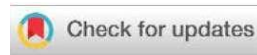


УДК 631.481

<https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.341>

Опыт оценки эффективности рекультивации отвалов вскрышных пород коренных месторождений алмазов в Западной Якутии

© 2026 А. А. Петров ¹, Г. Н. Саввинов ¹, А. А. Данилова ²

¹Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», пр. Ленина, д. 43, г. Якутск, 677000, Россия. E-mail: Petrov_Alexey@mail.ru, savvinov_gn@mail.ru

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, а/я 356, Новосибирский район, Новосибирская область, 630501, Россия. E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Цель исследования. Оценка почвенно-экологического эффекта (ПЭЭ) рекультивационных мероприятий, проведенных путем формирования техноземов недифференцированных на отвалах вскрышных пород коренных месторождений алмазов в Западной Якутии.

Место и время проведения. Изучили отвалы вскрышных пород, сформированных при разработке коренных месторождений алмазов Западной Якутии (66°26,5'52,16" с.ш. и 112°19'24,67" в.д.; 62°32'32,90"с.ш. и 114°01'14,89" в.д.). Фактический материал получили при выполнении НИР НИИПЭС им. проф. Д.Д. Саввинова СВФУ в 2007–2024 гг.

Методы. Применены модифицированный бонитировочный подход для расчета показателя почвенно-экологического состояния (ПЭС) техногенных ландшафтов.

Основные результаты. Составлена серия электронных карт-схем ареалов рекультивированных участков на отвалах вскрышных пород после разработки кимберлитовых трубок «Мир» и «Удачный». На основе расчета разницы значений ПЭС отвалов до и после рекультивации рассчитан показатель ПЭЭ рекультивации. Согласно классификации почв техногенных ландшафтов, грунты отвалов классифицируются как элювиоземы инициальные из класса литогенно неразвитых почв (ПЭС=8,6–9,9 баллов), на рекультивированных участках – как техноземы недифференцированные (ПЭС=16–24 балла), которые в настоящее время находятся в инициальной и органо-аккумулятивной стадиях развития. Дополнительным доказательством обоснованности наших расчетов является корреляция величины ПЭЭ рекультивационных мероприятий с возрастом объекта: для отвалов карьера «Мир» возрастом более 20 лет этот показатель составил 15,2 балла, а для отвалов карьера «Удачный» возрастом менее 10 лет – 6,5 баллов.

Заключение. Обоснована применимость модифицированных расчетов показателя ПЭС техногенно-нарушенной экосистемы для оценки эффекта рекультивации отвалов после разработки кимберлитовых трубок в Западной Якутии. За 10–20 лет после формирования техноземов из потенциально плодородного материала значение ПЭС субстратов на отвалах повысилось с оценки «неудовлетворительное» (8,6–9,9 баллов) до оценки «удовлетворительное» (16–24 баллов). При этом показатель ПЭЭ составил 6,5–15 баллов. Данный эффект достигался существенной нейтрализацией фитотоксичности исходных субстратов отвалов. Из литогенных факторов наибольшее положительное влияние на ПЭЭ оказывали содержание физической глины и органического углерода, отрицательное – плотность субстрата.

Ключевые слова: отвалы вскрышных пород; техногенные ландшафты; оценка эффекта рекультивации; Западная Якутия; криолитозона.

Цитирование: Петров А.А., Саввинов Г.Н., Данилова А.А. Опыт оценки эффективности рекультивации отвалов вскрышных пород коренных месторождений алмазов в Западной Якутии // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 2. е341. DOI: [10.31251/pos.v9i2.341](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.341)

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость рекультивации техногенно нарушенных (ТН) экосистем становится глобальной проблемой современности. Разрабатываются и осваиваются самые разнообразные технологии восстановления и эксплуатации подобных объектов. В последние годы в литературе все чаще озвучивается проблема разработки интегральных критериев для оценки эффективности этих мероприятий (Van der Heyde et al., 2020; Spasić et al., 2021; Gwenzi, 2021). Опробована применимость для этих целей интегрального показателя качества почвы (SQI) (Muñoz-Rojas, 2018). Расчет критерия предусматривает измерение широкого ряда свойств почвы в баллах и вычисление суммы этих баллов (Moebius-Clune et al., 2016). Проблема в применении SQI заключается в том, что сложно найти пределы, ограничивающие список возможных показателей почвы (Gwenzi, 2021). Исследователи считают, что свойства техногенно нарушенной экосистемы никогда не смогут вернуться к таковым

исходной ненарушенной экосистемы. Поэтому критерии оценок должны основываться на других принципах (Gwenzi, 2021; Bennett et al., 2021). Осознавая этот момент, W. Gwenzi (2021) предлагает другой способ, основанный на иерархической оценке состояния экосистемы в целом – функции, статуса, экологических услуг (ecological services). При таком подходе свойства почвы становятся только одним из критериев состояния экосистемы. В этом случае ответ на вопрос – какие свойства экосистемы оценивать, зависит от конечной цели рекультивации – агроиспользование, лесоразведение, рекреация и др. Однако, судя по литературным данным, эти выкладки пока остаются далекими от практического применения (Gatica-Saavedra et al., 2023; Pandey et al., 2023; Garg et al., 2024), в то время как назревшая проблема требует своего решения. Сотрудники Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Андроханов, Курачев, 2009, 2010; Соколов и др., 2015; Госсен и др., 2016) предложили использовать бонитировочный подход на основе расчета **почвенно-экологического состояния (ПЭС)** техногенных ландшафтов, который был реализован для оценки состояния угольных отвалов на территории Кузбасса. В нашей предыдущей публикации (Петров и др., 2025) мы предложили некоторую модификацию этого подхода для оценки состояния техногенных ландшафтов криолитозоны, разработали градации ПЭС посттехногенных ландшафтов Якутии, позволяющие проводить интегральную оценку состояния широкого спектра отвалов для разработки индивидуальных проектов рекультивационных мероприятий. Следующий этап наших исследований заключался в оценке применимости этих критериев для определения эффективности рекультивационных мероприятий на техногенно нарушенных территориях криолитозоны. В связи с этим целью нашей работы была оценка **почвенно-экологического эффекта (ПЭЭ)** рекультивационных мероприятий, проведенных путем формирования техноземов недифференцированных на отвалах вскрышных пород коренных месторождений алмазов в Западной Якутии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки ПЭС грунтов, техногенных почв и техноземов применен модифицированный бонитировочный подход (Гуркова и др., 2019; Петров и др., 2025). Под почвенно-экологическим эффектом рекультивационных мероприятий авторы понимают разницу между почвенно-экологическим состоянием техногенных ландшафтов до и после проведения рекультивационных мероприятий и выражают в формуле (1):

$$\text{ПЭЭ} = \text{ПЭС}_p - \text{ПЭС} \quad (1)$$

где ПЭЭ – почвенно-экологический эффект рекультивационных мероприятий;
 ПЭС_p – почвенно-экологическое состояние рекультивированного техногенного ландшафта;
 ПЭС – почвенно-экологическое состояние техногенного ландшафта.

Для определения почвенно-экологического эффекта рекультивационных мероприятий был проведен отбор проб элювиоземов и техноземов с глубин 0–10 и 10–20 см в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01-2017. Химические, физико-химические, агрохимические и агрофизические свойства почв определяли общепринятыми в почвоведении методами (Аринюшкина, 1970; Вадюнина, Корчагина, 1986; Воробьева, 1998) в лаборатории физико-химических методов анализа НИИПЭС СВФУ (Аттестат аккредитации RA.RU.210B4). Устойчивость микробного сообщества почвы определяли путем измерения функционального отклика последнего на экспериментальный стресс при помощи метода мультисубстратного теста (Данилова и др., 2019). Плотность почв и грунтов определяли в ненарушенном сложении на глубинах 0–10 и 10–20 см. Пробы отбирали цилиндром-буром объемом 100 см³. Для элювиоземов пробы отбирали из аккумулятивного горизонта продуктов выветривания исходных пород. Картографические материалы создали и обработали с помощью программного обеспечения QGIS 3.30.1. Статистический анализ выполнили с использованием программы Statistica 10.0. Для классификации техногенных почв применили профилно-генетическую классификацию почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002). Фитотоксичность субстратов оценивали с помощью биотеста на проростках редиса, определяли первоначальный рост проростков растений за 4 суток после посева, а динамику роста оценивали по общей живой биомассе проростков редиса. Испытания проводили при постоянной температуре 20 °С и при влажности субстрата 20% (Петров, 2013).

Объектами исследований являются разновозрастные отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке коренных месторождений алмазов открытым способом в Западной Якутии. Согласно почвенно-растительному районированию Якутии (Атлас ..., 1989), районы исследований охватывают северотаежную и среднетаежную почвенно-растительные подзоны. Все

объекты исследований расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с мощностью от 700 до 1500 м (Федоров и др., 2018). Отвалы карьера «Удачный» находятся в Сибирской области Субарктического пояса, характеризующейся умеренно холодным, умеренно влажным климатом, а отвалы карьера «Мир» – в континентальной Восточносибирской области умеренного пояса с умеренно холодным и умеренно влажным климатом (Национальный атлас России, 2007).

Отвалы вскрышных пород представляют собой аккумулятивные формы неорельефа, имеющие преимущественно трапециевидную форму (одно- или многоярусную) с относительно выровненной поверхностью на вершине трапеции. Эти отвалы в соответствии с классификацией нарушенных земель (ГОСТ 17.5.1.02-85) относятся к платообразным террасированным очень высоким отвалам (средняя высота 40–70 м). Параметры рельефа отвалов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика рельефа отвалов вскрышных пород коренных месторождений алмазов в Западной Якутии

Отвалы вскрышных пород	Площадь, га	Высота отвалов (м)	Крутизна склонов, (% от общей площади)				Экспозиции склонов, (% от общей площади)		
			<5°	5–15°	16–35°	>35°	Ю-ЮЗ-З	СЗ-С-СВ	В-ЮВ
Отвалы карьера «Удачный»	637,4	40–70	0,5	21,6	38,1	39,8	26,4	49,6	24,0
Отвалы карьера «Мир»	280,9	40–60	52,6	22,6	22,1	2,7	39,2	31,1	29,7

Тела отвалов сложены песчаниками, известняками, доломитами, доломитовыми мергелями и алевролитами. В условиях гипергенеза выветривание этих пород происходит очень медленно. Грунты характеризуются сильной каменистостью, доля фракций размером более 3 мм составляет 70–85%. Содержание мелкозема (фракций размером менее 1 мм) колеблется в пределах 10,3–27,7%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полевых исследований и данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения (<https://earth.google.com/>, <https://www.pgc.umn.edu>) на отвалах вскрышных пород карьеров «Мир» и «Удачный» была создана серия электронных карт-схем рекультивированных участков отвалов с определением ареалов техноземов недифференцированных (рис. 1 и 2).

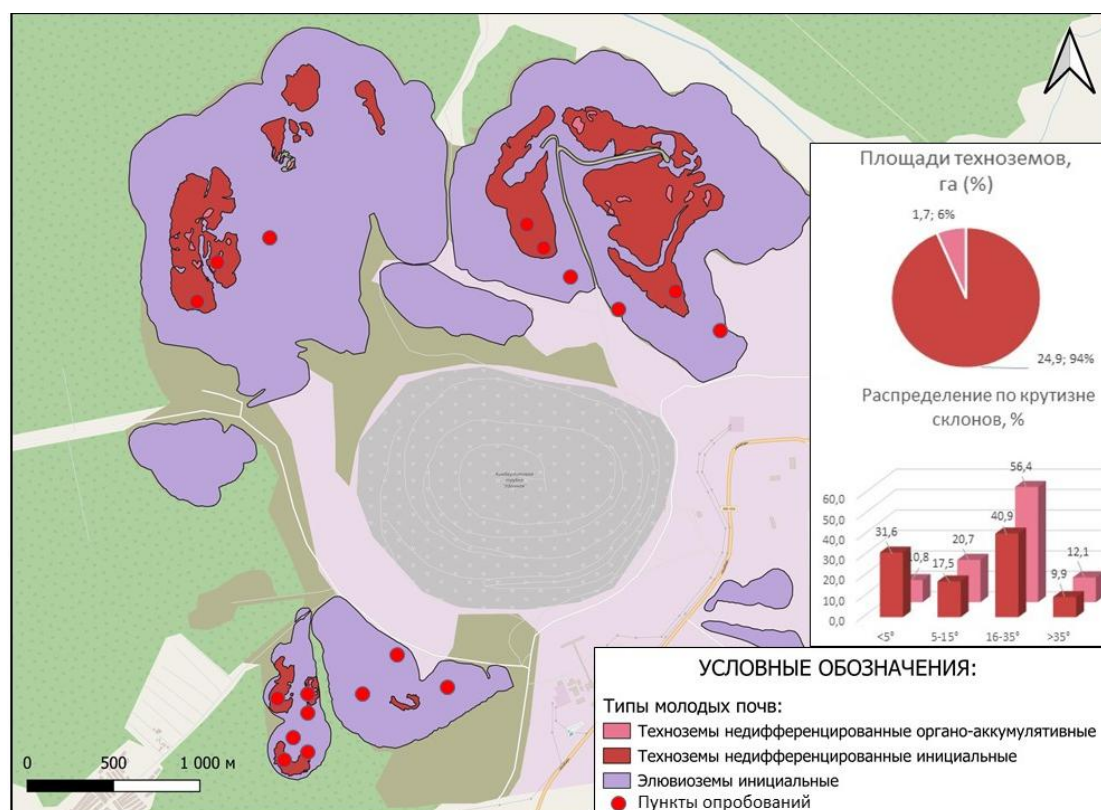


Рисунок 1. Карта-схема расположения техноземов на отвалах карьера «Мир».

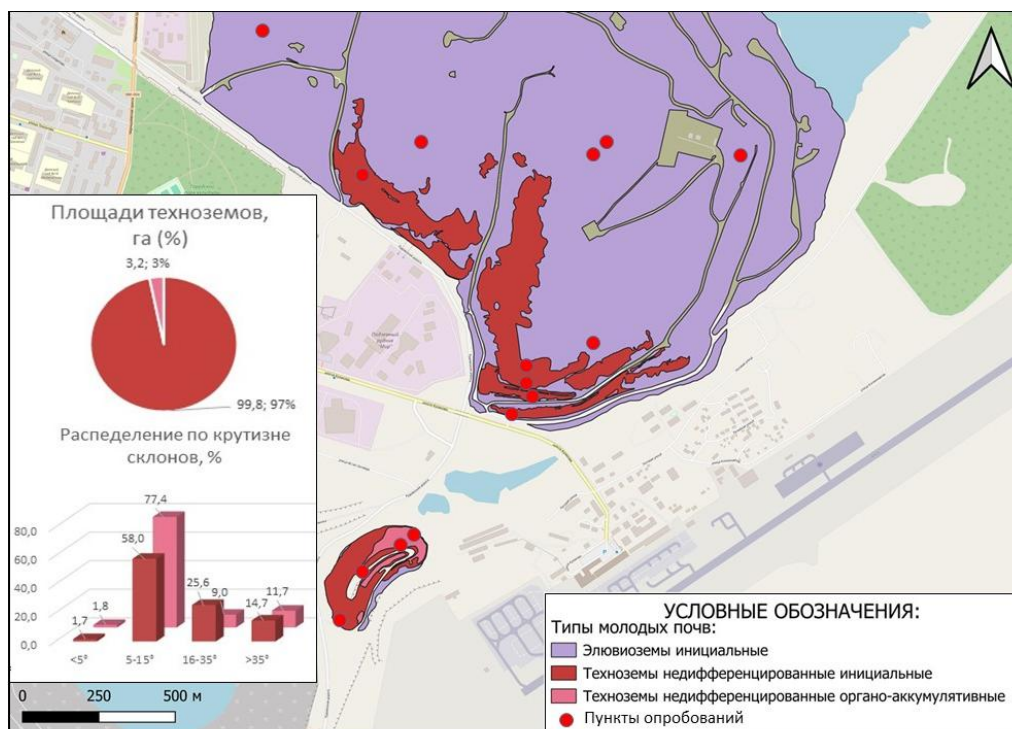


Рисунок 2. Карта-схема расположения техноземов на отвалах карьера «Удачный».

Отвал № 6 карьера «Мир» был рекультивирован в начале 1990-х годов (Миронова и др., 2012); южная часть отвала № 2 – в 2006–2008 гг.; отвалы карьера «Удачный» – в 2018-2019 гг. На отвалах карьера «Мир» рекультивированные участки занимают 103 га или 16,2% от общей площади. На отвале № 6 техноземы недифференцированные органо-аккумулятивной стадии развития занимают 3% от площади рекультивированных участков. Техноземы были сформированы, в основном, на склоновых поверхностях с небольшим уклоном ($5-15^\circ$) (см. рис. 1). Площадь рекультивированных участков отвалов вскрышных пород карьера «Удачный» составляет 26,6 га (9,5% от всей площади отвалов). Техноземы сформированы на горизонтальных поверхностях и на склонах со средним уклоном $16-35^\circ$. Доля техноземов недифференцированных, находящихся в органо-аккумулятивной стадии развития, составляет 6% от площади рекультивированных участков (см. рис. 2).

Согласно классификации почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002), грунты отвалов классифицируются как элювиоземы инициальные из класса литогенно неразвитых почв; на рекультивированных участках – техноземы недифференцированные (рис. 3), которые в настоящее время находятся в инициальной и органо-аккумулятивной стадиях развития (табл. 2). Уточнение классификационных выделов техногенных почв на объектах исследования проводили на основе почвенно-микробиологических исследований (Данилова и др., 2012, 2019; Петров и др., 2025).

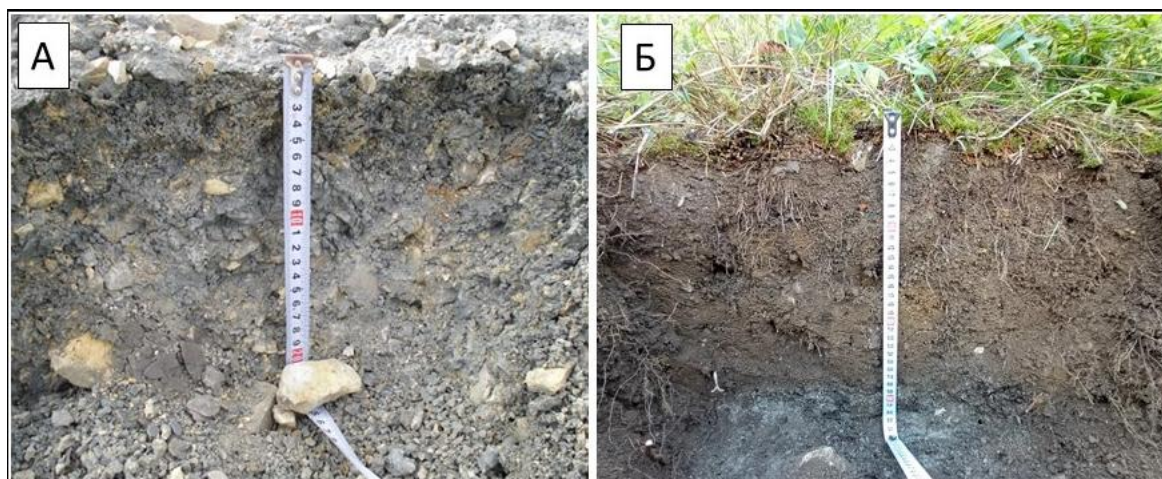


Рисунок 3. Профиль элювиоземов инициальных (А) и техноземов недифференцированных (В).

ПЭС отвалов вскрышных пород оценивается как «неудовлетворительное» (ПЭС=8,6–9,9 баллов). Это связано с неблагоприятными литогенными условиями для инициального почвообразования (Петров и др., 2025). Субстраты этих отвалов не поддерживают почвообразовательный процесс. Согласно ранее проведенным исследованиям (Петров, 2013), элювиоземы отвалов карьера «Мир» обладают значительной фитотоксичностью, обусловленной с высоким содержанием тяжелых металлов, типоморфных к кимберлитам.

При рекультивации на поверхность отвалов был нанесен слой **потенциально плодородных пород (ППП)** мощностью 20–40 см, характеризующийся супесчаным или суглинистым гранулометрическим составом (содержание физической глины <0,01 мм составляет 15–30%), нейтральной или слабощелочной реакцией среды (рН = 6,9–7,6), незначительным содержанием биогенных элементов и отсутствием засоления. На подготовленный слой ППП были внесены минеральные удобрения и сформированы устойчивые растительные сообщества (Миронова и др., 2012). Таким образом, на поверхности рекультивированного отвала органогенный слой из **плодородных слоев почв (ПСП)** отсутствовал. Почво-грунты рекультивированных участков классифицируются как техноземы недифференцированные (табл. 2). После окончания рекультивационных мероприятий эти техноземы развиваются под воздействием естественных факторов почвообразования. Так как, органогенные слои исходно не были сформированы, эволюционное развитие техноземов протекает по схожему сценарию развития эмбриоземов. На момент исследований данные техноземы находились в инициальной и органо-аккумулятивной стадиях развития.

Таблица 2

Систематический список техногенных почв* отвалов вскрышных пород разработки коренных месторождений алмазов

Ствол	Класс	Тип	Формула профиля	Синоним (Классификация ..., 2004)
Постлитогенные	Литогенно-неразвитые	Элювиоземы инициальные	Д	Группа: Токсифабрикаты Подгруппа: Токсилитостраты
	Техноземы трансформируемые	Техноземы недифференцированные	С+Д	Группа: Натурфабрикаты Подгруппа: Литостраты

Примечание.

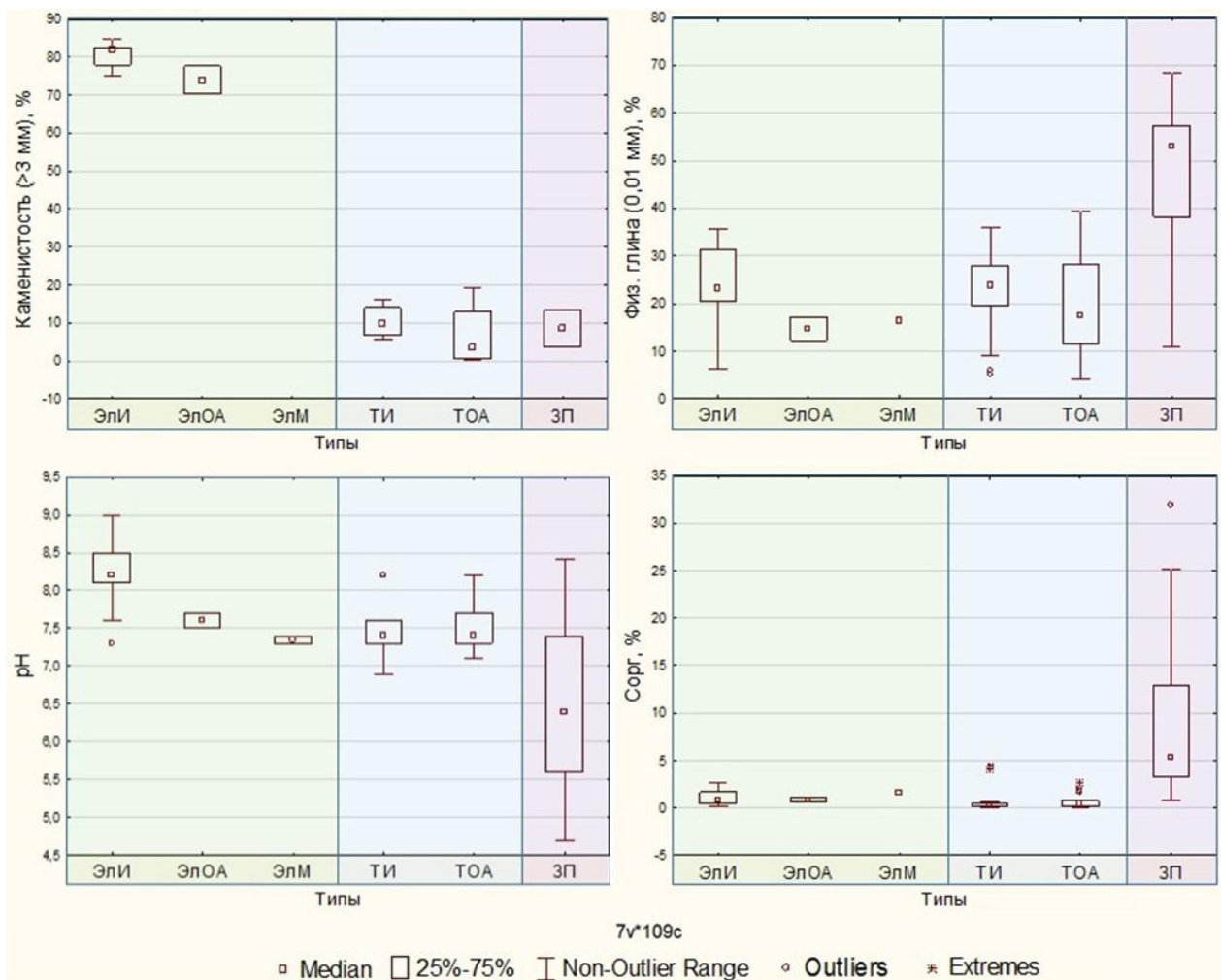
* – согласно классификации почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002).

На рисунке 4 приведены данные по основным свойствам элювиоземов, техноземов и естественных почв районов исследований. Как видно из рисунка, пределы колебаний физических показателей техноземов, таких как каменистость и физическая глина, перекрываются пределами колебаний показателей естественных почв и значительно отличаются от элювиоземов по каменистости. Кислотность субстратов техноземов, в основном, нейтральная и перекрывается пределами естественных почв. Содержание общего углерода у техноземов как и у элювиоземов, закономерно ниже, чем у естественных почв.

Для получения количественной оценки почвенно-экологического эффекта рекультивационных мероприятий провели оценку ПЭС рекультивированных участков.

Расчеты коэффициентов специфичности и ПЭС техноземов недифференцированных проведены аналогично самовосстанавливающимся отвалам. В качестве эталонов были приняты доминирующие в районах исследований зональные типы почв. Для отвалов карьера «Удачный» эталоном служат криоземы, а для отвалов карьера «Мир» — мерзлотные дерново-карбонатные почвы. В таблице 3 приведены усредненные значения физико-химических свойств почв, принятых за эталон.

Результаты расчетов приведены в таблицах 4 и 5. У техноземов отвалов вскрышных пород карьера «Мир» ПЭС составил 23,8 баллов, у техноземов карьера «Удачный» – 16,4 баллов (см. табл. 5). Эти значения соответствуют «удовлетворительной» категории ПЭС. Следовательно, эффект рекультивационных мероприятий путем формирования техноземов из ППП для отвалов карьера «Мир» составляет 15,2 балла, для отвалов карьера «Удачный» – 6,5. Таким образом, в результате рекультивационных мероприятий техноземы достигли органо-аккумулятивной стадии восстановления за прагматически приемлемый срок (20 лет). Более низкий балл для карьера «Удачный» связан, вероятно, с относительной молодостью объекта в сравнении с отвалами карьера «Мир».



ЭлИ – Элювиоземы инициальные; ЭлОА – Элювиоземы органо-аккумулятивные; ЭлМ – Элювиоземы мохопокрытые; ТИ – Техноземы недифференцированные инициальные; ТОА – Техноземы недифференцированные органо-аккумулятивные

Рисунок 4. Пределы колебаний основных показателей элювиоземов и техноземов отвалов коренных месторождений алмазов.

Таблица 3

Усредненные значения физико-химических свойств почв, принятых за эталон

п/№	Типы почв (по классификации Л.Г. Еловской (1987))	Физ. глина в мелкоземе (<0,01), %	Мелкозем (< 1 мм), %	Плотность, г/см ³	С _{орг} , в мелкоземе, %
Район кимберлитовой трубки «Удачный»					
3	Комплекс криоземов	51,4	90,1	0,6	12,8
Район кимберлитовой трубки «Мирный»					
4	Мерзлотные дерново-карбонатные	62,2	59,0	0,7	7,4

Таблица 4

Расчеты объединенных коэффициентов специфичности техноземов отвалов коренных месторождений алмазов в Западной Якутии

№	Типы почв	Кс.р.	Кс.ф.г	Кс.Рв	Кс.Сорг	Кс.ПП	Кс.МБУ	КС
Отвалы карьера «Мир»								
1	Элювиоземы инициальные	0,79	0,4	36	13	5	0	8,6
2	Техноземы недифференцированные инициальные	0,6	53,1	50,0	59,1	20,0	33,3	23,7
3	Техноземы недифференцированные органо-аккумулятивные	0,4	44,3	56,0	36,2	100,0	66,6	24,3
Отвалы карьера «Удачный»								
1	Элювиоземы инициальные	0,9	3	36	12	5	0	9,9
2	Техноземы недифференцированные инициальные	0,5	16,2	56,0	34,2	15,0	33,3	16,0
3	Техноземы недифференцированные органо-аккумулятивные	0,6	7,7	63,0	21,0	80,0	66,6	29,6

Примечание.

Коэффициент специфичности: Кс.р – по рельефу; Кс.ф.г – по физической глине; Кс.Рв – по плотности; Кс.Сорг – по органическому углероду; Кс.МБУ – по устойчивости сапротрофного микробного сообщества; Кс.ПП – по проективному покрытию растительности. КС – объединенный коэффициент специфичности конкретной техногенной почвы.

Таблица 5

Почвенно-экологический эффект (ПЭЭ) рекультивационных мероприятий с формированием техноземов на отвалах коренных месторождений алмазов в Западной Якутии

№	Типы почв	ПЭС (баллы)	ПЭС _р (баллы)	ПЭЭ (баллы)
1	Отвалы карьера «Мир»	8,6	23,8	15,2
2	Отвалы карьера «Удачный»	9,9	16,4	6,5

Положительный эффект рекультивационных мероприятий связан, в частности, с улучшением литогенных условий почвообразования, что подтверждается снижением фитотоксичности техноземов примерно на 70% по сравнению с элювиоземами. Данный эффект обусловлен экранированием токсичных элювиоземов нефитотоксичными потенциально-плодородными породами, нанесенными при формировании техноземов (рис. 4) (Петров, 2013).

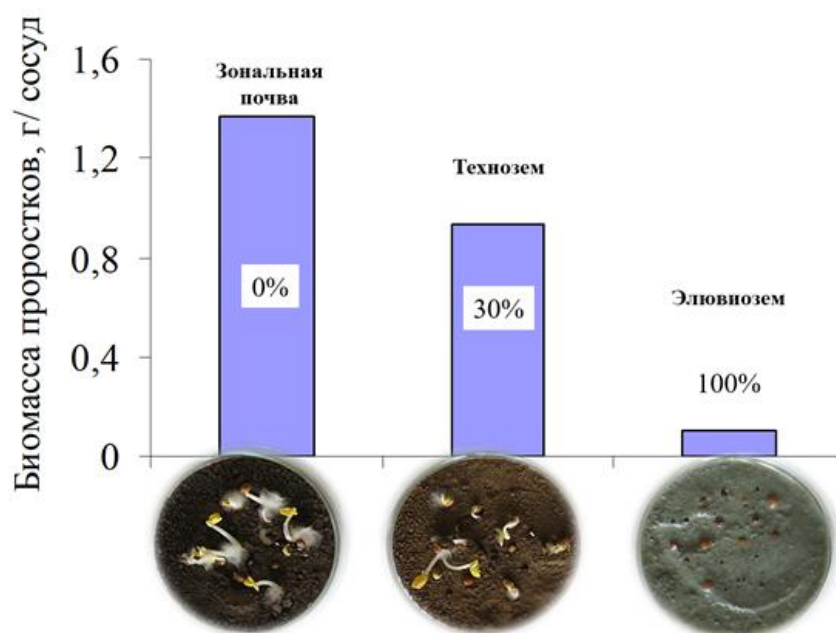


Рисунок 4. Уровень фитотоксичности грунтов отвала вскрышных пород и техноземов на территории карьера «Мир». Фитотест на проростках редиса.

Анализ соотношений коэффициентов специфичности (Кс.р., Кс.ф.г, Кс.Рв, Кс.Сорг, Кс.ПП, Кс.Мбу) и почвенно-экологического эффекта рекультивационных мероприятий (ПЭЭ) позволяет оценить факторы почвообразования, оказывающие наибольшее воздействие на эффект рекультивационных мероприятий. По тесноте связи с ПЭЭ исследованные коэффициенты специфичности составили убывающий ряд достоверных связей: Кс.ф.г (0,97) → Кс.Сорг (0,73) → Кс.Рв (-0,71) (табл. 6). Таким образом, наибольшее влияние на ПЭЭ оказывают содержание физической глины, органического углерода и плотность. Выявление этих факторов позволяет учитывать индивидуальные особенности отвалов при разработке проектов рекультивационных мероприятий.

Таблица 6

Корреляционный анализ соотношений коэффициентов специфичности техногенных ландшафтов Якутии и почвенно-экологического эффекта (ПЭЭ)

	Кс.р.	Кс.ф.г	Кс.Рв	Кс.Сорг	Кс.ПП	Кс.Мбу	ПЭЭ
Кс.р.	1,00						
Кс.ф.г	-0,22	1,00					
Кс.Рв	0,05	-0,85	1,00				
Кс.Сорг	0,14	0,86	-0,97	1,00			
Кс.ПП	-0,44	-0,06	0,57	-0,54	1,00		
Кс.Мбу	-0,30	-0,23	0,71	-0,66	0,98	1,00	
ПЭЭ	-0,30	0,97	-0,71	0,73	0,17	0,00	1,00

Примечание.

Коэффициент специфичности: Кс.р. – по рельефу; Кс.ф.г – по физической глине; Кс.Рв – по плотности; Кс.Сорг – по органическому углероду; Кс.ПП – по проективному покрытию растительности Кс.Мбу – по устойчивости сапротрофного микробного сообщества. Выраженные корреляции значимы при $p < 0,05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях обоснована применимость модифицированных расчетов почвенно-экологического состояния техногенно нарушенной экосистемы для оценки эффекта рекультивационных мероприятий. Суть модификации заключалась в следующем: для отвалов с сильнокаменистыми грунтами в формуле расчета коэффициентов специфичности по физической глине (Кс.ф.г) и органическому углероду (Кс.Сорг) уменьшили доли физической глины и органического углерода пропорционально доле мелкозема (фракция < 1 мм), поскольку определение данных показателей проводилось в мелкоземе; в формулу расчета добавили показатели, отражающие активность биологических процессов – коэффициенты специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества (Кс.Мбу) и по проективному покрытию растительности (Кс.ПП).

На примере отвалов вскрышных пород коренных месторождений алмазов Западной Якутии проведена апробация модифицированных расчетов для оценки почвенно-экологического эффекта рекультивационных мероприятий, представляющего собой разницу значений почвенно-экологического состояния до и после рекультивации. Показано, что неудовлетворительное почвенно-экологическое состояние, присущее этим объектам, можно повысить до удовлетворительного путем формирования техноземов из потенциально плодородных пород и плодородных слоев почв. При этом показатель эффекта рекультивационных мероприятий за 10–20 лет составлял 6,5–15 баллов. Анализ соотношений коэффициентов специфичности показал, что наибольшее влияние на почвенно-экологический эффект оказывают содержание физической глины и органического углерода, а также плотность субстрата. Определение этих факторов позволяет учитывать индивидуальные особенности отвалов при разработке проектов рекультивационных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

- Андроханов В.А., Курачев В.М. Принципы оценки почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2009. Том 16. № 2. С. 165–169.
- Андроханов В.А., Курачев В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2010. 224 с.
- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Издательство МГУ, 1970. 240 с.
- Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. Москва: ГУГК, 1989. 115 с.

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.С. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 345 с.
- Воробьева Л.А. Химический анализ почв. Москва: Издательство МГУ, 1998. 240 с.
- Госсен И.Н., Кулижский С.П., Данилова Е.Б., Соколов Д.А. Бонитировочный подход к оценке почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов Сибири (на примере отвалов антрацитовых, каменно- и бурогольных месторождений) // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2016. № 2(39). С. 71–82.
- Гуркова Е.А., Госсен И.Н., Куляпина Е.Д., Соколов Д.А., Беланов И.П., Андроханов В.А. Методические рекомендации по проведению почвенно-экологического обследования техногенно нарушенных территорий. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2019. 32 с.
- Данилова А.А., Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А. Биологическая характеристика почвогрунтов многолетних отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии // Сибирский экологический журнал. 2012. № 5. С. 749–756.
- Данилова А.А., Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Петров А.А. Способ оценки устойчивости сапротрофного микробного сообщества почвы методом мультисубстратного теста // Патент RU 2678876 С2. Заявление: 2017123480, 03.07.2017. Дата публикации: 04.02.2019.
- Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: Сиб. отд. Якут. филиал СО АН СССР, 1987. 172 с.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Том 9. № 3. С. 255–261.
- Миронова С.И., Иванов В.В., Гаврильева Л.Д., Назарова Г.В., Петров А.А. Научные основы выбора способов биологической рекультивации отвалов карьера «Айхал» // Успехи современного естествознания. 2012. № 11. С. 125–127.
- Национальный атлас России: В 4-х томах / А.Д. Думнов, А.А. Кирсанов, Е.А. Киселева и др. Том 2. Москва: ПКО «Картография», 2007. 496 с.
- Петров А.А. Особенности почвенно-восстановительных процессов в посттехногенных ландшафтах Западной Якутии. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Якутск, 2013. 22 с.
- Петров А.А., Саввинов Г.Н., Данилова А.А. Оценка почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов добычи алмазов в Якутии // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. e325. <https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325>
- Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижский С.П., Доможакова Е.А., Лойко С.В. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири // Почвоведение. 2015. № 1. С. 106–117. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010153>
- Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. Калиничева С.В., Башарин Н.И., Егорова Л.С., Константинов П.Я., Самсонова В.В., Николаев А.Н., Галанин А.А., Лыткин В.М., Угаров И.С., Шепелев А.Г., Васильев А.И., Ефремов Р.Н., Иванова Р.Н., Аргунов Р.Н. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л.
- Bennett J.M., Melland A.R., Eberhard J., Paton C., Clewett J.F., Newsome T., Baillie C. Rehabilitating open-cut coal mine spoil for a pasture system in south east Queensland, Australia: Abiotic soil properties compared with unmined land through time // Geoderma Regional. 2021. Vol. 25. e00364. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>
- Garg D., Patel N., Rawat A., Rosado A.S. Cutting edge tools in the field of soil microbiology // Current Research in Microbial Sciences. 2024. Vol. 6. P. 100226. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100226>
- Gatica-Saavedra P., Aburto F., Rojas P., Echeverría C. Soil health indicators for monitoring forest ecological restoration: a critical review // Restoration Ecology. 2023. Vol. 31. No. 5. e13836. <https://doi.org/10.1111/rec.13836>
- Gwenzi W. Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems Willis // Geoderma. 2021. Vol. 387. P. 114944. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114944>
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M, Wolfe D.W., Abawi G.S. Comprehensive Assessment of Soil Health. The Cornell Framework. NY: Cornell University, 2016. 134 p.

Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration // Current Opinion Environmental Science & Health. 2018. Vol. 5. P. 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>

Pandey V.C., Ahirwal J., Roychowdhury R., Chaturvedi R. Eco-Restoration of Mine Land. Assessing Mine Restoration Success Using Biological Soil Quality Indicators. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. Chapter 5. P. 153–180. <https://doi.org/10.1002/9781119872283.ch5>

Spasić M., Borůvka L., Vacek O., Drábek O., Tejnecký V. Pedogenesis problems on reclaimed coal mining sites // Soil and Water Research. 2021. Vol. 16. No. 3. P. 137–150. <https://doi.org/10.17221/163/2020-SWR>

Van der Heyde M., Bunce M., Dixon K., Wardell-Johnson G., White N.E., Nevill P. Changes in soil microbial communities in post mine ecological restoration: Implications for monitoring using high throughput DNA sequencing // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 749. P. 142262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142262>

Поступила в редакцию 30.10.2025

Принята 23.01.2026

Опубликована 31.03.2026

Сведения об авторах:

Петров Алексей Анатольевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (Якутск, Россия); Petrov_Alexey@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6863-7548>

Саввинов Григорий Николаевич – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, директор Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» (Якутск, Россия); savvinov_gn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>

Данилова Альбина Афанасьевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); Danilova7alb@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Evaluation of diamond mining spoils reclamation efficiency in West Yakutia

© 2026 A. A. Petrov ¹, G. N. Savvinov ¹, A. A. Danilova ²

¹Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University, Lenin Avenue, 43, Yakutsk, Russia. E-mail: Petrov_Alexey@mail.ru, savvinov_gn@mail.ru

²Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, 356, Novosibirsk Region, Russia, E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

The aim of the study was to evaluate the soil ecological effect for the reclaimed diamond mining spoils in West Yakutia, where reclamation resulted in undifferentiated technosol development.

Location and time of the study. Waste rock spoils formed during diamond deposits mining in West Yakutia (N 66°26,5'52,16", E 112°19'24,67"; N 62°32'32,90", E 114°01'14,89") were studied. Experimental data were obtained during research carried out by the D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North of NEFU from 2007 to 2024.

Methods. A modified appraisal approach was applied to calculate the soil ecological status (SES) of technogenically disturbed landscapes.

Results. A series of electronic maps was developed depicting the reclaimed areas on waste rock spoils from the Mir and Udachny kimberlite pipes. According to the classification of technogenic landscape soils, the spoil soils are classified as initial eluviozems from the class of lithogenically undeveloped soils (SES = 8,6–9,9 points), whereas the reclaimed areas are classified as undifferentiated technozems (SES = 16–24 points), which are currently at the initial and organo-accumulative stages of development. The value of the soil ecological effect ranged from 6,5 to 15 points. Additional evidence for the validity of our calculations was the SEE correlation with the age of a mining spoil: for the Mir quarry spoils over 20 years old it was 15,2, for the Udachny quarry spoils less than 10 years old it was 6,5 points).

Conclusions. *The applicability of the modified soil ecological status estimates for assessing the impact of reclamation of diamond mining spoils in West Yakutia was substantiated. During the first 10–20 years after the technozems formation by applying potentially fertile soil material, the SES value of the mining spoil substrates increased from "unsatisfactory" (8,6–9,9 points) to "satisfactory" (16–24 points). The soil ecological effect value ranged from 6,5 to 15 points. This effect was achieved by significantly neutralizing the phytotoxicity of the initial mining spoil substrates. Of the lithogenic factors, the content of physical clay and organic carbon had the greatest positive effect on soil ecological status, whereas the substrate density had a negative effect.*

Keywords: *mining spoils; technogenically disturbed landscapes; estimation of reclamation effect; West Yakutia; cryolithozone.*

How to cite: *Petrov A.A., Savvinov G.N., Danilova A.A. Evaluation of the diamond mining spoils reclamation efficiency in West Yakutia. The Journal of Soils and Environment. 2026. 9(2). e341. DOI: [10.31251/pos.v9i2.341](https://doi.org/10.31251/pos.v9i2.341) (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

- Androkhanov V.A., Kurachev V.M. Principles of the evaluation of soil-ecological state of technogenic landscapes. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2009. Vol. 16. No. 2. P. 165–169. (in Russian).
- Androkhanov V.A., Kurachev V.M. Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 224 p. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Guide to chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1970. 240 p. (in Russian).
- Atlas of Agriculture of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic. Moscow: GUGK, 1989. 115 p. (in Russian).
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.S. Methods for studying the physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 345 p. (in Russian).
- Vorobyova L.A. Chemical analysis of soils. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1998. 240 p. (in Russian).
- Gossen I.N., Kulizhsky S.P., Danilova E.B., Sokolov D.A. Bonitation approach to assessing the soil-ecological state of technogenic landscapes of Siberia (using the example of dumps of anthracite, hard and lignite deposits). *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2016. No. 2(39). P. 71–82. (in Russian).
- Gurkova E.A., Gossen I.N., Kulyapina E.D., Sokolov D.A., Belanov I.P., Androkhanov V.A. Methodological recommendations for conducting soil-ecological surveys of technogenically disturbed areas. Novosibirsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 2019. 32 p. (in Russian).
- Danilova A.A., Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A. Biological characterization of dump soils in diamond - mining industry of Yakutia. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2012. No. 5. P.749–756. (in Russian).
- Danilova A.A., Legostaeva Ya.B., Sivtseva N.E., Petrov A.A. Method for assessing the stability of the saprotrophic microbial community of soil using the multisubstrate test method. Patent RU 2678876 C2. Application: 2017123480, 03.07.2017. Publication date: 04.02.2019. (in Russian).
- Elovskaya L.G. Classification and diagnostics of frozen soils in Yakutia. Yakutsk: SO Yakut. filial SO AN SSSR, 1987. 172 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russia / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kurachev V.M., Androkhanov V.A. Classification of Soils of Technogenous Landscapes. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).
- Mironova S.I., Ivanov V.V., Gavrilyeva L.D., Nazarova G.V., Petrov A.A. Scientific basis for choosing methods for biological reclamation of dumps from the Aikhal quarry. *Advances in Current Natural Sciences*. 2012. No. 11. P. 125–127. (in Russian).
- National Atlas of Russia: In 4 volumes / A.D. Dumnov, A.A. Kirsanov, E.A. Kiseleva et al. Vol. 2. Moscow: Cartography, 2007. 496 p. (in Russian).
- Petrov A.A. Features of soil restoration processes in post-technogenic landscapes of Western Yakutia. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Yakutsk, 2013. 22 p. (in Russian).
- Petrov A.A., Savvinov G.N., Danilova A.A. Assessment of the soil-ecological state of post-technogenic diamond mining landscapes in Yakutia. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. Vol. 8. No. 3. e325. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325>

Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Kulizhskii S.P., Loiko S.V., Domozhakova E.A. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015. Vol. 48. No. 1. P. 95–105. <https://doi.org/10.1134/S1064229315010159>

Fedorov A. N., Torgutkin Ya. I., Shestakova A. A., Vasiliev N. F., Makarov V. S. Kalinicheva S. V., Basharin N. I., Egorova L. S., Konstantinov P. Ya., Samsonova V. V., Nikolaev A. N., Galanin A. A., Lytkin V. M., Ugarov I. S., Shepelev A. G., Vasiliev A. I., Efremov R.N., Ivanov R.N., Argunov R.N. Permafrost landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1: 1 500 000. Yakutsk: IMZ SO RAN, 2018. 2 p. (in Russian).

Bennett J.M., Melland A.R., Eberhard J., Paton C., Clewett J.F., Newsome T., Baillie C. Rehabilitating open-cut coal mine spoil for a pasture system in south east Queensland, Australia: Abiotic soil properties compared with unmined land through time. *Geoderma Regional*. 2021. Vol. 25. e00364. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>

Garg D., Patel N., Rawat A., Rosado A.S. Cutting edge tools in the field of soil microbiology. *Current Research in Microbial Sciences*. 2024. Vol. 6. P. 100226. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100226>

Gatica-Saavedra P., Aburto F., Rojas P., Echeverría C. Soil health indicators for monitoring forest ecological restoration: a critical review. *Restoration Ecology*. 2023. Vol. 31. No. 5. e13836. <https://doi.org/10.1111/rec.13836>

Gwenzi W. Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems Willis. *Geoderma*. 2021. Vol. 387. P. 114944. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114944>

Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M, Wolfe D.W., Abawi G.S. Comprehensive Assessment of Soil Health. The Cornell Framework. NY: Cornell University, 2016. 134 p.

Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion Environmental Science & Health*. 2018. Vol. 5. P. 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>

Pandey V.C., Ahirwal J., Roychowdhury R., Chaturvedi R. Eco-Restoration of Mine Land. Assessing Mine Restoration Success Using Biological Soil Quality Indicators. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. Chapter 5. P. 153–180. <https://doi.org/10.1002/9781119872283.ch5>

Spasić M., Borůvka L., Vacek O., Drábek O., Tejnecký V. Pedogenesis problems on reclaimed coal mining sites. *Soil and Water Research*. 2021. Vol. 16. No. 3. P. 137–150. <https://doi.org/10.17221/163/2020-SWR>

Van der Heyde M., Bunce M., Dixon K., Wardell-Johnson G., White N.E., Nevill P. Changes in soil microbial communities in post mine ecological restoration: Implications for monitoring using high throughput DNA sequencing. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 749. P. 142262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142262>

Received 30 October 2025

Accepted 23 January 2026

Published 31 March 2026

About the authors:

Alexey A. Petrov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); Petrov_Alexey@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6863-7548>

Grigory N. Savvinov – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Director of the Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); savvinov_gn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5324-5410>

Albina A. Danilova – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher at the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russia); Danilova7alb@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)