

На правах рукописи



Дмитракова

Янина Александровна

**СУБСТРАТНО-ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
УЧАСТКОВ САМОЗАРАСТАНИЯ И РЕКУЛЬТИВАЦИИ КАРЬЕРНО-
ОТВАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность

03.02.08 экология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата

биологических наук

Москва 2019

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель:

Абакумов Евгений Васильевич
Доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский
государственный университет, и.о.
заведующего кафедрой прикладной
экологии

Официальные оппоненты:

Андроханов Владимир Алексеевич
Доктор биологических наук, ФГБУН
Институт почвоведения и агрохимии СО
РАН,
заместитель директора по научной работе,
заведующий лабораторией рекультивации
почв

Курганова Ирина Николаевна
Доктор биологических наук, доцент,
обособленное подразделение ФГБУН
«Пушкинский научный центр биологических
исследований Российской академии наук»,
Институт физико-химических и
биологических проблем почвоведения РАН,
ведущий научный сотрудник лаборатории
почвенных циклов азота и углерода

Ведущая организация:

ФГБУН «Санкт-Петербургский научно-
исследовательский Центр экологической
безопасности РАН» (НИЦЭБ РАН)

Защита диссертации состоится «23» мая 2019 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.203.38 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» по адресу: 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5, экологический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6 и на сайте dissovet.rudn.ru.

Автореферат разослан: «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат биологических наук

Елена Александровна Ванисова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. С каждым годом в России увеличиваются площади нарушенных земель. По данным государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды РФ, на территории нашей страны нарушено более 1200 тыс. га земель. Согласно приблизительным оценкам, основной причиной образования техногенных ландшафтов является добыча полезных ископаемых – почти 900 тыс. га (Нешатаев и др., 2012). Добыча полезных ископаемых характеризуется серией негативных последствий: полное уничтожение почвенно-растительного покрова (Сумина, 2012; Абакумов и Гагарина, 2006), изменение рельефа территории, гидрологического режима, биогеохимических циклов, загрязнение токсическими веществами окружающих ландшафтов (Андроханов и др., 2000), интенсивная эмиссия CO₂ в атмосферу (Lal, 2004).

Необходимость рекультивации земель и реабилитации посттехногенных ландшафтов обусловлена постоянно нарастающими темпами нарушения территорий и широким спектром негативных последствий горной добычи. Доля рекультивированных земель остается крайне низка, темпы восстановления ниже, чем скорость нарушения. При этом, некоторые территории можно оставить под самозарастание. Все перечисленное обосновывает необходимость изучения процессов и механизмов первичной сукцессии. Данные исследования интересны с точки зрения фундаментальной науки, поскольку карьеры строительных материалов являются удобным объектом для изучения первичного почвообразования и освоения растительностью свободных территорий. Исследование механизмов восстановления растительных сообществ, также, как и процессов инициального педогенеза, необходимо для научного обоснования проведения рекультивации, что несет высокую прикладную значимость. Комплексные исследования начальных стадий экогенеза могут быть наиболее успешными в случае хроносерий отвалов.

Степень разработанности проблемы. Восстановление экосистем на карьерно-отвальных комплексах изучало большое количество авторов (Баева и др., 1992; Капелькина, 1993; Махонина, 2003; Сумина, 2011, 2013; Řehouňková and Prach, 2008; Borgegerd, 1990; Ursic et al., 1997; Cullen et al., 1998; Копцева, 2005; Абакумов и Гагарина, 2006; Нешатаев и др., 2013). В существующих работах сукцессия растительного покрова и процессы педогенеза чаще всего рассматриваются отдельно друг от друга. Комплексные исследования восстановления почвенно-растительного покрова и связанного с ними микробиома по-прежнему актуальны.

Цель работы – выявить связь темпов природного и рекультивационного восстановления фитоценозов со свойствами субстрата, а также влияние формирующегося

растительного сообщества на характеристики молодых почв. Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Охарактеризовать направленность почвообразовательных процессов на различных субстратах карьерно-отвальных комплексов;
2. Провести анализ видового состава растительных сообществ на карьерах с разными грунтами;
3. Оценить микробиологическую активность почв и разнообразие микробных сообществ на разных участках карьеров строительных материалов;
4. Выяснить особенности изменения физико-химических и физических свойств грунтов.

Научная новизна. Впервые проведен комплексный анализ почвенного и растительного компонентов, включая детальный анализ почвенных микробных сообществ карьерно-отвальных комплексов с различными субстратами. Выявлена субстратная приуроченность типов инициального почвообразования, что позволяет прогнозировать параметры почвенно-экологической эффективности рекультивации земель в различных субстратно-фитоценотических комбинациях. Оценены риски дополнительной эмиссии CO_2 в атмосферу и возможность секвестрации углекислого газа почвами карьеров. Оценен метод вертикального электрического зондирования для изучения неоднородности посттехногенных субстратов.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты полезны при планировании современных подходов к рекультивации земель. Они дают возможность оценивать экологические последствия при принятии плана на этапе разработки полезных ископаемых, выборе технического и биологического этапов рекультивации, а также возможности оставления участка под самозарастание.

Положения, выносимые на защиту:

1. Эффективность восстановления экосистем в посттехногенных и техногенных местообитаниях карьерно-отвальных комплексов зависит от формирования благоприятных свойств субстрата, определяющего возможность инициации сукцессии. Тренды развития экогенеза определяются сочетаниями субстратных и геоморфологических условий в пределах карьерно-отвальных комплексов.

2. Для перехода микробоценоза в климаксную стадию, стабилизации углеродного цикла и увеличения стабильности экосистем необходимо восстанавливать определенные группы микроорганизмов, а именно – олиготрофов.

3. Формирование большого количества посттехногенных форм мезорельефа благоприятствует диверсификации биоразнообразия и разнообразия почв и соответствующих эдафических условий.

4. В условиях карьерно-отвалных комплексов для выявления неоднородности сложения почвенного профиля эффективным является метод вертикального электрического зондирования. Однако из-за сложного внутреннего рельефа посттехногенных территорий часто наблюдаются аномально высокие значения кажущегося электрического сопротивления.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты и положения работы были представлены на семинарах кафедры прикладной экологии СПбГУ; на международной научно-технической конференции преподавателей, студентов, аспирантов и докторантов «Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка» (СПб 2014); на X молодежной экологической школе-конференции «Рациональное использование природных ресурсов и проблемы сохранения биоразнообразия» (СПб 2015); на международной научной конференции «Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления» (Новосибирск, 2016); на VII съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Белгород, 2016); на II Научно-практическом семинаре для стипендиатов Фонда имени В.И. Вернадского «Актуальные научные исследования в сфере управления природопользованием и экологической безопасности»; на 6 молодежном экологическом конгрессе «Северная пальмира» (СПб, 2017); на Всероссийской научной конференции «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления» (СПб, 2017); на 1-ом Российском Микробиологическом Конгрессе (Пушино, 2017); на 9-й международной конференции «Biodiversity research» (Daugavpils, Латвия, 2017); на международных экологических конференциях «University Alliance for Sustainability» (Berlin, Германия, 2016, 2017); на международном конгрессе SUTMA 9 (Москва, 2017); на 7-ой международной конференции ИЮПАК по зеленой химии (Москва, 2017).

Глава 1. Экологические последствия горнодобывающей деятельности (обзор литературы). В главе рассмотрены основные негативные последствия разработки полезных ископаемых: загрязнение воздуха, воды и почв; изменение биогеохимических циклов, физических свойств субстрата (Claussen et al., 2001). При полном уничтожении почвенно-растительного покрова исчезает большое количество местообитаний, что создает угрозу для биоразнообразия (Thornton, 1996).

Описаны различные подходы к установлению целей рекультивации и оценке успеха проведенных мероприятий. Большое внимание уделено изучению первичной сукцессии, жизненным стратегиям видов колонистов, факторам, оказывающим большое влияние на восстановление экосистем (Андроханов, 2000). Рассмотрено влияние растительных сообществ на почвенные параметры (Арчегова, 1992), а также то, каким образом свойства субстрата способны определять тип доминирующей растительности. Поскольку карьерно-отвалы являются источником выделения больших количеств CO_2 в атмосферу (Лосев, 2009), оценена роль почвы в эмиссии и депонировании углекислого газа. Заключительная часть главы посвящена современным перспективам рекультивации земель.

Глава 2. Природные условия районов и характеристики объектов исследования. Рассмотрены физико-географические характеристики Тульской, Ленинградской и Новгородской областей. Кратко описаны геологическое строение, рельеф, климат, особенности выпадения осадков, средние температуры, преобладающий тип почв и растительности. Все области характеризуются умеренно-континентальным климатом, однако среднегодовое количество осадков, влажность воздуха и средние температуры различны. Северная часть Ленинградской области расположена в подзоне средней тайги, Новгородская область – в подзоне южной тайги. Тульская область расположена в зоне широколиственных лесов.

Исследование проводили на территории 10 карьерно-отвалных комплексов с разными субстратами. Семь из них расположены на территории Ленинградской области: 2 карьера по добыче известняка, 1 – по добыче известнякового туфа, 1 – по добыче фосфорита, и 3 песчаных карьера (рис.1). В Новгородской области было исследовано 2 карьера: по добыче огнеупорных глин и песчаный карьер. В Тульской области исследовали известняковый карьер. Время зарастания варьировало от 1 до 200 лет, но обычно не превышало 75 лет. На каждом карьере, по возможности, были выделены максимально контрастные экотопы, соответствующие элементарному почвенному ареалу. Исследование проводили на самозарастающих участках, на участках где была выполнена только техническая рекультивация, а также там, где вслед за техническим этапом была проведена биологическая рекультивация, заключающаяся в посадке травянистых растений или саженцев хвойных пород. Биологическая рекультивация также иногда сопровождалась внесением удобрений.



Рисунок 1. Месторасположение объектов исследований

Примечание: 1 – известняковый карьер (Елизаветино); 2 – карьер по добыче известнякового туфа (Пудость); 3 – известняковый карьер (Печурки); 4 – месторождение фосфоритов в Кингисеппском районе; 5 – песчаный карьер (Колтуши); 6 – песчаный карьер (Капитолово); 7 – песчаный карьер (Окуловка); 8 – глиняный карьер (Устье-Брынкино); 9 – песчаный карьер (Малукса); 10 – известняковый карьер (Ново-Гуровский).

Глава 3. Методы сбора и обработки материала. В пределах каждого выбранного экотопа были заложены пробные площадки 25x25 м, (всего 41). На каждом участке выполнены геоботанические описания и полевые описания почв («Классификация и диагностика почв России», 2004) (всего 63 прикопки). С помощью прибора LandMapper-03 было выполнено вертикальное электрическое зондирование для изучения неоднородности почв. Для каждого почвенного горизонта определены важнейшие агрофизические, агрохимические и биологические свойства по стандартным методикам (Растворова, 1983; Химический анализ..., 1995). Были измерены следующие показатели: субстрат индуцированное дыхание (Ananyeva et al, 2008); базальное дыхание почвы, по методике СИД, но в небогатенной субстратом почве; содержание органического углерода в почве (метод бихроматного окисления И. В. Тюрина (Тюрин, 1931); рН водной вытяжки (1:2,5); обменная кислотность и гидролитическая кислотность; содержание CO₂

карбонатов ацидиметрически (Цитович, 1994); гигроскопическая влажность и максимальная гигроскопическая влажность (Рожков и др., 2002); полная влагоемкость (водовместимость) и наименьшая влагоемкость (Рожков и др., 2002); плотность почвы и плотность твердой фазы почв; структурность и каменистость почвы методом сухого просеивания; гранулометрический состав почвы пипет-методом Качинского с пирофосфатной пептизацией микроагрегатов (Растворова, 1983); фракционно-групповой состав гумуса по схеме И. В. Тюрина, модифицированной В.В. Пономаревой и Т. А. Плотниковой (1980). Определение подвижных соединений фосфора и калия было определено по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ Р 54650-2011), обменный аммоний был определен согласно методу ЦИНАО (ГОСТ 26489-85), нитраты были измерены ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86).

Рассчитаны микробный метаболический коэффициент и содержание углерода микробной биомассы (Anderson и Domsch, 1987). Была проведена эколого-фитоценотическая оценка видов высших сосудистых растений для каждого участка. Для разных участков в пределах одного карьера рассчитан коэффициент видового сходства (коэффициент Сьеренсона-Чекановского). Рассчитан коэффициент корреляции Пирсона между следующими характеристиками верхних горизонтов почв: содержание ила и углерода, содержание фракций физической глины и углерода, содержание углерода и общее проективное покрытие растительности на участке, а также содержание фракций ила и физической глины с общим проективным покрытием.

Для 9 площадок известнякового карьера в Печурках провели исследование микробиома почвенных образцов. Общая ДНК была выделена с использованием набора MoBio (США), секвенирование V4 - варибельного участка гена 16s рРНК проводили с помощью секвенатора третьего поколения (Junior, «Roshe»). Результаты были обработаны с использованием программы QIIME. Для сравнения микробных сообществ были проведены анализ альфа- и бета-разнообразия. Различия в частотах микробных таксонов между исследуемыми образцами определялись посредством проведения точного теста Фишера с поправкой на множественные сравнения по процедуре Бенджамини-Хохберга на 5% уровне значимости (Benjamini and Hochberg, 1995).

Для верхнего органоминерального горизонта с трех точек на карьере ПО «Фосфорит» были выделены препараты гуминовых кислот по классической схеме (Александрова, 1980; IHSS, 1982). Далее для полученных препаратов гуминовых кислот регистрировали твердофазные спектры ЯМР ^{13}C с помощью импульсного ЯМР (ядерный магнитный резонанс) спектрометра Bruker Ultra_Shield_500. Полученные ЯМР ^{13}C спектры препаратов гуминовых кислот были трансформированы в количественную форму

с помощью трансформации Фурье. Установление соответствия фрагментов было проведено согласно литературным данным (Кечайкина и др., 2011; Artinger et al., 2002; Chefetz, 2002) по диапазонам химического сдвига. Отношение содержания ароматичных структур к алифатичным AR/AL (%) было рассчитано на основании суммирования сигналов ароматических структур по областям 105–164 и 183–190 ppm, а по алифатическим – 0–105 и 164–183 ppm.

Глава 4. Общая характеристика видового состава растительности на карьерах с различными грунтами. Дана общая характеристика флор районов исследования. Проведен анализ видового состава растительности разных участков карьеров.

Согласно полученным результатам, видовой состав каждого карьера индивидуален. В первую очередь он определяется окружающей флорой. Список ведущих семейств на карьере, как правило, повторяет данное соотношение для региона, при этом часто повышена доля видов, типичных для антропогенных местообитаний, например, из семейства бобовые. Спектр жизненных форм на карьерах разнообразен, он может как повторять соотношение жизненных форм естественных сообществ, так и значительно отличаться, как, например, в случае травянистых сообществ или группировок на скальных переуплотненных участках. Самозарастание обычно идет по лесной траектории, при этом рекультивация с использованием трав задерживает процесс формирования лесных сообществ на участках. По мере формирования сомкнутых хвойных лесов, число видов может снова снижаться, но при этом эколого-ценотический состав видов полностью отличается от изначального. На разных экотопах сукцессия протекает с различной скоростью, наиболее быстро зарастание происходит на участках со стабильной поверхностью и благоприятными физико-химическими параметрами субстрата. В случае наличия лимитирующих факторов участки остаются без признаков поселения растительности на многие десятилетия.

Значения коэффициента Сьеренсена-Чекановского указывают на то, что сходство видового состава в пределах одного карьера может быть очень низким. Максимальное сходство видового состава наблюдается на участках, имеющих сходный рельеф и физико-химические параметры субстрата. Из-за слишком высокой каменистости некоторых карьеров, сукцессия идет крайне медленно. На участках скальных днищ известнякового карьера, несмотря на разницу срока зарастания в 40 лет, зафиксировано наибольшее сходство видового состава (92 %).

Глава 5. Оценка разнообразия растений на карьерах с различными субстратами. Рассчитаны индексы Шеннона и обратный индекс Симпсона для каждого описанного участка. Количество видов высших растений, зафиксированных на площадке,

варьирует от 9 (на самозарастающем трансэллювиально-аккумулятивном экотопе песчаного карьера) до 51 (на самозарастающем аккумулятивном экотопе известнякового карьера); на токсичном пиритосодержащем субстрате растений не обнаружено.

Максимальные значения индексов биоразнообразия (индекс Шеннона – 3,7; обратный индекс Симпсона – 37,2) отмечены на самозарастающем днище известнякового карьера в Елизаветино, с большим количеством мелкозема. На карьере по добыче фосфоритов наименьшее разнообразие высших растений (индекс Шеннона – 1,3; обратный индекс Симпсона – 2,1) соответствуют участку под биологической рекультивацией, где в настоящий момент сформирован ельник-мертвопокровник.

В первые годы зарастания карьеров уровень биоразнообразия, как правило, низкий, в случаях самозарастающих участков с большим количеством мелкозема, он увеличивается со временем (рис. 2 А). На рекультивированных участках под лесными сообществами с увеличением срока зарастания, видовое богатство, как и видовое разнообразие, сокращаются (рис. 2 Б). При наличии на карьерах ряда лимитирующих факторов, препятствующих развитию растительности, процессы восстановления очень сильно затягиваются во времени (рис. 2 В).

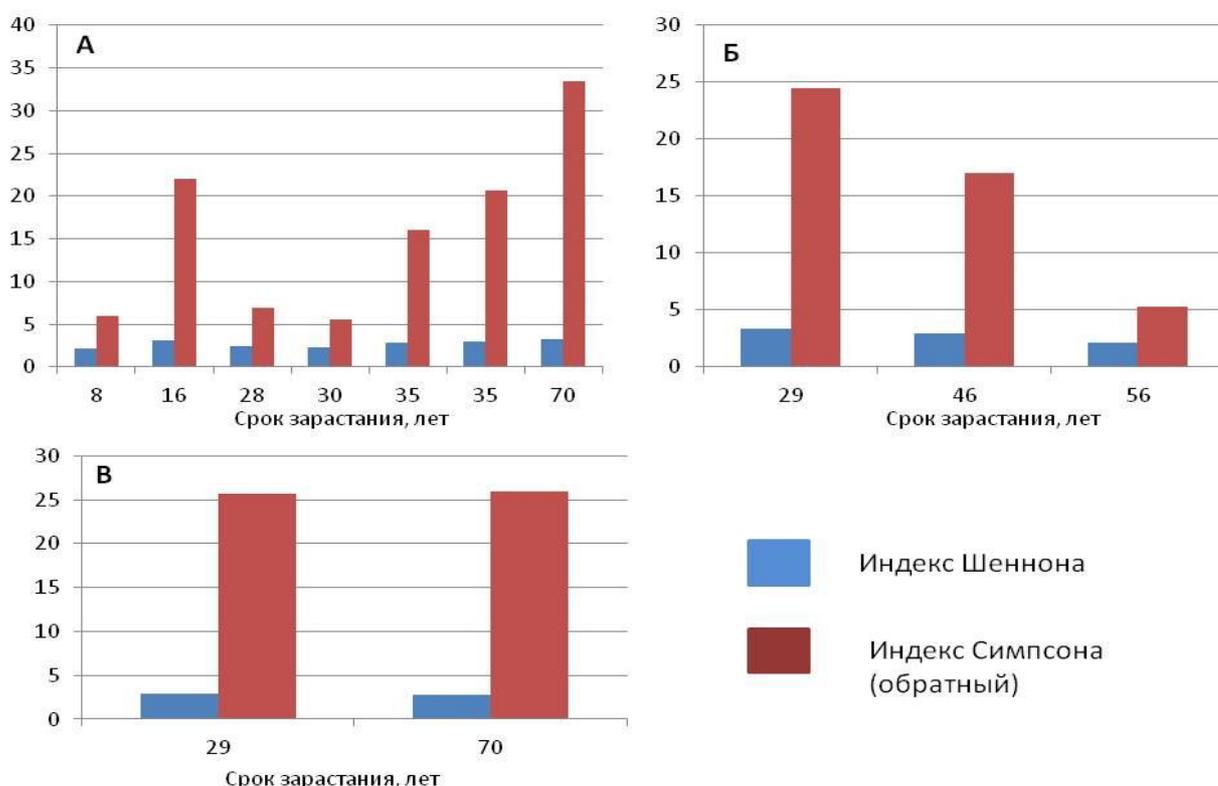


Рисунок 2. Индексы биоразнообразия разных экотопов известнякового карьера «Печурки»

Примечание: А - индексы биоразнообразия на самозарастающих участках; Б – на рекультивированных участках; В – на скальных днищах.

Участки с минимальным общим проективным покрытием и видовым богатством могут характеризоваться максимальными индексами разнообразия. Максимальным биоразнообразием характеризовались карбонатные субстраты, что может быть связано как с потенциально высокой плодородностью данных грунтов, так и историческими причинами. Согласно теории о связи регионального флористического богатства и pH почвы (Patrel, 2002), большинство видов эволюционно приспособилось к карбонатному субстрату в связи с широким распространением этих пород в плейстоцене.

Наименьшее видовое богатство, индекс Шеннона и обратный индекс Симпсона отмечены на самозарастающем песчаном карьере; в случае нанесения на песчаный субстрат органогенного материала, показатели сопоставимы с карбонатными карьерами.

Глава 6. Почвообразование на карьерах с различными субстратами. Рассмотрены особенности почвообразования на участках самозарастания и рекультивации на карбонатных породах, песчаных субстратах, сульфатно-кислых грунтах и отвалах месторождения фосфоритов.

Показано, что при нанесении органического субстрата на поверхность отвалов в первые годы наблюдается снижение содержания органического углерода в результате процессов минерализации. В случае самозарастания этот показатель увеличивается со временем. При оптимальных физических условиях субстрата накопление углерода максимально в аккумулятивных экотопах. Практически на всех карьерах субстраты характеризуются слабокислыми значениями pH водной вытяжки, что оптимально для развития большинства видов растений. Исключением оказался отвал пиритосодержащей породы карьера по добыче огнеупорных глин: здесь процессы самозарастания невозможны вследствие высокой токсичности и низких значений pH (2,1) субстрата. При рекультивации сульфатнокислых грунтов необходимо внесение фракций карбоната кальция в почву. Содержание элементов минерального питания иногда противоречило общепринятым представлениям о содержании того или иного вещества в рассматриваемом типе почв (табл. 1). В частности, в зависимости от участка и способа рекультивации содержание P_2O_5 на территории одного карьера изменяется сильнее, чем на карьерах с различными субстратами. На нерекультивированном участке карьера по добыче глин содержание K_2O составляет 24,1 мг/кг против 234,9—314,5 мг/кг на других участках. На отвале песчаного карьера (Колтуши) значение составляет 242,6 мг/кг, тогда как среднее содержание калия для субстратов песчаных карьеров составляет $27,6 \pm 9,73$ мг/кг. Таким образом, можно сделать вывод, что неравномерность сложения отвалов

карьеров и способ рекультивации могут влиять на агрохимические параметры почв сильнее, чем тип субстрата.

Таблица 1. Основные агрохимические показатели верхних горизонтов почв карьеров с разными субстратами

Горизонт	Глубина, см	№ площадки	pH водн.	C %	P ₂ O ₅ (мг/кг)	K ₂ O(мг/кг)	N-NH ₄ (мг/кг)	N-NO ₃ (мг/кг)
Песчаный карьер (Малукса)								
C	0-5	1	6,43	0,23	167,60	10,1	8,9	0,02
AУ	0,5-4	2	6,10	0,93	227,10	16,2	9,5	0,03
(e)	3-4	3	4,36	0,65	88,20	45,4	17,6	0,18
E	9-10	4	3,50	3,93	22,80	60,8	16,4	0,12
E	2-4	5	4,73	2,18	49,80	59,8	23,1	0,10
Песчаный карьер (Окуловка)								
A	0,5-3	1	6,30	11,20	389,20	73,5	34,4	0,01
RY	0-2	2	6,00	14,70	5,79	78,3	6,8	0,01
Песчаный карьер (Колтуши)								
A	0-5	1	5,00	22,50	66,80	12,7	70,8	0,02
AУ	0,5-10	2	5,20	26,40	63,30	90,5	51,6	2,32
AУ	0-12	3	5,00	18,90	168,90	85,9	11,2	0,30
A	0-5	4	4,80	7,60	144,80	242,6	14,6	0,01
Месторождение фосфоритов (Кингисепп)								
AУ	3-18	1	6,50	2,00	2043,50	338,3	31,1	0,24
AУ	1-18	2	7,60	2,40	4198,50	242,7	27,2	0,82
AУ	1-10	3	7,20	1,90	1731,50	214,7	27,4	0,37
Известняковый карьер (Печурки)								
AУ	0-18	10	6,50	12,64	7,13	142,2	28,1	0,62
AC	0-3	11	6,00	16,00	2,23	137,7	25,3	6,65
AУ	0-25	12	6,15	17,68	193,90	293,3	31,4	2,85
Известняковый карьер (Елизаветино)								
AC	0-6	1	7,60	1,96	92,70	103,9	17,2	0,50
AC	1-7	2	7,90	1,72	52,60	154,1	22,2	0,66
AC	0-18	3	7,00	1,98	210,40	196,3	17,3	2,83
Известняковый карьер (Гурово)								
C	0-5	1	7,60	0,85	77,60	195,6	13,3	0,33
C	0-5	2	7,70	1,98	6,24	133,2	11,1	0,64
AУ	0-1	3	7,60	3,60	2,23	171,9	9,31	2,55
Карьер по добыче огнеупорных глин (Устье-Брынкино)								
AУ	0-4	1	7,60	2,10	187,20	314,5	21,5	1,14
AУ	0-4	2	5,80	2,05	70,70	234,9	20,8	2,04
C	0-5	3	2,20	1,62	1,34	24,1	48,8	0,05

На величины агрофизических показателей выбранный способ технической рекультивации и положение участка в рельефе также могут оказывать большее влияние, чем тип почвообразующей породы. В частности, на участках, где был внесен органический субстрат, отличающийся высокой водоудерживающей способностью, гидрофизические свойства почв значительно отличаются от карьеров с такой же материнской породой (рис.3). Таким образом, оптимизация гидрофизических параметров почв для интенсификации зарастания отвалов при рекультивации и при оставлении

участков под самозарастание возможна с помощью внесения субстратов, содержащих органическое вещество в существенных количествах.

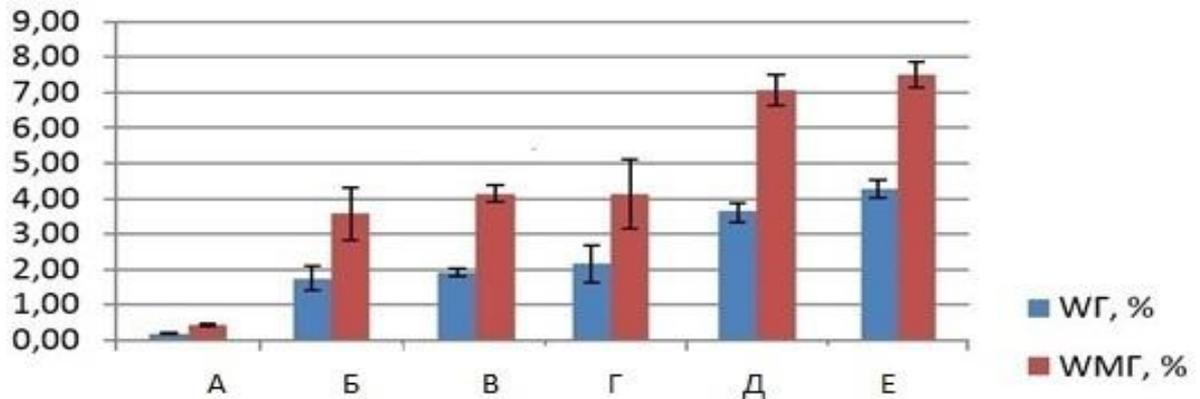


Рисунок 3. Средние значения гигроскопической влажности (WG) и максимальной гигроскопической влажности (WMG)

Примечание: А - песчаные самозарастающие карьеры; Б - карьер по добыче известнякового туфа; В - известняковые карьеры; Г - песчаный рекультивированный карьер; Д - ПО Фосфорит; Е - карьер по добыче огнеупорных глин.

Почва на участках со слаборазвитым растительным сообществом морфологически отстает в развитии в сравнении с площадками того же возраста, на которых фитоценоз развит хорошо. Возможность поселения растений определяется субстратом. Когда растительное сообщество не сформировано, преобладает антропогенная трансформация грунта. При наличии неблагоприятных факторов (высокая крутизна склона, слишком низкое значение pH, высокая каменистость, низкое содержание фракций физической глины) данный этап может затягиваться на многие годы. С формированием растительного покрова на поверхность начинают поступать продукты трансформации растительных остатков – ключевые агенты биохимического выветривания.

Первичные почвообразовательные процессы сходны на разных экотопах карьеров. В случае, когда участки отличаются по типу фитоценоза, по литологическому составу, положению в рельефе и прочим факторам, могут появляться элементы, отличные от структуры и свойств фоновых почв. Формирование элювиально-иллювиальной фракции происходит при наличии достаточного количества тонких фракций. В случае доминирования травянистой растительности гумусовый горизонт появляется несколько раньше, чем под лесной растительностью, при этом он развивается быстрее и выражен лучше. Высокое содержание карбонатов замедляет формирование элювиального горизонта.

Результаты качественного и количественного анализа гуминовых кислот отвалов месторождения фосфоритов выявили низкий уровень изменения углеродного пула во

времени, а также схожесть состава гуминовых кислот под различными сообществами (рис.4). Установлено, что алифатические группы заметно преобладают над ароматическими, что свидетельствует о значительной роли лесного опада в формировании

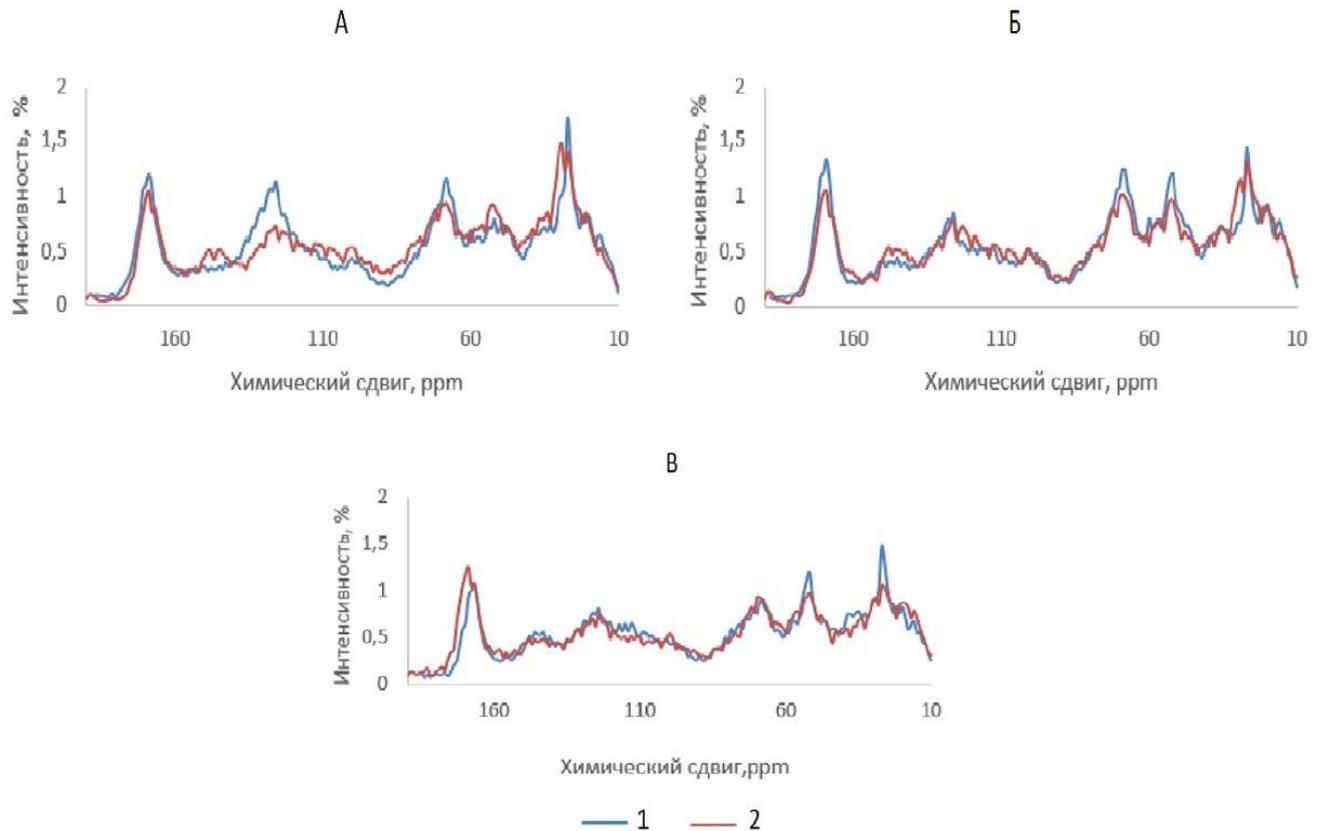


Рисунок 4. ^{13}C ЯМР спектры гуминовых кислот органоминеральных горизонтов АУ (глубина отбора 4 см) под елью (А), лиственницей (Б) и сосной (В) в 2004 (1) и 2014 (2) гг

Глава 7. Микробиологические характеристики посттехногенных экосистем.

Важнейшие функции микробных сообществ почв заключаются в трансформации почвенных компонентов и свойств, детоксикации почв и восстановлении их естественного профиля. Однако состояние микробиоценозов техногенных почв по-прежнему недостаточно изучено.

По уровню содержания микробной биомассы и величине базального дыхания значения исследуемых образцов можно расположить в следующий ряд: подстилка > органоминеральный горизонт > порода. Максимальное содержание микробной биомассы отмечено в подстилке, где значения варьируют от 8,9 до 65, 6 мкг С/г почвы. В минеральных и органоминеральных горизонтах показатель меняется в пределах от 1,0 до 4,7 мкг С/г почвы, при этом средние значения – 1,8–2,7 мкг С/г почвы. Микробный метаболический коэффициент варьирует от 0,001 до 0,022 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{мг Смик}\cdot\text{ч}^{-1}$.

Для разных почв известнякового карьера «Печурки» для анализа таксономического состава и структуры бактериоценоза были использованы методы высокопроизводительного секвенирования ампликонных библиотек гена *16SpPHK*. На всех площадках 55,7% всего биоразнообразия приходится на наиболее многочисленную группу *Proteobacteria*, на втором месте находится филотип *Actinobacteria* (17,0%), за ним следуют *Bacteroidetes* (10,3%), *Acidobacteria* (6,4%) и *Chloroflexi* (3,8%). По результатам анализа главных компонент (РсоА), среди всех рассматриваемых факторов наибольшее влияние на видовой состав микробных сообществ оказывает возраст участков (19,9% объясненной вариабельности). В отдельные кластеры группируются сообщества со сроками зарастания 8-16 лет, 28-30 лет и от 35 лет (рис. 5). Сообщества скальных днищ карьера также заметно выделяются в отдельную группу, что предположительно связано с высокой каменистостью субстрата и разреженностью растительного покрова.

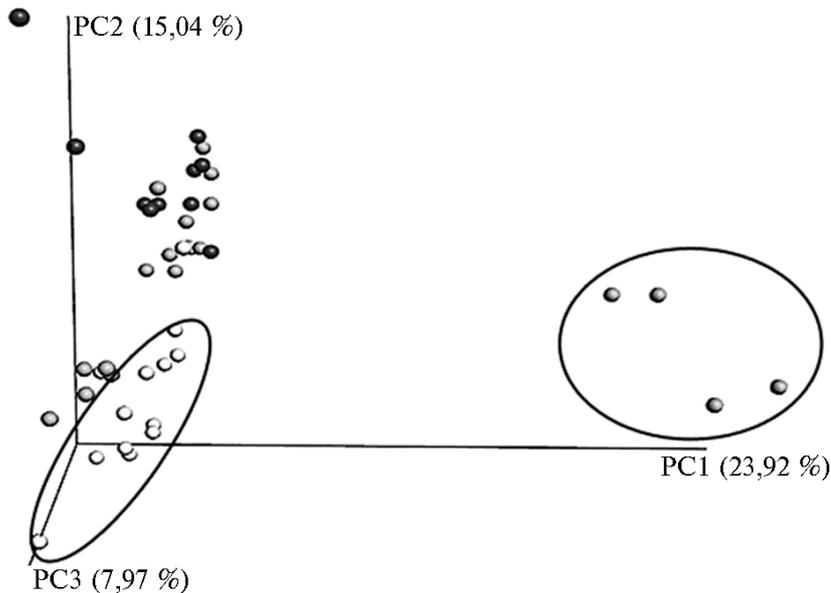


Рисунок 5. Результаты анализа главных компонент (РсоА)

Примечание: белые кружки — старовозрастные участки (35 лет), серые кружки — средневозрастные участки (28-30 лет), черные кружки — молодые участки (8-16 лет). Выделенные области обозначают группы отвалов определенного возраста, объединяющиеся в кластеры.

Рисунок 5. Результаты анализа главных координат (РсоА) микробиомов почв разного возраста: белый – старовозрастные участки (35 лет), серый – средневозрастные участки (28-30 лет), черный – молодые участки (8-16 лет).

На свежих участках доминируют *Acinetobacter* (8,8% всего сообщества), *Micrococcaceae* (8%) и *Pseudomonas* (6%). Доминирующие таксоны средневозрастных участков – *Micrococcaceae* (4,5%) и *Sphingomonadaceae* (1,4%). С увеличением срока зарастания в составе микробиома статистически значимо повышается участие альфа-протеобактерий пор. *Rhizobiales* за счет семейств *Bradyrhizobiaceae* (5% сиквенсов) и *Huphomicrobiaceae* (2,5% сиквенсов). В микробиомах 35-летних участков доля таких

групп, как *Micromonosporaceae* и *Sinobacteraceae*, *Chitinophagaceae* и *Cytophagaceae* увеличена в 6-8 раз. Микробные сообщества участков с меньшим сроком зарастания отличаются увеличением доли представителей *Pseudomonas* и *Micrococcaceae*. Основная проблема заключается в особенностях динамики восстановления различных групп микроорганизмов. На более поздних этапах сукцессии преобладают олиготрофы, участвующие в процессах разложения органического вещества.

Глава 8. Эмиссия углекислого газа и стабилизации органического вещества в почвах посттехногенных экосистем. Уровень эмиссии CO_2 в атмосферу из почвы оценивался по выветриванию карбонатов и почвенному дыханию. Обратный процесс – депонирование углекислого газа – был оценен по содержанию органического вещества в почве. Было рассчитано соотношение гуминовых и фульвокислот.

Во всех исследованных образцах величина базального дыхания крайне низка (от 0,008 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}\cdot\text{ч}^{-1}$ на лишенных растительности участках и в горизонте С, до 0,2 мкг $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}\cdot\text{ч}^{-1}$ в подстилке хвойных пород). Содержание CO_2 карбонатов в мелкозем на разных участках варьирует от 0 до 20 %. Максимальные значения отмечены в минеральных горизонтах, на участках с относительно небольшим проективным покрытием растительности.

На песчаных карьерах содержание C_{ox} в мелкозем обычно не превышало 1-3 %, за исключением подстилки. В случае внесения органических субстратов, показатель может достигать более 38 %. На глиняном карьере содержание С колеблется в пределах 0 – 2,1 % (в среднем – $1,1 \pm 0,2$ %). На карбонатных субстратах данный показатель варьирует в пределах 0,3 – 25 %, средние значения составляют $5,8 \pm 0,8$ %. Способность к секвестрации углерода у песчаных почв ниже при прочих равных условиях.

Для карьеров с карбонатным субстратом характерна максимальная доля термодинамически устойчивых гуминовых кислот (отношение $\text{C}_{\text{гк}}/\text{C}_{\text{фк}}$ до 1,3). На песчаных субстратах отношение $\text{C}_{\text{гк}}/\text{C}_{\text{фк}}$ как правило ниже, чем на других породах (в среднем – 0,6). На начальных этапах зарастания и в случае доминирования травянистой растительности доля гуминовых кислот несколько выше. С увеличением срока зарастания и появлением лесного фитоценоза увеличивается доля фульвокислот.

Уровни содержания CO_2 карбонатов и органического углерода сопоставимы. В случае неблагоприятных физических параметров субстрата зарастание карьеров крайне затруднено, и процессы эмиссии могут преобладать над депонированием. При планировании рекультивации карьеров необходимо учитывать важнейшую функцию почв – депонирование атмосферной углекислоты.

Глава 9. Применение метода вертикального электрического зондирования для изучения вертикальной неоднородности почв. Было выделено несколько основных трендов изменения кажущегося электрического сопротивления с глубиной, несмотря на то, что значения на разных участках значительно отличаются. Для отвалов типична ситуация, когда величина кажущегося электрического сопротивления плавно возрастает с глубиной, что отражает увеличение содержания крупнообломочного материала массивно-кристаллических пород. Резкие скачки сопротивления на небольших глубинах на графиках вертикального-электрического зондирования диагностируют смену породы. Материал мягкой вскрыши, нанесенный при рекультивации на материнскую породу, характеризуется значительно меньшим сопротивлением. На террасированных плоских участках нередко наблюдаются изменения значений в небольших пределах. Кажущееся электрическое сопротивление в данных случаях меняется неравномерно с глубиной, а график имеет вид сильно ломаной кривой. Такая ситуация вызвана неоднородным распределением различных фракций гранулометрического состава по профилю. При этом кажущееся сопротивление тем меньше, чем больше содержание фракций физической глины. На некоторых участках, в особенности на свежих отвалах, зафиксированы аномально высокие значения кажущегося электрического сопротивления. Причина кроется в наличии пустот, образующихся при укладке крупнообломочного материала. С течением времени, при усадке пород и заполнении мелкоземом трещин и пустот, кажущееся сопротивление снижается. Наравне с наличием пустот, завышение параметра может быть вызвано боковым влиянием геологических неоднородностей, таких как обрыв или крутой склон.

ВЫВОДЫ

1. Основные элементарные почвообразовательные процессы сходны на всех карьерах. На самых первых этапах восстановления экосистем определяющим фактором является почвообразующая порода, затем главную роль играет растительное сообщество. Гумусонакопление – ключевой процесс в восстановлении почв. Под травянистой растительностью и в случае проведения технической рекультивации аккумуляция органических веществ происходит быстрее. Несмотря на сходство почвообразовательных процессов, на различных экотопах, отличающихся по литологическому составу, положению в рельефе, типу фитоценоза и т. д., могут формироваться специфичные элементы структуры и свойств почв.
2. Видовой состав растительных сообществ каждого карьера индивидуален. Спектр жизненных форм на карьерах разнообразен, и в зависимости от литологических

характеристик он может как повторять соотношение жизненных форм нетронутых сообществ, так и значительно отличаться. В ходе первичной сукцессии на первых этапах постепенно увеличивается число видов, растет разнообразие жизненных форм, усложняется структура сообщества.

3. На всех карьерах выявлен низкий уровень интенсивности микробиологических процессов. По уровню содержания микробной биомассы и величине базального дыхания значения исследуемых образцов можно расположить в ряд: подстилка > органоминеральный горизонт > порода. Результаты свидетельствуют о нестабильном функционировании микробных сообществ на посттехногенных экосистемах.
4. На ранних стадиях сукцессии преобладают представители группы копиотрофов. С увеличением сроков зарастания (начиная с 16 лет) в доминанты выходят олиготрофные группы бактерий, что указывает на стабилизацию состава сообщества.
5. На субстратах, более богатых питательными веществами, видовое разнообразие зачастую выше. В случаях самозарастания и рекультивации травами видовое разнообразие постепенно увеличивается, достигая максимума к 20-25 годам. С точки зрения увеличения биоразнообразия наилучшим методом рекультивации является создание благоприятных физико-химических параметров субстрата и оставление участков под самозарастание. При этом, ввиду относительно низкого уровня разнообразия еловых и сосновых лесов, установившихся на карьерах, а также их высокой ценности для региона, использовать критерий «высокое биоразнообразие» для разработки плана рекультивации следует с особой осторожностью.
6. Карьерно-отвальные комплексы играют важную роль в формировании баланса углерода и стабилизации его соединений в общей структуре посттехногенных ландшафтов. Данная функция осуществляется посредством минерализации углерода, выщелачивания карбонатов и обратных процессов – депонирования углекислоты в составе биомассы растений и почвенного органического углерода. Высвобождение CO_2 в атмосферу максимально на этапе разработки полезных ископаемых. Эмиссия углекислого газа в атмосферу может преобладать над депонированием в первые этапы зарастания, или при наличии ряда лимитирующих факторов, препятствующих восстановлению растительного покрова. Наибольшей потенциальной способностью к обогащению атмосферы углекислым газом обладают карбонатные породы, однако в случае благоприятных параметров

субстрата данные карьеры также обладают большим потенциалом к депонированию CO₂ из атмосферы. Кроме того, наличие большого количества кальция способствует формированию более термодинамически устойчивых молекул гуминовых кислот в процессе гумификации.

7. Результаты качественного и количественного анализа гуминовых кислот выявили низкий уровень изменения состава гуминовых кислот во времени, а также схожесть состава гуминовых кислот под сосняком, лиственничником и ельником. Установлено, что алифатические группы заметно преобладают над ароматическими, что свидетельствует о значительной роли лесного опада в формировании гумуса почв.
8. Применение метода вертикального электрического зондирования позволило установить присутствие скального обломочного материала, а также наличие и глубину залегающих материнских пород. Метод также полезен для выявления неоднородности сложения почвенного профиля и оценки мощности слоев разного гранулометрического состава. В то же время нужно учитывать специфичность посттехногенных территорий и антропогенных ландшафтов, поскольку здесь часто могут наблюдаться аномально высокие значения кажущегося электрического сопротивления.

Список публикаций автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в базы данных ВАК, Scopus, Web of Science, Springer:

1. Abakumov, E. Evolution of humus in young soils of mining dumps (Russian North West) after fertilization by organic amendments / E. Abakumov, **J. Dmitrakova** // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2017. – P. 2367-2378
2. **Дмитракова, Я. А.** Применение метода вертикального электрического зондирования для изучения вертикальной неоднородности отвалов промышленных карьеров / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // Агрофизика. – 2017. – № 1. – С. 19-26.
3. **Дмитракова, Я. А.** Динамика растительного сообщества и микробиома хроносерий посттехногенных почв известняковых карьеров в условиях рекультивации / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов, Е. А. Першина, Е. И. Иванова, Е. Е. Андронов, // Сельскохозяйственная биология. – 2018. – Т. 53. – № 3. – С.557-569.
4. **Дмитракова, Я. А.** Восстановление почвенно-растительного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // Почвоведение. – 2018. – №5. – С. 630-640
5. **Dmitrakova, J.** Dynamics of soil organic carbon of reclaimed lands and the related ecological risks to the additional CO₂ emission / J. Dmitrakova, E. Abakumov // Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services. SUITMA 2017. Springer Geography. Springer, Cham. – 2019. – P. 97-105.

В других изданиях:

6. **Дмитракова, Я. А.** Зарастание песчаных карьеров: влияние рельефа на размещение видов-колонистов / Я. А. Дмитракова, О.И.Сумина // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 11-1. – С. 86-88

7. **Дмитракова, Я. А.**, Видовой состав и размещение растений по элементам нанорельефа на карьерах с различными грунтами / Я. А. Дмитракова // В сборнике: Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка. Сборник материалов Международной научно-технической конференции преподавателей, студентов, аспирантов и докторантов в рамках научной темы. – 2014. – С. 74-76.

8. **Дмитракова, Я. А.** Динамика Растительного покрова, изменение рН и содержания органического углерода реплантоземов Кингисеппского месторождения фосфоритов/ Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // В сборнике: Рациональное использование природных ресурсов и проблемы сохранения биоразнообразия Материалы X ежегодной молодежной экологической Школы-конференции в усадьбе «Сергиевка» - памятнике природного и культурного наследия. – 2015. – С. 146-151.

9. **Дмитракова, Я. А.** Микробная биомасса и базальное дыхание карьерно-отвальных комплексов с различными субстратами / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов, Живые и биокосные системы. – 2016. – № 16. – С. 1-9.

10. **Дмитракова, Я. А.**, Способы рекультивации пиритосодержащих токсичных грунтов и оценка темпов регенерации экосистем / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // В книге: Почвоведение - продовольственной и экологической безопасности страны тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции. – 2016. – С. 170-171.

11. **Дмитракова, Я. А.** Субстратные характеристики участков самозарастания и рекультивации карьеров с различными грунтами / Я. А. Дмитракова // В сборнике: Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления сборник материалов международной научной конференции. – 2016. – С. 74-78.

12. **Дмитракова, Я. А.** Эмиссия и депонирование углекислого газа почвами карьеров строительных материалов / Я. А. Дмитракова // В сборнике научных трудов молодых ученых, аспирантов, студентов и преподавателей 6 молодежного экологического конгресса «Северная Пальмира». – 2017. – С. 26-28

13. **Дмитракова, Я. А.** Проблемы рекультивации посттехногенных экосистем Северо-Запада и введения их в сельскохозяйственный оборот / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // В сборнике: «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления». Сборник трудов конференции. – 2017. – С. 46-50

14. Алексеев, И. И. Метаболический коэффициент и содержание микробной биомассы в разновозрастных почвах хроносерии подзолов, формирующихся на отвалах карьера по добыче водноледниковых песков Ленинградской области / И. И. Алексеев, Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов, Е. А. Иванова, Е. В. Першина, А. К. Кимеклис // В книге: 1-й Российский Микробиологический Конгресс Материалы конгресса. – 2017. – С. 24-25.

15. **Дмитракова, Я. А.** Микробиологические параметры молодых почв отвалов карьера по добыче известняков, Ленинградская область / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов, Е. А. Иванова, Е. В. Першина, А. К. Кимеклис, А. О. Зверев // В книге: 1-й Российский Микробиологический Конгресс Материалы конгресса. – 2017. – С. 38.

16. **Dmitrakova, Ia.** Biodiversity in quarries with the different types of substrate / Ia. Dmitrakova, E. Abakumov // 9th international conference on biodiversity research, Book of Abstracts, Daugavpils. – 2017. – P. 33

17. Abakumov, E. Stabilization of Soil Organic Matter and Soil Microbial Community in Abandoned Restoration Chronoserries of Post Mines Landscapes of European / E. Abakumov, Y. Dmitrakova // 7th international IUPAC conference on green chemistry, Book of Abstracts. Moscow. – 2017. – P. 138

18. **Dmitrakova, I.** Dynamics of soil organic carbon of reclaimed lands and the related ecological risks to the additional CO₂ emission / I. Dmitrakova, E. Abakumov // Abstract book

9th international congress Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas. "Urbanization: a challenge and an opportunity for soil functions and ecosystem services" – Moscow, 22-26 May 2017: RUDN University. – 2017. – P. 286-288.

19. **Дмитракова, Я. А.** Агрохимические характеристики карьерно-отвальных комплексов с различными субстратами / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // Живые и биокосные системы. – 2018. – № 23. – С. 1-9.

20. **Дмитракова Я. А.** Динамика растительного покрова, изменение pH и содержания органического углерода реплантоземов Кингисеппского месторождения фосфоритов / Я. А. Дмитракова, Е. В. Абакумов // В сборнике: Ленинградская земля: краеведческий альманах Санкт-Петербург. – 2018. – С.200-205

Дмитракова Янина Александровна (Российская Федерация)

Субстратно-фитоценотические характеристики участков самозарастания и рекультивации карьерно-отвальных комплексов

Работа посвящена выявлению связей темпов природного и рекультивационного восстановления фитоценозов со свойствами субстрата, а также влиянию формирующегося растительного сообщества на характеристики молодых почв. Исследование проводили на территории карьерно-отвальных комплексов с различными субстратами, расположенных в Ленинградской, Новгородской и Тульской областях. Была охарактеризована направленность почвообразовательных процессов на карьерах по добыче: известняка, известнякового туфа, фосфорита, песка и огнеупорных глин. Проведен анализ видового состава растительных сообществ на карьерах с разными грунтами. Оценена микробиологическая активность почв и разнообразие микробных сообществ на разных участках карьеров. Выявлены особенности изменения физико-химических свойств грунтов.

Dmitrakova Ianina Aleksandrovna (Russian Federation)

Substrate-phytocoenotic characteristics of nonreclaimed and recultivated plots of quarry dump systems

The work is devoted to identifying the relationship of the rates of natural and remediation restoration of phytocenoses with the properties of the substrate, as well as the influence of the emerging plant community on the characteristics of young soils. The study was conducted on the territory of the quarry dump complexes with various substrates located in the Leningrad, Novgorod and Tula regions. The features of soil-forming processes in: limestone, limestone tuff, phosphorite, sand and seat clay quarries was characterized. The analysis of the species composition of plant communities in quarries with different soils was carried out. The soil microbiological activity and the diversity of microbial communities in different areas of the quarries were evaluated. The features of changes in the physicochemical properties of soils are revealed.