

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 631.4:502.56.568(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>

Изучение техногенно нарушенных почв Якутии

А. А. Данилова^{1,✉}, А. А. Петров²

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉danilova7alb@yandex.ru

Аннотация

Проблема изучения последствий промышленной добычи полезных ископаемых для объектов окружающей среды была поставлена только в середине XX века. За последние десятилетия число публикаций по теме в мире возросло более чем в 10 раз. Можно выделить два основных направления исследований: прикладное – оценка результатов рекультивационных мероприятий и теоретическое – изучение первичного почвообразования. На основе обзора публикаций, индексированных в БД WoS за 1997–2021 гг., выделены основные методические подходы в разработке проблемы. Наиболее широко исследователи используют физико-химические показатели почв; биологические критерии обычно изучают в комплексе с физическими и химическими. Метод хронорядов признан наиболее информативным в изучении динамики техногенных объектов. Однако из 1440 экосистем, описанных в 700 публикациях, 32 % объектов имели возраст менее 5 лет, 75 % – до 20 лет, 3–4 % – старше 40 лет. В последние годы обсуждается проблема создания моделей почвообразования на техногенных объектах. В Якутии к проблеме обратились в 1992 г. с организацией Института прикладной экологии Севера АН РС (Я). В статье на основе обзора публикаций за 1980–2022 гг. проанализированы итоги изучения физико-химических, биологических свойств, особенностей классификации техногенно нарушенных почв (ТНП) на территории Республики Саха (Якутия). В результате наблюдений во всех почвенно-климатических зонах республики к данному моменту составлено представление о степени информативности разных методических подходов для диагностики состояния ТНП в условиях криолитозоны: опробованы экологические индикаторы от ландшафтного до цитокинетического уровня. В заключении обсуждаются перспективы дальнейших исследований по проблеме.

Ключевые слова: криолитозона, почвы техногенных ландшафтов, классификация, биотестирование

Для цитирования: Данилова А.А., Петров А.А. Изучение техногенно нарушенных почв Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):547–560. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>

Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia)

A. A. Danilova^{1,✉}, A. A. Petrov²

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Russian Federation

²Research Institute of Applied Ecology of the North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉e-mail@mail.ru

Abstract

The article presents a review of publications from 1980–2022 which deal with the study of post mining soils (PMS) in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Though mining in Yakutia began in the 1920s and 1930s, the study of PMS in this territory began only in 1992. Over the past decades, the number of publications on the problem has increased more

than 10 times. Still, there are no exact figures on the area of PMS in this territory. The inventory of the latter as a scientific problem has not yet been posed. This study of the properties of the young soils on post mining dumps was carried out in all the climatic zones of Yakutia from tundra to the middle taiga. A classification of biotopes according to the degree of anthropogenic transformation in the permafrost zone has been proposed. We tested a hierarchical scheme of bioindication of disturbed permafrost ecosystems, including coenotic, population, ontogenetic and cytogenetic levels. Three methodological approaches (physicochemical, microbiological, phytotest) for studying the biogenic stage of primary soil formation in cryolithozone was assessed. The information content of the classical genetic soil science positions for the classification of young PMS under the conditions of different climatic zones of Yakutia is shown. We identified the informativeness of various methodological approaches for diagnosing the state of PMS in the permafrost zone.

Keywords: permafrost zone, post mining soils, classification, biotest

For citation: Danilova A.A., Petrov A.A. Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):547–560. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>

Введение

Республика Саха (Якутия) расположена в северо-восточной части РФ. Протяженность республики с севера на юг – 2500 км, с запада на восток – 2000 км. Более 40 % территории Якутии находится за Северным полярным кругом. Вся территория входит зону сплошного распространения многолетней мерзлоты. Тринадцать улусов (районов) Республики Саха (Якутия) из 34 отнесены к арктической зоне РФ [1]. Согласно карте Арктического Совета, вся территория Якутии относится к арктической зоне мира [2].

Промышленное освоение Якутии началось в 1920–1930-х г. с разработки месторождений золота в Южной Якутии и в бассейне р. Индигирка, добычи олова в бассейне р. Яна. В 1950-е гг. рост добывающей промышленности был связан с открытием месторождений алмазов в Западной Якутии. Республика является важнейшим сырьевым источником РФ. В настоящее время территория переживает новый этап интенсивного техногенного освоения.

Отметим, что разработка большинства месторождений полезных ископаемых производилась открытым способом, соответственно появились обширные территории, лишенные почвенного и растительного покрова. Изучение техногенно нарушенных территорий республики как самостоятельная научная проблема было поставлено только в 1992 г., благодаря созданию Института прикладной экологии Севера Академии наук Республики Саха (Якутия) под руководством профессора Д.Д. Саввинова.

Цель данного обзора – проанализировать результаты исследований техногенно нарушенных почв Якутии и попытаться выделить перспективы дальнейших исследований.

Краткий обзор подходов к изучению состояния техногенно нарушенных почв

В данном обзоре под техногенно нарушенными (ТН) будем иметь в виду почвы, нарушенные в результате добычи полезных ископаемых (ДПИ).

В 2015 г. Генеральная Ассамблея ООН сформулировала 17 целей для обеспечения устойчивого развития мира (Sustainable Development Goals) [3]. Достижение 13 из них напрямую или опосредованно связано с благополучием почвы [4]. На пути решения поставленных задач возникают сложнейшие противоречия. С ростом населения Земли возрастает потребность в минеральных и энергетических ресурсах. Соответственно, возрастает активность ДПИ, в процессе которой неизбежно нарушается вся экосистема территории. В обзорах [5, 6] 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 настоящее время основные месторождения в умеренных широтах планеты исчерпаны и активность по разработке ресурсов смещается в ранее труднодоступные районы, в частности, в высокие широты, где хрупкость экосистем известна [2].

В сравнении с длительностью промышленной добычи полезных ископаемых история изучения последствий этого воздействия на объекты окружающей среды чрезвычайно коротка. В мире данный вопрос как научная проблема был поставлен только во второй половине XX века, интенсивность и глубина исследований существенно возросли только к концу века [7, 8].

Количество публикаций, индексированных в базе WoS (время обращения 26.03.2022), по ключевым словам *post mining area*, *post mining environments*, *post mining landscapes* за 1997–2021 гг. составило 2404 записей, количество публикаций выросло с 20 записей в 1997 г. до 293 в 2021. Из них 23 % относится к странам Европы, доля США – 14,6 %, Китая – 9,4 %. При поиске по ключевому слову *post mining soils* обнаружено 1134 записи. Рост числа публикаций: с 9 в 1998 г. до 131 в 2020. Преобладающую часть из них (около 40 %) составляют статьи из европейских стран (преимущественно Польша, Чехия, Германия), США – 15 %, Китай – 6, РФ – 1,5 %. Наибольшее число публикаций связано с изучением почв на отвалах угольной промышленности, что обусловлено, на наш взгляд, наличием объектов с длительной историей добычи этого сырья и относительно благоприятными условиями почвообразования на подобных отвалах, позволяющими проследить динамику процессов формирования молодых почв в пределах относительно короткого периода времени.

Общее представление о методических подходах, используемых для изучения техногенных ландшафтов, можно получить из анализа 700 публикаций, процитированных в крупнейших базах данных мира за 1990–2018 гг. [9]. В этом обзоре все критерии подразделены на три группы – описывающие состав, структуру и функции экосистемы. В первые две группы включены показатели надземной растительности, в третью – свойства почвы. Критерии для оценки состояния почвы и их соотношение представлено на рис. 1. Наиболее широко исследователи используют физико-химические показатели (66 %). Биологические показатели обычно изучают в комплексе с физическими и химическими (30 %). Именно такой подход, по мнению авторов, является наиболее информативным для изучения процессов начального почвообразования на отвалах [10–12]. Особенно это касается молекулярно-генетических методов, набирающих популярность в почвенных исследованиях [13].

Важнейшим методологическим инструментом при изучении динамики техногенных ландшафтов, а соответственно, и почв является метод хронорядов [14]. Применительно ТН почв научная ценность подхода связана как с оценкой динамики самого объекта, так и с уточнением особенностей почвообразовательного процесса, происходящего в молодых почвах с так называемым

нулевым моментом [15–18]. Как отмечают авторы [19], несмотря на наличие весьма «возрастных» техногенных объектов, документированных длительных хронорядов очень мало. Так в упомянутом выше обзоре Martins et al. [9] отмечено, что из 1440 экосистем, описанных в 700 публикациях, возраст менее 5 лет имели 32 % объектов, до 20 лет – 75 %, старше 40 лет 3–4 %. По свидетельству Gwenzi [20], один из самых старых документированных хронорядов в мире расположен в Зимбабве – отвалы хвостохранилищ после добычи золота и никеля возрастом около 110 лет.

Важной проблемой в данной области знаний является подбор ориентиров для оценки степени восстановления нарушенной экосистемы [8, 20, 21]. Широко распространено сравнение опытного объекта с исходной ненарушенной экосистемой. Для количественных оценок обычно применяют общепринятый для агроэкосистем индекс качества почвы (SQI) [22]. Суть процедуры заключается в измерении большого ряда показателей почвы, оценку их уровня в баллах и вычислении суммы этих баллов [23]. Появились сомнения в корректности данного подхода для оценки ТН экосистем, поскольку сложно найти границы, ограничивающие список возможных показателей почвы [20]. Упомянутые выше авторы считают, что ТН почва является новым объектом,

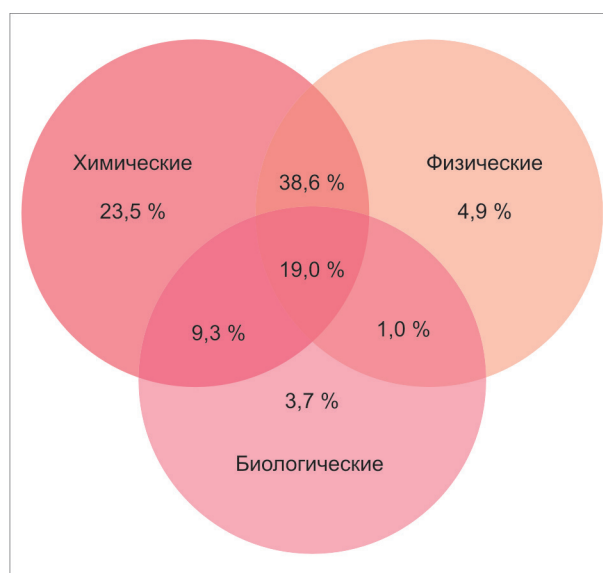


Рис. 1. Соотношение различных методических подходов в изучении почв техногенных ландшафтов мира [9].

Fig. 1. Ratio of different methodical approaches in the study of soils of technogenic landscapes of the world [9].

так как ее свойства невозможно приблизить к показателям исходного ненарушенного аналога. Поэтому оценка состояния такого объекта должна основываться на других принципах.

Как было отмечено выше, 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 [20, 24]. Осознавая этот момент, в частности Gwenz [20], 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. Пример подобной оценки показан в публикации Bennett et al. [24]: через 12 лет после рекультивации (нанесение потенциально плодородного слоя и посев трав) отвалов после открытой добычи угля (Австралия) оценили способность этих территорий функционировать в качестве высокопродуктивного пастбища. После определения химических свойств молодой почвы недостаток NPK был скорректирован при помощи удобрений, что обеспечило стабильную продуктивность пастбища. На основании последнего результат рекультивации был оценен как успешный.

В последние годы обсуждается проблема создания моделей почвообразования на техногенных объектах. Leguédou et al. [25] на основе анализа имеющихся моделей почвообразования сформулировали исходные параметры для создания такой модели. Интересен тот факт, что первой исходной позицией для этих целей является постулат «молодая почва формируется при благоприятных условиях тепла и влаги – среднегодовая температура воздуха выше 0 °C и количество осадков за год – не менее 800 мм». Отсюда следует, что создаваемые в ближайшее

время модели не будут применимы для циркумполярных областей.

Обзор состояния проблемы в Республике Саха (Якутия)

Как было отмечено выше, в международных базах научного цитирования материал по ТН почвам России представлен весьма ограниченно (менее 2 %). В российских БД подобная информация по почвам Якутии также остается слабо освещенной. Так, в РИНЦ по ключевым словам *мерзлотные почвы* обнаружено 7348 публикаций, из них *техногенно нарушенные* – 18 (по Якутии – 6). По ключевым словам *почвы Якутии* обнаружено 10264 записи. Из них по словам *техногенно нарушенные* – 43 записи (время обращения 02.06.2022). Таким образом, в мировой литературе результаты исследований техногенных почв РФ представлены слабо. В пределах РФ доля публикаций, касающихся объектов в Якутии, крайне недостаточна. Все же на основе доступных нам публикаций попытаемся кратко осветить историю и современное состояние вопроса.

На рис. 2 представлена карта-схема наиболее значимых разрабатываемых месторождений полезных ископаемых в Якутии. При этом точных цифр площадей почв, нарушенных при разведке и добыче полезных ископаемых, пока не существует. По официальным данным, на конец 2020 г. общая площадь нарушенных земель составляет 15,5 тыс. га, куда включены территории, задействованные не только в ДПИ, но и в энергетике, транспорте, связи, радиовещании, телевидении, информатике, для обеспечения космической деятельности, обороны, безопасности и земель иного специального назначения [26]. Необходимость инвентаризации ТН почв Якутии как научная проблема обсуждается только в последнее время [27].

Начальный этап исследования техногенных ландшафтов в Якутии, как и других регионах, проводился геоботаниками – рекультиваторами. По динамике растительности на отвалах можно было составить первое представление о свойствах субстратов и молодых почв. Так, на отвалах после разработки коренных месторождений алмазов (кимберлитовые трубки «Мир», «Айхал», «Удачная») было установлено, что получение стабильного травяного покрова возможно только после отсыпки потенциально плодородного слоя мощностью не менее 20–40 см, применения



Рис. 2. Минерально-сырьевая база Республики Саха (Якутия) [28].

Fig. 2. Mineral Resource Base of the Republic of Sakha (Yakutia) [28].

удобрений и высеве семян трав дикороссов или местной селекции [29, 30]. После разработки россыпных месторождений алмазов (бассейн р. Анабар) наблюдали удовлетворительное самозаращение отвалов, которое можно стимулировать посевом трав местной селекции [31, 32]. Также удовлетворительное самозаращение отвалов после добычи угля было установлено на угольных разрезах Кангаласский (Центральная Якутия) и Нерюнгринский (Южная Якутия) [33, 34].

Сходные результаты были получены на дражных отвалах после добычи золота [35, 36].

Первый опыт систематизации антропогенно нарушенных почв Якутии представлен Г.Н. Савиновым [37]. Осознавая роль почвы как основы функционирования экосистемы, автор выделил три эколого-почвенных комплекса: агрогенный, селитебный, техногенный. В работе впервые был приведен обобщенный материал по географии и основным свойствам ТН почв Якутии.

Сложность ТН почв как объектов исследования заключается в чрезвычайной гетерогенности как в пространстве, так и по уровню нарушенности. Е.Г. Шадрин, Я.Л. Вольперт [38] предложили классификацию биотопов в криолитозоне по степени антропогенной трансформации: 1) макроантропогенно трансформированные – полностью удален или уничтожен почвенный и растительный покров, 2) мезоантропогенно трансформированные – удаленный растительный покров, нарушенный или загрязненный почвенный покров, 3) микроантропогенно трансформированные – ненарушенный почвенный и частично нарушенный или загрязненный растительный покров. Согласно этой классификации, все объекты горно-добывающей промышленности относятся к первой группе. Самым известным примером разрушительного влияния на экосистему является разработка коренных месторождений алмазов. Объекты нефтедобывающей и газоконденсатной промышленности в зависимости от специфики условий могут быть отнесены к группе 2 или 3. На примере территории газоконденсатного месторождения (Чаяндинское), угольного (Эльгинское), урановорудного (Эльконское) была установлена специфичность загрязнения почв под влиянием различных отраслей ДПИ. Для нефтедобывающей промышленности характерно загрязнение территории водным путем, угольной – воздушным (пыль при буровзрывных работах), атомной – радиоактивное заражение территории всеми названными путями [39]. Была установлена специфичность динамики нефтяного загрязнения для криогенных почв. А именно, показана способность нефти к длительному сохранению в мерзлотной почве как за счет низкой естественной биodeградации, так и за счет миграции в профиле почвы в процессах замерзания-оттаивания [40].

Техногенно нарушенные почвы Якутии достаточно широко изучают с точки зрения загрязнения тяжелыми металлами [41], радионуклидами [42, 43]. Выявлены естественные и техногенные источники этих загрязнителей, изучены интенсивность и основные факторы их накопления, разработаны некоторые способы снижения фона загрязнения.

Как уже отмечено выше, в изучении ТН почв особенно информативны исследования в хронологиях. Подобных объектов в исследованиях на территории Якутии немного. Это связано прежде всего с активно продолжающейся разработкой

месторождений. Как известно, на таких объектах территория используется очень динамично и часто на старые отвалы наслаивают новые слои пустой породы. В этом плане интересны исследования, проведенные на объектах, возраст которых известен и конфигурация отвалов относительно стабильна. В работе [43] представлен опыт сравнения динамики распределения в профиле почвы радионуклидов ^{238}U , ^{226}Ra в зависимости от срока начала поступления элементов в среду. Оказалось, что в сходных по генезису почвах, куда радионуклиды стали поступать 57 лет назад, профильное распределение их характеризуется как аккумулятивно-иллювиальное, в то время как при длительности 40 лет – как аккумулятивное без проявления процессов иллювиирования.

Высока научная ценность многолетних мониторинговых исследований на ключевых точках. Подобные работы проведены на территории Накынского кимберлитового поля [44]. Полевые исследования были проведены в 2007–2018 гг. с периодичностью 3–4 года на территории северо-таежных ландшафтов Ханья-Накынского междуречья в Западной Якутии (Нюрбинский ГОК). В работе показана динамика увеличения площадей почв, загрязненность которых оценивается как высокая и чрезвычайно опасная (см. таблицу).

В целом, если публикаций по динамике техногенного загрязнения почв относительно много, то данные по динамике почвообразования на отвалах представлены редко. Известны подобные сведения по отвалам ГОК «Мирнинский» [45]. В работе сделан вывод, что спустя 30 лет после отсыпки эти отвалы без рекультивации до сих пор не заняты растительностью, соответственно почвообразовательный процесс не фиксируется. На рекультивированных и самозарастающих отвалах почвообразовательный процесс при помощи традиционных физико-химических анализов не зафиксирован. Это связано с особенностями состава отвальных пород, поднятых на поверхность с глубины до 200 м, и крайней криоаридностью климата.

При относительно более благоприятных исходных условиях признаки первичного почвообразования могут быть зафиксированы за более короткий срок. Так, опубликовано описание молодых почв, обнаруженных через 20 лет после разработки россыпного месторождения золота на территории тундровой части Куларского зо-

**Площадь и уровень загрязнения почвенного покрова
на территории промышленной площадки Нюрбинского ГОКа [44]**

**Area and level of soil contamination
in the territory of the industrial site of Nyurbinsky Mining and Processing Plant [44]**

Категория загрязнения. Level of soil contamination	Уровень суммарного показателя Zc Level of total contamination indicator	Площадь по годам исследований, км ² Soil area by years of research, km ²			
		2007	2011	2014	2018
Допустимая	<16	222,5	171,5	70,0	61,0
Умеренно опасная	16–32	210,0	305,0	267,0	104,9
Высоко опасная	32–128	45,0	1,44	122,0	260,9
Чрезвычайно опасная	>128	–	–	18,2	51,6

лотоносного района [46]. За этот период на отвалах восстановилась растительность, сходная с естественной. Молодые почвы, по классификации [47], отнесены к эмбриоземам дерновым и органо-аккумулятивным. Сделан вывод, что по морфологическим признакам эмбриоземы исследуемых отвалов мало отличаются от зональных почв – аллювиальных дерново-глеяватых или тундровых глеевых, это обусловлено тем, что почвы тундр имеют упрощенный профиль, характерный для территории с замедленными темпами почвообразования.

Сходный объект изучен на отвалах после разработки россыпных месторождений алмазов в бассейне р. Анабар. Низкая фитотоксичность переработанных субстратов обуславливает достаточно быстрое самозаращение отвалов. При высеве трав местной селекции на фоне минеральных удобрений через 2 года образовался травяной покров с проективным покрытием до 60–80 %. Формирование при этом весьма активного и разнообразного по функциональному спектру микробного сообщества в субстрате может быть признаком начального этапа почвообразовательного процесса [31, 48, 49].

Описанные выше объекты исследования чрезвычайно сложны в связи с наложением антропогенного фактора на целый ряд неблагоприятных естественных факторов, в частности, климата, геологических особенностей криолитозоны. В этих условиях необходим комплексный подход в оценке состояния среды. Такая оценка возможна при помощи методов биоиндикации – применения в качестве индикаторов живых организмов. Предложена иерархическая схема биоиндикации нарушенных экосистем Севера, включающая ценотический, популяционный, онтогенетический и цитогенетический

уровни [38, 50]. С точки зрения оценки состояния почв наиболее информативны два последних уровня как более чувствительные для регистрации слабых воздействий. В качестве индикатора организменного уровня широко опробован показатель флуктуирующей асимметрии (ФА) листьев деревьев. Представлен опыт соотнесения уровня загрязнения почвы тяжелыми металлами с величиной ФА листьев березы повислой [41]. В пределах Накынского кимберлитового поля показано увеличение ФА листьев березы при повышении в почве концентрации кислоторастворимых форм свинца и кадмия.

В качестве индикатора клеточного уровня опробован показатель частоты встречаемости патологий митоза (показателя мутагенной активности) в корнях проростков лука-батуна (*Allium fistulosum* L.), выращенных на почвенных пробах. На территории Мирнинского промышленного узла (зона воздействия алмазодобывающей промышленности), площадки восьми геологоразведочных скважин Чаяндынского нефтегазоконденсатного и Среднетюнгского газоконденсатного месторождений установлено снижение всхожести семян и повышение частоты мутаций в клетках корня лука, что свидетельствует о техногенном преобразовании состояния почвенной среды до уровня, вызывающего нарушение цитогенетического гомеостаза корней высших растений [51].

Особой группой биоиндикаторов является состояние живой фазы почвы. Изучено распределение дождевых червей на рекультивированных отвалах на территории деятельности Мирнинского ГОК, АК «АЛРОСА» (ЗАО) [52]. Исследование микробного сообщества грунтов и молодых почв на этом же объекте показало следующие отличительные черты биологических свойств

отвалов по сравнению с зональной почвой: нарастание числа КОЕ с глубиной до величин, превышающих величины зональной почвы; преобладание клеток с относительно низкой скоростью роста на агаризованной среде; сочетание высокой численности микробного комплекса эмбриозема с низкими показателями функционального разнообразия и слабой активностью потребления полимеров. На основе биологических критериев установлена низкая экологическая эффективность упрощенной схемы рекультивации отвалов алмазодобывающей промышленности [45].

На основе многолетних исследований на территории Нерюнгринского каменноугольного разреза ПАО «Мечел» разработана шкала для оценки экологической устойчивости микробного сообщества техногенно трансформированных почв. Практическое значение способа заключается, во-первых, в определении стадии почвообразования на угольных отвалах, минуя традиционный анализ содержания органического углерода, что позволяет обойти проблему дифференциации углерода биологического и техногенного происхождения в субстрате, во-вторых в возможности прогноза перспективности рекультивационных мероприятий [49].

Проведена проверка применимости традиционных методов биоиндикации почвенной среды на техногенных ландшафтах криолитозоны. Так, определена заселенность техногенных субстратов клетками бактерий рода *Azotobacter* в зональном ряду объектов от южной до полярной Якутии. Высокое число этих микроорганизмов в изученных объектах заставило задуматься о корректности традиционного подхода к интерпретации результатов данного биотеста [53].

На примере отвалов на территории деятельности Мирнинского ГОК, АК «АЛРОСА» (ЗАО) представлен опыт комплексного подхода к оценке состояния техногенно нарушенных почв. Проведена оценка чувствительности трех методических подходов для определения степени биогенной стадии почвообразования – физико-химического, микробиологического и фитотеста. Сделан вывод, что достоверная дифференциация всех типов молодых почв на данном объекте возможна только по способности почвы поддерживать рост высших растений (фитотест на проростках капустовых) [54, 55].

Остается актуальной задачей совершенствование классификации ТН почв. Существуют два подхода к решению проблемы, соответствующие

двум названным выше целям изучения нарушенных почв – прикладной (рекультивация) и теоретической. По классификации и диагностике почв России 2004 г. техногенно преобразованные образования (ТПО) не являются почвами в докучаевском смысле этого понятия, но выступают объектами почвенного картографирования и группировка ТПО базируется на технологических особенностях формирования субстрата, т. е. данная классификация применима в первую очередь в прикладных целях. На основе данной классификации грунты и почвогрунты ТПО Западной Якутии определены как натурфабрикаты, артифабрикаты, токсифабрикаты, реплантоземы, проведена систематизация, составлены карты их современных ареалов. Эти образования изучаются, прежде всего, как источники негативного воздействия на прилегающий почвенный покров [56].

Другой подход к данным объектам предлагает профильно-генетическая классификация почв техногенных ландшафтов (ТЛ) [47], согласно которой хотя ТЛ представляет собой экотип, внедренный в систему естественных ландшафтов, тем не менее, в посттехногенную фазу развития естественные процессы начинают преобладать над антропогенными и поэтому почвы, формирующиеся в ТЛ, необходимо признать естественно историческими образованиями, и, следовательно, подходить к их классификации необходимо с позиций классического генетического почвоведения.

Показана информативность данного подхода для классификации молодых почв на территории ряда ТЛ в условиях разных природно-климатических зон Якутии от тундры до средней тайги, где выделены три стадии эволюционного ряда эмбриоземов. В тундрово-лесной почвенно-растительной подзоне Якутии исследованы техногенные объекты после разработки россыпных месторождений алмазов в среднем течении р. Анабар в пределах горного отвода АК «АЛРОСА» ПАО и АО «Алмазы Анабара» [57], а также техногенные ландшафты Куларского золотоносного района Усть-Янского района [46]; в северо-таежной почвенно-растительной подзоне – объекты после добычи золота на участках «ЛАЗО» и «Сентачан» и после добычи олова на участках шахты «Эгэ-Хайа» и карьера «Костер» Верхоянского района [58]; в среднетаежной почвенно-растительной подзоне изучены объекты на отвалах вскрышных пород после добычи алмазов Мирнинского ГОК АК «АЛРОСА» ПАО [45, 52,

54]; на отвалах вскрышных пород после добычи каменного угля ГОК «Денисовский» и «Инаглинский» ООО УК «КОЛМАР» в бассейне р. Чульман (Нерюнгринский район) [59], изучены молодые почвы на карьере «Кильдямский» после добычи песка в окрестностях г. Якутск [60].

В результате исследований отмечена необходимость дополнения профилно-генетической классификации почв техногенных ландшафтов [47] новыми таксономическими единицами, для чего нужны дополнительные сведения по морфологии, физико-химическим и микробиологическим свойствам молодых почв, сформированных в условиях различных природно-климатических зон Якутии.

Заключение

Если учесть длительность промышленной добычи полезных ископаемых, то история изучения последствий этого воздействия на объекты окружающей среды чрезвычайно короткая. Данный вопрос как научная проблема был поставлен только во второй половине XX в. Интенсивность и глубина исследований существенно возросли только к концу XX в. История разработки проблемы в Якутии еще короче: целенаправленные исследования почв техногенных ландшафтов Якутии были начаты только в 1992 г., первый опыт систематизации этих знаний был предпринят в 2007 г. В последующие годы исследованиями были охвачены объекты во всех климатических зонах Якутии. Разнообразие природных и геологических условий формирования объектов техногенеза обусловили некоторую пестроту результатов этих исследований. Тем не менее можно считать, что к данному моменту составлено представление о степени информативности разных уровней исследования для диагностики состояния техногенно нарушенных почв в криолитозоне (от изучения профиля до особенностей микробных сообществ).

Перспективы исследований

Необходим переход на мультидисциплинарный уровень исследований, когда изучение почв становится частью комплексных наблюдений. В качестве идеального будущего этих исследований можно бы было представить создание, например, комплексного стационара в полярной Якутии в районе отвалов Куларского золотоносного района для изучения динамики самовосстановления техногенно нарушенных поляр-

ных экосистем на фоне изменения климата. Экологический статус и проблемы этого объекта описаны ранее [61]. По свидетельству автора одного из последних во времени обзоров по проблеме Gwenzi [20], в мире известно только два стационара, где проводится длительное мультидисциплинарное изучение техногенно нарушенных экосистем, – хвостохранилище в Зимбабве (Южная Африка) после добычи золота возрастом 110 лет и объект «Chieken Creek» в Германии, где в 2005 г. на территории после открытой добычи угля был создан искусственный ландшафт, имитирующий все компоненты водосборной территории. Объект был признан междисциплинарной лабораторией по изучению начальных этапов формирования экосистемы после техногенного разрушения [62]. Понятно, что такие программы очень дороги и для обеспечения длительных наблюдений необходимо гарантированное финансирование на многие десятилетия. Но если учесть, сколько полезных ископаемых дают недра Якутии, то цены, видимо, были бы сопоставимыми.

Список литературы / References

1. Федеральный закон «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» от 13.07.2020 N 193-ФЗ.
[Federal Law «On State Support of Entrepreneurial Activity in the Arctic Zone of the Russian Federation» dt. 13.07.2020 N 193-FZ (In Russ.)]
2. Tolvanen A., Eilu P., Artti Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J. Mining in the Arctic environment – A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2019;233:832–844. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.124>.
3. Sustainable Development Goals: The 17 Goals [<https://sdgs.un.org/goals>] Department of Economic and Social Affairs, 2015 [обновлено 14 ноября 2022, процитировано 14 ноября 2022]. Доступно: <http://www.example.ru>.
4. 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;25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>.
5. Worlanyo A.S., Li 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;279.111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>.
6. Forget M., Rossi M. Mining region value and vulnerabilities: Evolutions over the mine life cycle. *The Extractive Industries and Society*. 2021;8(1). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.010>.
7. Uzarowicz L., Charzyński P., Greinert A., Hulisz P., Kabała C., Kusza G., Kwasowski W., Pędziwiatr A. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2020;71(4). <https://doi.org/10.37501/soilsa/131615>.
8. Spasić M., Borůvka L., Vacek O., Drábek O., Tejnecký V. Pedogenesis problems on reclaimed coal mining sites. *Soil and Water Research*, 2021;16. <https://doi.org/10.17221/163/2020-SWR>.
9. Martins W.B.R., Lima M.D.R., Junior U. de O.B., Amorim L.S.V-B., Oliveira F.de A., Schwartz G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*. 2020;145.105707. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>.
10. Uzarowicz L., Wolińska A., Błońska E., Szafranek-Nakonieczna A., Kuźniar A., Ślodeczyk Z., Kwasowski W. Technogenic soils (Technosols) developed from mine spoils containing Fe sulphides: Microbiological activity as an indicator of soil development following landreclamation. *Applied Soil Ecology*. 2020;156.103699. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103699>.
11. Thavamani P., Samkumar R.A., Satheesh V., Subashchandrabose S.R., Ramadass K., Ravi Naidu R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Microbes from mined sites: Harnessing their potential for reclamation of derelict mine sites. *Environmental Pollution*. 2017;230. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.056>.
12. Lemanowicz J., Brzezinska M., Siwik-Ziomek A., Koper J. Activity of selected enzymes and phosphorus content in soils of former sulphur mines. *Science of The Total Environment*. 2020;708.134545 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134545>.
13. Baveye P.C., Berthelin J., Munch J.-C. Too much or not enough: Reflection on two contrasting perspectives on soil biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016;103. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.09.008> 0038-0717
14. Huggett R.J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*. 1998;32.
15. Banning N.C., Lalor B.M., Cookson W.R., Grigg A.H., Murphy D.V. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and post-mining rehabilitation forest: Which substrates discriminate? *Applied Soil Ecology*. 2012;56.
16. Li J., Xin Z., Yan J., Li H., Chen J., Ding G. Physicochemical and microbiological assessment of soil quality on a chronosequence of a mine reclamation site. *European Journal of Soil Science*. 2018;69. <https://doi.org/10.1111/ejss.12714>
17. Schmid C. A.O., Reichel R., Schröder P., Brüggemann N., Schlöter M. 52 years of ecological restoration following a major disturbance by opencast lignite mining does not reassemble microbiome structures of the original arable soils. *Science of the Total Environment* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140955> 0048-9697
18. Moradi J., John K., Vicentini F., Vesela H., Vicens J., Ardestani M.M., Jan Frouz J. Vertical distribution of soil fauna and microbial community under two contrasting post mining chronosequences: Sites reclaimed by alder plantation and unreclaimed regrowth. *Global Ecology and Conservation*. 2020;23.e01165. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01165>
19. Salom A.T., Kivinen S. Closed and abandoned mines in Namibia: a critical review of environmental impacts and constraints to rehabilitation. *South African Geographical Journal*. 2020;102(3). <https://doi.org/10.1080/03736245.2019.1698450>
20. Gwenzi W. Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems Willis. *Geoderma*. 2021; Vol:387.114944. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114944>
21. 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 M. *Science of The Total Environment*. 2020;749-20-142262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142262>
22. Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018;5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>
23. 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*. Edition 3.2. NY: Cornell University. Geneva; 2016.
24. Bennett J.McL., Melland A.R., Eberhard J., Patton 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;25. e00364. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>
25. Leguëdois S., Séré G., Auclerc A., Cortet J., Huot H., Ouvrard S., Watteau F., Schwartz C., Morel J.L. Modelling pedogenesis of Technosols. *Geoderma*. 2016; 262. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.008>
26. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды. Якутск: Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Правительства Республики Саха (Якутия); 2021. 677 с.
- [State report on the status and protection of the environment. Yakutsk: Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia)]

27. Легостаева Я.Б., Журавлев А.И., Попов В.Ф., Шадрин О.В., Ноев Д.С. Инвентаризация нарушенных геологоразведочными работами земель Западной Якутии по данным дистанционного зондирования. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*. 2022;25(1).
[Legostaeva YA.B., Zhuravlev A.I., Popov V.F., Shadrin O.V., Noev D.S. Inventory of the lands of Western Yakutia disturbed by geological exploration according to remote sensing data. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. (In Russ.). 2022;25(1)]
28. Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года. Сводный том. Якутск: Правительство Республики Саха (Якутия); 2006. 279 с.
[Scheme of integrated development of production forces, transport and energy of the Republic of Sakha (Yakutia) until 2020. Cumulated volume. Yakutsk: Government of the Republic of Sakha (Yakutia); 2006. 2006. (In Russ.)]
29. Лебедева Н.А., Лонкунова А.Я. Биологическая рекультивация земель, нарушенных при добыче алмазов в Якутии. *Растения и промышленная среда*. 1990;13.
[Lebedeva N.A., Lonkunova A.YA. Biological reclamation of lands disturbed during diamond mining in Yakutia. *Rasteniya i promyshlennaya Sreda*. 1990;13. (In Russ.)]
30. Миронова С.И., Кудинова З.А. Заращение растительности на угольных отвалах в Якутии. *Вестник СВФУ*. 2012;9(3).
[Mironova S.I., Kudinova Z.A. Overgrowing of vegetation on coal dumps in Yakutia. *Vestnik SVFU*. 2012;9(3). (In Russ.)]
31. Сивцева Н.Е., Легостаева Я.Б. Биологический этап рекультивации на россыпных месторождениях алмаза (в среднем течении реки Анабар, Республики Саха (Якутия)). *Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием*. Апатиты; 2019.
[Sivceva N.E., Legostaeva YA.B. Biologicheskij etap rekul'tivacii na rossypanyh mestorozhdeniyah almaza (v srednem techenii reki Anabar, Respubliki Saha (Yakutiya)). *Environmental problems of the northern regions and ways to solve them. Abstracts of the 7th All-Russian Scientific Conference with international participation*. Apatity; 2019. (In Russ.)]
32. Миронова С.И., Гаврильева Л.Д., Петров А.А., Никифоров А.А. Биологическая рекультивация промышленных земель Якутии. М.: Издательский дом Академии Естествознания; 2021. 166 с. DOI:10/17513/np.446.
[Mironova S.I., Gavril'eva L.D., Petrov A.A., Nikiforov A.A. Biological recultivation of industrial lands of Yakutia. M.: Publishing House of the Academy of Natural Sciences; 2021. <https://doi.org/10/17513/np.446> (In Russ.)]
33. Петрова А.Н. Выращивание многолетних злаковых трав на дражных полигонах в Южной Якутии. *Освоение Севера и проблема рекультивации*. Сыктывкар; 1994:273–281.
[Petrova A.N. Cultivation of perennial grasses on draining grounds in South Yakutia. *Development of the North and the problem of recultivation*. Syktyvkar; 1994 (In Russ.)]
34. Миронова С.И., Иванов В.В., Кудинова З.А. Антропогенная динамика растительности Севера (в зоне влияния разреза «Нерюнгринский»). *Бюлл. МОИП. Отдел биол.* 2009;114(3).
[Mironova S.I., Ivanov V.V., Kudinova Z.A. Anthropogenic dynamics of the vegetation of the North (in the zone of influence of the Neryungri section). *Byull. MOIP. Otdel biol.* 2009;114(3). (In Russ.)]
35. Кузьмин Ю.И. Биологическая рекультивация техногенных отвалов в условиях Крайнего Севера. *Экология*. 1985;(2):21–24.
[Kuz'min Yu. I. Biological reclamation of technogenic dumps in the conditions of the Far North. *Ecology*. 1985;(2):21–24. (In Russ.)]
36. Миронова С.И., Иванов В.В. Рекультивация нарушенных при добыче золота земель Южной Якутии. *International journal of applied and fundamental research*. 2009;(6):13–15.
[Mironova S.I., Ivanov V.V. Reclamation of lands disturbed during gold mining in South Yakutia. *International journal of applied and fundamental research*. 2009;(6):13–15. (In Russ.)]
37. Саввинов Г.Н. Эколого-почвенные комплексы Якутии. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр»; 2007. 312 с.
[Savvinov G.N. *Ecological and soil complexes in Yakutia*. M.: ООО «Nedra-Biznescentr»; 2007. (In Russ.)]
38. Шадрин Е.Г., Вольперт Я.Л. Биоиндикация воздействия горнодобывающей промышленности на наземные экосистемы Севера: эффективность цено-тического, популяционного и онтогенетического подходов. *Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования. Сб. статей V Всероссийской научно-практической конференции*. Нижний Тагил 1-4 марта. 2017.
[Shadrina E.G., Vol'pert YA.L. Bioindication of the impact of the mining industry on the terrestrial ecosystems of the North: the effectiveness of cost, population and ontogenetic approaches. *Biological systems: stability, principles and mechanisms of functioning. Collection of articles of the 5th All-Russian Scientific and Practical Conference*. Nizhnij Tagil 1-4 marta. 2017. (In Russ.)]
39. Саввинов Г.Н., Пестерев А.П., Дмитриев А.И., Тарабукина В.Г., Данилов П.П. Почвы Южной Якутии в условиях промышленного освоения. *Проблемы региональной экологии*. 2011;(4).
[Savvinov G.N., Pesterev A.P., Dmitriev A.I., Tarabukina V.G., Danilov P.P. Soils of South Yakutia under conditions of industrial development. *Regional environmental issues*. 2011;(4) (In Russ.)]

40. Глязнецова Ю.С., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Зуева И.Н. Мониторинг состояния нефтезагрязненных почв криолитозоны. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2018;(29): 4;111–128. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2018-4-111-128>.
- [Glyaznecova YU.S., ChAlaya O.N., Lifshic S.H., Zueva I.N. Monitoring the state of oil-contaminated soils in the permafrost zone. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 2018;(29):4. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-4-111–128. (In Russ.)]
41. Легостаева Я.Б., Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю., Дягилева А.Г. Эколого-геохимическая и биоиндикационная оценка трансформации экосистем при разработках коренных месторождений алмазов в Якутии. *Современные проблемы науки и образования*. 2011;(6).
- [Legostaeva YA.B., SHadrina E.G., Soldatova V.YU., Dyagileva A.G. Ecogeochemical and bioindication assessment of transformation of ecosystem in process drafting of primary deposits of diamonds in Yakutia. *Modern problems of science and education*. 2011;(6) (In Russ.)]
42. Собакин П.И., Молчанова И.В. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове в условиях техногенного загрязнения. *Экология*. 1998;(2).
- [Sobakin P.I., Molchanova I.V. Migration of Heavy Natural Radionuclides in the Soil and Vegetation Cover under the Conditions of Technogenic Pollution. *Ekologiya*. 1998;(2) (In Russ.)]
43. Чевычелов А.П., Собакин П.И. Содержание, распределение и формы миграции ²³⁸U почва природных и техногенных ландшафтов Южной Якутии. *Почвоведение*. 2020;(1):110–118. <https://doi.org/110-118.10.31857/S0032180X20010062>
- [Chevychelov A.P., Sobakin P.I. Content, distribution, and migration of ²³⁸u in soils of natural and technogenic landscapes of Southern Yakutia. *Eurasian Soil Science*. 2020;(1):110–118. <https://doi.org/110-118.10.31857/S0032180X20010062> (In Russ.)]
44. Гололобова А.Г., Легостаева Я.Б. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(12). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2.948.146>.
- [Gololobova A.G., Legostaeva YA.B. Ecogeochemical monitoring of soil cover on diamond mining site in Western Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2.948.146>. (In Russ.)]
45. Данилова А.А., Саввинов Г.Н., Петров А.А., Данилов П.П. Биологическая характеристика почвогрунтов многолетних отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии. *Сибирский экологический журнал*. 2012;(5):749–756.
- [Danilova A.A., Savvinov G.N., Petrov A.A., Danilov P.P. Biological characterization of soil dumps in diamond-mining industry of Yakutia. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal*. 2012;(5):749–756. (In Russ.)]
46. Иванова А.З., Десяткин Р.В. Техногенные почвы Куларского золотоносного района. *Успехи современного естествознания*. 2018;(6):71–72.
- [Ivanova A.Z., Desyatkin R.V. Technogenic soils of the Kular gold-bearing region. *Advances in current natural sciences*. 2018;(6):71–72. (In Russ.)]
47. Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов. *Сибирский экологический журнал*. 2002;9(3):255–261.
- [Kurachev V.M., Androhanov V.A. Classification of soils in technogenic landscapes. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal*. 2002;9(3):255–261 (In Russ.)]
48. Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е. Опыт восстановления нарушенных земель прииска “Маят” (среднее течение р. Анабар). *Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века. Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Романа Викторовича Ковалева*. Новосибирск: 2017; 2:180–185.
- [Legostaeva YA.B., Sivceva N.E. The experience of restoration of disturbed land mine «Mayat» (average flow of the Anabar River). *Soil resources of Siberia: challenges of the 21th century. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation dedicated to the 110th anniversary of the outstanding organizer of science and the first director of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS Roman Viktorovich Kovalev*. Novosibirsk: 2017;2:180–185. (In Russ.)]
49. Данилова А.А., Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Петров А.А. Способ оценки устойчивости сапротрофного микробного сообщества почв методом мультисубстратного теста. *Патент на изобретение № 2678876. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 04 февраля 2019 г.*
- [Danilova A.A., Legostaeva YA.B., Sivceva N.E., Petrov A.A. A method for assessing the stability of the saprotrophic microbial community of soils by the multi-substantial test method. *Patent for invention No. 2678876. Date of state registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation dt. 04 February 2019*. (In Russ.)]
50. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Опыт применения показателей флуктуирующей асимметрии растений и животных для оценки качества среды в наземных экосистемах: результаты 20-летних исследований природных и антропогенно трансформированных территорий. *Онтогенез*. 2018;49(1). <https://doi.org/10.7868/S0475145018010044>.
- [Shadrina E.G., Volpert Ya. L. Experience of applying plant and animal fluctuating asymmetry in assess-

ment of environmental quality in terrestrial ecosystems: results of 20-year studies of wildlife and anthropogenically transformed territories. *Russ J Dev Biol.* 2018;49(1): 23-35. <https://doi.org/10.7868/S0475145018010044>. (In Russ.)]

51. Пудова Т.М., Шадрина Е.Г. Биоиндикационная оценка состояния техногенно нарушенных земель на территории Западной Якутии. *Успехи современного естествознания.* 2012;(11).

[Pudova T.M., SHadrina E.G. Bioindicative assessment of anthropogenic disturbed soils in Western Yakutia. *Advances in current natural sciences.* 2012;(11). (In Russ.)]

52. Саввинов Г.Н., Данилова А.А., Данилов П.П., Петров А.А., Боесков В.С., Алексеев Г.А. Комплексная диагностика почвогрунтов рекультивированных отвалов Западной Якутии по состоянию почвенных беспозвоночных и микробиоты. *Проблемы региональной экологии.* 2009;(3).

[Savvinov G.N., Danilova A.A., Danilov P.P., Petrov A.A., Boeskorov V.S., Alekseev G.A. Complex diagnostic of soil-grounds of recultivated refused heaps in West Yakutia based on condition of soil inhabiting invertebrates and microbiota. *Regional Environmental Issues.* 2009;(3). (In Russ.)]

53. Данилова А.А., Петров А.А. Вопросы интерпретации результатов биотеста с применением бактерий рода *Azotobacter*. *Почвы и окружающая среда.* 2021;4(3). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i3.154>.

[Danilova A.A., Petrov A.A. Soil biotest results using azotobacter bacteria: interpretation problems and possible solutions. *The Journal of Soils and Environment.* 2021;4(3). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i3.154> (In Russ.)]

54. Петров А.А. О начальной стадии почвообразования в посттехногенных ландшафтах Западной Якутии. *Успехи современного естествознания.* 2012; 11(1):68–70.

[Petrov A.A. About the initial stage of pedogenesis on technogenic landscapes of the Western Yakutia. *Advances in current Natural Sciences.* 2012;11(1):68–70. (In Russ.)]

55. Петров А.А. Особенности почвенно-восстановительных процессов в посттехногенных ландшафтах Западной Якутии. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск: 2013; 22 с.

[Petrov A.A. Features of soil-restoration processes in post-technological landscapes Western Yakutia.. *Av-toref. dis. ... kand. biol. nauk.* Yakutsk: 2013. (In Russ.)]

56. Данилов П.П., Саввинов Г.Н., Дмитриев А.И. О проблемах рекультивации в посттехногенных ландшафтах алмазодобывающего комплекса Западной Якутии. *Проблемы региональной экологии.* 2021;2(5): 70–75. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-5-100-103>

[Danilov P.P., Savvinov G.N., Dmitriev A.I. On the problems of recultivation in post-technogenic landscapes diamond mining complex in Western Yakutia. *Regional Environmental Issues.* 2021;2(5):70–75. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-5-100-103>. (In Russ.)]

57. Петров А.А. Эмбриоземы техногенных ландшафтов алмазодобывающей промышленности в бассейне р. Анабар. *Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых (с международным участием) Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы Улан-Удэ (Россия), 23–27 июня 2016 г.* Улан-Удэ: 2016.

[Petrov A.A. Embryos of technogenic landscapes of the diamond mining industry in the basin of the Anabar River. *Materials of the 4th All-Russian Conference of Young Scientists (with international participation) Biodiversity: Global and Regional Processes. Ulan-Ude (Russia), June 23-27, 2016.* Ulan-Ude: 2016. (In Russ.)]

58. Петров А.А. Восстановление почвенного покрова посттехногенных ландшафтов, сформированных при разработке месторождений золота Северо-Востока Якутии. *Проблемы региональной экологии.* 2018;(5): 120–122. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-15120>.

[Petrov A.A. Restoration of the soil cover of post-technogenic landscapes formed during the development of gold deposits in the North-East of Yakutia. *Regional Enviromental Issues.* 2018;(5):120–122. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-15120>. (In Russ.)]

59. Петров А.А. Почво-восстановительные процессы в посттехногенных ландшафтах Чульманской впадины (Южная Якутия). *Проблемы региональной экологии.* 2020;(5):49–52. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-49-52>.

[Petrov A.A. Soils restoration processes in post-technogenic landscapes of the Chulman depression (South Yakutia). *Regional Enviromental Issues.* 2020;(5):49–52. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-49-52>. (In Russ.)]

60. Zverev A., Petrov A., Kimeklis A., Kichko A., Andronov E., Abakumov E. Microbiomes of the initial soils of mining areas of Yakutsk City (Eastern Siberia, Russia). *Czech Polar Reports.* 2020;10(1). <https://doi.org/10.5817/CPR2020-1-7>.

61. Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А., Макаров В.С., Боесков В.С., Григорьев С.Е. Экологические проблемы Верхоянского района. *Вестник СВФУ.* 2018;68(6). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.68.21798>

[Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., Makarov V.S., Boeskorov V.S., Grigor'ev S.E. Environmental problems of the Verkhoyansky region. *Vestnik SVFU.* 2018;68(6). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.68.21798>. (In Russ.)]

62. Gerwin W., Schaaf W., Biemelt D., Fischer A., Winter S., Hüttl R.F. The artificial catchment «Chicken Creek» (Lusatia, Germany) – A landscape laboratory for interdisciplinary studies of initial ecosystem development. *Ecological Engineering.* 2009; Vol: 35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.09.00>

Об авторах

¹ДАНИЛОВА Альбина Афанасьевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>, e-mail: danilova7alb@yandex.ru

²ПЕТРОВ Алексей Анатольевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8536-4078>, Author ID: 57072487900, Researcher ID: A-9853-2014, e-mail: Petrov_Alexey@mail.ru

Аффилиация

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 356, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ, 677000, Якутск, пр. Ленина, д. 43, Российская Федерация

About the authors

¹DANILOVA, Albina Afanas'evna, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>, e-mail: Danilova7alb@yandex.ru

²PETROV, Alexey Anatol'evich, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8536-4078>, e-mail: Petrov_Alexey@mail.ru

Affiliation

¹Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk Region, 633501 Krasnoobsk, Russian Federation

²Research Institute of Applied Ecology of the North-Eastern Federal University, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 11.07.2022

Поступила после рецензирования / Revised 28.08.2022

Принята к публикации / Accepted 15.09.2022