

УДК631.618

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259>

Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения)

© 2024 А. Е. Скотарева^{1,2}, Н. А. Иванов¹, Д. А. Соколов² 

¹Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: skotareva04@mail.ru

²ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

Цель исследования. Выявление и оценка специфики сукцессионных процессов самозарастающих отвалов Горловского антрацитового месторождения в зависимости от абиотических факторов.

Место и время проведения. Внешний породный отвал Горловского антрацитового месторождения (54.568880, 83.588956), Новосибирская область, Искитимский район, июнь 2023 г.

Методы. Свойства субстратов техногенных ландшафтов определялись традиционными почвенными методами (ГОСТ 12536–2014, ГОСТ 26423–85, ГОСТ 26213–21). В полевых условиях пенетрометром измеряли твердость почв, затем по этим значениям при помощи функции зависимости рассчитывали ее плотность. Содержание общего углерода и азота определяли при помощи CHNS/O-анализатора 2400 Series II PerkinElmer. Статистическая обработка полученных данных проведена при помощи кластерного анализа (метод Варда), анализа главных компонент, а также корреляционного анализа.

Основные результаты. В отвалах отходов добычи антрацита в условиях лесостепи Западной Сибири высокое содержание физической глины и пород, продуцирующих ее в почвах, способствует развитию травянистых растительных группировок. На склоновых участках с высоким содержанием камней преимущество получает древесная растительность.

Ключевые слова: рекультивация; эмбриоземы; фитоценозы техногенных ландшафтов; отвалы отходов угледобычи.

Цитирование: Скотарева А.Е., Иванов Н.А., Соколов Д.А. Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e259. DOI: [10.31251/pos.v7i2.259](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время функционирование и состояние наземных экосистем в промышленных регионах претерпевают значительные изменения, связанные с увеличением интенсивности антропогенного воздействия. Не исключением является и Новосибирская область, где увеличение объемов добычи антрацитовых углей влечет за собой нарушение хода естественных природных процессов. Как правило, добыча угля и размещение ее отходов имеет разрушительные последствия для экосистем: от обеднения сообществ и смены доминантов до полного их исчезновения.

Восстановление экосистем вместе с улучшением экологической обстановки достигается в процессе формирования устойчивых растительных сообществ. Имеющиеся сегодня научные представления говорят о том, что восстановление растительного покрова сингенетично связано с формированием почв нарушенных угледобычей земель (Курачев и др., 1994). Изменения в составе растительных сообществ и свойств почв техногенных ландшафтов характеризуют протекание одного из ключевых процессов регенерационных экосистем, а именно - сукцессии. Другими словами, смена сукцессионных рядов сопровождается трансформацией почв: их химических, физических и микробиологических свойств.

Скорость и направленность сукцессий в условиях техногенных ландшафтов определяются, в первую очередь, физическими свойствами почв. Физические свойства почв отвалов неоднородны, что приводит к дифференциации условий произрастания растительности (Sokolov et al., 2021). Плотность, гранулометрический и фракционный состав субстратов обуславливают скорость и направленность развития фитоценозов, а особенности формирования корневых систем определяют характер процессов выветривания и освоения внутрпочвенного пространства (Кусов, 2007).

Процесс зарастания породных отвалов отличается линейной тенденцией увеличения процента проективного покрытия и биомассы растительности. На первых этапах в ходе сукцессий

растительности образуются «биологические корки», состоящие из мха, лишайников и других организмов, которые тесно интегрированы с частицами поверхностного слоя почвы. Поэтому ранние стадии сукцессии характеризуются преобладанием однолетних травянистых видов, что обусловливается их приспособленностью к экстремальным условиям окружающей среды голый поверхности (высокий уровень инсоляции, каменистая структура почвы и т.д.) и низкому плодородию почв (Lei et al., 2015). Свойства верхней части почв и их положение в рельефе также оказывают влияние на растительный покров. Например, на южных склоновых участках, отличающихся высоким содержанием крупнообломочных и углеродсодержащих пород, при нагреве поверхности солнцем замечена тенденция подавления роста растений (Liu et al., 2016).

Сингенетический подход в изучении специфики протекания сукцессий растительности техногенных ландшафтов заключается в комбинированной системе оценки состояния растительного покрова в совокупности с изучением особенностей физического и химического состава почв. Все это при помощи корреляционного анализа позволяет выявить положительные и отрицательные связи между показателями состояния и особенностями молодых фитоценозов отвалов (процент проективного покрытия, число видов), с одной стороны, и спецификой свойств почв, с другой.

Таким образом, целью исследования является выявление и оценка специфики сукцессионных процессов самозарастающих отвалов Горловского антрацитового месторождения в зависимости от абиотических факторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследований был выбран ряд участков внешнего породного отвала Горловского антрацитового месторождения (54.568880 с.ш., 83.588956 в.д.), расположенного в Искитимском районе Новосибирской области. Биологическая рекультивация на отвале не проводилась, поэтому на всех участках исследований восстановление растительных сообществ происходит при самозарастании. Описание растительных сообществ и сбор характерных представителей для дальнейшей гербаризации, а также исследование почв проводили в июне 2023 г. Участки выбирали по ходу рекогносцировочных маршрутов по периметру участков 2–3 летней отсыпки с тем расчетом, чтобы охватить как можно больше местообитаний, дифференцированных по различиям в рельефе, экспозиции склонов, возрасте, особенностях почвообразующих пород и характере зарастания (табл. 1). Детальные геоботанические описания проведены на восьми выбранных репрезентативных участках. Площадь участков равна 100 м². Также в работе использовали материалы, полученные ранее по результатам аналогичных исследований (Restoration of the biodiversity..., 2021; Скотарева, Соколов, 2023). Сбор гербарных образцов производили по всему периметру выбранного для анализа отвала с целью наибольшего охвата различных факторов и условий, влияющих на развитие растительных сообществ.

На поверхности отвала сформированы эмбриоземы, относящиеся, в соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов (Курачев, Андроханов, 2002), к типам инициальных, органо-аккумулятивных и дерновых. Классификационная принадлежность подтипов эмбриозем определялась по характеру типодиагностических горизонтов (Androkhonov, Sokolov, 2021).

Для оценки плотности почв, как основного из показателей, характеризующих абиотические свойства, использовали пенетrometer Wile Soil (FARMCOMP, Финляндия). В полевых условиях пенетрометром измеряли твердость почв, затем по этим значениям по уравнению регрессии (Соколова и др., 2020) рассчитывали их плотность. На каждом ключевом участке закладывались почвенные разрезы, из которых по глубинам 0-10 и 10-20 см отбирались пробы почв. Содержание в почвах мелкозема и крупнозема – скелетность (Скел.) оценивали ситовым методом; содержание тонких фракций (>0,01 мм – физической глины) определяли пипеточным методом (ГОСТ 12536-2014).

Определение pH почвенных проб проводили с помощью pH-метра (Hanna-213 в комплекте с электродом ЭСК 1060/7) с предварительной подготовкой водной суспензии почв (ГОСТ 26423-85). Определение содержания органического вещества (Сорг.) осуществляли по методу Тюрина с колориметрическим окончанием (ГОСТ 26213-21). Содержание общих углерода и азота определяли при помощи CHNS/O-анализатора 2400 Series II Perkin Elmer (США).

Выраженность рельефа (Рел.) оценивали из отношения площади поверхности к площади ее основания ($S_{\text{п}}/S_0$).

Статистическую обработку данных выполняли с использованием пакетов программ Microsoft Excel и PAST V2.17. Для статистической обработки использовались как собственные данные, так и данные Н.А. Соколовой (2023) полученные теми же методами и подходами при исследовании

аналогичных участков. Таким образом всего было исследовано 23 участка. Для группировки наиболее близких по составу растительных сообществ участков исследований степень сходства видового состава флоры оценивали при помощи кластерного анализа. Взаимосвязь свойств почв при сукцессии фитоценозов в условиях техногенных ландшафтов оценивали на основании коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Структуру взаимосвязи изученных объектов (разных участков отвалов) и переменных анализа (свойств почв и растительных сообществ) визуализировали с помощью метода анализа главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые исследования показали, что развитие растительного покрова на начальных этапах контролируется абиогенными, главным образом, техногенными факторами. На более поздних этапах эволюции определяющее значение приобретают биогеоценотические свойства сообществ, что согласуется с выводами полученными О.И. Глебовой (2005) при работе с аналогичными техногенными местообитаниями Кузнецкого каменноугольного бассейна. По результатам визуальной оценки местности, составления геоботанических описаний, сбора и идентификации гербарных образцов на отвалах были выявлены разнообразные пионерные, простые и сложные растительные группировки (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика исследуемых участков

Номер участка	Описание участка (почвообразующие породы)	Возраст, лет	Число видов растений, шт.	Фитоценоз	Тип эмбриозема (обозначение)
1	южный склон (плотные)	35–40	8	пионерный	инициальный (ЭИпион_др)
2	горизонтальный, бугристый участок (плотные)	35–40	15	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)
3	горизонтальный, выровненный участок (плотные)	25–30	16	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_тр)
4	горизонтальный выровненный участок (плотные)	25–30	21	сложный	дерновый (ЭДсл_тр)
5	северный склон (плотные)	35–40	5	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)
6	горизонтальный, бугристый участок (рыхлые)	20–25	25	сложный	дерновый (ЭДсл_тр)
7	горизонтальная поверхность, выровненный участок (плотные)	10–15	11	пионерный	инициальный (ЭИпион_тр)
8	пологий (7–10°) южный склон, выровненный участок (плотные)	20–25	6	простой	органо-аккумулятивный (ЭОАпр_др)

Пионерные растительные группировки приурочены к молодым (до 10 лет), а также средневозрастным (10–20 лет) участкам отсыпки плотных осадочных пород. На таких участках растительный покров изреженный, представлен отдельными куртинами и ассоциациями донника желтого (*Melilotus officinalis* L.) и синяка обыкновенного (*Échium vulgáre* L.), реже клевера лугового (*Trifolium pratense* L.), что свидетельствует о начальном этапе протекания сукцессионных процессов. На горизонтальных спланированных участках отсыпки плотных осадочных пород (участок №7) общее число видов не превышает 11. Процент общего проективного покрытия низкий, составляет около 10–15%, выражена мозаичность, отмечено формирование небольших ассоциаций пионерных видов. Старые (более 20 лет) участки отсыпки, занятые пионерными группировками, представлены южными (участок №1) и западными склонами (рис. 1). Здесь, помимо вышеописанных видов, встречаются другие рудеральные виды, среди которых преобладают икотник серый (*Bertéro aincána* L.) и желтушник левкойный (*Erýsimum cheiranthoïdes* L.). Кроме того, пионерные растительные группировки встречаются также на молодых и средневозрастных (10–20 лет) горизонтальных участках с бугристым рельефом. Их отличительной особенностью является присутствие древесных видов, таких

как береза повислая (*Betula pendula* Roth.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и осина обыкновенная (*Populus tremula* L.), которые распространены на участках, получающих дополнительное увлажнение.

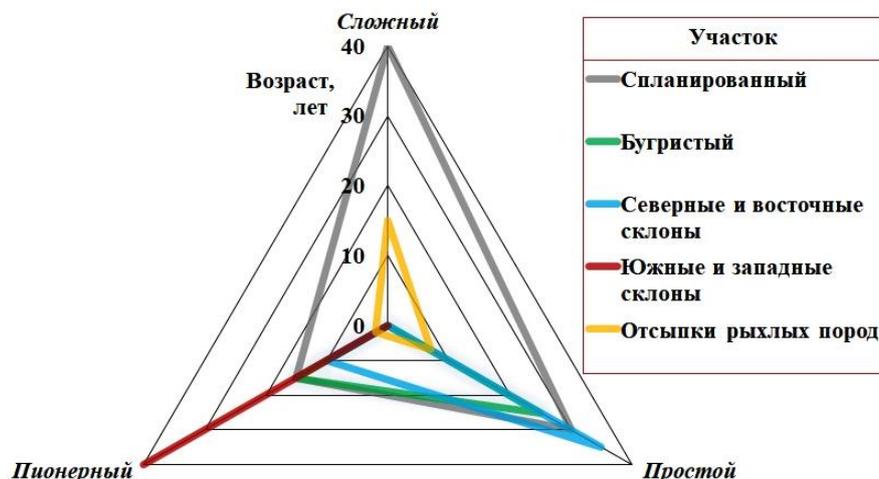


Рисунок 1. Схема сукцессий фитоценозов в техногенных экосистемах Горловского антрацитового месторождения.

Преобладающими почвами на участках с пионерной растительностью являются инициальные эмбриоземы. Типичный подтип отмечается на молодых и средневозрастных участках, криптопедогенный – на старых участках с экстремальными эдафическими условиями. Как правило, инициальные эмбриоземы сильнокаменистые по составу. Поскольку слагающие породы имеют преимущественно серый или темно-серый цвет, поверхность инициальных эмбриоземов подвержена значительным колебаниям температуры, что, в свою очередь, способствует активной дезинтеграции каменистых отдельностей с образованием мелкозема (Соколов и др., 2015). На склонах, особенно южных и западных, этот процесс более выражен; здесь образовавшийся материал перемещается вниз по склонам, в результате чего происходит обновление поверхности, что препятствует закреплению травянистой растительности.

На участках, где в почвах накапливается мелкозем, эдафические условия со временем улучшаются, способствуя, тем самым, развитию простых растительных группировок. Простые растительные группировки характеризуются одноярусностью, низким видовым разнообразием, преобладанием одного-двух видов – эдификаторов, высоким процентом проективного покрытия (Воронов, 1973; Кандрашин, 1989). Простые фитоценозы на горизонтальных спланированных участках формируются за 5–7 лет на рыхлых осадочных породах и за 15–20 лет на плотных (рис. 1). В их составе сохраняется высокая доля рудеральных видов, но преобладают донник желтый (*Melilotus officinalis* L.) и земляника зеленая (*Fragaria viridis* Duch.). Отдельными куртинами встречаются злаковые растения: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) и костер ржаной (*Bromus secalinus* L.). Общее число видов (участок №3) достигает 16.

В почвах, благодаря накоплению на поверхности растительных остатков, формируются горизонты их аккумуляции; такие почвы называют органо-аккумулятивными эмбриоземами (Курачев, Андроханов, 2002). На отвалах Горловского антрацитового месторождения встречаются два подтипа этих почв. Подтип войлочных эмбриоземов формируются под травянистыми простыми растительными группировками, а подстилочный подтип под древесной растительностью (Androkhanov, Sokolov, 2021).

Простые сообщества с доминированием древесных видов характерны для склонов и средневозрастных и старых участков с бугристым рельефом. При этом на бугристых участках (участок №2) отмечено формирование березняка (*Betula pendula* Roth.) с одиночными включениями представителей осины (*Populus tremula* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Сомкнутость крон около 70%. В травостое формируется сообщество с преобладанием пионерных видов: мать-и-мачехи (*Tussilago farfara* L.), донника желтого (*Melilotus officinalis* L.) и ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.); процент общего проективного покрытия высокий и составляет 80%. В целом, общее число видов здесь достигает 15 и более. Полученные данные о качественном и количественном распределении видов в экотопе, позволяют оценить данную сукцессионную стадию как березово-сосновый лес с разнотравно-злаковым травостоем, характерную для лесостепной зоны Западной

Сибири (Кандрашин, 1989). Кроме того, на таких участках выражен напочвенный ярус, представленный моховым покровом, являющимся идентификационным признаком зоны прикромового повышенного увлажнения (Уфимцев, 2023).

Простые древесные группировки склоновых участков отличаются более низким количеством видов (табл. 1). Здесь, по причине описанного выше обновления поверхности и провальной водопроницаемости, на начальных этапах формирования растительного покрова древесные виды получают преимущество перед травянистыми (Frouz et al., 2018). Впоследствии закреплению травянистых видов, препятствует изменение светового режима поверхности при смыкании крон деревьев. Поэтому на обследованных нами участках №5 и №7 травянистый ярус практически не развит.

Формирование на отвалах сложных растительных группировок (участки №4 и №6) характеризуется увеличением количества видов (20 и более) и рассредоточением их в пространстве; также отмечается дифференцированность по ярусам (Воронов, 1973). Процент проективного покрытия находится в интервале 80–100%. В составе таких сообществ преобладают злаки, такие как ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), мятлик узколистый (*Poa angustifolia* L.) и костер ржаной (*Bromus secalinus* L.). На исследуемых отвалах образование сложных фитоценозов наблюдается на участках отсыпки плотных пород на старых (более 20 лет) горизонтальных выровненных поверхностях, на рыхлых почвообразующих породах и на участках с бугристым рельефом. В формирующемся фитоценозе с корневищными или корнеотпрысковыми растениями с мощной корневой системой более активно происходит освоение внутрипочвенного пространства (Батурина, 2005). В результате этого под сложными растительными группировками формируются дерновые эмбриоземы, относящиеся к мезофитному подтипу.

Таким образом, дифференциация растительных сообществ на отвалах отходов добычи антрацита, в целом, соответствует природным закономерностям, характерным для лесостепной зоны Западной Сибири. Так, на плакорных выровненных участках и пологих склонах южной экспозиции отмечается преобладание травянистой растительности. В нижней части теневых склонов, а также на участках с микро- и макропонижениями, бугристыми формами рельефа выявлено доминирование древесной растительности (Лапшина, 1978). Подтверждением этого служат результаты группировки растительных сообществ исследуемых ключевых участков, которые были получены при проведении кластерного анализа. Кластеризация разделила их на две группы по типу доминирующей растительности: древесной или травянистой (рис. 2). Простые группировки лесных фитоценозов вошли в первую группу, где выделяется более богатый по видовому составу участок №2. Вторая группа объединила участки с пионерными, простыми и сложными травянистыми фитоценозами. В этой группе отмечается наиболее богатый по видовому разнообразию участок №6. В отдельную подгруппу были включены участки пионерных сообществ (№ 1 и №7). Третья подгруппа объединила отличающиеся простые и сложные фитоценозы участков №3 и №4.

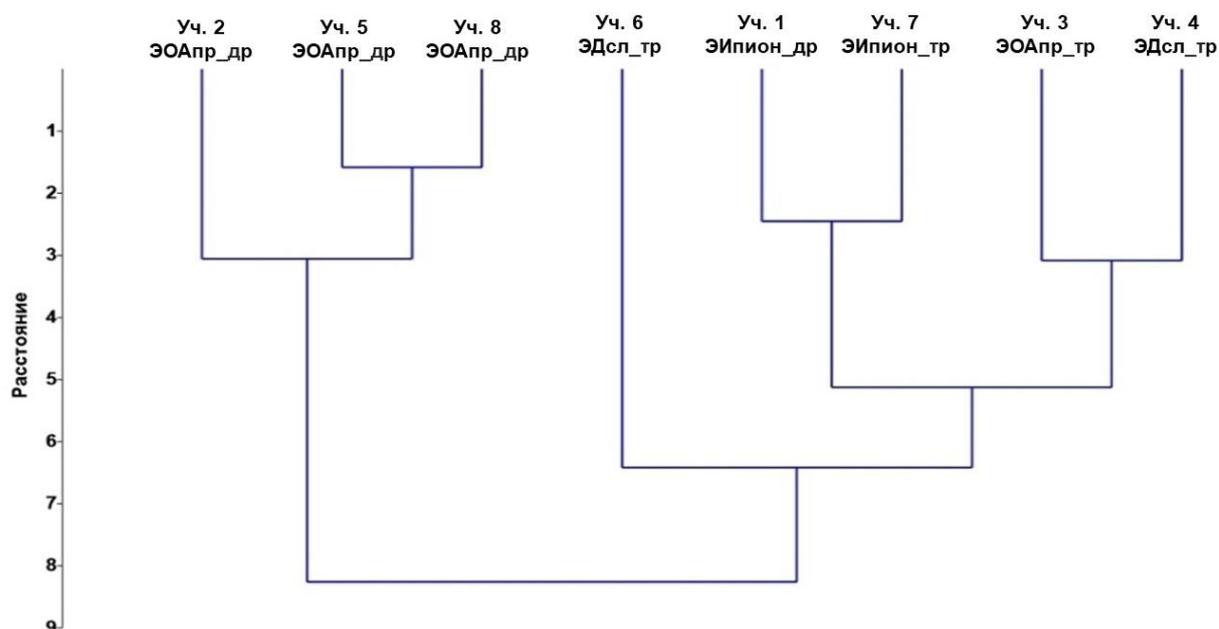


Рисунок 2. Дендрограмма иерархической группировки участков исследований (метод Варда).

Характерной особенностью почв исследуемого отвала Горловского антрацитового месторождения является неоднородность поверхности, которая проявляется в рельефе, слагающих породах, возрасте и т.д. Отмеченные особенности сказываются на свойствах почв, определяя, тем самым, дифференцированность эдафических условий формирования растительного покрова (табл. 2).

Таблица 2

Основные физические свойства почв исследуемых отвалов*

Описание почв участков	Глубина, см	Плотность, г/см ³	Доля фракции, %	
			>3 мм	<0,01 мм
Рельеф				
Склоновый (n=6)	0–10	1,3–2,0	43,1–75,9	8,1–26,7
	10–20		71,2–86,9	9,1–24,1
Бугристый (n=5)	0–10	1,4–1,7	36,3–81,1	0,1–23,9
	10–20		63,3–80,1	0,4–32,8
Спланированный (n=12)	0–10	1,8–2,1	0,4–46,5	10,6–36,1
	10–20		0,2–57,5	13,9–32,4
Почвообразующие породы				
Плотные (n=18)	0–10	1,4–2,4	32,6–75,9	8,1–36,1
	10–20		55,0–86,9	9,1–2,8
Рыхлые (n=5)	0–10	1,2–1,4	0,0–0,4	32,8–59,1
	10–20		0,0–0,2	31,1–65,0
Возраст				
Молодые, до 10 лет (n=5)	0–10	1,7–2,4	30,1–89,1	1,5–2,4
	10–20		64,4–90,1	1,9–2,1
Средневозрастные, 10-20 лет (n=7)	0–10	1,4–2,2	20,8–40,7	4,4–36,1
	10–20		32,5–57,5	4,1–32,4
Старые, более 20 лет (n=11)	0–10	1,2–1,8	0,4–75,9	8,1–32,8
	10–20		0,2–86,9	9,1–32,8
Тип эмбриозема				
Инициальные (n=8)	0–10	1,4–2,4	40,7–74,1	8,1–36,1
	10–20		57,5–86,9	9,1–32,4
Органо-аккумулятивные (n=10)	0–10	1,2–2,1	36,3–75,9	10,6–26,7
	10–20		56,1–73,0	13,9–32,8
Дерновые (n=5)	0–10	1,3–2,1	0,4–32,6	25,5–59,1
	10–20		0,2–55,0	19,5–65,0

Примечание.

*Для характеристики диапазонов значений использовались как собственные, так и данные Н.А. Соколовой (2023).

Результаты исследования основных физических свойств почв, представленные в таблице 2, говорят о высокой каменистости почв и, соответственно, низком содержании физической глины. Максимальная каменистость (40,7–86,9%) наблюдается в инициальных эмбриоземах, так как крупные обломки разрушаются здесь только под действием физического выветривания, тогда как участки с дерновыми эмбриоземами дополнительно подвергаются процессам химического, биофизического и биохимического выветривания (Шуклина и др., 2018). Для последних характерно минимальное содержание камней (0,4–32,6%) и относительно высокая доля физической глины (25,5–32,8%).

Склоновые участки подвержены воздействию осадков и образованию стоковых серий. Поверхность участков с бугристым и склоновым рельефом имеет более низкую плотность субстрата, что обеспечивает интенсивное протекание процессов выветривания. Крупные обломки пород здесь быстрее разрушаются до мелкозема, который накапливается в понижениях, способствуя лучшему развитию растений. Каменистость почв участков с бугристым рельефом составляет 36,3–63,3% (Андроханов, Соколова, 2022). Плотность зависит от содержания в почвах камней (Госсен и др., 2016) и варьирует в широких интервалах (1,2–2,4). Минимальная плотность наблюдается в эмбриоземах, сформированных на рыхлых породах (1,2–1,3), максимальная на горизонтальных спланированных участках отсыпки плотных пород (1,8–2,4).

Физико-химические свойства почв Горловского антрацитового месторождения характеризуются нейтральным или слабощелочным показателем кислотности (табл. 3). Содержание общего углерода варьирует в диапазоне от 0,5 до 21,8% и определяется присутствием включений углистых частиц, что характерно для большинства почв отвалов угольных месторождений (Соколов, 2009). При этом содержание органического углерода существенно меньше и составляет от 0,2 до 3,8%. Содержание азота на всех исследуемых участках варьирует в пределах от 0,07 до 0,64%. Следует обратить внимание, что содержание оцениваемых показателей приведено для мелкозема почв. В тоже время если учесть каменистость почв и пересчитать значения углерода и азота на всю почву, то они в разы меньше чем в мелкоземе (табл. 3), а в максимально каменистых инициальных эмбриоземах на порядок.

Таблица 3

Основные химические свойства почв и мелкозема почв исследуемых ключевых участков

№ участка (обозначение)	Глубина, см	pH	Углерод органического вещества (Сорг.), %	Углерод общий (Собщ.), %	Азот общий (Nобщ.), %
Уч. 1 (ЭИпион_др)	0–10	8,5	1,1/0,1*	4,7/0,4	0,35/0,032
	10–20	8,4	1,2/0,1	4,4/0,2	0,33/0,015
Уч. 2 (ЭОАпр_др)	0–10	7,9	3,8/2,1	21,3/11,7	0,63/0,31
	10–20	7,9	3,1/1,0	9,9/3,2	0,44/0,11
Уч. 3 (ЭОАпр_тр)	0–10	6,7	1,7/0,6	6,0/2,2	0,50/0,24
	10–20	7,1	0,6/0,2	2,4/0,7	0,30/0,12
Уч. 4 (ЭДсл_тр)	0–10	6,6	1,6/0,9	7,0/3,8	0,45/0,28
	10–20	7,9	2,2/0,8	7,3/2,8	0,42/0,22
Уч. 5 (ЭОАпр_др)	0–10	6,7	1,7/0,3	5,7/1,0	0,36/0,09
	10–20	6,2	2,7/0,6	21,8/5,0	0,54/0,12
Уч. 6 (ЭДсл_тр)	0–10	7,2	1,4/1,4	2,7/2,7	0,24/0,23
	10–20	8,1	0,2/0,2	0,5/0,5	0,08/0,07
Уч. 7 (ЭИпион_тр)	0–10	8,0	2,2/1,0	11,0/5,3	0,61/0,31
	10–20	7,5	1,0/0,6	14,0/5,0	0,70/0,20
Уч. 8 (ЭОАпр_др)	0–10	7,2	1,5/0,6	8,4/3,5	0,45/0,24
	10–20	7,5	0,5/0,1	2,7/0,6	0,45/0,08

Примечание.

*1,1/0,1: 1,1 – содержание в мелкоземе; 0,1 – содержание в почвах.

Корреляционный анализ описываемых свойств почв показал положительную связь между скелетностью и плотностью (0,69) (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Спирмена (n=23)

Параметр	Рел.	Скел.	Пл.	ФГ	Сорг.	pH	Собщ.	Nобщ.	ЧВ
Скел.	0,04	1							
Пл.	-0,19	0,69	1						
ФГ	-0,08	-0,84	-0,52	1					
Сорг.	-0,13	-0,60	-0,64	0,58	1				
pH	-0,10	0,04	0,04	-0,004	-0,15	1			
Собщ.	-0,15	-0,48	-0,47	0,61	0,89	-0,24	1		
Nобщ.	-0,12	-0,64	-0,55	0,72	0,85	-0,03	0,88	1	
ЧВ	-0,69	-0,35	-0,26	0,32	0,31	0,10	0,18	0,21	1
ПП	-0,17	-0,53	-0,45	0,60	0,39	-0,17	0,35	0,41	0,61
	слабая корреляционная зависимость								
	средняя корреляционная зависимость								
	сильная корреляционная зависимость								

Примечание.

* Рел.– рельеф, отношение S_o/S_n , Скел. – скелетная часть почвы, Пл. – плотность почвы, ФГ – физическая глина, Сорг.–органический углерод, pH– водородный показатель, Собщ.– общий углерод, Nобщ. – общий азот, ЧВ – число видов, ПП – проективное покрытие.

Отрицательную корреляцию с содержанием крупнозема продемонстрировали значения содержания физической глины (-0,84), а также органического углерода (-0,60) и общего азота (-0,64). Принимая это во внимание, можно сделать вывод, что содержание крупнозема в почвах является важнейшим параметром, определяющим основные химические и физические свойства почвы и, как следствие, условия произрастания растений в техногенных ландшафтах.

Анализ корреляционных зависимостей показателей состояния растительных сообществ со свойствами почв продемонстрировал, что наиболее тесную отрицательную корреляцию имеет рельеф и число видов (см. табл. 4). Высокая расчлененность рельефа обуславливает доминирование древесной растительности. В травяном ярусе формирующихся на поверхности отвалов лесных сообществах по мере увеличения сомкнутости крон происходит выпадение светолюбивых растений. Наиболее выражены связи свойств почв с площадью проективного покрытия. Так, средние статистически значимые коэффициенты корреляции зафиксированы с содержанием физической глины (ФГ), долей скелетной части почв (Скел.) и числом видов (ЧВ). Слабая корреляционная зависимость проективного покрытия отмечается с плотностью и содержанием общего азота.

Результаты анализа данных методом главных компонент показали (табл. 5), что наиболее тесную положительную связь с первой главной компонентой имеет содержание в почвах органического и общего углерода, а также азота. Обратную корреляцию с первой главной компонентой демонстрируют скелетность почв и плотность. Очевидно, что чем выше содержание в почве органического вещества, и, как правило, корней, тем ниже содержание камней и, соответственно, ниже плотность. Вторая компонента также положительно связана с общим углеродом и отрицательно с числом видов и проективным покрытием, что, вероятно обусловлено накоплением подстилки в маловидовых древесных сообществах. Отмеченное обстоятельство подтверждает также третья компонента, которая коррелирует с числом видов, но имеет сильную связь со степенью расчлененности рельефа.

Таблица 5

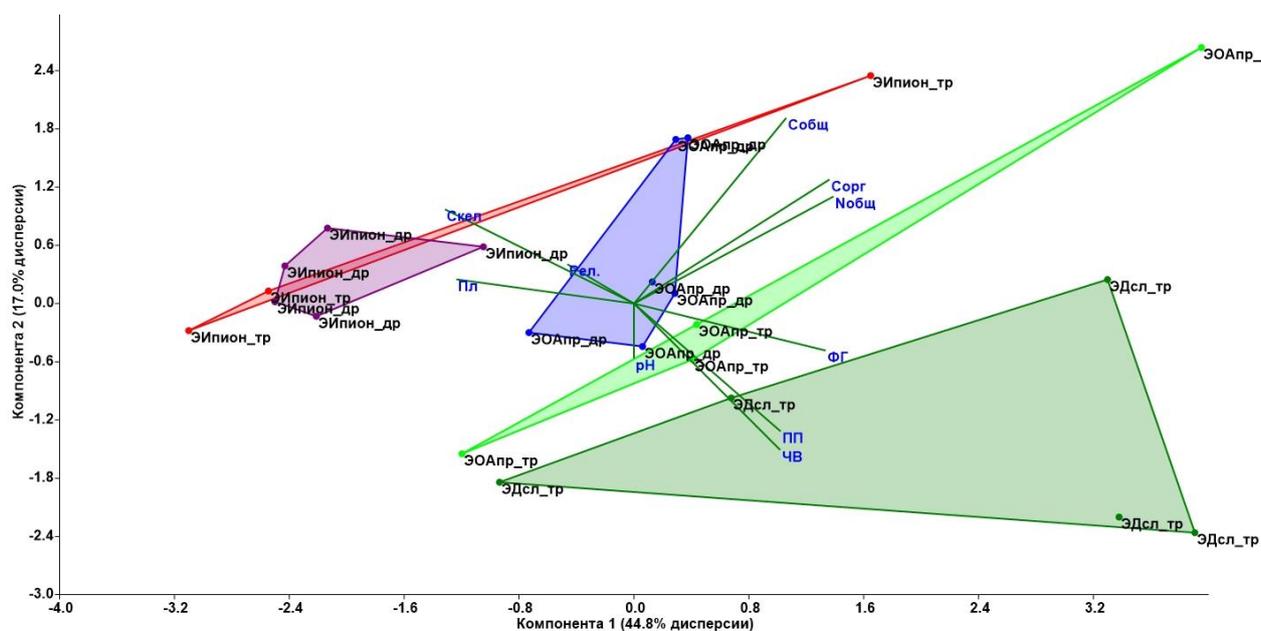
Корреляционная связь главных компонент, основных физических и химических свойств почв и некоторых параметров состояния растительного покрова

Показатель	Компонента 1 (44,8% дисперсии)	Компонента 2 (17,0% дисперсии)	Компонента 3 (14,4% дисперсии)
Расчлененность рельефа	-0,30	0,22	-0,88
Скелетность	-0,74	0,11	0,28
Плотность	-0,67	0,09	0,54
Содержание физ. глины	0,78	-0,08	-0,20
Сорг.	0,87	0,35	-0,12
pH	-0,13	-0,17	-0,02
Собщ.	0,83	0,42	-0,01
Нобщ.	0,85	0,31	-0,14
Число видов	0,55	-0,55	0,50
Проективное покрытие	0,65	-0,56	0,02

Примечание.

*Выделение жирным шрифтом означает выявление тесной положительной связи между показателями

На графике видно, что высокое содержание физической глины (ФГ) способствует развитию травянистых растительных группировок, а преобладание в почвах крупнозема (Скел.) – древесной (рис. 3). Это связано с тем, что неглубокая корневая система травянистой растительности, закрепляясь в почве, способствует биофизическому выветриванию и накоплению физической глины (Кусов, 2007). Тогда как на склоновых участках с высоким содержанием камней, на начальных этапах формирования растительного покрова преимущество получает древесная растительность, что было также отмечено для почв отвалов буроугольных месторождений Чехии (Frouz et al., 2018).



Обозначения:

- ЭИпион_др – инициальные эмбриоземы под пионерными древесными сообществами;
- ЭИпион_тр – инициальные эмбриоземы под пионерными травянистыми сообществами;
- ЭОАпр_тр – органо-аккумулятивные эмбриоземы под простыми травянистыми сообществами;
- ЭОАпр_др – органо-аккумулятивные эмбриоземы под простыми древесными сообществами;
- ЭДсл_тр – дерновые эмбриоземы под сложными травянистыми сообществами.

Рисунок 3. Расположение исследуемых участков и переменных анализа (свойства почв и растительных сообществ) в плоскости первых двух главных компонент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований были выявлены особенности развития пионерных, простых и сложных растительных группировок на разновозрастных участках отсыпки плотных и рыхлых осадочных пород отвалов угледобычи Горловского антрацитового месторождения. Отмечено, что развитие пионерных растительных группировок происходит на молодых и средневозрастных площадках отсыпки плотных осадочных пород, характеризующихся преобладанием инициальных эмбриоземов с сильнокаменистым составом, а также на склоновых участках, где закреплению растений препятствует обновление поверхности.

Формирование простых травянистых фитоценозов происходит на горизонтальных средневозрастных и старых участках отсыпки плотных пород. Простые древесные фитоценозы формируются на участках с бугристым рельефом, а также теневых склонах; для них характерно преобладание березы повислой (*Betula pendula* Roth). В результате развития простых фитоценозов на поверхности происходит накопление растительных остатков и, как следствие, формирование органо-аккумулятивных эмбриоземов.

На старых участках отсыпки плотных пород, а также средневозрастных участках, сложенных рыхлыми породами, образуются сложные фитоценозы. Для них характерна частая встречаемость ежи сборной (*Dactylis glomerata* L.), мятлика узколистного (*Poa angustifolia* L.) и костра ржаного (*Bromus secalinus* L.). Высокий процент освоения внутрипочвенного пространства обуславливает формирование вместе со сложными фитоценозами дерновых эмбриоземов.

Результаты кластерного анализа позволили разделить репрезентативные участки на две крупные группы по доминирующему типу растительности: древесной или травянистой. Выявленные корреляционные связи между свойствами почв, площадью проективного покрытия и числом видов растений подтверждают, что на склоновых и бугристых поверхностях преимущество получают древесные сообщества, на горизонтальных выровненных участках – травянистые.

Анализ полученных данных проведенный с использованием методом главных компонент показали подтвердили предположение о том, что высокое содержание физической глины и пород ее продуцирующих способствует развитию травянистых растительных группировок; на склоновых

участках с высоким содержанием камней на начальных этапах формирования растительного покрова преимущество получает древесная растительность.

Таким образом оценив факторы, определяющие скорость и направленность развития растительных сообществ на исследуемых участках, можно предложить практические рекомендации по восстановлению отвалов отходов добычи антрацита. Так в целях формирования лесных насаждений в аналогичных техногенных ландшафтах достаточным является организация расчлененного мелкобугристого или террасированного рельефа. При этом минимизация планировки поверхности на горнотехническом этапе снижет затраты на рекультивацию. Планировка необходима в тех случаях, когда цель рекультивации состоит в формировании травянистых сообществ, обогащению видами которых и ускорению развития способствует отсыпка на поверхности рыхлых суглинистых пород.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00116).

ЛИТЕРАТУРА

Андроханов В.А., Соколова Н.А. Почвенно-экологическое состояние поверхности отвалов антрацитовых месторождений (на примере Горловского антрацитового месторождения, Новосибирская область) // Достижения науки и техники АПК. 2022. Том 36. № 5. С. 31–36. https://doi.org/10.53859/02352451_2022-36-5-31

Батурина В.Б. Особенности гумификации и минерализации корневой массы в почвах техногенных ландшафтов. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 19 с.

Воронов А.Г. Геоботаника: Учеб. пособие для ун-тов и пед. ин-тов. 2-е изд. Высшая школа, 1973. 384 с.

Глебова О.И. Биогеографическая диагностика эмбриоземов Кузбасса. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 18 с.

Госсен И.Н., Кулижский С.П., Данилова Е.Б., Соколов Д.А. Бонитировочный подход к оценке почвенно-экологического состояния техногенных ландшафтов Сибири (на примере отвалов антрацитовых, каменно- и бурогольных месторождений) // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (39). С. 71–81.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Москва: Издательство стандартов, 1985. 4 с.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2015. 18 с.

ГОСТ 26213-21. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 7 с.

Кандрашин Е.Р. Сукцессии биоты в техногенных экосистемах (на примере Кузнецкого угольного бассейна): Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1989. 17 с.

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

Курачев В.М., Кандрашин Е.Р., Рагим-заде Ф.К. Сингенетичность растительности и почв техногенных ландшафтов: экологические аспекты, классификация // Сибирский экологический журнал. 1994. Том 1. № 3. С. 205–214.

Кусов А.В. Гранулометрическая диагностика внутрипочвенного выветривания обломочного материала в техногенных ландшафтах // Сибирский экологический журнал. 2007. Том 14. № 5. С. 837–843.

Лапшина Е.И. Растительный покров // Новосибирская область: природа и ресурсы. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1978. С. 112–124.

Скотарева А.Е., Соколов Д.А. Специфика сукцессии фитоценозов на отвалах плотных осадочных пород (например Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.). Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. С. 578–583. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>

Соколова Н.А. Оценка почвенно-экологического состояния отвалов угольных разрезов дистанционными методами (на примере Горловского антрацитового месторождения). Диссертация ... канд. биол. наук. Томск, 2023. 200 с.

Соколова Н.А., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка пригодности вегетационных индексов для выявления почвенно-экологического состояния поверхности отвалов антрацитовых месторождений // Экология и промышленность России. 2020. Том 24. № 1. С. 62–68. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68>

Соколов Д.А. Окислительно-восстановительные процессы в почвах техногенных ландшафтов. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2009. 17 с.

Соколов Д.А., Мерзляков О.Э., Доможакова Е.А. Оценка литогенного потенциала гумусонакопления в почвах отвалов каменноугольных месторождений Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 399. С. 247–253. <https://doi.org/10.17223/15617793/399/40>

Уфимцев В.И. Эндоекогенез насаждений *Pinus Sylvestris* L. на отвалах Кузбасса. Диссертация ... д-р. биол. наук. Томск, 2023. 420 с.

Шуклина А.Е., Соколова Н.А., Худяков С.Е., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка факторов дифференциации гранулометрического состава почв техногенных ландшафтов Горловского антрацитового месторождения // Почвы в биосфере: Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 10–14 сентября 2018 года / А.И. Сысо (отв. ред.). Часть II. Новосибирск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. С. 353–358.

Androkhonov V.A., Sokolov D.A. Soil evolution and reclamation of technogenic landscapes in Siberia // Advances in raw material industries for sustainable development goals / V. Litvinenko (ed.). Leiden: CRC Press/Balkema, 2021. P. 268–273. <https://doi.org/10.1201/9781003164395>

Frouz J., Mudrak O., Reitschmiedova E., Walmsley A., Vachova P., ˇSimaˇckova H., Albrechtova J., Moradi J., Kuˇcera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 205. P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065>

Lei H., Peng Z., Yigang H., Zhao Yang Z. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine // Global Ecology and Conservation. 2015. Vol. 4. P. 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.07.006>

Liu X., Zhou W., Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990–2015 // Ecological Engineering. 2016. Vol. 95. P. 447451. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.051>

Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // Tomsk State University Journal of Biology. 2021. No. 56. P. 6–32. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/1>

Поступила в редакцию 21.03.2024

Принята 23.04.2024

Опубликована 13.05.2024

Сведения об авторах:

Скотарева Анна Евгеньевна – студентка 2 курса Новосибирского национального исследовательского государственного университета (г. Новосибирск, Россия); skotareva04@mail.ru

Иванов Никита Александрович – студент 2 курса Новосибирского национального исследовательского государственного университета (г. Новосибирск, Россия); n.ivanov5@g.nsu.ru

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); sokolovdenis@issa-siberia.ru

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 factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit)

© 2024 A. E. Skotareva^{1,2}, N. A. Ivanov¹, D. A. Sokolov^{1,2} 

¹Novosibirsk State University, st. Pirogova, 1, Novosibirsk, Russia. E-mail: skotareva04@mail.ru

²Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

The aim of the study. Identification and assessment of specific succession processes on self-revegetating coal mining spoils of the Gorlovskoye anthracite deposit, as related to the abiotic factors.

Location and time of the study. The coal mining spoils of the Gorlovskoye anthracite deposit (54.568880 NL, 83.588956 EL), Novosibirsk region, Iskitimsky district, June 2023.

Methods. The properties of soil substrates in technogenic landscapes were determined by officially attested and widely used methods of soil analyses. In field conditions, soil hardness was measured with a penetrometer, then soil density was calculated from its values using the dependence function. Total carbon and nitrogen contents were determined using a Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O analyzer. Statistical processing of the data was carried out using cluster, principal components and Spearman's correlation analyses.

Results. In the anthracite coal mining spoils in the forest-steppe conditions of West Siberia, the high content of physical clay and clay-producing rocks in the developing soils promotes predominantly herbaceous plant groups, whereas slope areas with a high content of stones benefits the growth of woody vegetation.

Keywords: reclamation; embryozems; phytocenoses of technogenic landscapes; coal mining spoils.

How to cite: Skotareva A.E., Ivanov N.A., Sokolov D.A. Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit). *The Journal of Soils and Environment*. 2024. Vol. 7. No. 2. e259. DOI: [10.31251/pos.v7i2.259](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.259)

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 23-24-00116).

REFERENCES

- Androkhanov V.A., Sokolova N.A. Soil-ecological state of the surface of dumps of anthracite deposits (on the example of the Gorlovskoye anthracite deposit, Novosibirsk region). *Achievements of Science and Technology in Agribusiness*. 2022. Vol. 36. No. 5. P. 31–36. (in Russian). <https://doi.org/10.53859/02352451-2022-36-5-31>
- Baturina V.B. Features of humification and mineralization of root mass in soils of technogenic landscapes. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2005. 19 p. (in Russian).
- Voronov A.G. *Geobotany*. 2nd ed. Vysshaya Shkola Publ., 1973. 384 p. (in Russian).
- Glebova O.I. Biogeographical diagnostics of Kuzbassembryozems. Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Novosibirsk, 2005. 18 p. (in Russian).
- Gossen I.N., Kulizhsky S.P., Danilova E.B., Sokolov D.A. Assessment 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 Novosibirsk State Agrarian University*. 2016. No. 2 (39). P. 71–81. (in Russian).
- GOST 26423-85. Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract. Moscow: Standard Publishing House, 1985. 4 p. (in Russian).
- GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform Publ., 2015. 18 p. (in Russian).
- GOST 26213-21. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow: Russian Standardization Institute, 2021. 7 p. (in Russian).
- Kandrashin E.R. Biota succession in technogenic ecosystems (on the example of the Kuznetsk coal basin). Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Dnepropetrovsk, 1989. 17 p. (in Russian).
- Kurachev V.M., Androkhanov V.A. Classification of soils in technogenic landscapes. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2002. Vol. 9. No. 3. P. 255–261. (in Russian).
- Kurachev V.M., Kandrashin E.R., Ragim-zade F.K. Syngeneticity of vegetation and soils of technogenic landscapes: environmental aspects, classification. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 1994. Vol. 1. No. 3. P. 205–214. (in Russian).

- Kusov A.V. Granulometric diagnostics of intrasoil weathering of clastic material in technogenic landscapes. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2007. Vol. 14. No. 5. P. 837–843. (in Russian).
- Lapshina E.I. Vegetation cover. In book: *Novosibirsk region: nature and resources*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1978. P. 112–124. (in Russian).
- Skotareva A.E., Sokolov D.A. Specificity of succession of phytocenoses on dumps of dense sedimentary rocks (on example of the Gorlovskoye anthracite deposit). In book: *Soils and Environment [Electronic resource]: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, October 2–6, 2023)*. Novosibirsk: SSA SB RAS, 2023. P. 578–583. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
- Sokolova N.A. Assessment of the soil-ecological state of coal mine dumps using remote methods (using the example of the Gorlovskoye anthracite deposit). *Dissertation ... Cand. of Biol. Sci.* Tomsk, 2023. 200 p. (in Russian).
- Sokolova N., Gossen I., Sokolov D. Assessment of the Suitability of Vegetation Indices to Identify Soil and Ecological Condition of the Surface of Anthracite Deposits Dumps. *Ecology and Industry of Russia*. 2020. Vol. 24. No. 1. P. 62–68. (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-62-68>
- Sokolov D.A. Oxidation-reduction processes in soils of technogenic landscapes. *Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci.* Novosibirsk, 2009. 17 p. (in Russian).
- Sokolov D.A., Merzlyakov O.E., Domozhakova E.A. Assessment of the lithogenic potential of humus accumulation in the soils of coal deposits in Siberia. *Tomsk State University Journal*. 2015. No. 399. P. 247–253. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/15617793/399/40>
- Ufimtsev V.I. Endoecogenesis of *Pinus Sylvestris* L. on dumps of Kuzbass. *Dissertation ... Dr. of Biol. Sci.* Tomsk, 2023. 420 p. (in Russian).
- Shuklina A.E., Sokolova N.A., Khudyakov S.E., Gossen I.N., Sokolov D.A. Assessment of factors of differentiation of the granulometric composition of soils in technogenic landscapes of the Gorlovka anthracite deposit. In book: *Soils in the biosphere. Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, 10–14 September, 2018 / A.I. Syso (ed.). Part II*. Novosibirsk: National Research Tomsk State University, 2018. P. 353–358. (in Russian).
- Androkhanov V.A., Sokolov D.A. Soil evolution and reclamation of technogenic landscapes in Siberia. On book: *Advances in raw material industries for sustainable development goals / V. Litvinenko (ed.)*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2021. P. 268–273. <https://doi.org/10.1201/9781003164395>
- Frouz J., Mudrak O., Reitschmiedova E., Walmsley A., Vachova P., ˇSimackova H., Albrechtova J., Moradi J., Kuˇcera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 205. P. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.065>
- Lei H., Peng Z., Yigang H., Zhao Yang Z. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine. *Global Ecology and Conservation*. 2015. Vol. 4. P. 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.07.006>
- Liu X., Zhou W., Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990–2015. *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 95. P. 447451. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.051>
- Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021. No. 56. P. 6–32. <https://doi.org/10.17223/19988591/56/1>

Received 21 March 2024

Accepted 24 April 2024

Published 13 May 2024

About the authors:

Anna E. Skotareva – 2nd year student, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia); skotareva04@mail.ru

Nikita A. Ivanov – 2nd year student, Novosibirsk State University, (Novosibirsk, Russia); n.ivanov5@g.nsu.ru

Denis A. Sokolov – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Soil Reclamation in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); sokolovdenis@issa-siberia.ru

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/)