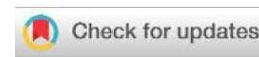


УДК 631.481

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325>

Оценка почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов добычи алмазов в Якутии

© 2025 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. Оценить почвенно-экологическое состояние самовосстанавливающихся отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии для разработки научно-практических рекомендаций по проведению биологического этапа рекультивационных мероприятий.

Место и время проведения. Изучены отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке россыпных и коренных месторождений в Северной и Западной Якутии. Отвалы значительно отличаются между собой по рельефу, почвообразующим породам и другим характеристикам. Фактический материал был собран в рамках выполнения НИР НИИПЭС имени профессора Д.Д. Саввинова СВФУ с 2007–2024 гг.

Методы. Применен и модифицирован бонитировочный подход для оценки почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов, предложенный сотрудниками Института почвоведения и агрохимии СО РАН.

Основные результаты. Проведена интегральная оценка индивидуальной специфики отвалов вскрышных пород и перспектив самовосстановления их важнейших почвенно-экологических функций для разработки (или адаптации) методов и технологий рекультивационных мероприятий в условиях криолитозоны Якутии. В целях повышения точности оценки почвенно-экологического состояния предложена модификация вычислений, которая заключается в применении двухступенчатого расчета коэффициента специфичности по физической глине и ввода в формулу расчета показателей, отражающих состояние почвенной микробиоты и растительности.

Заключение. Предложены градации почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов Якутии, позволяющие проводить интегральную оценку состояния широкого спектра отвалов для разработки индивидуальных проектов рекультивационных мероприятий.

Ключевые слова: почвенно-экологическое состояние; техногенные ландшафты; почвообразование; рекультивация; эмбриоземы; элювиоземы; алмазодобывающая промышленность; Якутия.

Цитирование: 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. DOI: [10.31251/pos.v8i3.325](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325)

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 году Генеральная Ассамблея ООН сформулировала 17 целей для обеспечения устойчивого развития мира (Sustainable Development Goals) (Ильин и др., 2015; Урсул А., Урсул Т., 2016). Достижение 13 из них напрямую или опосредованно связано с благополучием почвы (Lal et al., 2021). На пути решения поставленных задач возникают сложнейшие противоречия. С ростом населения Земли возрастает потребность в минеральных и энергетических ресурсах. Соответственно, возрастает активность **добычи полезных ископаемых (ДПИ)**, в процессе которой неизбежно нарушается вся экосистема территории. В обзорах (Worlanyo, Jiangfeng, 2021; Forget, Rossi, 2021) нарушение почвенно-растительного покрова территории признается ключевой проблемой, вызывающей каскад экологических и социально-культурных проблем. Если влияние ДПИ на экономические параметры территории, как правило, положительное, на социальную сферу – обычно неоднозначное, то последствия для окружающей среды всегда негативны. В связи с этим восстановление техногенно нарушенных экосистем становится сложнейшим вызовом XXI века. Огромное разнообразие природных, литогенных условий формирования этих объектов обуславливает практическую невозможность унификации методов рекультивации. Тем не менее, в последние годы в литературе все чаще озвучивается проблема поиска интегральных критериев для оценки состояния **техногенно нарушенных (ТН)** экосистем (Spasić et al., 2021; Gwenzi 2021; Van der Heyde et al., 2020). Для этих целей было предложено использовать интегральный показатель здоровья почвы (SQI)

(Muñoz-Rojas, 2018). Суть метода заключается в измерении большого ряда показателей почвы, оценку их уровня в баллах и вычислении суммы этих баллов (Moebius-Clune et al, 2016). Появились сомнения в корректности данного подхода для оценки ТН экосистем, поскольку сложно найти пределы, ограничивающие список возможных показателей почвы (Gwenzi, 2021). Упомянутые выше авторы считают, что ТН почва является новым объектом, так как ее свойства невозможно приблизить к показателям исходного ненарушенного аналога. Поэтому оценка состояния такого объекта должна основываться на других принципах. Как известно, изучение почвообразовательных процессов на техногенных ландшафтах при первом приближении преследует две цели. Первая теоретическая – изучение начальных этапов образования почвы с исходного, так называемого ноль-момента, вторая прикладная – разработка схем и оценка результатов рекультивационных мероприятий. Если для достижения первой цели является логичным сравнение получаемых сведений с показателями исходной ненарушенной почвы, то для достижения второй корректность данного подхода вызывает сомнения (Gwenzi, 2021; Bennett et al., 2021). Осознавая этот момент, в частности 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 данным литературы, 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 (ИПА) СО РАН (Андроханов и др., 2009; Андроханов и др., 2010; Соколов и др., 2015; Госсен и др., 2016) предложили использовать бонитировочный подход на основе расчета почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов, который был реализован для оценки состояния угольных отвалов на территории Кузбасса. Актуальность решения подобной проблемы чрезвычайно высока и для техногенных ландшафтов криолитозоны, в частности, для территорий, нарушенных при разработке месторождений алмазов. Алмазодобывающая промышленность является одной из традиционных базовых отраслей экономики Республики Саха (Якутия). За 70 лет развития отрасли в Западной Якутии открытым способом разработаны кимберлитовые трубки «Мир», «Интернациональный», «Айхал», «Удачный» и др. Кроме этого, начиная с 1990-х годов, разрабатываются россыпные месторождения алмазов в Северной Якутии. Посттехногенные ландшафты оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в связи с чем нуждаются в рекультивационных мероприятиях, в первую очередь, санитарно-гигиенического направления. Для разработки способов и технологий последних, адаптированных к природно-климатическим условиям Якутии, необходима интегральная оценка индивидуальной специфики каждого техногенного ландшафта и перспектив самовосстановления в нем важнейших почвенно-экологических функций. Таким показателем может быть оценка **почвенно-экологического состояния (ПЭС)** техногенного ландшафта.

Цель – оценить почвенно-экологическое состояние самовосстанавливающихся отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии для разработки научно-практических рекомендаций по проведению биологического этапа рекультивационных мероприятий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследований послужили разновозрастные отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке россыпных месторождений алмазов в Северной Якутии и коренных месторождений алмазов открытым способом в Западной Якутии. Исследования были проведены на трёх ключевых участках, которые расположены в тундрово-лесной, северотаежной и среднетаежной почвенно-растительных подзонах Якутии (рис. 1). Объекты исследований находятся в зоне сплошного распространения многолетнемёрзлых пород. Согласно климатическому районированию России (Национальный атлас ..., 2007), ключевые участки «Анабарский» и «Айхало-Удачный» входят в Сибирскую область Субарктического пояса, с умеренно холодным, умеренно влажным климатом, а ключевой участок «Мирнинский» входит в континентальную Восточносибирскую область умеренного пояса с умеренно холодным, умеренно влажным климатом.

Технологии разработки россыпных месторождений предопределили техногенный неорельеф и исходный субстрат почвообразования – невысокие отвалы холмовидной, гребневидной и трапиевидной формы с разнообразными условиями почвообразования. Грунты этих отвалов представлены смесью мелкозёма суглинистого гранулометрического состава и гравия.

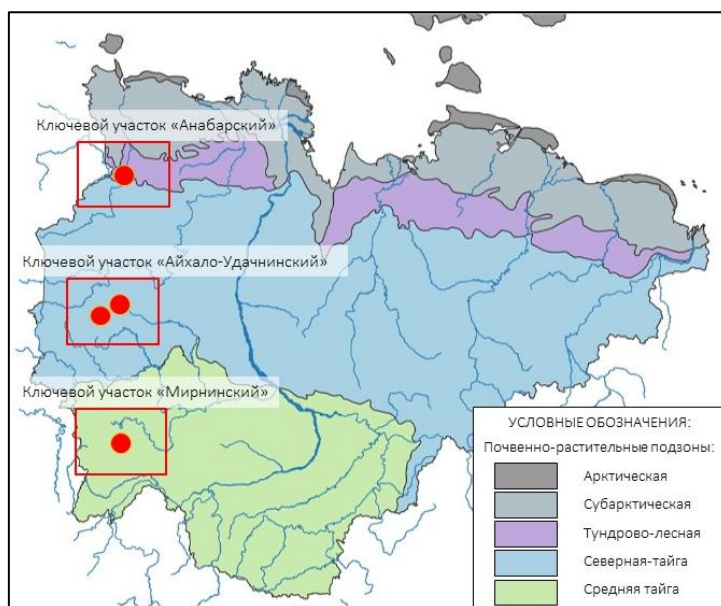


Рисунок 1. Объекты исследований на карте почвенно-растительного зонирования Якутии (Атлас сельского хозяйства ..., 1989).

Согласно ГОСТу 17.5.1.02-85 отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов Западной Якутии относятся к очень высоким платообразным одно- или многоярусным отвалам трапецевидной формы. Тела отвалов сложены доломитами, известняками, доломитовыми мергелями и алевролитами, которые слабо поддаются выветриванию.

Согласно классификации почв техногенных ландшафтов (Курачев и др., 2002), основу структуры почвенного покрова изученных отвалов составляют представители двух классов, которые подразделяются на шесть типов (табл. 1).

Таблица 1

Систематический список молодых почв отвалов вскрышных пород россыпных месторождений Северной Якутии

Ствол	Класс	Тип
Отвалы россыпных месторождений алмазов в Северной Якутии		
Постлитогенные	Биогенно-неразвитые	Эмбриоземы инициальные
		Эмбриоземы органо-аккумулятивные
		Эмбриоземы дерновые
Отвалы коренных месторождений алмазов в Западной Якутии		
Постлитогенные	Литогенно-неразвитые	Элювиоземы инициальные
		Элювиоземы органо-аккумулятивные
		Элювиоземы мохопокрытые

Техногенные почвы из класса «биогенно-неразвитых» формируются на рыхлых породах отвалов россыпных месторождений алмазов, где получили своё развития эмбриозёмы. Грунты отвалов коренных месторождений алмазов классифицированы как элювиозёмы из класса «литогенно-неразвитых» (табл. 1), при этом элювиоземы инициальные занимают 99–100% от общей площади отвалов.

Оценку состояния объектов провели при помощи расчета ПЭС на основе расчета коэффициентов специфичности согласно методическим рекомендациям (Гуркова и др., 2019).

В целях повышения точности и обоснованности расчета ПЭС в природно-климатических и техногенно-литогенных условиях Якутии данный метод был модифицирован (табл. 2):

1. Для отвалов с сильнокаменистыми грунтами в формулу расчета коэффициентов специфичности по физической глине (Кс.ф.г.) и органическому углероду (Кс.Сорг) было введено уменьшение долей физической глины и органического углерода пропорционально содержанию мелкозема (частиц с размером менее 1 мм), так как физическая глина и органический углероды были определены в мелкоземе.

2. В формулу расчета были добавлены показатели, отражающие активность биологических процессов – коэффициенты специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества (КсМбу) и по проективному покрытию растительности (КсПП).

Таблица 2

Модификации расчета почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов для криолитозоны Якутии

Оригинал	Модификации
$\text{Кс. ф. г.} = \frac{\text{Кф. г. э} \times 100}{\text{Кф. г. эталон}}$	$\text{Кс. ф. г.} = \frac{\text{М} \times \text{Кф. г. э} \times 100}{\text{М. эталон} \times \text{Кф. г. эталон}}$
Кс.ф.г. – коэффициент специфичности по содержанию физической глины; Кф.г.э. – содержание физической глины в искомой техногенной почве; Кф.г. эталон – содержание физической глины в почве, принятой за эталон; М – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в искомой техногенной почве; М.эталон – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в почве, принятой за эталон.	
$\text{Кс. Сорг} = \frac{\text{Сорг} \times 100}{\text{Сорг. эталон}}$	$\text{Кс. Сорг} = \frac{\text{М} \times \text{Сорг} \times 100}{\text{М. эталон} \times \text{Сорг. эталон}}$
Кс.Сорг – коэффициент специфичности по органическому углероду; Сорг – содержание органического углерода в искомой техногенной почве; Сорг.эталон – содержание органического углерода в почве, принятой за эталон; М – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в искомой техногенной почве; М.эталон – мелкозем, доля фракций с размером менее 1 мм в почве, принятой за эталон.	
Нет показателя	$\text{КсМбу} = \frac{\text{МБУт} \times 100}{\text{МБУэталон}}$
КсМбу – коэффициент специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества; МБУт – устойчивость сапротрофного микробного сообщества в искомой техногенной почве; МБУэталон – устойчивость сапротрофного микробного сообщества почвы, принятого за эталон.	
Нет показателя	$\text{КсПП} = \frac{\text{ППт} \times 100}{\text{ППэталон}}$
КсПП – коэффициент специфичности по проективному покрытию растительности; ППт – проективное покрытие растительности в искомой техногенной почве; ППэталон – проективное покрытие почвы, принятого за эталон.	
$\text{Кс} = \frac{\Sigma(\text{Кс. Рb, Кс. Сорг, Кс. ф. г.})}{3} \times \text{Кс. р}$	$\text{Кс} = \frac{\Sigma(\text{Кс. Рb, Кс. Сорг, Кс. ф. г., Кс. ПП, Кс. Мбу})}{5} \times \text{Кс. р}$
Кс – Объединенный коэффициент специфичности конкретной техногенной почвы; Кс.р – Коэффициент специфичности по рельефу; Кс.ф.г – Коэффициент специфичности по физической глине; Кс.Рb – Коэффициент специфичности по плотности; Кс.Сорг – Коэффициент специфичности по органическому углероду; КсМбу – Коэффициент специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества; КсПП – Коэффициент специфичности по проективному покрытию растительности.	

Химические, физико-химические, агрохимические и агрофизические свойства почв определены общепринятыми для почвоведения методами (Аринушкина, 1970; Агрохимические методы ..., 1975; Воробьева, 1998; Хитров, Понизовский, 1990; Вадюнина, Корчагина, 1986) в лаборатории физико-химических методов анализа НИИПЭС СВФУ (Аттестат аккредитации RA.RU.210B4). Картографические материалы созданы и обработаны с помощью программного обеспечения QGIS 3.30.1. Статистический анализ выполнен с использованием программного обеспечения Statistica 10.0. Для классификации техногенных почв применена профильно-генетическая классификация почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При помощи ГИС-технологий были созданы карты рельефа, крутизны и экспозиции склонов отвалов. Определены площади техногенных почв на разных склоновых поверхностях по крутизне (0–5°, 6–15°, 16–35°) и экспозиции (Ю–ЮЗ–З, СЗ–С–СВ, В–ЮВ) (рис. 2). На основе параметров рельефа отвалов рассчитали коэффициенты специфичности по рельефу для всех типов техногенных почв и грунтов (табл. 2). Показатели для отвалов вскрышных пород россыпных месторождений алмазов

составили $K_{с.р.} = 0,85–0,98$ баллов, что отражает благоприятные геоморфологические условия для протекания почвообразовательного процесса. Отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов обладают также неплохими геоморфологическими условиями ($K_{с.р.} = 0,65–1,00$ баллов).

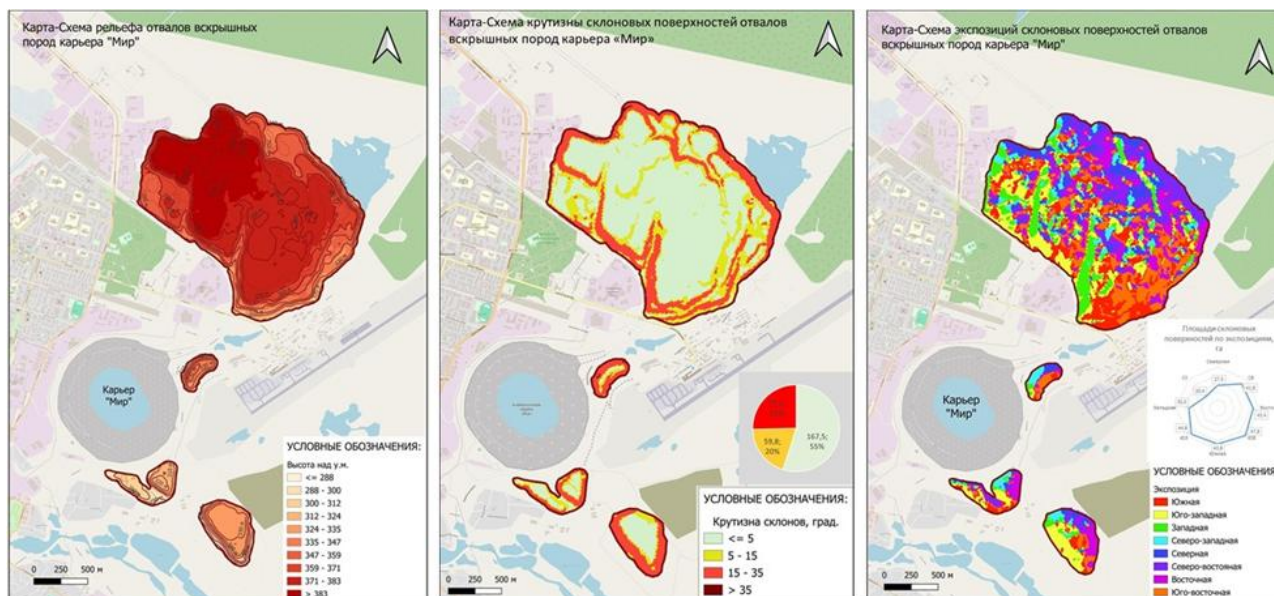


Рисунок 2. Примеры тематических карт параметров рельефа, созданные на основе ArcticDEM (Digital Elevation Model, разрешение 2 м).

Особенности месторождений алмазов и технологии добычи полезных ископаемых привели к формированию отвалов вскрышных пород с разными почвообразующими породами. При разработке россыпных месторождений сформированы отвалы из **потенциально плодородных пород (ППП)**. Разработки кимберлитовых трубок открытым способом вызвали образование отвалов вскрышных пород, состоящих в основном из грубообломочных массивно-кристаллических пород с небольшим содержанием мелкозёма (10–30%) (Петров, 2021).

Применение формулы расчета коэффициента специфичности по физической глине ($K_{с.ф.г.}$) по оригинальной методике (табл. 2) для отвалов с сильнокаменистыми грунтами приводили к некорректным результатам (табл. 3). Так, $K_{с.ф.г.}$ элювиоземов карьера «Айхал» составил 29–51 баллов (оценка удовлетворительная), что не соответствует действительности. Причиной ошибки является высокое содержание физической глины (15–26%) в мелкоземе субстрата. Поэтому в данной формуле мы предлагаем внести некоторые изменения – в расчетах $K_{с.ф.г.}$ долю физической глины уменьшаем пропорционально содержанию мелкозёма (табл. 2). В результате применения модифицированной формулы получили следующие результаты – техногенные почвы отвалов россыпных месторождений алмазов обладают благоприятными условиями по содержанию физической глины ($K_{с.ф.г.} = 71–82\%$). Грунты отвалов вскрышных пород коренных месторождений обладают высокой специфичностью ($K_{с.ф.г.} = 0,4–9\%$).

Важной особенностью эдафических условий почвообразования на отвалах вскрышных пород является плотность сложения техногенных почв и грунтов. Техногенные почвы отвалов вскрышных россыпных месторождений алмазов имеют небольшую специфичность по плотности ($K_{с.рб} = 75–86\%$). Грунты отвалов вскрышных пород коренных месторождений уплотнены и относительно эталонных почв имеют большую специфичность ($K_{с.рб} = 31–36\%$) (табл. 3). Сильная уплотнённость грунтов лимитирует процессы самовосстановления отвалов и усложняет проведение рекультивационных мероприятий.

Результатом функционирования посттехногенных ландшафтов является накопление и преобразование органического вещества, поэтому содержание педогенного углерода является важным показателем не только функционирования экосистемы, но и ее способности к самовосстановлению. Так как органический углерод определяется в мелкоземе субстрата, формула расчета коэффициента специфичности по органическому углероду ($K_{с.орг}$) для отвалов с сильнокаменистыми грунтами была модифицирована: долю органического углерода пересчитывали пропорционально содержанию мелкозема (табл. 2).

Таблица 3

Итоги расчёта коэффициентов специфичности конкретной техногенной почвы и почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов по оригинальной и модифицированной методике

Типы почв	S,%	Кс по оригинальной методике				Кс по модифицированной методике				КС			ПЭС
		Кс.р.	Кс.Рb	Кс.ф.г	Кс.Сорг	Кс.ф.г	Кс.Сорг	Кс.ПП	Кс.МбУ	Ориг.	Модиф.	Ориг.	Модиф.
Отвалы россыпных месторождений алмазов													
Эмбриоземы инициальные	2,0	0,85	75	99	69	75	53	20	33,3	69	52	71	72
Эмбриоземы органо-аккумулятивные	88,7	0,92	86	82	62	71	54	75	66,6	70	71		
Эмбриоземы дерновые	9,3	0,98	86	93	53	82	46	100	100,0	76	84		
Отвалы коренных месторождений алмазов													
Отвалы карьера «Айхал»													
Элювиоземы инициальные	99,1	0,80	31	51	5	8	1	5	0,0	23	10	23	9,8
Элювиоземы органо-аккумулятивные	0,7	0,65	36	29	7	8	2	20	33,3	15	20		
Элювиоземы мохопокрытые	0,2	1,00	33	32	12	9	4	30	33,3	26	23		
Отвалы карьера «Удачный»													
Элювиоземы инициальные	100	0,79	36	3	13	0,4	2	5	0	14	9,4	14	9
Отвалы карьера «Мир»													
Элювиоземы инициальные	100	0,90	36	11	12	3	3	5	0	18	8,3	18	8

Изученные отвалы вскрышных пород значительно отличаются между собой по содержанию и генезису органического углерода. Грунты отвалов вскрышных пород россыпных месторождений изначально содержат органическое вещество, унаследованное от древних аллювиальных отложений, сохранных многолетней мерзлотой. Эти органогенные вещества вовлекаются в биологический круговорот, что увеличивает потенциал субстрата к самовосстановлению. Эмбриоземы отвалов россыпных месторождений имеют умеренную специфичность по органическому углероду ($K_{с.Сорг} = 46\text{--}54\%$). Грунты отвалов вскрышных пород коренных месторождений не содержат органического углерода, поэтому относительно зональных мерзлотных дерново-карбонатных почв имеют очень высокую специфичность ($K_{с.Сорг} = 1\text{--}4\%$) (табл. 3).

Для уточнения оценок в формулу расчета ПЭС предлагаем ввести показатели состояния растительности и живой фазы почвы. Биогенные факторы почвообразования, чаще всего, выступают в качестве ведущего механизма преобразования исходного субстрата в почву, поэтому сукцессия растительности на техногенных ландшафтах имеет особое значение для развития почвенных процессов. Для оценки ПЭС использовали показатели проективного покрытия растительности. Формула расчета коэффициента специфичности по проективному покрытию растительности ($K_{с.ПП}$) представлена в таблице 2, итоги расчетов приведены в таблице 3. Техногенные почвы россыпных месторождений алмазов по мере своего развития могут достичь 100 % $K_{с.ПП}$ (табл. 3). Проективное покрытие элювиозёмов инициальных отвалов коренных месторождений алмазов составляло 5%; это соответствует 5% $K_{с.ПП}$, что отражает крайне низкую способность грунтов поддерживать рост растений.

Если учет состояния растительного покрова для оценочных целей представляется вполне логичным и относительно распространенным, то введение в формулы расчетов количественных критериев состояния микробного сообщества почвы является существенной новизной наших исследований. Мы рассчитали коэффициент специфичности по устойчивости сапротрофного

микробного сообщества (Кс.МБУ), который отражает отношение показателей устойчивости функционального разнообразия микробного сообщества техногенных почв к зональным почвам. Устойчивость сапротрофной части сообщества определили путем измерения отклика сообщества на стресс (поступление растительных остатков) при помощи мультисубстратного теста (МСТ). Как известно, чем ниже устойчивость системы, тем выше отклик ее показателей на стресс. На наших объектах это положение выражалось в том, что относительное повышение активности микробиоты на внесение растительных остатков составляло убывающий ряд: элювиоземы инициальные – эмбриоземы инициальные – эмбриоземы органо-аккумулятивные – зональная почва (рис. 3). Количественные показатели этой зависимости приведены в таблице 4.

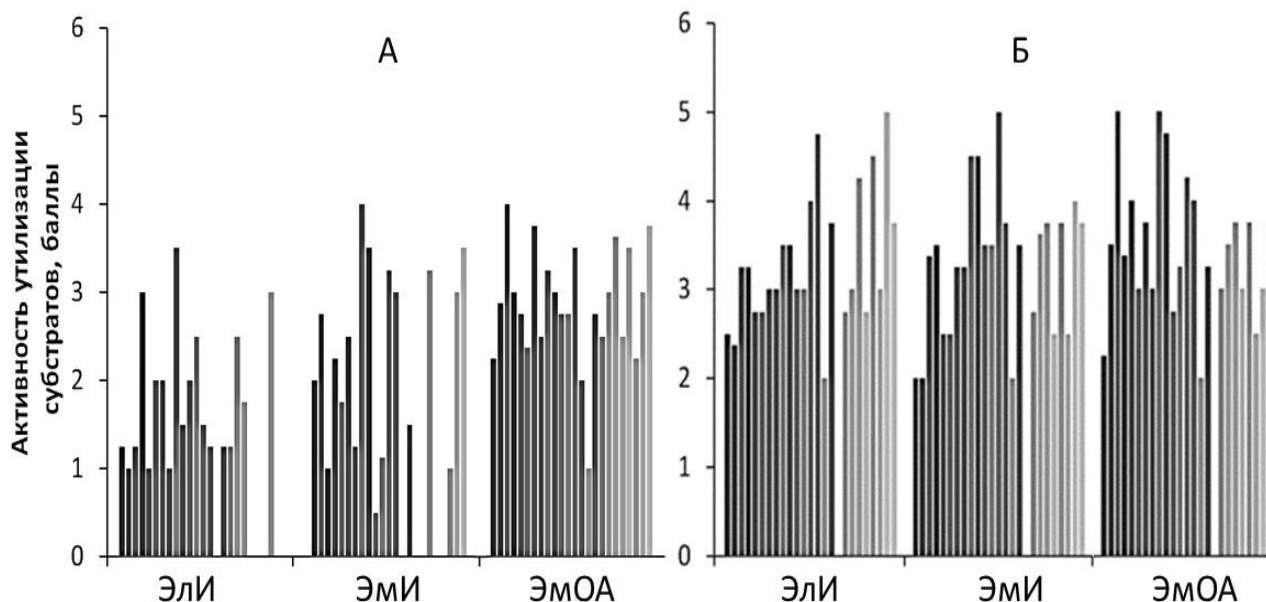


Рисунок 3. Функциональный спектр (активность утилизации питательных субстратов) микробного сообщества молодых почв до (А) и после (Б) стресса. Обозначения: ЭЛИ – элювиоземы инициальные; ЭМИ – эмбриоземы инициальные; ЭМОА – эмбриоземы органо-аккумулятивные. Примечание. На каждом из вариантов столбиками показаны субстраты слева направо: дульцит, инозит, маннит, сорбит, глицерин, мальтоза, лактоза, раффиноза, глюкоза, арабиноза, рамноза, ксилоза, галактоза, фруктоза, сахароза, крахмал, ацетат натрия, цитрат натрия, цитрат аммония, малат калия, тартрат калия-натрия, мочевины, карбоксиметил целлюлоза, ТВИН-80.

Таблица 4

Количественные показатели функционального спектра и устойчивости микробного сообщества молодых почв

Таксоны	Выравненность функционального спектра, единица		Суммарная активность сообщества, баллы		Отклик на стресс		Группа устойчивости
	Исходная	После стресса	Исходная	После стресса	Абсолютное значение, баллы	Относительное значение, %	
Естественные почвы	22	22	57	83	26	50	1
Элювиоземы инициальные	16	23	35	79	45	130	3
Эмбриоземы инициальные	15	23	41	79	38	90	2
Эмбриоземы органо-аккумулятивные	23	23	69	83	15	20	1

Данный способ оценки устойчивости микробного сообщества почвы защищен патентом РФ на изобретение (Данилова и др., 2019). Далее для использования критерия устойчивости в расчетах мы провели некоторое его преобразование. Если принять «высокую» оценку устойчивости (группа 1) за коэффициент специфичности равный 100 ед., а «очень низкую» – за 0 ед., то получим следующий ряд:

Группа устойчивости 1 – 100%;
 Группа устойчивости 2 – 66,6%;
 Группа устойчивости 3 – 33,3%;
 Группа устойчивости 4 – 0%.

Расчет специфичности по устойчивости сапротрофного микробного сообщества (Кс.М6У) производится согласно формуле, приведенной в таблице. 2. Итоги расчетов показаны в таблице 3. Эмбриозёмы отвалов вскрышных пород россыпных месторождений алмазов по устойчивости сапротрофного микробного сообщества обладают слабой специфичностью. В эмбриозёмах дерновых показатель достигал уровня зональных почв, что может быть свидетельством высокой регенерационной способности этих отвалов. Элювиозёмы инициальные отвалов вскрышных пород коренных месторождений алмазов оказались почти стерильными и обладали очень большой специфичностью.

Среднее значение полученных коэффициентов даёт общий коэффициент специфичности конкретной техногенной почвы (Кс) (табл. 2, 3). Далее с учётом соотношения площадей техногенных почв определили ПЭС отвалов.

На наш взгляд, модификация метода расчета ПЭС позволяет провести более корректную оценку показателя для наших объектов. Согласно категорированию авторов метода определения ПЭС отвалы вскрышных пород, сформированные при разработке россыпных месторождений алмазов в Северной Якутии, обладают «хорошим» ПЭС (71 баллов по оригинальной методике и 72 баллов по модифицированной) (табл. 3). Это обусловлено благоприятными литогенными и геоморфологическими условиями. Исходные грунты этих отвалов поддерживают рост высших растений и развитие почвенной микробиоты. Совокупность этих условий позволяет эмбриозёмам достичь стадии «дернообразования» за 10–20 лет.

Отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов, согласно расчетам по оригинальной методике, обладают «удовлетворительной» (14–23 баллов) ПЭС, что не соответствует действительности, так как эти отвалы на протяжении 25–35 лет остаются техногенной пустыней. Модификация метода позволила более корректно оценить ПЭС этих объектов. По результатам расчетов эти отвалы обладают «неудовлетворительным» ПЭС (8-9,8 баллов) (табл. 3). Это связано с преобладанием негативных литогенных условий над относительно благоприятными геоморфологическими условиями. Субстрат отвалов не поддерживает рост высших растений и развитие микробиоты. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что отвалы вскрышных пород коренных месторождений алмазов Западной Якутии не поддерживают почвообразовательный процесс.

Введение дополнительных коэффициентов (Кс.ПП и Кс.М6У) позволяет выявлять факторы почвообразования, оказывающие наибольшее воздействие на развитие биологических процессов. Это позволит рекомендовать способы рекультивации, снижающие те или иные негативные факторы, что может повысить экологическую и экономическую эффективность рекультивационных мероприятий. По тесноте связи с суммой коэффициентов проективного покрытия растительности и устойчивости микробного сообщества изученные физико-химические факторы составили убывающий ряд: плотность – физическая глина – общий углерод – рельеф (табл. 5).

Таблица 5

Корреляционный анализ взаимоотношений коэффициентов специфичности техногенных ландшафтов Якутии

	Кс.р.	Кс.Рb	Кс.ф.г	Кс.Сорг	Кс.ПП+Кс.М6У
Кс.р.	1,00				
Кс.Рb	0,21	1,00			
Кс.ф.г	0,20	0,93	1,00		
Кс.Сорг	0,07	0,77	0,59	1,00	
Кс.ПП+Кс.М6У	0,31	0,84	0,76	0,70	1,00

Определение ПЭС отвалов вскрышных пород и анализ факторов позволили составить градации почвенно-экологического состояния отвалов вскрышных пород алмазодобывающей промышленности Якутии (табл. 6) и сопряженные с ним схемы биологического этапа рекультивационных мероприятий.

Таблица 6

Градации почвенно-экологического состояния отвалов вскрышных пород алмазодобывающей промышленности Якутии

Баллы ПЭС	Категория	Характеристика	Схемы биологического этапа рекультивации
50–75	Хорошее	Условия почвообразования благоприятны для развития почв техногенных ландшафтов; за практически приемлемый срок (20 лет) они могут достичь стадии дернообразования.	Отвалы можно оставить под самовосстановление. Биологический этап рекультивационных мероприятий может быть направлен на снижение негативных криогенных и эрозионных процессов.
10–50	Удовлетворительное	Темпы почвообразования медленные; эволюция техногенных почв в течение практически приемлемого срока (20 лет) не продвигается дальше стадии аккумуляции органики. Дальнейшее развитие техногенных почв лимитировано недостаточным развитием микроорганизмов-деструкторов.	Биологический этап рекультивационных мероприятий должен быть направлен на ускорение процессов самовосстановления путём формирования устойчивых растительных сообществ и внесением оптимальных доз минеральных и органических удобрений.
< 10	Неудовлетворительное	Нет условий для протекания процессов почвообразования. Грунты не поддерживают рост высших растений и развитие микробиоты.	Биологический этап рекультивационных мероприятий должен быть направлен на улучшение условий развития техногенных ландшафтов путём формирования технозёмов из ППП, ПСП или материалов из возобновляемых природных ресурсов.

Таким образом, модифицированный бонитировочный подход оказался вполне применимым для оценки состояния техногенно нарушенных почв в криолитозоне Якутии. Основная новизна нашей модификации заключается в разработке количественного критерия состояния живой фазы почвы. В литературе отмечают ограниченность числа исследований, включающих биологические показатели почв для оценки состояния нарушенных экосистем. Объективной причиной этого считают низкую информативность и трудоемкость традиционных показателей биологической активности почвы, а для решения проблемы предлагают применять метагеномные подходы (Garg et al., 2024). Тем не менее, нами показана информативность традиционных методов для характеристики микробной системы почвы для этих целей. Отметим, что отдельные показатели биологической активности почвы (микробная биомасса, дыхательная активность, ферментативная активность и др.) используют для оценки состояния нарушенных экосистем, но высокая вариабельность последних пока не позволяет разработать интегральный оценочный критерий (Pandey et al., 2023). В начальный период исследований мы также проводили апробацию этих методик для наших целей (Данилова и др., 2012). Однако из-за чрезвычайной пестроты свойств субстратов и молодых почв на основе традиционных микробиологических показателей нам не удалось разработать устойчивые оценочные критерии. Разработка способа количественной оценки важнейшего экологического критерия – функциональной устойчивости микробного сообщества почвы позволила в определенной мере приблизиться к решению этой сложной проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях большого разнообразия свойств изученных отвалов вскрышных пород, сформированных при разработке россыпных и коренных месторождений алмазов в криолитозоне Якутии, необходима разработка подходов к интегральной оценке индивидуальной специфики каждого техногенного ландшафта. Эти исследования позволяют оценить перспективы самовосстановления в

отвалах важнейших почвенно-экологических функций, что позволит разработать индивидуальные схемы рекультивационных мероприятий.

В нашей работе модифицирован известный бонитировочный подход к оценке техногенных ландшафтов на угольных отвалах Кузбасса, предложенный сотрудниками ИПА СО РАН. Расчет почвенно-экологического состояния (ПЭС) техногенного ландшафта основан на оценке специфичности молодых почв и грунтов техногенных ландшафтов относительно зональных почв. Повышение точности расчетов ПЭС посттехногенных ландшафтов для условий криолитозоны Якутии достигнуто путем ввода двухступенчатого расчета Кс.ф.г. и показателей, отражающих состояние почвенной микробиоты и растительности – коэффициентов по проективному покрытию растительности и функциональной устойчивости сапротрофного микробного сообщества (Кс.ПП и Кс.МБУ). В итоге нами предложены градации почвенно-экологического состояния посттехногенных ландшафтов Якутии, позволяющие проводить интегральную оценку широкого спектра отвалов для разработки индивидуальных проектов рекультивационных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

Агрохимические методы исследования почв. Москва: Наука, 1975. 656 с.

Андроханов В.А., Андроханов В.А., Курачев В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2010. 224 с.

Андроханов В.А., Курачев В.М. Принципы оценки почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2009. Том 16. № 2. С. 165–169.

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 буроугольных 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. Том 19. № 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.

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.

Ильин И.В. Урсул А.Д., Урсул Т.А. Новые глобальные цели устойчивого развития // Вестник Московского университета. Серия 27: Глобалистика и геополитика. 2015. № 3–4. С. 60–84.

Курачев В. М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Том 9. № 3. С. 255–261.

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>

Петров А.А. Молодые почвы посттехногенных ландшафтов Якутии ров // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 65–67.

Урсул А.Д. Урсул Т.А. Цели устойчивого развития и перспективы глобального управления // Экономика и управление: проблемы, решения. 2016. Том 2. № 7. С. 122–128.

- 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>
- Forget M., Rossi M. Mining region value and vulnerabilities: Evolutions over the mine life cycle // *The Extractive Industries and Society*. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.010>
- 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>
- Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan, X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective // *Geoderma Regional*. 2021. Vol. 25. e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- 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>
- Worlanyo A.S., Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 279. P. 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>

Поступила в редакцию 04.08.2025

Принята 17.09.2025

Опубликована 24.09.2025

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/)

Assessment of soil-ecological status of post-technogenic diamond mining landscapes in Yakutia

© 2025 A. A. Petrov ¹, G. N. Savvinov ¹, A. A. Danilova ²

¹*Institute 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*

²*Siberian 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 assess the soil-ecological status of self-restoring diamond mining spoils of Yakutia for the optimization of reclamation activities.

Location and time of the study. In Northern and Western Yakutia, waste rock spoils formed during the placer and primary mining were studied. The spoils differ significantly in relief, bed rock and other properties. The experimental material was obtained as part of the research work of the Scientific Research Institute of Applied Ecology of the North named after prof. D.D. Savvinov of the North-Eastern Federal University in 2007–2024.

Methods. To assess the soil-ecological status of technogenic landscapes in the cryolithozone, the bonitation approach developed by the Institute of Soil Science and Agrochemistry (SB RAS, Novosibirsk, Russia) was modified and used.

Results. The integrated assessment of individual specificity of diamond mining spoils is presented to determine the prospects for self-restoration of the most important soil-ecological functions. The purpose of this assessment was to develop novel or adapt existing technologies for reclamation in the permafrost zone of Yakutia. In order to improve the accuracy of the soil-ecological status assessment, a modification of the calculations is proposed, namely, a) a two-stage calculation of the specificity coefficient for physical clay, and b) entering into the formula for calculating the soil-ecological indicators related to the status of soil microbiota and vegetation.

Conclusions. A gradation of the soil-ecological status of post-technogenic landscapes of Yakutia is proposed, allowing an integrated assessment of the status of a wide range of diamond mining spoils for better targeting reclamation technologies.

Keywords: soil-ecological status; technogenic landscapes; soil formation; reclamation; embryozems; eluviozems; diamond mining industry; Yakutia.

How to cite: Petrov A.A., Savvinov G.N., Danilova A.A. Assessment of soil-ecological status of post-technogenic diamond mining landscapes in Yakutia. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(3). e325. DOI: [10.31251/pos.v8i3.325](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.325) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

- Agrochemical methods of soil research. Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (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).
- 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).
- 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 soil dumps 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).
- 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).
- Ilyin I.V., Ursul A.D., Ursul T.A. New global goals for sustainable development. Bulletin of Moscow University. Series 27: Global Studies and Geopolitics. 2015. No. 3–4. P. 60–84. (in Russian).
- Kurachev V.M., Androkhonov V.A. Classification of Soils of Technogenous Landscapes. Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).
- 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>
- Petrov A.A. Young soils of post-technogenic landscapes of Yakutia. Regional environmental issues. 2021. No. 5. P. 65–67. (in Russian).
- Ursul A.D., Ursul T.A. Sustainable development goals and prospects for global governance. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya. 2016. Vol. 2. No. 7. P. 122–128. (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>
- Forget M., Rossi M. Mining region value and vulnerabilities: Evolutions over the mine life cycle. The Extractive Industries and Society. 2021. Vol. 8. No. 1. P. 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.010>
- 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>
- Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan, X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. Geoderma Regional. 2021. Vol. 25. e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- 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 in 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>
- Worlanyo A.S., Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. P. 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>

Received 04 August 2025

Accepted 17 September 2025

Published 24 September 2025

About the authors:

Alexey A. Petrov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); Petrov_Alexey@mail.ru

Grigory N. Savvinov – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, Director in 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 in 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/)