся от растения полуавтоматически. Оцифровка травяного покрова для оценки высоты растительного покрова основывалась на сравнении полученных измеренных линий роста с размерными метками.

#### 2.4.4. Анализ данных

Для анализа экспериментальных данных использовали программное обеспечение Origin 8.5 Pro (Корпорация OriginLab, Нортгемптон, Массачусетс, США) и программу ImageJ на языке Java с открытым исходным кодом. Проверяли нормальность распределения и однородность дисперсии; различия между обработками анализировали с помощью тестов ANOVA.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Проращивание

Проба на проращивание проводилась для оценки эффективности мелиорации субстратов по сравнению с контрольной почвой, а также для оценки фитотоксичности обработанной почвы. Проба на всхожесть выявляет неподходящие условия, т.е. засоленность почвы, наличие токсичных соединений и дефицит питания растений [54,58,83].

Анализ проращивания и роста биомассы показали, что проращивание семян в исследованных почвенно-растительных комплексах травосмеси (райграс *Lolium perenne* и овсяница луговая *Festuca pratensis*) зависело от: (1) соотношения компонентов и (2) слоев пустой породы. Результаты проращивания показаны на рисунке 5.

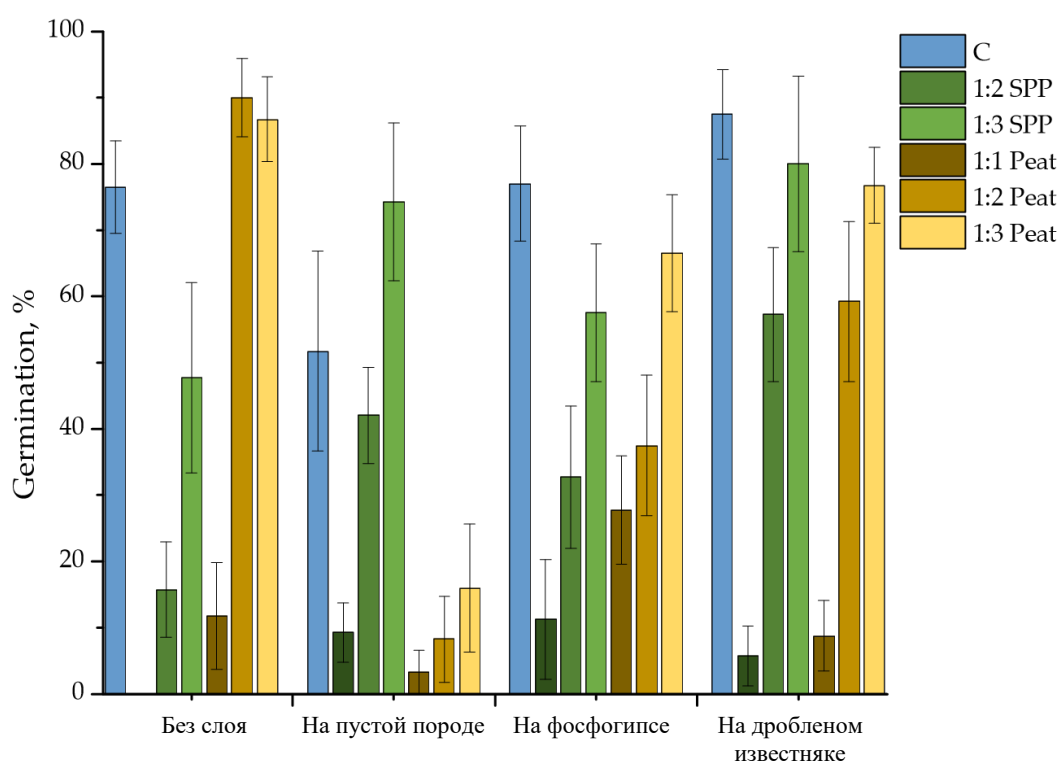


Рис. 5. Диаграммы всхожести семян (%) по четырем группам рекультивационных слоев с семью типами моделей – контрольная модель (почва), осадок сточных вод ОСВЦБК и торфяная смесь: А – без слоя, В – на пустой породе, С – на фосфогипсе, D – на дробленном известняке.

Данные представляют собой среднее значение из 4 реплик; вертикальные столбики указывают на стандартные отклонения

Результаты показали высокий уровень всхожести на контрольной почве (~70-80 %) по сравнению с обработанной, что объясняется ОСВЦБК высоким плодородием контрольной почвы. Оптимальные условия для проращивания семян были получены при: (1) соотношении 1:2 (торф:почва) – 50-60 %, и, (2) соотношении 1:3 (торф:почва) – 65-75 % и 60-70 %. Результаты показали нефитотоксичный эффект ОСВЦБК в оптимальных соотношениях для райграса и овсяницы луговой. Однако почвы, обработанные торфяной смесью, показали более высокие результаты проращивания семян в большинстве типов слоев, чем почвы, обработанные ОСВЦБК.

Резкое ингибирование проращивания семян наблюдалось на почвах, обработанных большим количеством ОСВЦБК, 1:1. Аналогичные результаты наблюдались и в более ранних исследованиях [16, 69]. Следовательно, следует избегать высоких доз ОСВЦБК, чтобы предотвратить негативное влияние на формирование растительного покрова.

Оценка прорастания семян райграса и овсяницы луговой на рекультивированных слоях показала разницу во всхожести, которая может быть объяснена: (i) нейтрализацией почвенного слоя в результате образования отвалов (слоев), (ii) оптимальными режимами (воздушным, водным и питательным) и (iii) степенью увлажнения почвы. Оптимальные воздушные режимы определяются плотностью субстрата и соотношением компонентов, водный режим зависит от влагоемкости и водопотерь субстратов, соотношение питательных веществ – от содержания вносимых компонентов в исходной добавке. Факторы (ii) и (iii) могут формироваться за счет различий в плотности субстрата и соотношении компонентов, а влияние фактора (i) подтверждается анализом биомассы растительного покрова и процента прорастания на моделях пустой породы. Самые низкие результаты наблюдались в модельных группах, сформированных на пустых породах, а самые высокие – на слое дробленого известняка.

Говоря о несхожести результатов, мы предполагаем, что на разницу во всхожести семян могло повлиять несколько факторов. Низкую всхожесть семян на пустой породе можно объяснить гранулометрическим составом: остальные модельные смеси имеют формирующийся минеральный слой с низкой водопроницаемостью, в то время как образцы щебня березита толщиной 1-4 см обеспечивают лучший дренаж и, таким образом, могут способствовать дефициту влаги при равных лабораторных осадках. Кроме того, ОСВЦБК характеризуется более высокой водоудерживающей способностью по сравнению с торфяной смесью, поэтому прорастание семян на пустой породе существенно различается. Контрольные образцы подтверждают эту гипотезу: учитывая вариативность прорастания на чистом слое, дробленом известняке и фосфогипсе, мы видим уровни, близкие к 80 %, в то время как на пустой породе процент обычно ниже 70 % и приближается к 50 %. Кроме того, капиллярное поглощение металлов из минеральных веществ может ингибировать травы, о чем сообщалось в ранних исследованиях Аоямы и Куроянаги [83] и в недавних лабораторных исследованиях Вевюры и Зурека [84] и ряда других авторов.

В целом, результаты анализа прорастания семян показали, что при внесении рационального количества ОСВЦБК фитотоксическое действие на прорастание семян из обработанной почвы отсутствует. Однако на результаты экспериментов могли повлиять многие другие факторы: засоленность [54,58,84] (и ЕС [85]), избыточное содержание аммонийного азота [16,54,58], высокое содержание металлов [54] и плохая физическая структура [86].

### 3.2. Биомасса растительного покрова

Анализ биомассы участков проводился в трехкратных измерениях путем взвешивания срезов растительного материала. Результаты анализа биомассы растительного покрова (вес срезов растительного материала) представлены на рисунке 6.

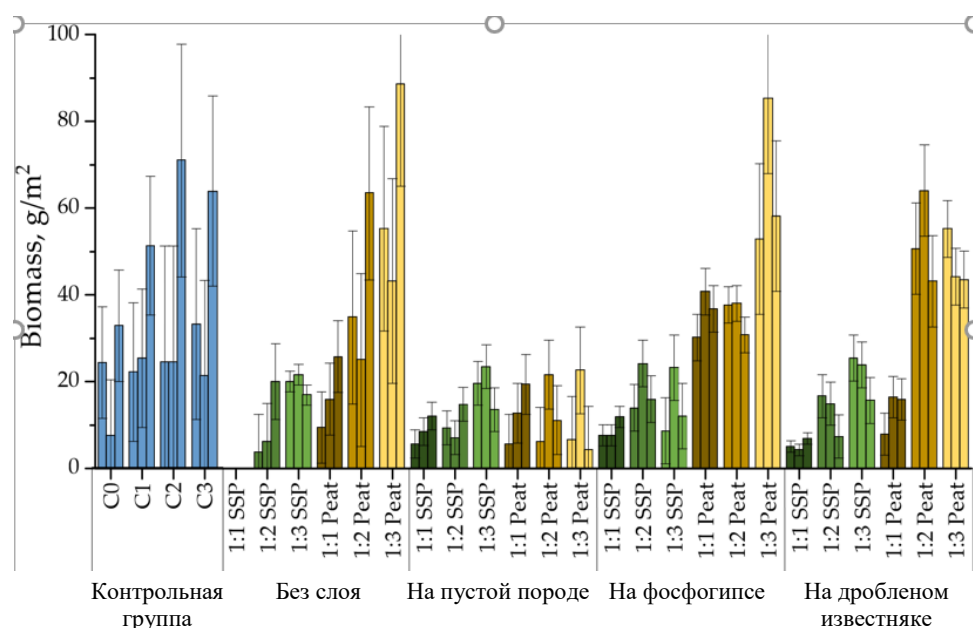


Рис. 6. Диаграмма биомассы по весу срезов растительного материала (г/м<sup>2</sup>):

Группа моделей: А – без слоя, В – на пустой породе, С – на фосфогипсе, D – на дробленном известняке; с шестью типами смеси осадка сточных вод и торфа (ОСВЦБК, торф) и соотношениями (1:1, 1:2, 1:3); с 3-кратными измерениями.

Данные представляют собой среднее значение из 4 реплик; вертикальные столбики указывают на стандартные отклонения

Метод анализа биомассы растений с использованием DIA и ИПЛ позволил проанализировать скорость роста биомассы растений за весь вегетационный период (стадия экспоненциального роста). Результат 36-дневных измерений отразил основные тенденции и выявил главные факторы воздействия на мелиорируемый слой и сформированные растительно-почвенные комплексы (рис. 7).

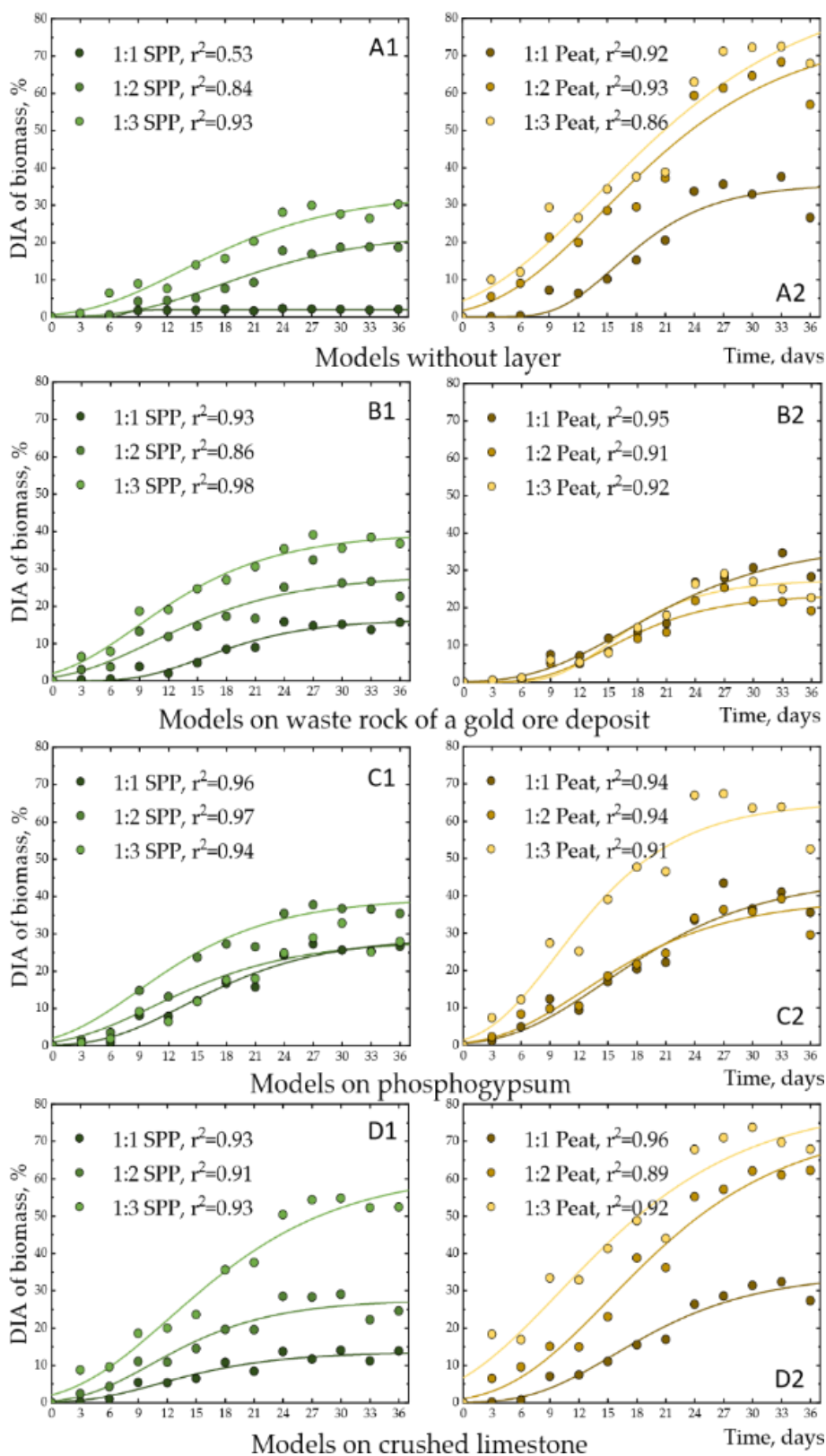


Рис. 7. Скорость роста биомассы растений по DIA и ИПЛ (%): А – модель без слоя, В – пустая порода золоторудного месторождения, С – фосфогипс, D – дробленый известняк, (A1, B1, C1, D1) – смесь почвы и осадка сточных вод ОСВЦБК, и (A2, B2, C2, D2) – смесь почвы и торфа

Сравнение результатов двух представленных методов измерения по дням сбора растительного материала показало корреляционную зависимость:  $r_1^2 = 0,95$ ,  $r_2^2 = 0,75$  и  $r_3^2 = 0,75$ .

Результаты скорости роста биомассы показали зависимость всхожести семян от применяемого субстрата. Эффективность формирования растительного покрова на нарушенных участках зависела от уложенного слоя, мелиоранта и его количества.

Анализ недельного прироста биомассы растительного покрова показал, что торфосмесь дала лучшие результаты прироста биомассы (ИПЛ > 50 % на фосфогипсе, на дробленом известняке и модели без слоя), чем почва с добавлением ОСВЦБК (ИПЛ < 40 %).

Торфяная смесь, внесенная в почву в соотношении 1:2 и 1:3, показала самые высокие результаты по формированию растительного покрова и скорости роста биомассы, где ИПЛ > 50 % на контрольных моделях, ИПЛ > 30 % на слое пустой породы, ИПЛ > 40 % на слое фосфогипса и ИПЛ > 60 % на щебне известняке. Рост растений ускорился, и общий прирост биомассы улучшился. Наиболее близкие результаты по скорости роста биомассы были получены в моделях, где ОСВЦБК вносился в почву в соотношении 1:3, где ИПЛ > 30 % на всех типах слоев.

Если говорить о количестве внесения, то соотношение 1:1 не применимо ни к торфяной смеси, ни к ОСВЦБК (ИПЛ ~ 10 %), как мелиоранту. Было отмечено ингибирование роста растений и снижение общей продуктивности биомассы растительного покрова. Эти результаты могут быть объяснены: (1) высокой степенью легкости почвы, т.е. низкой плотностью почвенного субстрата, неприемлемой для эффективного формирования травяного растительного покрова, или повышением фитотоксичности почвенного слоя, что в целом приводит к ингибирующему влиянию на рост растений. Подобные результаты исследований уже отмечались при избыточном внесении осадков сточных вод [8, 39].

Анализ влияния рекультивируемого слоя определил, что формирование минимального 20-сантиметрового слоя почвы является наиболее экологически эффективной формой растительного покрова на моделях с нейтральной средой (рН 6,5-7,0), обусловленной характеристиками отвалных пород. Рекультивация отвалов пустой породы (от золотодобычи) показала самые незначительные результаты по всхожести и росту биомассы, что, в свою очередь, также объясняется кислотностью сформировавшихся условий.

Снижение кислотности почвенного слоя ухудшало эффективность биомассы по причинам: нарушение оптимальных условий кислотности, увеличение миграционной способности металлов, что приводило к увеличению фитотоксического эффекта почвенных слоев [15, 17].

Фитотоксического действия внесенных мелиорантов и рекультивированных слоев не было выявлено ни в одной из исследуемых моделей: не наблюдалось признаков хлороза, некроза или других повреждений растений.

Высокие результаты прироста биомассы, нормального роста и вегетации растений наблюдались при внесении в почву торфяной смеси в соотношении 1:3 и 1:2 и ОСВЦБК 1:3, что подтвердило полученные ранее результаты прорастания семян.

На основании полученных функций роста травяного покрова (сигмоидная функция Гомперца) и их коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что развитие растительного покрова на сформированных обработанных почвенных моделях протекало без отклонений и в пределах стандартной скорости роста ( $r^2 = 0,84-0,98$ ). Для изучения различий между типами сформированных почвенно-растительных моделей был использован дисперсионный анализ (ANOVA). Все статистические анализы проводились при 95 % доверительном уровне ( $p < 0,05$ ).

### 3.3. Скорость роста растительного покрова

Результаты по скорости роста растительного покрова показали зависимость прорастания от применяемого субстрата и отложенного слоя.

Анализ еженедельного увеличения высоты растительного покрова в основном подтвердил результаты роста биомассы. Формирование травяного покрова на смеси ОСВЦБК (максимальная высота растительного покрова ~10 см) достигало большего максимума, чем травяной покров на торфяной смеси (>10-15 см). Результаты высоты растительного покрова, выращенного на смеси почвы и ОСВЦБК, показали схожие результаты на всех типах восстановительных слоев. Полученные результаты высоты травяного покрова представлены на рисунке 8.

На основании полученных функций роста травяного покрова (сигмоидная функция Гомперца) и их коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что развитие растительного покрова

на сформированных обработанных почвенных моделях протекало без отклонений и в пределах стандартной скорости роста ( $r^2 = 0,85-0,99$ ). Для изучения различий между типами сформированных почвенно-растительных моделей был использован дисперсионный анализ (ANOVA). Все статистические анализы проводились при 95 % доверительном уровне ( $p < 0,05$ ). Визуальных или измеримых признаков влияния нижних горизонтов на высоту растительности обнаружено не было. Однако более высокие значения максимальной высоты растительности были отмечены в следующих группах моделей: (1) на группе без горизонта 0, (2) на рекультивированном слое пустой породы и (3) на фосфогипсе. В целом, визуальных искажений зафиксировано не было, поэтому результаты измерений биомассы можно считать более показательными.

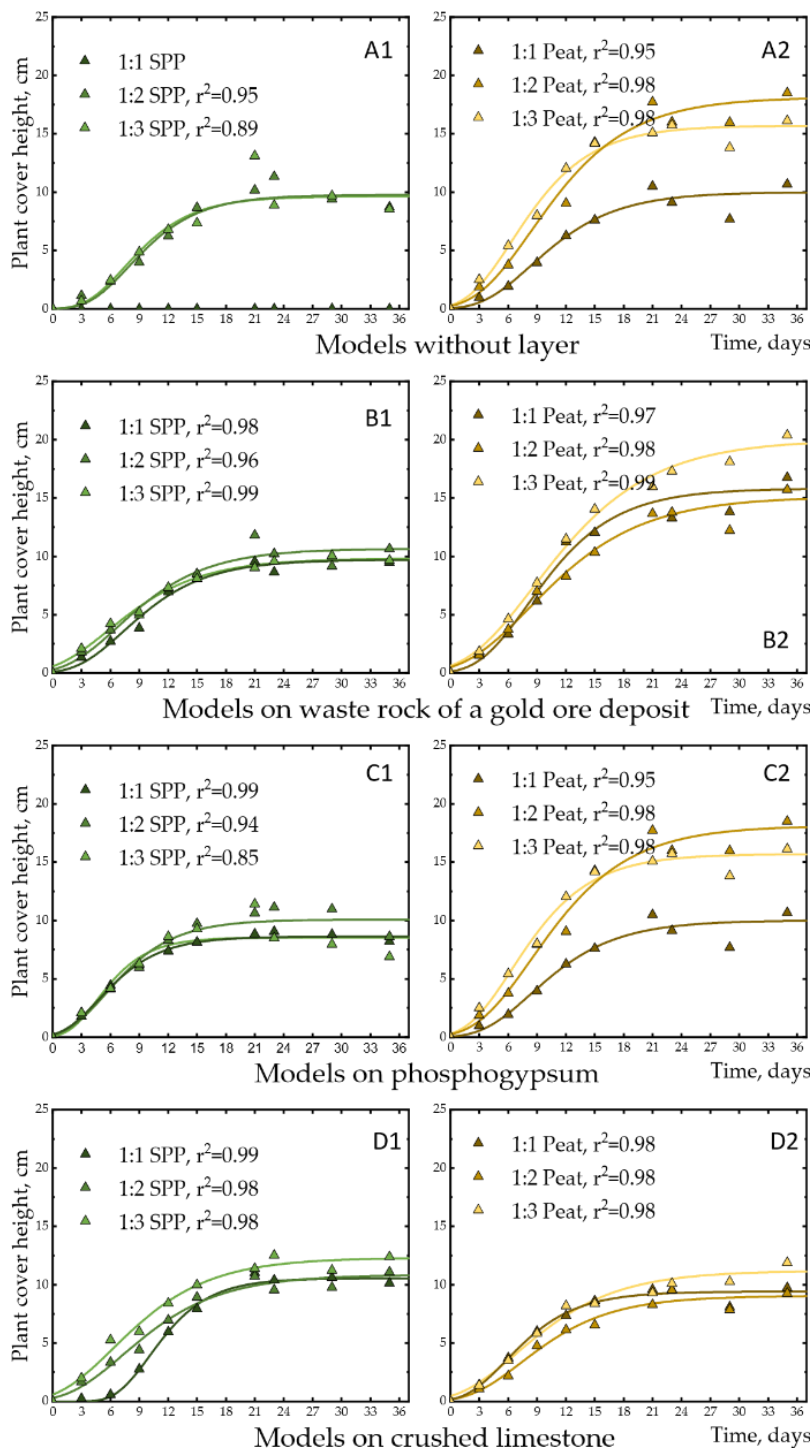


Рис. 8. Показатель высоты растительного покрова (см): А – модель без слоя, В – пустая порода золоторудного месторождения, С – фосфогипс, D – дробленый известняк, (A1, B1, C1, D1) – на смеси почвы и осадка сточных вод ОСВЦБК, и (A2, B2, C2, D2) – на смеси почвы и торфа

### 3.4. Рост растений и растительность

Измеренные характеристики пересчитывались в сравнении с результатами контрольных моделей и максимальными полученными значениями. Пересчитанные характеристики были сведены в общую матрицу показателей роста растительного покрова и вегетации (рис. 9). Объединенная матрица показателей подтвердила результаты анализа всхожести и оценки биомассы покрова (при помощи ИПЛ), воспроизведя особенно актуальный объем внесения ОСВЦБК в почву для рекультивации нарушенных земель. По сравнению с добавками торфяной смеси, рекомендуемое соотношение ОСВЦБК и почвы составило 1:3, что было основано на достигнутых результатах роста травяного покрова и развития растительности.

Measured characteristics by comparison, %		WITHOUT LAYER						ON WASTE ROCK						ON PHOSHOGYPSUM						ON CRUSHED LIMESTONE					
		SPP			Peat			SPP			Peat			SPP			Peat			SPP			Peat		
		1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
with control models	Germination	0	18	24	15	34	46	58	124	116	75	44	89	15	4	53	9	16	71	105	9	24	116	79	104
	Plant tissue cuts 1	0	14	77	29	54	33	36	133	211	116	144	203	22	36	75	19	64	98	21	23	25	30	194	211
	Plant tissue cuts 2	0	32	109	38	123	118	81	127	219	207	193	432	43	36	119	21	75	121	65	110	115	83	325	224
	Plant tissue cuts 3	0	37	31	22	29	22	47	116	162	67	56	106	22	27	25	13	13	29	35	20	8	29	79	80
with maximum	LAI (biomass), average	3	21	37	39	79	91	18	36	55	35	26	31	33	50	35	47	46	89	17	37	71	35	75	100
	LAI (biomass), max	3	25	41	51	93	98	21	44	53	47	34	39	37	51	45	59	53	91	19	39	74	44	84	100
	Plant height, average	0	54	54	70	65	89	53	59	69	56	49	61	54	60	57	84	77	100	54	61	55	53	94	90
	Plant height, max	0	56	64	74	69	90	54	54	61	48	47	58	49	58	49	82	77	100	44	55	56	52	91	79

Рис. 9. Измеренные характеристики в сравнении с контрольными моделями/максимум

Средние показатели измеренных растительных индикаторов выявили оптимальные соотношения ОСВЦБК для внесения в почву (обработки почвы) на нарушенных землях горнодобывающей промышленности. Обработанные почвы, сформированные без слоя отходов горнодобывающей промышленности, показали средние значения роста растений и вегетации. Оптимальными соотношениями при отсутствии слоя отходов горнодобывающей промышленности были 1:3 для ОСВЦБК и 1:2 и 1:3 для торфяной смеси, так как полученные значения среднего показателя измеренных растительных индикаторов составляли > 50 %:

Для слоя пустой породы оптимальные соотношения были получены с почвой при добавлении в нее ОСВЦБК и торфяной смеси в пропорции 1:3 (средний показатель > 50 %);

Для фосфогипсового слоя оптимальными соотношениями при рекультивации отвала пустой породы для ОСВЦБК были 1:2 и 1:3, а для торфяной смеси все типы соотношений (1:1, 1:2 и 1:3) приводили к среднему показателю измеренных растительных индикаторов > 50 %. Наибольшее значение среднего показателя измеренных растительных индикаторов было получено при соотношении торфяной смеси и почвы 1:3 (средний показатель >100 %);

Для слоя дробленого известняка полученные результаты показали более подходящее добавление торфяной смеси, чем добавление торфа для дробленого известняка; средняя скорость измеренных растительных индикаторов: (1) для ОСВЦБК 1:2 (>60 %) и 1:3 (>90 %) к почве; (2) для торфяной смеси 1:2 (>100 %) и 1:3 (>100 %).

## 4. Выводы

Оценка применимости ОСВЦБК в качестве почвенной добавки для рекультивации нарушенных земель в горнодобывающей промышленности проводилась на основе оценки роста растительного покрова с учетом климатических, экологических и антропогенных факторов техногенного вещества. Эффективность роста растительного покрова оценивалась по следующим параметрам: (1) всхожесть семян, (2) биомасса растительного покрова и (3) скорость роста растительного покрова.

Влияние ОСВЦБК на всхожесть семян измерялось методом анализа цифровых изображений. В целом, рациональное внесение ОСВЦБК в почву не влияет на всхожесть семян (всхожесть семян > 50 %). Однако чрезмерное внесение (в соотношении 1:1 ОСВЦБК к почве) негативно сказывалось на параметре всхожести, проявляя фитотоксическое действие и ингибирование роста.

Влияние на биомассу растительного покрова анализировали методом анализа цифровых изображений и индекса площади листьев (ИПЛ). Влияние ОСВЦБК (в соотношении 1:3) на скорость роста биомассы отразилось одинаково на всех почвенно-растительных комплексах (ИПЛ > 30 % на всех типах слоев). Однако это привело к снижению количества биомассы по сравнению с почвами с внесением торфосмеси (ИПЛ > 50 % на контрольных образцах, ИПЛ > 30 % на слое пустой породы, ИПЛ > 40 % на слое фосфогипса и ИПЛ > 60 % на щебне известняка).

Влияние ОСВЦБК на показатель высоты растительного покрова повторило предыдущие результаты по всхожести и биомассе растительного покрова. Однако не было выявлено существенной разницы в соотношении ОСВЦБК и типе слоя шахтных отходов.

В целом, результаты оценки формирования растительного покрова показали, что применение торфяной смеси привело к более здоровому и высокому уровню роста растительного покрова, чем внесение ОСВЦБК. Тем не менее, результаты ОСВЦБК были близки к результатам торфяной смеси по влиянию на рост растений в соотношении 1:3 к почве: (1) прорастание: 1:2 торф-50-60 %, 1:3 торф-60-70 %, и 1:3-ОСВЦБК 65-75 %; (2) биомасса: 1:3 ОСВЦБК ИПЛ = 30-40 % (в известняке >60 %) по сравнению с торфяной смесью ИПЛ = 30-80 %; (3) высота: в ОСВЦБК в соотношении 1:3 к почве-10 см, а торфяной смеси-10-20 см.

Рекультивация земель с формированием 20-сантиметрового слоя почвы на отвалах шахт является экологически приемлемой при соотношении внесения ОСВЦБК 1:3 в почву. Количество ОСВЦБК в соотношении 1:1 оказалось неприменимым в качестве мелиоранта.

**Вклад авторов:** концептуализация, Т.А.П., Е.Р. и Дж.Б.; методология, М.А.П. и Дж.Б.; программное обеспечение, Е.Р.; валидация и формальный анализ, М.А.П. и Т.А.П.; исследование, Е.Р.; ресурсы и обработка данных, А.В.А.; написание – подготовка первоначального проекта, Е.Р.; написание-рецензирование и редактирование, Т.А.Р. и А.В.А.; визуализация, Е.Р. и А.В.А.; руководство, М.А.Р.; администрирование проекта, Т.А.Р.; получение финансирования, Т.А.Р. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Заявление о доступности данных:** данные, представленные в этом исследовании, доступны в этой статье.

**Благодарности:** исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета. Благодарим научного редактора и трех анонимных рецензентов за критическое прочтение рукописи и предложения по ее существенному улучшению.

**Конфликты интересов:** авторы не заявляют о конфликте интересов. Финансирующие организации не принимали участия в разработке дизайна исследования, сборе, анализе и интерпретации данных, написании рукописи и принятии решения о публикации результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Gendler, S.G.; Rudakov, M.L.; Kuznetsov, V.S. Evaluation principles of the dust influence of mining enterprises on the environment. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 2019, 56, 62–69. <http://doi.org/10.2478/lpts-2019-0020>
- Nevskaya, M.A.; Seleznev, S.G.; Masloboev, V.A.; Klyuchnikova, E.M.; Makarov, D.V. Environmental and business challenges presented by mining and mineral processing waste in the Russian federation. *Minerals* 2019, 9, 445. <http://doi.org/10.3390/min9070445>
- Kutepov, Y.I.; Kutepova, N.A.; Vasileva, A.D.; Mukhina, A.S. Engineering-geological and ecological concerns in operation and reclamation of high slope dumps at open-pit mines in Kuzbass. *Min. Inf. Anal. Bull.* 2021, 164–178. [http://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_8\\_0\\_164](http://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_164)
- Zuev, B.Y.; Zubov, V.P.; Fedorov, A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Min.* 2019, 2019, 8–12. <http://doi.org/10.17580/em.2019.01.02>
- Marinin, M.A.; Alexandrovichisheysky, V. State-of-art of mine engineering reclamation while developing of steep-dipping ore fields. *Asian J. Microbiol. Biotechnol. Environ. Sci.* 2017, 19, 240–246.
- Alekseenko, V.A.; Pashkevich, M.A.; Alekseenko, A.V. Metallisation and environmental management of mining site soils. *J. Geochem. Explor.* 2017, 174, 121–127.
- Strizhenok, A.; Tsvetkov, P. Ecology-economical assessment of new reclamation method for currently working technogenic massifs. *J. Ecol. Eng.* 2017, 18, 58–64. <http://doi.org/10.12911/22998993/66251>
- Corrêa, R.S.; do Carmo Balduino, A.P.; Teza, C.T.V.; de Mello Baptista, G.M. Vegetation cover development resulting from different restoration approaches of exploited mines. *Floresta E Ambiente* 2018, 25, e20171116. <http://doi.org/10.1590/2179-8087.111617>
- Alekseenko, A.V.; Drebenstedt, C.; Bech, J. Assessment and abatement of the eco-risk caused by mine spoils in the dry subtropical climate. *Environ. Geochem. Health* 2021, 3, 1–23. <http://doi.org/10.1007/s10653-021-00885-3>
- Radziemska, M.; Gusiatin, Z.M.; Bęćs, A.; Czajkowska, J.; Mazur, Z.; Hammerschmidt, T.; Sikorski, Ł.; Kobzova, E.; Klik, B.K.; Sas, W.; et al. Can the Application of Municipal Sewage Sludge Compost in the Aided Phytostabilization Technique Provide an Effective Waste Management Method? *Energies* 2021, 14, 1984. <http://doi.org/10.3390/en14071984>

11. Das Gupta, S.; Kirby, W.; Pinno, B.D. Effects of Stockpiling and Organic Matter Addition on Nutrient Bioavailability in Reclamation Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2019, 83, S27–S41.
12. Angst, G.; Mueller, C.W.; Angst, Š.; Pivokonský, M.; Franklin, J.; Stahl, P.D.; Frouz, J. Fast accrual of C and N in soil organic matter fractions following post-mining reclamation across the USA. *J. Environ. Manag.* 2018, 209, 216–226. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.050>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29294447>
13. Jezowski, S.; Mos, M.; Buckby, S.; Ceraży-Waliszewska, J.; Owczarzak, W.; Mocek, A.; Kaczmarek, Z.; McCalmont, J.P. Establishment, growth, and yield potential of the perennial grass *Miscanthus* \_ Giganteus on degraded coal mine soils. *Front. Plant Sci.* 2017, 8, 726. <http://doi.org/10.3389/fpls.2017.00726>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28659931>
14. Jordán, M.M.; Bech, J.; García-Sánchez, E.; García-Orenes, F. Bulk density and aggregate stability assays in percolation columns. *J. Min. Inst.* 2016, 222, 877–881.
15. Halecki, W.; Klatka, S. Application of Soil Productivity Index after Eight Years of Soil Reclamation with Sewage Sludge Amendments. *Environ. Manag.* 2021, 67, 822–832. <http://doi.org/10.1007/s00267-020-01422-1>
16. Carabassa, V.; Domene, X.; Alcañiz, J.M. Soil restoration using compost-like-outputs and digestates from non-source-separated urban waste as organic amendments: Limitations and opportunities. *J. Environ. Manag.* 2020, 255, 109909. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109909>
17. Soria, R.; Ortega, R.; Bastida, F.; Miralles, I. Role of organic amendment application on soil quality, functionality and greenhouse emission in a limestone quarry from semiarid ecosystems. *Appl. Soil Ecol.* 2021, 164, 103925. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103925>
18. Strizhenok, A.V.; Korelskiy, D.S.; Choi, Y. Assessment of the Efficiency of Using OrganicWaste from the Brewing Industry for Bioremediation of Oil-Contaminated Soils. *J. Ecol. Eng.* 2021, 22, 66–77. <http://doi.org/10.12911/22998993/133966>
19. Larney, F.J.; Angers, D.A. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Can. J. Soil Sci.* 2012, 92, 19–38. <http://doi.org/10.4141/cjss2010-064>
20. Zuo, W.; Gu, C.; Zhang, W.; Xu, K.; Wang, Y.; Bai, Y.; Shan, Y.; Dai, Q. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land. *Sci. Total Environ.* 2019, 654, 541–549. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.127>
21. Antonelli, P.M.; Fraser, L.H.; Gardner, W.C.; Broersma, K.; Karakatsoulis, J.; Phillips, M.E. Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation. *Ecol. Eng.* 2018, 117, 38–49. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.001>
22. Smirnov, Y.D.; Suchkova, M.V. Development of the beneficial utilisation of urban sewage sludge using modern analysis methods. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1384, 012049. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012049>
23. Halecki, W.; Klatka, S. Long term growth of crop plants on experimental plots created among slag heaps. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018, 147, 86–92. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.025>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28837874>
24. Žaltauskaitė, J.; Judeikytė, S.; Sujetovienė, G.; Dagiliūtė, R. Sewage Sludge Application Effects to First Year Willows (*Salix Viminalis* L.) Growth and Heavy Metal Bioaccumulation. *Waste Biomass Valorization* 2017, 8, 1813–1818. <http://doi.org/10.1007/s12649-016-9691-1>
25. Al Ghouti, M.A.; Ali, M.; Ahmed, T. Potential benefits and risk assessments of using sewage sludge on soil and plants: A review. *Int. J. Environ. Waste Manag.* 2019, 23, 352. <http://doi.org/10.1504/IJEW.2019.10020556>
26. Mohamed, B.; Mounia, K.; Aziz, A.; Ahmed, H.; Rachid, B.; Lotfi, A. Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: Effects on certain soil properties, growth and yield components. *Sci. Total Environ.* 2018, 627, 681–688. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.258>
27. Urbaniak, M.; Wyrwicka, A.; Tołoczko, W.; Serwecińska, L.; Zieliński, M. The effect of sewage sludge application on soil properties and willow (*Salix* sp.) cultivation. *Sci. Total Environ.* 2017, 586, 66–75. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.012>
28. Carabassa, V.; Ortiz, O.; Alcañiz, J.M. Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: Effects on soil and vegetation. *Land Degrad. Dev.* 2018, 29, 2568–2574. <http://doi.org/10.1002/ldr.3071>
29. Delibacac, S.; Voronina, L.; Morachevskaya, E.; Ongun, A.R. Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. *Eurasian J. Soil Sci.* 2020, 9, 126–139. <http://doi.org/10.18393/ejss.687052>
30. Delgado, M.; Maeso, F.J.; Martín, J.V.; Gonzalez, M.L.; Martinez, S. Valorization of sludge from the quartz industry as soil amendment and crop production. *Soil Tillage Res.* 2019, 194, 104320. <http://doi.org/10.1016/j.still.2019.104320>
31. Alayu, E.; Leta, S. Brewery sludge quality, agronomic importance and its short-term residual effect on soil properties. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2020, 17, 2337–2348. <http://doi.org/10.1007/s13762-020-02630-2>
32. Chu, L.; He, W. Toxic metals in soil due to the land application of sewage sludge in China: Spatiotemporal variations and influencing factors. *Sci. Total Environ.* 2020, 757, 143813. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143813>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33248760>
33. Nicolás, C.; Kennedy, J.N.; Hernández, T.; García, C.; Six, J. Soil aggregation in a semiarid soil amended with composted and non-composted sewage sludge-A field experiment. *Geoderma* 2014, 219, 24–31. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.017>
34. Sarapulova, G.I. Environmental geochemical assessment of technogenic soils. *J. Min. Inst.* 2018, 234, 658–662. <http://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.658>
35. Lobacheva, O.; Dzhevaga, N. Method for removing valuable components from technogenic solutions by the example of rare earth elements. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, 1679, 042016. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042016>
36. Koutroubas, S.D.; Antoniadis, V.; Damalas, C.A.; Fotiadis, S. Sunflower growth and yield response to sewage sludge application under contrasting water availability conditions. *Ind. Crops Prod.* 2020, 154, 112670. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112670>
37. Burducea, M.; Lobiuc, A.; Asandulesa, M.; Zaltariov, M.F.; Burducea, I.; Popescu, S.M.; Zheljzkov, V.D. Effects of sewage sludge amendments on the growth and physiology of sweet basil. *Agronomy* 2019, 9, 548. <http://doi.org/10.3390/agronomy9090548>
38. Abbas, A.M.; Abd-Elmabod, S.K.; El-Ashry, S.M.; Soliman, W.S.; El-Tayeh, N.; Castillo, J.M. Capability of the invasive tree *Prosopis glandulosa* Torr. To remediate soil treated with Sewage Sludge. *Sustainability* 2019, 11, 2711. <http://doi.org/10.3390/su11092711>

39. Curci, M.; Lavecchia, A.; Cucci, G.; Lacolla, G.; De Corato, U.; Crecchio, C. Short-term effects of sewage sludge compost amendment on semiarid soil. *Soil Syst.* 2020, 4, 48. <http://doi.org/10.3390/soilsystems4030048>
40. Siebielec, G.; Siebielec, S.; Lipski, D. Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. *J. Clean. Prod.* 2018, 187, 372–379. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.245>
41. Brykly, M.; Dorak, S.; Bülent A, s, B. Effects of food industry wastewater treatment sludge on corn plant development and soil properties. *Pol. J. Environ. Stud.* 2020, 29, 2565–2578. <http://doi.org/10.15244/pjoes/112897>
42. Xue, D.; Huang, X. The impact of sewage sludge compost on tree peony growth and soil microbiological, and biochemical properties. *Chemosphere* 2013, 93, 583–589. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.065>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23800593>
43. Pashkevich, M.A.; Petrova, T.A.; Rudzisha, E. Lignin sludge application for forest land reclamation: Feasibility assessment. *J. Min. Inst.* 2019, 235, 106–112. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.106>
44. Artico, M.; Firpo, B.A.; Artico, L.L.; Tubino, R.M.C. Integrated use of sewage sludge and basalt mine environmental restoration. *Rev. Esc. Minas* 2020, 73, 225–232.
45. Kodešová, R.; Klement, A.; Golovko, O.; Fér, M.; Kočárek, M.; Nikodem, A.; Grabic, R. Soil influences on uptake and transfer of pharmaceuticals from sewage sludge amended soils to spinach. *J. Environ. Manag.* 2019, 250, 109407. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109407>
46. Eid, E.M.; Alrumman, S.A.; El-Bebany, A.F.; Hesham, A.E.L.; Taher, M.A.; Fawy, K.F. The effects of different sewage sludge amendment rates on the heavy metal bioaccumulation, growth and biomass of cucumbers (*Cucumis sativus* L.). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017, 24, 16371–16382. <http://doi.org/10.1007/s11356-017-9289-6>
47. Eid, E.M.; Alrumman, S.A.; El-Bebany, A.F.; Fawy, K.F.; Taher, M.A.; Hesham, A.E.L.; El-Shaboury, G.A.; Ahmed, M.T. The evaluation of sewage sludge application as a fertilizer for broad bean (*Faba sativa* Bernh.) crops. *Food Energy Secur.* 2018, 7, e00142. <http://doi.org/10.1002/fes3.142>
48. Pöykiö, R.; Watkins, G.; Dahl, O. Characterisation of Municipal Sewage Sludge as a Soil Improver and a Fertilizer Product. *Ecol. Chem. Eng. S* 2019, 26, 547–557. <http://doi.org/10.1515/eces-2019-0040>
49. Raheem, A.; Sikarwar, V.S.; He, J.; Dastyar, W.; Dionysiou, D.D.; Wang, W.; Zhao, M. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chem. Eng. J.* 2018, 337, 616–641. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>
50. Matveeva, V.A.; Smirnov, Y.D.; Suchkov, D.V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environ. Geochem. Health* 2021, 1–14. <http://doi.org/10.1007/s10653-021-00988-x>
51. Asemaninejad, A.; Arteaga, J.; Spiers, G.; Beckett, P.; McGarry, S.; Mykytczuk, N.; Basiliko, N. Blended pulp mill, forest humus and mine residual material Technosols for mine reclamation: A growth-chamber study to explore the role of physicochemical properties of substrates and microbial inoculation on plant growth. *J. Environ. Manag.* 2018, 228, 93–102. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.114>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30212679>
52. Undurraga, P.; Hirzel, J.; Celis, J.E.; Perez, C.; Sandoval, M.A. Pelletized paper mill waste promotes nutrient input and N mineralization in a degraded Alfisol. *Chil. J. Agric. Res.* 2017, 77, 390–399. <http://doi.org/10.4067/S0718-58392017000400390>
53. Hagelqvist, A. Batchwise mesophilic anaerobic co-digestion of secondary sludge from pulp and paper industry and municipal sewage sludge. *Waste Manag.* 2013, 33, 820–824. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.002>
54. Pérez, R.A.; Sánchez-Brunete, C.; Albero, B.; Miguel, E.; Tadeo, J.L.; Alonso, J.; Lobo, M.C. Quality assessment of three industry-derived organic amendments for agricultural use. *Compost Sci. Util.* 2016, 24, 190–202. <http://doi.org/10.1080/1065657X.2015.1124817>
55. Rasa, K.; Pennanen, T.; Peltoniemi, K.; Velmala, S.; Fritze, H.; Kaseva, J.; Joona, J.; Uusitalo, R. Pulp and paper mill sludges decrease soil erodibility. *J. Environ. Qual.* 2021, 50, 172–184. <http://doi.org/10.1002/jeq2.20170>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33084047>
56. Vasilyeva, M.; Kovshov, S.; Zambrano, J.; Zhemchuzhnikov, M. Effect of magnetic fields and fertilizers on grass and onion growth on technogenic soils. *J. Water Land Dev.* 2021, 49, 55–62.
57. Ivanov, A.V.; Smirnov, Y.D.; Petrov, G.I. Investigation of waste properties of subway construction as a potential component of soil layer. *J. Ecol. Eng.* 2018, 19, 59–69. <http://doi.org/10.12911/22998993/91267>
58. Luo, Y.; Liang, J.; Zeng, G.; Chen, M.; Mo, D.; Li, G.; Zhang, D. Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Manag.* 2018, 71, 109–114. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.023>
59. Pashkevich, M.A.; Bech, J.; Matveeva, V.A.; Alekseenko, A.V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *J. Min. Inst.* 2020, 241, 125–130. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125>
60. Sunoj, S.; McRoberts, K.C.; Benson, M.; Ketterings, Q.M. Digital image analysis estimates of biomass, carbon, and nitrogen uptake of winter cereal cover crops. *Comput. Electron. Agric.* 2021, 184, 106093. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106093>
61. Huang, W.; Su, X.; Ratkowsky, D.A.; Niklas, K.J.; Gielis, J.; Shi, P. The scaling relationships of leaf biomass vs. leaf surface area of 12 bamboo species. *Glob. Ecol. Conserv.* 2019, 20, e00793. <http://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00793>
62. Xiong, Y.; West, C.P.; Brown, C.P.; Green, P.E. Digital Image Analysis of Old World Bluestem Cover to Estimate Canopy Development. *Agron. J.* 2019, 111, 1–7. <http://doi.org/10.2134/agronj2018.08.0502>
63. Zhang, L.; Verma, B.; Stockwell, D.; Chowdhury, S. DensityWeighted Connectivity of Grass Pixels in image frames for biomass estimation. *Expert Syst. Appl.* 2018, 101, 213–227. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.055>
64. Hechmi, S.; Hamdi, H.; Mokni-Tlili, S.; Zoghalmi, I.R.; Khelil, M.N.; Benzarti, S.; Hassen, A.; Jedidi, N. Carbon mineralization, biological indicators, and phytotoxicity to assess the impact of urban sewage sludge on two light-textured soils in a microcosm. *J. Environ. Qual.* 2020, 49, 460–471. <http://doi.org/10.1002/jeq2.20011>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33016418>
65. Eid, E.M.; Hussain, A.A.; Taher, M.A.; Galal, T.M.; Shaltout, K.H.; Sewelam, N. Sewage Sludge Application Enhances the Growth of *Corchorus olitorius* Plants and Provides a Sustainable Practice for Nutrient Recirculation in Agricultural Soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2020, 20, 149–159. <http://doi.org/10.1007/s42729-019-00113-z>
66. Gallardo, F.; Cea, M.; Tortella, G.R.; Diez, M.C. Effect of pulp mill sludge on soil characteristics, microbial community and vegetal production of *Lolium Perenne*. *J. Environ. Manag.* 2012, 95, S193–S198. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.001>

67. Kaur, A.; Singh, J.; Vig, A.P.; Dhaliwal, S.S.; Rup, P.J. Cocomposting with and without *Eisenia fetida* for conversion of toxic paper mill sludge to a soil conditioner. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 8192–8198. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.041>
68. Gomes, L.A.; Santos, A.F.; Góis, J.C.; Quina, M.J. Thermal dehydration of urban biosolids with green liquor dregs from pulp and paper mill. *J. Environ. Manag.* 2020, 261, 109944. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109944>
69. Antonkiewicz, J.; Baran, A.; Pełka, R.; Wisła-Świder, A.; Nowak, E.; Konieczka, P. A mixture of cellulose production waste with municipal sewage as new material for an ecological management of wastes. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019, 169, 607–614. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.070>
70. Bourioug, M.; Alaoui-Sehmer, L.; Laffray, X.; Benbrahim, M.; Aleya, L.; Alaoui-Sossé, B. Sewage sludge fertilization in larch seedlings: Effects on trace metal accumulation and growth performance. *Ecol. Eng.* 2015, 77, 216–224. <http://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2015.01.031>
71. Černe, M.; Palčić, I.; Pasković, I.; Major, N.; Romić, M.; Filipović, V.; Igrc, M.D.; Perčin, A.; Goreta Ban, S.; Zorko, B.; et al. The effect of stabilization on the utilization of municipal sewage sludge as a soil amendment. *Waste Manag.* 2019, 94, 27–38. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.032>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31279393>
72. Mohamed, B.; Olivier, G.; François, G.; Laurence, A.S.; Bourgeade, P.; Badr, A.S.; Lotfi, A. Sewage sludge as a soil amendment in a *Larix decidua* plantation: Effects on tree growth and floristic diversity. *Sci. Total Environ.* 2018, 621, 291–301. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.283>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29190553>
73. Zhang, L.; Xu, C.C.; Champagne, P. Energy recovery from secondary pulp/paper-mill sludge and sewage sludge with supercritical water treatment. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 2713–2721. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.106>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20044251>
74. Korotaeva, A.E.; Pashkevich, M.A. Spectrum survey data application in ecological monitoring of aquatic vegetation. *Min. Inf. Anal. Bull.* 2021, 5, 231–244. [http://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_52\\_0\\_231](http://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_231)
75. Elsayed, S.; Barmeier, G.; Schmidhalter, U. Passive Reflectance Sensing and Digital Image Analysis Allows for Assessing the Biomass and Nitrogen Status of Wheat in Early and Late Tillering Stages. *Front. Plant Sci.* 2018, 9, 1478. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01478>
76. Jin, X.; Zarco-Tejada, P.J.; Schmidhalter, U.; Reynolds, M.P.; Hawkesford, M.J.; Varshney, R.K.; Yang, T.; Nie, C.; Li, Z.; Ming, B.; et al. High-Throughput Estimation of Crop Traits: A Review of Ground and Aerial Phenotyping Platforms. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 2021, 9, 200–231. <http://doi.org/10.1109/MGRS.2020.2998816>
77. Xu, D.; Pu, Y.; Guo, X. Non-Photosynthetic Vegetation Cover from RGB Images in Mixed Grasslands. *Sensors* 2020, 20, 6870. <http://doi.org/10.3390/s20236870>
78. Dinalankara, S.; Chandrasiri, T.S.; Dias, D.; Hettiarachchi, K.; Rodrigo, R.; Premaratne, U. Vision Based Automated Biomass Estimation of Fronds of *Salvinia molesta*. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAFS), Colombo, Sri Lanka, 21–22 December 2018; pp. 1–6.
79. Chianucci, F.; Lucibelli, A.; Dell'Abate, M.T. Estimation of ground canopy cover in agricultural crops using downward-looking photography. *Biosyst. Eng.* 2018, 169, 209–216. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.012>
80. Hu, B.; Bennett, M.A.; Kleinhenz, M.D. A new method to estimate vegetable seedling vigor, piloted with tomato, for use in grafting and other contexts. *Horttechnology* 2016, 26, 767–775. <http://doi.org/10.21273/HORTTECH03485-16>
81. Archontoulis, S.V.; Miguez, F.E. Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agron. J.* 2015, 107, 786–798. <http://doi.org/10.2134/agronj2012.0506>
82. Tackenberg, O. A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis. *Ann. Bot.* 2007, 99, 777–783. <http://doi.org/10.1093/aob/mcm009>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17353204>
83. Aoyama, M.; Kuroyanagi, S. Effects of heavy metal accumulation associated with pesticide application on the decomposition of cellulose and orchard grass in soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 1996, 42, 121–131. <http://doi.org/10.1080/00380768.1996.10414695>
84. Wiewióra, B.; Żurek, G. The Response of the Associations of Grass and Epichloë Endophytes to the Increased Content of Heavy Metals in the Soil. *Plants* 2021, 10, 429. <http://doi.org/10.3390/plants10030429> <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33668289>
85. Gallardo, F.; Bravo, C.; Briceño, G.; Diez, M.C. Use of sludge from kraft mill wastewater treatment as improver of volcanic soils: Effect on soil biological parameters. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 2010, 10, 48–61. <http://doi.org/10.4067/S0718-27912010000100006>
86. Ye, Z.H.; Shu, W.S.; Zhang, Z.Q.; Lan, C.Y.; Wong, M.H. Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques. *Chemosphere* 2002, 47, 1103–1111. [http://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00054-1](http://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00054-1)