

ДЕГРАДАЦИЯ,
ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.48(470.13-924.82)

ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ НА КАРЬЕРАХ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ
ЛЕСНОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ В СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЕ
НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

© 2021 г. И. А. Лиханова^{а, *}, Е. Г. Кузнецова^а, Е. М. Лаптева^а, С. В. Денева^а, Б. А. Макеев^б

^аИнститут биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия

^бИнститут геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

*e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 20.02.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 27.10.2020 г.

Исследования проведены на европейском северо-востоке России (Республика Коми), в подзоне средней тайги, на территориях карьеров по добыче полезных ископаемых (строительного песка). Рассмотрено формирование почв в течение двух десятилетий после применения методов лесной рекультивации (посадка *Pinus sylvestris*). Выявлены особенности первичного почвообразования на субстратах разного гранулометрического состава. На песчано-супесчаном субстрате динамический ряд почв образуют: абралит (0-момент) → псаммозем гумусовый остаточно-карбонатный (11-й год) → псаммозем гумусовый грубогумусированный оподзоленный остаточно-карбонатный глееватый (18-й год); на суглинистом: абралит → пелозем гумусовый остаточно-карбонатный (3-й и 11-й годы) → пелозем гумусовый грубогумусированный элювируемый остаточно-карбонатный глееватый (18-й год). Ведущие процессы почвообразования – подстилкообразование, формирование гумусово-аккумулятивных горизонтов и гумусонакопление; их интенсивность определяется степенью развития растительного сообщества. К концу второго десятилетия в гумусово-аккумулятивном слое (0–20 см) песчано-супесчаных почв аккумулируется до 2.7 т/га органического углерода, суглинистых – 6.3 т/га, азота – соответственно 0.1 и 0.4 т/га. Скорость накопления $C_{орг}$ в почве песчано-супесчаного карьера достигала 0.16, суглинистого – 0.37 т/га в год. В составе почвенного органического вещества отмечены более высокое содержание водорастворимых и лабильных компонентов гумуса по сравнению с фоновыми подзолистыми почвами, низкая степень конденсированности гуминовых кислот. Первичное почвообразование на субстрате карьеров характеризуется возрастанием актуальной кислотности от 8.0 ед. рН в абралите до 6.3–6.7 ед. рН в горизонте W образующихся почв. Скорость процесса подкисления меньше в суглинистых почвах по сравнению с песчано-супесчаными. Выщелачивание карбонатов подтверждается отсутствием кальцита и доломита в минералогическом составе верхних горизонтов формирующихся почв, уменьшением в них валового содержания оксида кальция (в абралите – 4%, в горизонте W почв – 2–3%) и карбонатов кальция (соответственно 3 и <0.5%). Спустя 18 лет, в профилях почв карьеров отмечены слабовыраженные процессы элювирования, иллювирувания и глееобразования.

Ключевые слова: первичное почвообразование, средняя тайга, Albic Podzols, Albic Retisols, Regosols, Arenosols

DOI: 10.31857/S0032180X21040109

ВВЕДЕНИЕ

Добыча минеральных и топливно-энергетических ресурсов в таежной зоне сопровождается сведением лесов и формированием техногенных ландшафтов. В условиях возрастания антропогенной нагрузки на природные экосистемы усиливается интерес исследователей к познанию их регенеративных возможностей, установлению закономерностей формирования техногенных почв

[3, 15, 24, 39, 57]. В Российской Федерации изучение первичного почвообразования на нарушенных землях таежной зоны, как в ходе самозарастания, так и после проведения рекультивации, ведется на территории Урала [21], Сибири [8, 33], северо-запада [1, 2] и северо-востока [9] европейской части России. Установлено, что в процессе начального педогенеза при уменьшении неоднородности почвенно-растительного покрова происходит накопление подстилки, аккумуляция ор-

ганического углерода и азота, подкисление почвы, увеличение емкости поглощения, уменьшение плотности верхних горизонтов [1, 2, 21, 39, 50]. По мнению одних авторов [30, 33, 56], ведущий процесс в ходе первичного почвообразования – преобразование минерального субстрата. Другие считают, что основные процессы, определяющие формирование профиля “молодых” почв, – биогенная аккумуляция и трансформация органического вещества [2, 9, 36]. Специфика почвенного органического вещества на разных стадиях сукцессии во многом определяется видовым составом и структурой растительного сообщества [9, 21, 39, 50, 54]. Наибольшая скорость гумусонакопления в экосистемах техногенных ландшафтов характерна для начальных стадий сукцессии, по мере стабилизации биологического круговорота она уменьшается [14, 33, 54]. Существенное влияние на почвообразование оказывают особенности состава материнских пород [29, 53]. Значительные изменения в химических и морфологических свойствах почвы, свидетельствующие о развитии процессов оподзоливания, могут наблюдаться, по одним данным – через несколько десятков лет [37, 40, 45], по другим – несколько сотен [46, 47, 49, 52].

Ускорить процесс восстановления наземных экосистем на месте техногенных ландшафтов можно приемами рекультивации, в том числе лесной [9, 48]. В связи с тем, что сукцессионный процесс на базе искусственно созданного растительного сообщества характеризуется более высокой скоростью развития, рекультивированные площади являются удобным объектом для исследования особенностей первичного почвообразования. В настоящее время опубликован ряд работ о результатах изучения процессов восстановления растительности и почв на посттехногенных территориях таежной зоны Республики Коми [9, 19, 20], но эти исследования нуждаются в продолжении и систематизации.

Цель работы – выявление особенностей первичного почвообразования на нарушенных территориях (карьеры с разным гранулометрическим составом субстратов) после проведения лесной рекультивации в подзоне средней тайги (северо-восток европейской части России, Республика Коми). Особое внимание уделено формированию гумусово-аккумулятивного горизонта и роли растительности в его образовании.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучение почв, формирующихся на техногенных субстратах после рекультивации разработанных карьеров, проводили в окрестностях г. Сыктывкар. В геоморфологическом отношении объекты исследования расположены на территории Вычегодско-Мезенской равнины. Современный рельеф сформировался в четвертичное время,

большое значение в его образовании имела деятельность экзогенных факторов: ледниковой и водно-ледниковой эрозии и аккумуляции. Территория представляет собой пониженную пологоувалистую, местами значительно расчлененную равнину, на которой моренные отложения частично перекрыты с поверхности маломощным покровом флювиогляциальных песков и супесей [7]. Климат района умеренно-континентальный, характеризуется длительной холодной зимой с устойчивым снежным покровом и коротким прохладным летом. Среднегодовая температура воздуха $+0.4^{\circ}\text{C}$, сумма осадков 560 мм [11]. Согласно почвенно-географическому районированию [27], участок исследований относится к Луза-Сысольскому округу подзолистых и болотно-подзолистых почв подзоны средней тайги. По ботанико-географическому районированию, территория приурочена к восточно-европейской части подзоны средней тайги [28], полосе среднетаежных лесов Кольско-Печорской подпровинции Северо-европейской таежной провинции Евразийской таежной (хвойнолесной) области [26].

Объектами исследования послужили два карьера, в которых осуществлялась добыча строительных материалов (песка): 1 – “Даса” ($61^{\circ}43' \text{N}$, $50^{\circ}38' \text{E}$), 4 – “Важелью” ($61^{\circ}38' \text{N}$, $50^{\circ}40' \text{E}$). Рельеф местности в окрестностях карьера 1 пологоволнистый с абсолютными высотами порядка 125–140 м над ур. м., карьера 4 – холмисто-увалистый с высотами 125–160 м над ур. м. (рис. 1). Дневная поверхность днища карьеров в пределах их контуров выположена. Их преобладающие высоты – 115 (карьер 1) и 110–115 (карьер 4) м над ур. м. Восточная часть карьера 4 имеет небольшой уклон (крутизна около 5°). Грунтовые воды в обоих случаях залегают глубже 18–20 м от поверхности, однако учитывая специфику климатических условий (преобладание осадков над испарением), в периоды снеготаяния и выпадения обильных дождей возможна верховодка как в почвах фоновых участков, так и субстрате днища карьеров.

После окончания эксплуатации (карьер 1 разрабатывали до 1996 г., карьер 4 – до 1991 г.) карьеры рекультивировали. Технический этап, включавший уборку строительного мусора и планировку поверхности, на карьере 1 проведен в 1998 г. (площадь территории 5.8 га), 4 – в 1999 г. (5.0 га). Субстраты карьеров по таким показателям, как значения pH, содержание гумуса, CaCO_3 , отсутствие токсичных солей, сумма фракций менее 0.01 мм, согласно ГОСТ 17.5.1.03-78¹, были пригодны для биологической рекультивации. В ходе биологического этапа (спустя 1–2 года) на территории карьеров (в их днища) были высажены

¹ ГОСТ 17.5.1.03-78 Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель. М.: Изд-во стандартов, 1978. 12 с.

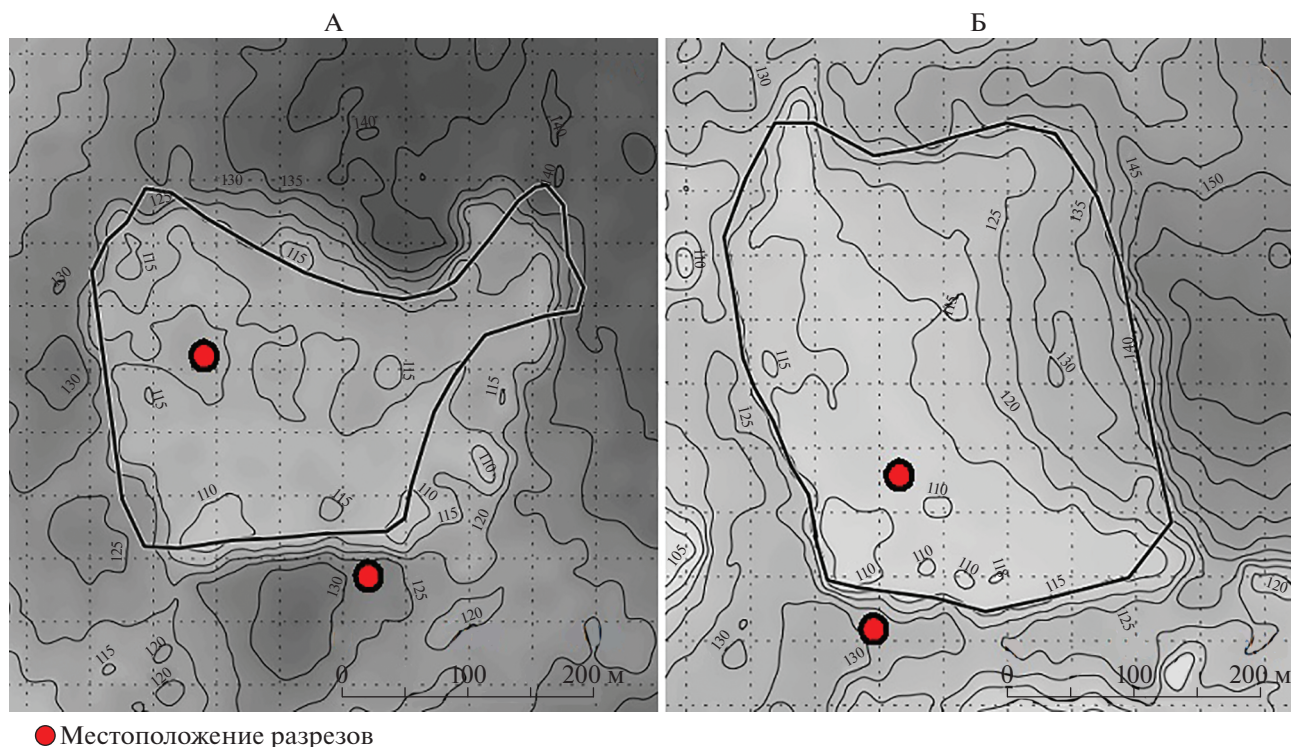


Рис. 1. Карты-схемы территории расположения карьеров 1 “Даса” (А) и 4 “Важелью” (Б), сплошные горизонтали проведены через 5 м (карты-схемы составлены с использованием программ QGIS, Google Earth Pro, SAS. Планета; источник – картографическая база данных ArcticDEM <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>).

2-летние сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) высотой около 10–15 см. На карьере 4 перед проведением посадочных работ были проложены плужные борозды через каждые 4 м с помощью лесного двухотвального плуга с оборотом пласта вразвал. Это способствовало образованию хорошо выраженного микрорельефа – чередование перевернутых пластов (гряд), плужных борозд и междурядий. Сеянцы сосны высаживали в гряды, сформированные по обоим краям борозд. На территории карьера 1 посадку культур осуществляли без дополнительной механической подготовки субстрата. Густота посадки 4 (карьер 1) – 5 (карьер 4) тыс. шт./га. Ширина междурядий 2.5–3 м. Дополнительные агротехнические мероприятия (внесение удобрений, посев трав) не проводили.

Наблюдения проводили в период с 2000 по 2018 гг., соответственно на 1–5, 12, 18-й годы управляемой сукцессии. Выполняли геоботанические описания [6], закладывали почвенные разрезы, проводили морфологическое описание, отбирали образцы почв для физико-химических исследований, определяли плотность почв (повторность трехкратная). Массу подстилки учитывали металлическим шаблоном площадью 98 см² в 10-кратной повторности. В качестве контроля (фон) использовали лесные участки в окрестно-

стях карьеров с ненарушенным почвенно-растительным покровом. Вблизи карьера 1 фоном послужил сосняк бруснично-зеленомошный, почва – подзол иллювиально-гумусово-железистый со строением профиля O1–O2–E1–E2–ВНF–В–BCg–C (Albic Podzol (Arenic)); карьера 4 – сосново-еловый травяно-чернично-зеленомошный лес, почва – подзолистая грубогумусовая потечно-гумусовая (Oa0–ELhi–EL–BEL–BT–BCg–C) (Albic Epistagnic Retisol (Humic)).

Гранулометрический состав определяли по Качинскому [12], рН водной (рН_{H₂O}) и солевой (рН_{KCl}) суспензий – потенциометрически (ГОСТ 26423-85² и 26483-85³ соответственно), гидролитическую кислотность (Нr) – по Каппену, обменную кислотность (Н⁺, Al³⁺) – по Соколову, содержание обменных катионов (Ca²⁺, Mg²⁺) – по Гедройцу с вытеснением 1 М NH₄Cl и последующим атомно-эмиссионным определением на ICP Spectro Ciros CCD (Германия); оксалаторастворимых соединений железа (ω(Fe₂O₃)_o) и

² ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. М.: Стандартинформ, 2011. 6 с.

³ ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2011. 6 с.

алюминия ($\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)_o$) – по Тамму, дитиониторастворимых ($\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)_d$) – по Мера–Джексоу [32]; содержание карбонатов – объемно-метрическим методом [ISO 10693]⁴. Для оценки степени гидроморфизма почв использовали критерий Швертмана – соотношение содержания в почвах оксалато- и дитиониторастворимых соединений железа ($\text{Fe}_o : \text{Fe}_d$) [13].

Содержание общего азота ($\omega(\text{N}_{\text{общ}})$) и углерода ($\omega(\text{C}_{\text{общ}})$) оценивали методом газовой хроматографии на элементном CHNS-O анализаторе EA 1110 (Carlo Erba, Италия). Для почв с $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 6.8$ выполняется равенство $\omega(\text{C}_{\text{общ}}) = \omega(\text{C}_{\text{орг}})$, так как следовые количества неорганического углерода не превышают погрешности метода. В менее кислых образцах, где $\omega(\text{C}_{\text{общ}}) > \omega(\text{C}_{\text{орг}})$ в связи с присутствием неорганического углерода, значения $\omega(\text{C}_{\text{неорг}})$ рассчитывали как разницу между $\omega(\text{C}_{\text{общ}})$ и $\omega(\text{C}_{\text{орг}})$. Содержание органического углерода ($\omega(\text{C}_{\text{орг}})$) в образцах почв определяли по Тюрину с фотометрическим окончанием [32]. Расчет запасов элементов (Q) в отдельных горизонтах (слоях) почв проводили с учетом их плотности (г/см^3), мощности и содержания в них соответствующего элемента (углерода, азота). Общие запасы элемента вычисляли простым суммированием $Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$, где n – количество горизонтов (слоев).

Содержание углерода лабильных органических веществ учитывали после их экстракции из образцов почв растворами гидроксида (0.1 М NaOH) и пирофосфата (0.1 М $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ + 0.1 М NaOH) натрия [5]. Оптические свойства гуминовых кислот (ГК), выделенных в составе лабильных органических веществ ускоренным пирофосфатным методом, определяли в соответствии с [23]. Общее содержание углерода органических ($\omega(\text{C}_{\text{орг}})_{\text{H}_2\text{O}}$) и неорганических ($\omega(\text{C}_{\text{неорг}})_{\text{H}_2\text{O}}$) соединений в водных вытяжках из образцов почв измеряли методом высокотемпературного каталитического окисления с бездисперсионной ИК-регистрацией на анализаторе общего углерода ТОС VCPH по методике измерений М-02-2405-09⁵. Для выявления динамики подкисления почв в ходе первичного почвообразования на нарушенных землях использовали коэффициент дифференциации ($K_{\text{диф}}$), предложенный Махониной [21]: отношение наибольшей в пределах почвенного профиля концентрации протонов (ммоль/дм^3), рассчитанной по

актуальной кислотности, к соответствующей величине в почвообразующей породе.

Минералогический состав субстратов определяли рентгеновским методом на приборе XRD-6000 (Shimadzu, Япония), элементный (валовый) состав – приближенно-количественным методом на рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония).

Для диагностики и идентификации почв использовали принципы классификации почв России [25]. Привели корреляцию наименований почв с системой мировой базы почвенных ресурсов [44].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвообразующие породы карьеров. Техногенно-поверхностные образования (абралиты) днища карьеров, выполняющие роль почвообразующей породы, различаются по гранулометрическому составу и близки к почвообразующим породам соответствующих фоновых участков. В субстрате карьера 1 преобладает фракция мелкого песка (около 70%), карьера 4 – фракции мелкого песка (28–38%), ила (19–28%) и крупной пыли (14–25%). Почвообразующие породы фоновой почвы вблизи карьера 1 имеют песчано-супесчаный состав с преобладанием фракций крупного (около 67%) и мелкого (около 25%) песка, в окрестностях карьера 4 – среднесуглинистый с преобладанием фракций мелкого песка (около 30–34%), ила (27–28%) и крупной пыли (15–16%).

В минералогическом составе абралитов обоих карьеров преобладает кварц, содержание полевых шпатов (преимущественно альбитового состава) небольшое, присутствуют рutil, кальцит и доломит. В субстрате карьера 4 обнаружены слюда и хлорит (рис. 2). Присутствие кальцийсодержащих минералов в породах согласуется с данными Андричевой [7] о карбонатности морены вычегодского (московского) возраста в бассейне р. Вычегда, обусловленной наличием обломков известняков и доломитов. Содержание карбонатов в абралитах составляет 2–3%, их присутствие морфологически не выражено, однако отмечено вскипание мелкозема при обработке 10% раствором HCl. Реакция среды – слабощелочная (pH около 8). В профиле фоновых почв кальцит и доломит до глубины 50–70 см не были обнаружены (рис. 2), что характерно для подзолистых почв, представленных в окрестностях г. Сыктывкар, где карбонаты встречаются, начиная с глубины 140–170 см [31].

Для абралитов характерно низкое содержание органического углерода (не более 0.3–0.4%) и азота (не более 0.02–0.03%). Эти значения близки к соответствующим показателям почвообразую-

⁴ ISO 10693. 1994. Soil Quality – Determination of carbonate content – Volumetric method. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 7 p.

⁵ ГОСТР 52991-2008 Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: Изд-во Стандартиформ, 2009. 12 с.

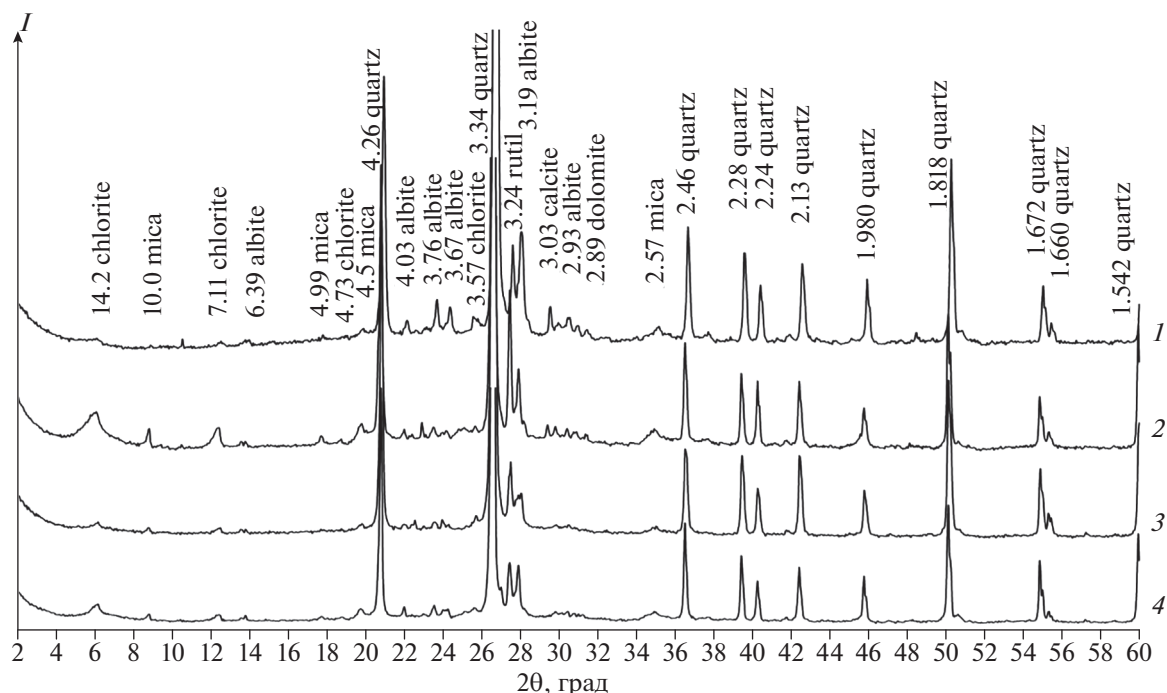


Рис. 2. Рентгендифрактограммы образцов почвообразующих пород карьеров и фоновых почв (глубина 50–70 см): 1 – карьер 1; 2 – карьер 4; 3 – фоновая почва в окрестностях карьера 1; 4 – фоновая почва в окрестностях карьера 4.

ших пород фоновых участков ($\omega(C_{\text{орг}})$ не более 0.2–0.3%, $\omega(N_{\text{общ}})$ не более 0.02–0.03%).

Динамика растительного покрова и морфология почв. К середине первого десятилетия после посадки сосны обыкновенной высота саженцев на обоих карьерах составила около 0.5 м, к началу второго десятилетия – 2–3 м, к его концу – 5–7 м при сомкнутости крон 0.4–0.5 и густоте 2.3–2.9 тыс. шт./га.

Песчано-супесчаный карьер. На территории карьера 1 в первые 5 лет растительное сообщество находилось на стадии пионерных группировок. Заметных изменений морфологического строения и химических свойств субстрата в пределах дна карьера не наблюдалось.

В начале второго десятилетия отмечено слабое развитие растительного покрова в междурядьях. Разреженный травянистый ярус с проективным покрытием не более 20% формировали синантропные, ксерофильные и луговые виды (*Agrostis tenuis*, *Calamagrostis epigeios*, *Chamaenerion angustifolium*, *Trifolium pratense*), моховой ярус – пионерные (*Ceratodon purpureus*, *Polytrichum piliferum*, *P. juniperinum*). Под растительными группировками в почвенном профиле начал обособляться гумусово-слаборазвитый горизонт (W), в минеральной толще выявились признаки оглеения – серые и охристые пятна на светло-буром фоне. В соответствии со строением профиля: W(0–0.5)–C^{ca}(0.5–15)–C^{ca,g}(15–30 см), на данном эта-

пе формирующаяся почва диагностирована как псаммозем гумусовый остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Stagnic)).

В конце второго десятилетия в напочвенном покрове появляются пионерные лишайники (*Cladonia gracilis* ssp. *turbinata*, *C. mitis*, *C. subulata*, *C. verticillata* и др.). Травяно-кустарничковый ярус остается слабо развитым (проективное покрытие 20%). Формирование лесной среды за счет роста лесных культур обусловило внедрение сосудистых растений (*Antennaria dioica*, *Orthilia secunda*, *P. chlorantha*, *P. media*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*) и мхов (*Dicranum polysetum*, *D. scoparium*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*), характерных для сосняков зеленомошных. Около 80% поверхности дна карьера покрыто хвоей сосны. Мощность слоя хвойного опада возрастает в подкромном пространстве. Почвы в прикромной части сосен и в междурядье начинают различаться по морфологическому строению. Накопление хвои под кроной сосны (0.94 ± 0.08 кг/м²) способствует формированию рыхлой подстилки Wao бурых тонов, под которой выделяется подгоризонт We с признаками оподзоливания – присутствуют белесоватые пятна на общем темно-сером фоне. С глубины 10 см отмечены сизовато-серые и охристые пятна, свидетельствующие о протекании глеевых процессов. Для почвы под кроной сосны характерен профиль со строением: Wao(0–2(2.5))–W1e(2(2.5)–3)–W2e(3–5)–C^{ca}(5–10)–

C⁻ca,g(10–55 см), что позволяет идентифицировать ее как псаммозем гумусовый грубогумусированный оподзоленный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Nechic, Stagnic)).

В междурядьях формирование горизонта W выражено слабее, масса подстилки меньше (0.60 ± 0.03 кг/м²), морфологических признаков оподзоливания не отмечено. Строение профиля: Wao(0–1)–W(1–4)–C⁻ca,g(4–55 см). Почва – псаммозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Stagnic)).

Суглинистый карьер. На территории карьера 4 в первый год наблюдений растительный покров был представлен единичными пионерными и луговыми растениями. Формирование сомкнутого травостоя, образованного луговыми видами (*Agrostis* sp., *Festuca pratensis*, *Poa pratensis*, *Trifolium* sp., *Vicia* sp. и др.), завершилось к концу третьего года. Накопление органического вещества за счет поступающей отмершей растительной массы обусловило заметное, по сравнению с карьером 1, прокрашивание верхнего маломощного слоя грунта в темно-серые тона. Ниже морфологические изменения субстрата не отмечены. Строение профиля: W(0–0.2)–C⁻ca(0.2–50 см). Почва – пелозем гумусовый остаточно-карбонатный (Calcaric Regosol).

В начале второго десятилетия из-за невысокой сомкнутости крон сосны (0.2) растительный покров междурядий образуют луговые травы, что обусловило насыщенность корнями горизонта W. Под подгоризонтом W1 с начальной стадией аккумуляции гумуса залегают скрепленный живыми корнями легкосуглинистый подгоризонт W2, переходящий в слабо преобразованный минеральный субстрат. Строение профиля: W1(0–2)–W2(2–5)–C⁻ca(5–50 см). Почва – пелозем гумусовый остаточно-карбонатный (Calcaric Regosol).

В конце второго десятилетия растительность междурядий представлена в основном травянистыми растениями. В связи с увеличением сомкнутости крон сосны (0.4–0.5) усилилась роль опушечного и лесного разнотравья (*Aegopodium podagraria*, *Calamagrostis arundinacea*, *Equisetum sylvaticum*, *Hieracium altipes*, *Pyrola rotundifolia*, *Rubus saxatilis*, *Vicia sylvatica*) и мхов (*Dicranum scoparium*, *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*). Под кроной сосны травостой изрежен, поверхность почвы покрыта слоем опада хвои (1.00 ± 0.06 кг/м²). В прикомлевой части влияние фитогенного поля сосны и специфика опада обусловили вычленение в верхней части профиля маломощной подстилки (Wao до 1.5 см) и подгоризонта Wel с признаками элювирования (наличие осветленных минеральных зерен). На глубине 4–22 см отмечено присутствие органических включений, наличие которых связано с погребением верхней части субстрата днища карьера с единичными растени-

ями при нарезании гряд во время проведения биологического этапа рекультивации. В минеральной толще профиля (20–50 см) имеются ржаво-охристые и сизые пятна, свидетельствующие об окислительно-восстановительных процессах. Строение профиля: Wao(0–1.5)–W1el(1.5–2)–W2el(2–3(4))–C⁻tu,ca(3(4)–10)–C⁻tu,ca,g(10–22)–C⁻ca,g(22–40 см). Почва – пелозем гумусовый грубогумусированный элювированный турбированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Relocatic, Stagnic)).

В междурядье формирующаяся под сомкнутым травостоем подстилка представлена остатками трав, в меньшей мере – мхов и хвоей разной степени разложения (1.03 ± 0.09 кг/м²). Дерновый процесс здесь выражен сильнее, чем под кронами сосен, морфологические признаки элювирования не отмечены. Горизонт W достиг мощности 7 см. Строение профиля: Wao(0–2.5)–W1(2.5–3)–W2(3–7)–C⁻ca,g(7–50 см). Почва – пелозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Stagnic)).

В почвах на суглинистом субстрате к концу второго десятилетия сукцессии наблюдается некоторое облегчение гранулометрического состава горизонтов W и в подкрановом пространстве, и в междурядье с образованием “иллювиального максимума” в подстиляющем минеральном слое (табл. 1). Аналогичная картина отмечена и другими авторами [34, 56].

Минералогический состав почв. На 18-й год управляемой сукцессии в профиле почв карьеров преобладает кварц, в небольшом количестве содержатся полевые шпаты, диагностирован рутил (рис. 3). Суглинистая почва (карьер 4) отличается от песчано-супесчаной (карьер 1) присутствием слюды и хлорита. На начальных стадиях почвообразования изменение минералогического состава происходит прежде всего за счет менее устойчивых компонентов минеральной части. Так, кальцийсодержащие минералы (доломит и кальцит), присутствующие в абралитах, в горизонтах W почв не обнаружены (рис. 3), что обусловлено, по-видимому, их выщелачиванием. Данные валового анализа также показывают существенное уменьшение содержания CaO в верхних горизонтах молодых почв.

Качественный состав минералов в почвах фоновых участков практически идентичен. Во всех горизонтах преобладает кварц, в небольшом количестве присутствуют натриевые и калиевые полевые шпаты. С глубины 10 см диагностированы слюда и хлорит. Судя по выраженности пиков на рентгендифрактограммах, подзолистая грубогумусовая почва характеризуется более высоким содержанием этих минералов, чем подзол иллювиально-гумусово-железистый. Почвы карьеров отличаются от фоновых в основном наличием кальцийсо-

Таблица 1. Валовой химический состав почв*

Горизонт, глубина, см	Содержание компонентов, % (воздушно-сухая навеска)																
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	ZrO ₂	StrO	Rb ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	ZnO
Карьер 1 (18-й год сукцессии). Псаммомем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Stagnic)), междурядье																	
W, 1–4	75.28	0.40	13.57	2.59	0.07	1.74	1.76	1.03	3.12	0.25	0.08	0.038	0.025	0.007	0.030	<0.01	<0.01
C ⁺ ca,g, 4–10	74.10	0.40	14.37	2.81	0.08	1.98	1.71	1.00	3.15	0.26	0.05	0.038	0.023	0.007	0.030	<0.01	<0.01
C ⁺ sa,g, 10–20	74.48	0.39	13.96	2.70	0.07	1.85	2.01	1.02	3.14	0.24	0.05	0.037	0.023	0.007	0.032	<0.01	<0.01
C ⁺ sa,g, 20–28	75.24	0.36	12.72	2.38	0.07	1.70	3.21	0.95	3.02	0.21	0.05	0.040	0.026	<0.01	0.026	<0.01	<0.01
C ⁺ sa,g, 28–42	74.78	0.37	12.14	2.16	0.06	1.64	4.40	1.14	2.98	0.17	0.05	0.042	0.029	<0.01	0.030	<0.01	<0.01
C ⁺ sa,g, 46–55	75.31	0.37	11.89	2.10	0.06	1.64	4.20	1.17	2.91	0.18	0.05	0.053	0.030	0.007	0.038	<0.01	<0.01
Карьер 4 (18-й год сукцессии). Пелозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Stagnic)), междурядье																	
W2, 3–7	67.86	0.53	17.16	3.84	0.10	3.44	3.05	0.62	2.96	0.20	0.11	0.033	0.014	0.007	0.073	0.009	<0.01
C ⁻ sa,g, 7–11	67.38	0.58	18.34	4.10	0.08	3.06	2.50	0.59	3.02	0.16	0.09	0.032	0.014	0.008	0.061	<0.01	<0.01
C ⁻ sa,g, 11–22	65.09	0.56	18.50	4.10	0.09	3.34	4.28	0.65	3.03	0.17	0.04	0.036	0.014	0.007	0.083	0.011	<0.01
C ⁻ sa,g, 22–40	65.84	0.56	18.03	4.02	0.09	3.20	4.40	0.62	2.94	0.16	0.03	0.038	0.016	0.007	0.047	0.009	<0.01
C ⁻ sa,g, 40–50	68.32	0.53	17.52	3.32	0.08	2.86	3.85	0.51	2.74	0.13	0.05	0.032	0.012	<0.01	0.038	0.010	<0.01
Окрестности карьера 1 (фоновый участок). Подзол иллювиально-гумусово-железистый (Albic Podzol (Arenic))																	
E2, 6(6.5)–10(18)	89.16	0.36	6.14	0.43	0.01	0.25	0.53	0.79	2.20	0.05	**	0.036	0.013	**	0.035	**	**
VHF, 10(18)–23	76.27	0.39	14.06	3.25	0.13	1.35	0.57	0.60	2.70	0.54	0.06	0.027	0.013	<0.01	0.031	**	<0.01
VHF, 23–31	75.40	0.29	15.48	2.97	0.06	1.59	0.55	0.46	2.45	0.63	0.06	0.022	0.012	<0.01	0.037	<0.01	<0.01
VHF, 31–38	79.57	0.18	12.67	1.98	0.06	1.23	0.58	0.63	2.48	0.53	0.04	0.013	0.015	<0.01	0.029	<0.01	<0.01
B, 38–50	79.02	0.21	12.87	2.23	0.05	1.31	0.63	0.67	2.42	0.51	**	0.018	0.016	<0.01	0.029	<0.01	<0.01
BCg, 50–70	82.89	0.15	10.54	1.66	0.06	1.02	0.53	0.59	1.99	0.51	**	0.015	0.013	<0.01	0.033	<0.01	<0.01
Окрестности карьера 4 (фоновый участок). Подзолистая грубогумусовая потечно-гумусовая почва (Albic Epistagnic Retisol (Humic))																	
ELhi, 8(9)–10	83.63	0.67	8.98	0.80	0.46	0.48	1.20	0.87	2.43	0.22	0.15	0.054	0.014	<0.01	0.036	<0.01	<0.01
EL, 10–17	84.06	0.59	9.84	0.67	0.06	0.45	0.61	0.95	2.63	0.07	**	0.042	0.013	<0.01	0.031	<0.01	<0.01
BEL, 17–25	73.35	0.54	15.97	3.35	0.07	1.78	0.81	0.81	3.05	0.20	**	0.035	0.012	<0.01	0.023	<0.01	<0.01
BT, 25–40	70.57	0.53	17.72	3.87	0.05	2.32	0.92	0.74	3.06	0.13	**	0.034	0.013	<0.01	0.045	<0.01	<0.01
BT, 40–60	64.59	0.52	21.03	5.11	0.07	3.25	1.05	0.53	3.52	0.15	0.08	0.035	0.013	<0.01	0.047	<0.01	<0.01
BT, 60–75	64.90	0.57	20.79	5.03	0.08	3.22	1.04	0.57	3.50	0.16	0.07	0.036	0.012	<0.01	0.038	<0.01	<0.01

* Содержание компонентов приведено к 100% без учета потерь при прокаливании.

** Измеряемое значение ниже предела обнаружения.

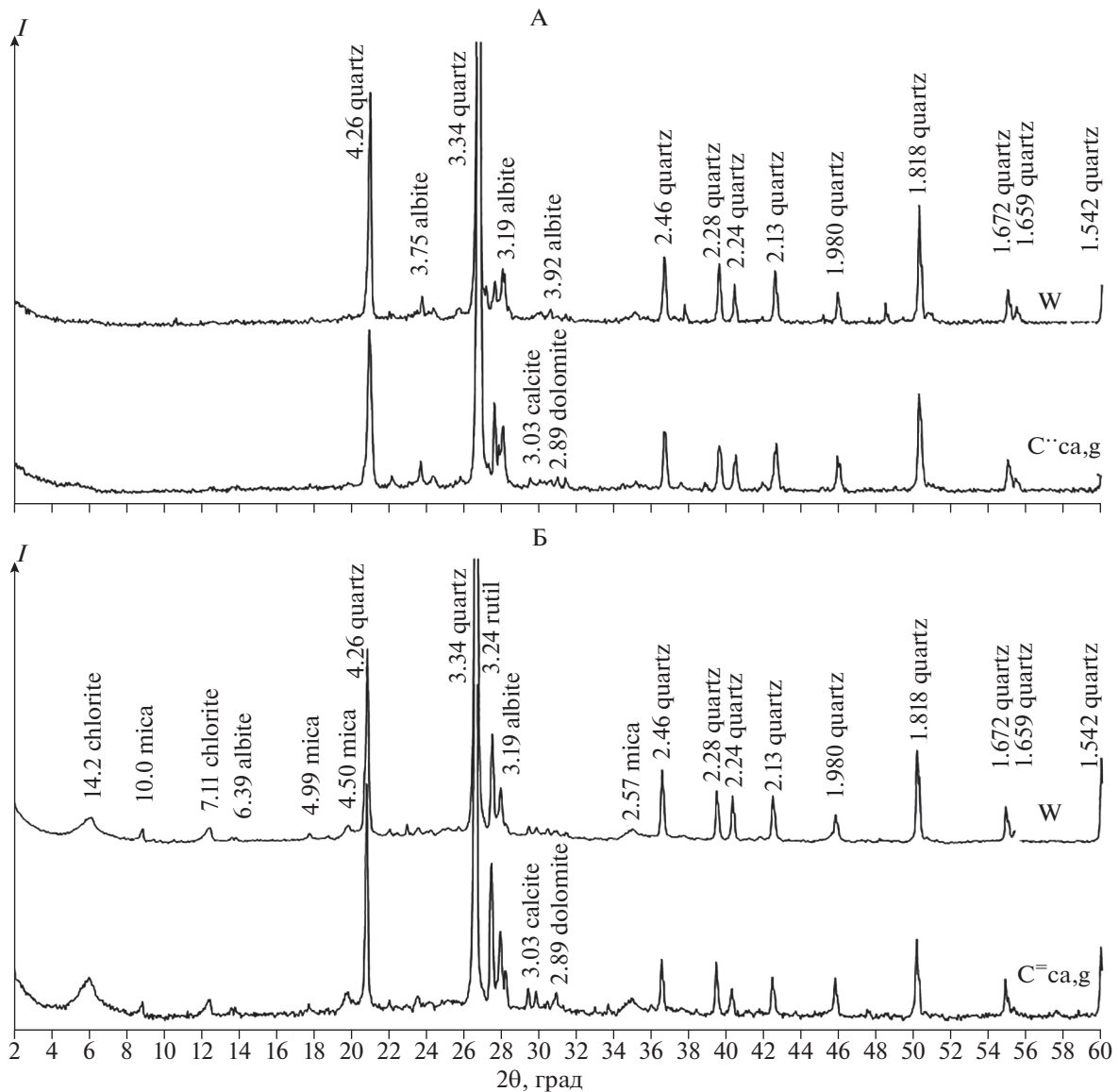


Рис. 3. Рентгendifрактограммы образцов нижней части гумусово-аккумулятивных (W) горизонтов и почвообразующих пород (Cg) почв карьеров 1 (А) и 4 (Б).

держущих минералов. Учитывая различия почв по гранулометрическому составу, выделение илистой фракции, изучение содержания и состава в ней глинистых минералов позволят более детально оценить преобразование минеральной части почв.

Динамика кислотности почв. В течение первого пятилетия сукцессии дифференциация актуальной кислотности в профиле формирующихся почв выражена слабо (рис. 4). Во втором десятилетии значения рН водных вытяжек значимо уменьшаются в верхних горизонтах, что согласуется с данными ряда авторов [2, 21, 39]. Однако подкисление по сравнению с фоновыми почвами охватывает только верхнюю часть профиля почв карьеров — на глуби-

ну не более 10 см от их поверхности (табл. 2). Максимальные величины кислотности приурочены к горизонту W.

Увеличение кислотности почв демонстрирует значимое возрастание коэффициента $K_{диф}$. На территории песчано-супесчаного карьера $K_{диф}$ в первое пятилетие наблюдений составил около 1, в начале второго десятилетия — 6, в конце — 20 (в междурядье) и 79 (под сосной). В почве суглинистого карьера $K_{диф}$ в конце первого пятилетия достиг 4, в начале второго десятилетия — 13, в конце — 17 (под сосной) и 25 (в междурядье). С подкислением почв в ходе сукцессии связано выщелачивание карбонатов кальция из почвооб-

Таблица 2. Некоторые физико-химические свойства почв

Горизонт, глубина, см	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Hг*	Обменные катионы				Потери от обработки HCl	Содержание физической глины <0.01 мм	CaCO ₃	ω(Fe ₂ O ₃) ^d по Мера— Джексону	Коэффициент Швертмана Fe ₀ : Fe _d
				смоль(экв)/кг								
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺	Al ³⁺					
Карьер 1 (18-й год сукцессии)												
Псаммозем гумусовый грубогумусированный оподзоленный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Nechic, Stagnic)), под кроной сосны												
W _{ао} , 0–2(2.5)	6.32	5.33	52.5	16.7	2.8	0.33	0.33	—	—	—	—	—
W _{1с} , 2(2.5)–3	6.33	5.34	1.8	5.4	0.82	0	0.03	0.75	—	—	—	—
W _{2с} , 3–5	6.90	5.77	1.0	5.0	0.6	0.02	0	0.36	—	0.25	0.34	0.36
C [•] са, 5–10	7.25	6.29	—	—	—	—	—	1.01	—	0.23	0.36	0.36
C [•] са, g, 10–20	8.10	7.20	—	—	—	—	—	2.56	—	0.28	0.30	0.30
Псаммозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Stagnic)), междурядье												
W _{ао} , 0–1	6.67	5.74	26.3	10.2	1.6	0.17	0.17	—	—	—	—	—
W, 1–4	6.67	5.38	1.3	4.9	0.72	0.02	0	0.17	—	0.27	0.33	0.33
C [•] са, g, 4–10	7.07	5.83	—	—	—	—	—	0.12	<0.5**	0.30	0.33	0.33
C [•] са, g, 10–20	7.70	6.95	—	—	—	—	—	0.81	<0.5**	0.26	0.38	0.38
C [•] са, g, 20–28	8.20	7.37	—	—	—	—	—	1.66	1.7	0.23	0.33	0.33
C [•] са, g, 28–42	8.39	7.50	—	—	—	—	—	2.49	1.5	0.20	0.21	0.21
C [•] са, g, 46–55	8.48	7.56	—	—	—	—	—	2.09	2.7	0.17	0.20	0.20
Окрестности карьера 1 (фоновый участок)												
Подзол иллювиально-гумусово-железистый (Albic Podzol (Arenic))												
O ₁ , 0–3	4.46	3.79	71.0	21.1	4.8	3.17	1.08	—	—	—	—	—
O ₂ , 3–5(6)	4.00	3.11	22.3	14.4	3.92	3.33	2.50	—	—	—	—	—
E ₁ , 5(6)–6(6.5)	4.16	3.10	45.0	3.50	1.37	0.83	2.17	—	—	—	—	—
E ₂ , 6(6.5)–10(18)	4.40	3.33	2.1	0.12	0.12	0.02	0.55	0.59	—	0.04	0.23	0.23
BHF, 10(18)–23	4.86	3.89	6.5	0.43	0.18	0.02	3.00	0.57	—	0.44	0.80	0.80
BHF, 23–31	5.34	4.25	4.0	0.71	0.25	0.02	1.00	0.57	—	0.37	0.49	0.49
BHF, 31–38	5.61	4.36	2.7	0.60	0.21	0	0.58	0.41	—	0.37	0.32	0.32
B, 38–50	5.44	4.31	2.9	0.47	0.19	0	0.72	0.22	—	0.23	0.48	0.48
BCg, 50–70	5.64	4.45	2.0	0.29	0.14	0	0.32	0.27	—	0.21	0.33	0.33

Таблица 2. Окончание

Горизонт, глубина, см	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Нг*	Обменные катионы				Потери от обработки HCl	Содержание физической глины <0.01 мм	СаСО ₃	ω(Fe ₂ O ₃) _d по Мера— Джексону	Коэффициент Швермана Fe ₀ : Fe _d
				смоль(экв)/кг								
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺	Al ³⁺					
Карьер 4 (18-й год сукцессии)												
Пелозем гумусовый грубогумусированный элювируванный турбированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Relocatic, Stagnic)), под кроной												
Wao, 0–1.5	6.68	5.90	35.0	25.8	5.4	0.33	0.17	—	—	—	—	
W1el, 1.5–2	6.57	6.23	1.7	16.5	3.09	0.1	0	2.54	—	—	—	
W2el, 2–3(4)	7.02	6.65	—	—	—	—	—	2.43	—	0.44	0.34	
C ⁻ tu,ca, 3(4)–10	7.42	6.8	—	—	—	—	—	4.52	—	0.49	0.31	
C ⁻ tu,ca,g, 10–22	7.76	6.98	—	—	—	—	—	6.97	—	0.45	0.38	
C ⁻ ca,g, 22–40	7.92	7.12	—	—	—	—	—	6.76	—	0.49	0.24	
Пелозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Stagnic)), междуурядье												
Wao, 0–2.5	6.69	6.45	26.3	26.1	4.8	0.17	0.33	—	—	—	—	
W1, 2.5–3	6.36	6.07	2.2	13.9	2.31	0.10	0	1.59	—	—	—	
W2, 3–7	6.88	6.31	1.1	11.6	2.15	0	0	1.08	<0.5**	0.35	0.34	
C ⁻ ca,g, 7–11	7.41	6.80	—	—	—	—	—	1.12	0.6	0.39	0.36	
C ⁻ ca,g, 11–22	7.79	7.01	—	—	—	—	—	4.47	3.0	0.30	0.53	
C ⁻ ca,g, 22–40	7.92	7.07	—	—	—	—	—	3.77	3.1	0.44	0.39	
C ⁻ ca,g, 40–50	7.98	7.24	—	—	—	—	—	3.48	2.5	0.34	0.35	
Окрестности карьера 4 (фоновый участок)												
Подзолистая грубогумусовая потечно-гумусовая почва (Albic Epistagnic Retisol (Humic))												
Oao, 0–8(9)	5.74	5.23	29.0	27.0	3.91	2.00	1.17	—	—	—	—	
ELhi, 8(9)–10	4.81	4.03	7.0	3.2	0.45	0.17	0.28	0.58	—	0.09	0.67	
EL, 10–17	4.71	3.51	4.1	0.7	0.19	0.03	1.93	0.96	—	0.08	0.70	
BEL, 17–25	5.03	3.72	7.0	3.4	0.90	0.03	3.25	0.57	—	0.47	0.66	
BT, 25–40	5.29	3.90	5.7	4.3	1.20	0.03	2.42	0.23	—	0.48	0.48	
BT, 40–60	5.24	3.67	7.6	7.3	2.16	0.08	4.28	0.40	—	0.65	0.23	
BT, 60–75	5.25	3.65	7.8	7.3	2.17	0.07	4.22	0.45	—	0.66	0.23	

* Нг — гидролитическая кислотность; прочерк — не определяли.

** Измеряемое значение ниже предела обнаружения.

Таблица 3. Некоторые характеристики системы почвенного органического вещества в исследованных экотопах

Горизонт, глубина, см	Массовая доля компонента в единице массы почвы, г/кг				Отношение массовых долей компонентов			
	$\omega(C_{орг})$	$\omega(C_{неорг})$	$\omega(C_{орг}/H_2O)$	$\omega(C_{неорг}/H_2O)$	$\omega(N_{общ})$	$\frac{\omega(C_{орг})}{\omega(N_{общ})}$	$\frac{\omega(C_{орг}/H_2O)}{\omega(C_{орг})}, \%$	$\frac{\omega(C_{неорг}/H_2O)}{\omega(C_{общ}/H_2O)}, \%$
Карьер 1 (18-й год сукцессии)								
Псаммозем гумусовый грубогумусированный оподзоленный остаточно-карбонатный глееватый (Calcarg Arenosol (Nechic, Stagnic)), под кроной сосны								
W _{ао} , 0–2(2.5)	152.0	–	8.91	0.10	5.50	27.64	5.86	1.05
W _{1e} , 2(2.5)–3	6.7	–	0.48	0.03	0.54	12.41	7.15	5.13
W _{2e} , 3–5	1.8	–	0.06	0.01	0.13	13.85	3.53	15.12
C [•] ca, 5–10	1.8	0.9	0.03	0.01	0.19	9.47	1.86	26.77
C [•] ca,g, 10–20	1.0	1.9	0.03	0.03	0.14	7.14	3.42	45.99
Псаммозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcarg Arenosol (Stagnic)), междурядье								
W _{ао} , 0–1	36.6	–	–	–	2.00	18.30	–	–
W, 1–4	2.2	–	0.05	0.01	0.21	10.48	2.47	17.03
C [•] ca,g, 4–10	1.8	–	0.03	0.01	0.16	11.25	1.82	18.63
C [•] ca,g, 10–20	1.5	0.7	0.05	0.02	0.16	9.38	3.10	28.88
C [•] ca,g, 20–28	1.6	0.8	0.02	0.03	0.14	11.43	1.42	57.67
C [•] ca,g, 28–42	2.0	1.1	0.02	0.03	**	–	0.96	61.51
C [•] ca,g, 46–55	0.9	1.5	0.01	0.02	**	–	1.45	64.61
Окрестности карьера 1 (фоновый участок) Подзол иллювиально-гумусово-железистый (Albic Podzol (Arenic))								
O ₁ , 0–3	426.0	–	6.64	0.04	11.00	38.73	1.56	0.53
O ₂ , 3–5(6)	436.0	–	7.08	0.02	10.00	43.60	1.62	0.28
E ₁ , 5(6)–6(6.5)	170.0	–	1.78	**	3.80	44.74	1.05	–
E ₂ , 6(6.5)–10(18)	2.5	–	0.09	**	0.22	11.36	3.54	–
VHF, 10(18)–23	4.2	–	0.11	**	0.36	11.67	2.64	–
VHF, 23–31	2.6	–	0.06	**	0.23	11.30	2.46	–
VHF, 31–38	1.3	–	0.03	**	0.13	10.00	2.41	–
B, 38–50	1.6	–	0.04	**	0.12	13.33	2.27	–
BCg, 50–70	1.0	–	0.03	**	**	**	2.57	–

Таблица 3. Окончание

Горизонт, глубина, см	Массовая доля компонента в единице массы почвы, г/кг				Отношение массовых долей компонентов			
	$\omega(C_{орг})$	$\omega(C_{неорг})$	$\omega(C_{орг})_{H_2O}$	$\omega(C_{неорг})_{H_2O}$	$\omega(N_{общ})$	$\frac{\omega(C_{орг})}{\omega(N_{общ})}$	$\frac{\omega(C_{орг})_{H_2O}}{\omega(C_{орг})}$, %	$\frac{\omega(C_{неорг})_{H_2O}}{\omega(C_{общ})_{H_2O}}$, %
Карьер 4 (18-й год сукцессии)								
Пелозем гумусовый грубогумусированный элювируванный турбированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Relocatic, Stagnic)), под кроной								
Wao, 0–1.5	180.0	–	–	–	7.00	25.71	–	–
W1e1, 1.5–2	55.8	–	0.65	0.07	3.10	18.00	1.16	9.87
W2e, 12–3(4)	10.0	5.0	0.31	0.06	0.76	13.16	3.09	16.17
C ⁻ tu,ca, 3(4)–10	4.9	8.1	0.13	0.05	0.47	10.43	2.58	29.82
C ⁻ tu,ca,g, 10–22	2.4	7.6	0.06	0.05	0.29	8.28	2.45	46.91
C ⁻ ca,g, 22–40	2.2	4.4	0.04	0.05	0.24	9.17	1.91	54.90
Пелозем гумусовый грубогумусированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Stagnic)), междуудья								
Wao, 0–2.5	114.0	–	–	–	6.00	19.00	–	–
W1, 2.5–3	32.3	–	0.58	0.04	2.40	13.46	1.79	6.47
W2, 3–7	12.3	1.7	0.23	0.04	1.07	11.50	1.85	15.63
C ⁻ ca,g, 7–11	4.1	1.3	0.10	0.06	0.38	10.79	2.35	38.36
C ⁻ ca,g, 11–22	2.9	2.1	0.05	0.05	0.29	10.00	1.64	52.40
C ⁻ ca,g, 22–40	3.6	1.5	0.04	0.05	0.27	13.33	1.05	58.15
C ⁻ ca,g, 40–50	2.2	1.6	0.03	0.05	0.13	16.92	1.48	58.58
Окрестности карьера 4 (фоновый участок)								
Подзолистая грубогумусовая потечно-гумусовая почва (Albic Epistagnic Retisol (Humic))								
Oao, 0–8(9)	220.0	–	4.74	0.20	8.30	26.51	2.16	4.01
ELhi, 8(9)–10	32.0	–	0.54	0.02	1.60	20.00	1.69	3.78
EL, 10–17	4.0	–	0.13	0.01	0.33	12.12	3.19	4.61
BEL, 17–25	4.7	–	0.13	0.01	0.43	10.93	2.76	4.76
BT, 25–40	3.9	–	0.09	0.01	0.41	9.51	2.37	4.76
BT, 40–60	2.3	–	0.06	**	0.31	7.42	2.56	–
BT, 60–75	2.9	–	0.06	**	0.34	8.53	2.12	–

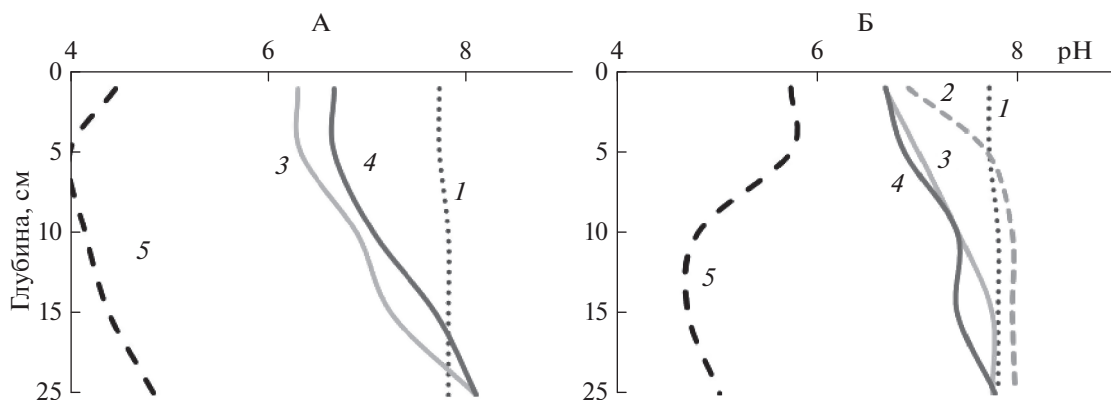


Рис. 4. Динамика распределения актуальной кислотности ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) в верхней части профилей почв, формирующихся на песчано-супесчаном (А) и суглинистом (Б) субстратах карьеров: 1 – исходный субстрат; 2 – 12-й год сукцессии; 3 – 18-й год сукцессии (крона сосны); 4 – 18-й год сукцессии (междурядье); 5 – фоновые почвы.

разующей породы. Если в абралитах распределение CaCO_3 было равномерным в толще субстрата, то к концу второго десятилетия наблюдается значимое уменьшение его содержания в верхней части профиля почв. Потери от обработки 2 н. раствором HCl [12] в минеральных горизонтах фоновых почв составляют 0.22–0.96%, в почвах карьеров этот показатель возрастает вниз по профилю и достигает в нижних горизонтах 2.0–2.6% (карьер 1) и 2.5–7.0% (карьер 4). Профильное распределение величины $\omega(\text{C}_{\text{неорг}})$, рассчитанной как разница между $\omega(\text{C}_{\text{общ}})$ и $\omega(\text{C}_{\text{орг}})$, показывает аналогичную закономерность, которая более четко выражена в песчано-супесчаной почве карьера 1 (табл. 3). В этом карьере существенное подкисление почвы под кроной сосны, по сравнению с междурядьем, происходит за счет поступления на поверхность большего количества хвои [51]. Значения $K_{\text{диф}}$, рассчитанные для почвы карьера 4, значительно ниже, что обусловлено изначально более высоким содержанием в почвообразующей породе карбонатов и тонкодисперсной фракции. О развитии процессов подкисления свидетельствует некоторое увеличение обменной и гидролитической кислотности в верхних горизонтах новообразованных почв. Однако неполное выщелачивание карбонатов и, возможно, биогенная аккумуляция обменных оснований [34] способствуют сохранению на данном этапе высокой степени насыщенности основаниями (82–92%) горизонтов W.

Динамика накопления углерода и азота в почвах. Содержание органического углерода и азота в исходном субстрате карьеров низкое, отношение $\omega(\text{C}_{\text{орг}})/\omega(\text{N}_{\text{общ}})$ составляет 5–11. В соответствии с формированием, развитием и дифференциацией горизонтов W на грубогумусовую и гумусово-аккумулятивную части, в профилях почв на территории карьеров количества взаимосвязанных в

них $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{общ}}$ (уравнение регрессии: $\omega(\text{N}_{\text{общ}}) = 0.026\omega(\text{C}_{\text{орг}}) + 0.45$; $R^2 = 0.93$) приближаются к таковым в органогенных горизонтах фоновых почв, но еще не достигают их значений. Вниз по профилю величина соотношения $\omega(\text{C}_{\text{орг}})/\omega(\text{N}_{\text{общ}})$ закономерно уменьшается, что связано с относительным обогащением органического вещества азотом по мере разложения растительных остатков [20]. Элювиально-иллювиальное распределение $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{общ}}$, характерное для профиля фоновых подзолистых почв, в почвах карьеров не выражено.

В почве карьера 1 (песчано-супесчаный субстрат) запасы $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнем 20-сантиметровом слое (включая подстилку) возросли от 4.8 (первые годы сукцессии) до 6.0 (междурядье) и 7.5 т/га (под кроной сосны) к 18-му году сукцессии. Эти величины примерно в 3 раза меньше по сравнению с запасами $\text{C}_{\text{орг}}$ в зональных автоморфных почвах, развитых под пологом сосновых лесов [22, 35]. Скорость накопления $\text{C}_{\text{орг}}$ в 20-сантиметровом слое почвы междурядья на территории карьера 1 составила 0.07, под кроной сосны – 0.16 т/га/год.

На карьере 4 (суглинистый субстрат) во все сроки наблюдений запасы $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнем 20-сантиметровом слое почв были выше, по сравнению с почвами карьера 1. В первые годы сукцессии они составили 7.2, к концу второго десятилетия – 13.5 (междурядье) и 11.6 (под кроной сосны) т/га. Это примерно в 2 раза меньше, чем в подзолистых почвах еловых лесов [18]. Скорость накопления $\text{C}_{\text{орг}}$ достигала 0.37 (междурядье) и 0.26 (под кроной сосны) т/га в год. Максимальные значения данного параметра, зафиксированные на карьере 4 в почвах междурядий, а на карьере 1 – в подкроновом пространстве, согласуются со строением и структурой растительного покрова. Более быстрые темпы накопления органического угле-

рода в почвах, формирующихся на суглинистых породах по сравнению с песчано-супесчаными связаны не только с лучшим развитием растительного покрова, но и с высоким содержанием в минеральной части профиля глинистых частиц [42].

Данные по динамике накопления $C_{орг}$ в исследованных почвах согласуются с результатами, полученными Абакумовым [2] при изучении первичного почвообразования на песчаных карьерах северо-запада России и Махониной [21] – на промышленных отвалах в таежной зоне Урала, где скорость накопления $C_{орг}$ на первых этапах первичного почвообразования находилась в пределах 0.2–0.3 т/га/год. В биоклиматических условиях Нидерландов [41] и Польши [53, 55, 57] процесс накопления $C_{орг}$ происходит быстрее. В частности, в супесчано-песчаных почвах, развитых на техногенных отвалах после проведения лесной рекультивации [55], запасы углерода в слое 0–20 см (с учетом горизонта лесной подстилки) спустя 19 лет после посадки сосны составили порядка 29 т/га, что в 3.8–4.8 раза больше по сравнению с запасами органического углерода в исследованных нами почвах карьера 1 на 18-й год развития посадок сосны. По [53] скорость накопления $C_{орг}$ в почвах, формирующихся на отвалах и карьерах Польши в районах добычи полезных ископаемых, варьирует от 0.7 до 5.3 т/га в год.

Содержание $\omega(C_{орг})_{H_2O}$ в горизонтах W карьера 1 достигает 8.9 г/кг, постепенно уменьшаясь вниз по профилю до 0.01 г/кг. В фоновой почве данный показатель меняется от 7.08 до 0.03 г/кг. Максимальная экстрагируемость водой $C_{орг}$ из твердой фазы отмечена в верхних горизонтах почвы карьера 1 под кроной сосны, где доля $\omega(C_{орг})_{H_2O}$ от $\omega(C_{орг})$ составляет 3.53–7.15% (в фоновой почве – 1.56–1.62%). Возможно, это связано с большей подвижностью органического вещества в молодых почвах, более активным протеканием процессов его минерализации, незрелостью механизмов, препятствующих потере углерода экосистемой.

В минеральных горизонтах фоновых почв содержание $\omega(C_{неорг})_{H_2O}$, как правило, не превышает 0.01 г/кг, в почвах карьеров в связи с наличием карбонатов $\omega(C_{неорг})_{H_2O}$ достигает 0.03 и 0.07 г/кг соответственно. Доля $\omega(C_{неорг})_{H_2O}$ от $\omega(C_{орг})$ в почвах карьеров увеличивается вниз по профилю, что обусловлено уменьшением степени выщелоченности карбонатов в его нижней части, еще не затронутой (или затронутой в малой степени) процессами почвообразования. В фоновых почвах это отношение сохраняется во всех горизонтах примерно на одном уровне.

На примере карьера 1 рассмотрены процессы накопления и изменения на первых этапах поч-

вообразования лабильных компонентов почвенного органического вещества в поверхностных горизонтах (рис. 5). Доля углерода лабильных органических веществ ($C_{лов}$) в подгорizontах Wao1 (0–1 см) и Wao2 (1–2 см) новообразованной почвы варьирует для щелочных экстрактов в пределах 43.9–77.1%, для пирофосфатных – 45.7–88.9% от $\omega(C_{орг})$. Меньшие показатели этого параметра в подстильно-торфяном горизонте (O) фоновой почвы (соответственно 22.8–24.1 и 23.0–24.1%) могут быть связаны со значительным содержанием в нем труднорастворимых компонентов – негидролизующего остатка [10, 22]. Присутствие карбонатов кальция в субстрате карьеров обусловило, по-видимому, возможность закрепления части новообразующихся гумусовых веществ в форме комплексов (солей) с ионами кальция. Об этом свидетельствует наличие разницы в количестве $C_{лов}$, экстрагируемых из образцов почв щелочной и пирофосфатной вытяжками. Доля $C_{лов}$, извлекаемых пирофосфатной вытяжкой, на 1.2–10.9% больше, по сравнению с содержанием $C_{лов}$, экстрагируемых раствором гидроксида натрия. Содержание $C_{лов}$ в подгорizontах O1 и O2 фоновой почвы имеет близкие значения при использовании указанных экстрагентов: разница между $C_{лов}$ в пирофосфатной и щелочной вытяжках из образцов фоновой почвы составляет всего 0.1–0.2%. Это подтверждает отсутствие в составе гумусовых веществ фоновой почвы фракций ГК и ФК, связанных с кальцием [10, 22].

Снятие оптических спектров растворов ГК, выделенных из щелочных и пирофосфатных экстрактов образцов почв, характеризующих горизонты W почвы карьера 1, и расчет коэффициентов цветности (E_{465}/E_{650}) свидетельствуют об их более высоких значениях (соответственно 6.9–8.8 и 6.4–8.4), по сравнению с образцами органогенного горизонта фоновой почвы (соответственно 5.4–5.5 и 5.9–6.0) (рис. 5). Полученные данные указывают на большее содержание в структуре ГК почвы, формирующейся на песчано-супесчаном субстрате днища карьера, периферических нерегулярных цепей алифатической природы и меньшую долю – ароматических компонентов, что позволяет судить об относительной “молодости” ГК почвы карьера.

Начало подзолообразования. В почвах фоновых участков четко выражен элювиально-иллювиальный характер распределения валовых (табл. 1) и оксалаторастворимых (рис. 6) форм соединений алюминия и железа. Максимум $\omega(Al_2O_3)_o$ несколько смещен вниз по профилю относительно максимума $\omega(Fe_2O_3)_o$ в связи с большей подвижностью соединений алюминия (III) в кислой среде [38].

В почвах карьеров отмечено равномерное распределение валового содержания алюминия и железа по профилю. Вместе с тем наблюдающее-

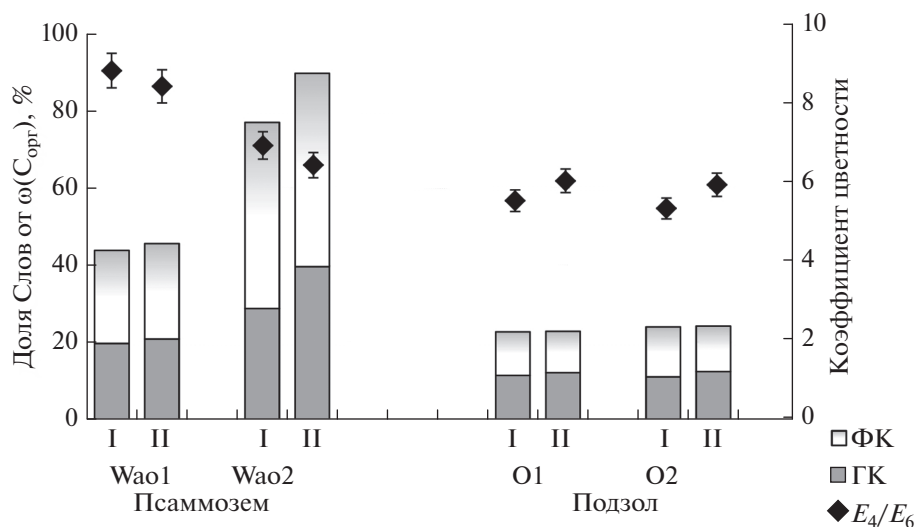


Рис. 5. Содержание углерода гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК), экстрагируемых щелочной (I) и пирофосфатной (II) вытяжками из образцов органогенных горизонтов почвы карьера (псаммозем) и фоновой участка (подзол) и величина коэффициента цветности (E_4/E_6) растворов гуминовых кислот.

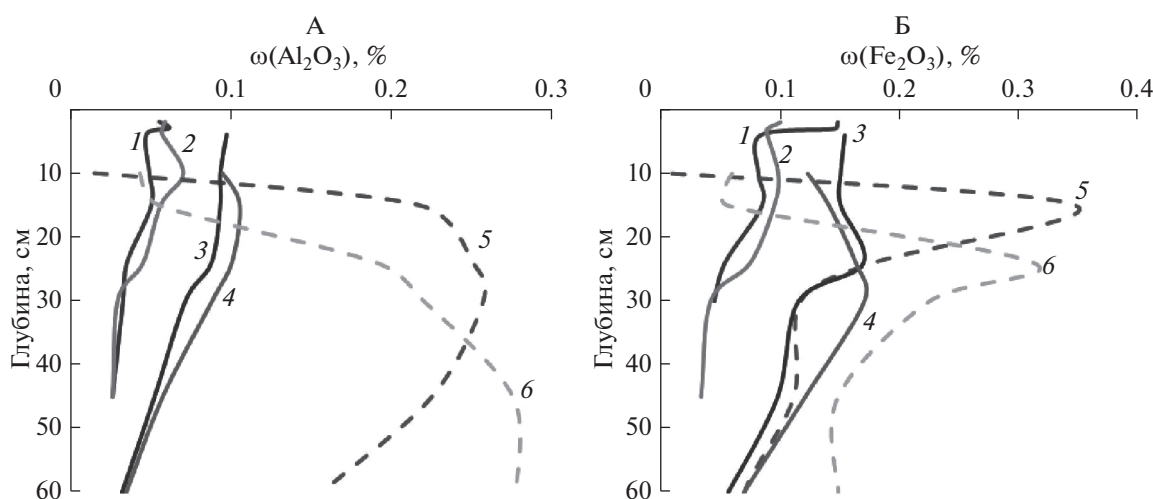


Рис. 6. Профильное распределение оксалаторазводимых соединений алюминия (А) и железа (Б): почва карьера 1 (1 – под кроной сосны, 2 – в междурадьё); почва карьера 4 (3 – под кроной сосны, 4 – в междурадьё); 5 – фоновая почва вблизи карьера 1; 6 – фоновая почва вблизи карьера 4.

ся в горизонте W небольшое увеличение содержания SiO_2 при некотором обеднении Al_2O_3 и Fe_2O_3 свидетельствует, по всей видимости, о развитии начальных стадий процессов оподзоливания при слабой морфологической визуализации диагностических горизонтов [46]. Тенденция элювиально-иллювиального распределения железа и алюминия находит подтверждение и в распределении по профилю их оксалаторазводимых форм, общее содержание которых незначительно (рис. 6). Абакумов с соавт. [37] отмечали появление подзолистого горизонта в почвах, формирующихся на песчаных отвалах под сосновым лесом в подзоне

южной тайги, уже через 20 лет от начала почвообразования. Не исключено, что в исследованных почвах процессу оподзоливания препятствует карбонатность техногенного субстрата карьеров. При наличии карбонатов подкисление формирующихся на техногенных отвалах почв и появление признаков подзолообразования могут отсутствовать даже спустя 20–30 лет от начала почвообразования [21, 55].

Глееобразование. В почвах фоновых участков морфохроматические признаки оглеения не отмечены. Однако развитие здесь глеевых процессов в условиях периодического поверхностного

переувлажнения, характерного для почв Республики Коми, в том числе автоморфных [10, 31], подтверждается наличием в элювиальной толще почв Fe–Mn-конкреций диаметром до 1–2 мм и повышенными значениями коэффициента Швертмана – 0.6–0.8 (табл. 2). В иллювиальных горизонтах значения этого индекса составляют 0.2–0.5, что условно соответствует слабой степени гидроморфизма и свидетельствует о формировании нижней части профиля фоновых почв преимущественно в окислительных условиях. Полученные данные согласуются с мнением [4], что применение критерия Швертмана более корректно для диагностики в почвах поверхностного гидроморфизма.

В молодых почвах признаки глееобразования в виде пятен сизоватых и охристых тонов, отмеченные в профилях на глубине 5–10 см и ниже, зафиксированы только во втором десятилетии. Появление зон восстановления соединений железа связано как с периодическим переувлажнением почв (наличие верховодки), так и с миграцией в профиле последовательно аккумулирующегося в ходе развития растительного сообщества почвенного органического вещества [13, 16, 17]. В почвах карьеров по сравнению с фоновыми почвами отсутствуют Fe–Mn-новообразования и отмечены меньшие значения критерия Швертмана (0.2–0.5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования особенностей формирования почв и растительности, проведенные в течение практически двух десятилетий после лесной рекультивации (посадка сосны обыкновенной) территории карьеров, где велась добыча строительных материалов, показали следующее. Процессы почвообразования и развития растительного покрова функционально взаимообусловлены и взаимосвязаны и определяются свойствами почвообразующих пород. Более активное протекание процессов почвообразования на песчано-супесчаном карьере отмечено под кронами сосны, как основного источника растительного опада, на суглинистом – в междурядьях под сомкнутым травостоем.

На песчано-супесчаном карьере представлен следующий динамический ряд: 1) техногенно-поверхностное образование (абралит) без растительного покрова → 2) культуры сосны на стадии приживания, начало формирования мохового покрова, незначительные изменения субстрата → 3) культуры с сомкнутостью крон менее 0.2, напочвенный покров из пионерных мхов, почва псаммозем гумусовый остаточно-карбонатный → 4) молодое лесное сообщество с сомкнутостью крон 0.4–0.5, напочвенный покров из пионерных мхов, почва псаммозем гумусовый грубогумусированный оподзоленный остаточно-карбонатный

глееватый. На суглинистом карьере: 1) техногенно-поверхностное образование (абралит) практически без растительного покрова → 2) культуры сосны на стадии приживания, формирование травостоя, почва пелозем гумусовый остаточно-карбонатный → 3) культуры сосны с сомкнутостью крон менее 0.2, травостой, почва пелозем гумусовый остаточно-карбонатный → 4) молодое лесное сообщество с сомкнутостью крон 0.4–0.5, деградация травостоя, почва пелозем гумусовый грубогумусированный элювирированный остаточно-карбонатный глееватый.

В средней тайге темпы биогенной аккумуляции органического вещества замедлены. За 20-летний период в верхнем 20-сантиметровом слое почв песчано-супесчаного карьера аккумулируется до 2.7 т/га органического углерода, суглинистого – до 6.3 т/га. Скорость накопления $C_{орг}$ достигает соответственно 0.16 и 0.37 т/га в год.

Молодость почв карьеров, короткий временной срок развития в них процессов подстилкообразования, гумусообразования и гумусонакопления определяют большую долю содержания лабильных компонентов в составе органического вещества их гумусово-аккумулятивных горизонтов, по сравнению с фоновыми подзолистыми почвами, низкую степень конденсированности гуминовых кислот, максимальную экстрагируемость водорастворимых органических соединений из твердой фазы почв.

В ходе формирования почв карьеров после лесной рекультивации происходит подкисление верхних горизонтов и выщелачивание карбонатов, о чем свидетельствуют отсутствие кальцита и доломита в минералогическом составе новообразованных горизонтов W, существенное уменьшение в них валового содержания кальция, а также $CaCO_3$. Скорость развития процессов подкисления ниже в почвах более тяжелого гранулометрического состава ($K_{диф}$ в суглинистых почвах до 25, песчано-супесчаных – до 79), что обусловлено, по-видимому, как свойствами субстрата, так и спецификой поступающего на поверхность почвы опада.

Во втором десятилетии сукцессии отмечены слабовыраженные процессы элювирования и иллювирования (начало подзолообразования), о чем свидетельствуют морфологические признаки (наличие осветленных минеральных зерен и белесоватые пятна в нижней части гумусово-аккумулятивного горизонта и в верхней части минеральной толщи), перераспределение соединений кремния, железа и алюминия, а также в профиле суглинистых почв – фракции физической глины.

Периодическое переувлажнение почв, обусловленное биоклиматическими условиями средней тайги, проявляется в почвенных профилях в

виде пятен сизоватых и охристых тонов во втором десятилетии управляемой сукцессии. Слабая выраженность перераспределения соединений железа (мобилизации и миграции) в условиях развития процессов глееобразования подтверждается невысокими значениями коэффициента Швертмана (0.2–0.5) и отсутствием Fe–Mn-новообразований.

Отмеченные в работе особенности почвообразовательного процесса на нарушенных землях таежной зоны могут быть учтены в практике лесной рекультивации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ Коми НЦ УрО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В.* Накопление и трансформация органического вещества на разновозрастных отвалах песчаного карьера // Почвоведение. 2008. № 8. С. 955–963.
2. *Абакумов Е.В., Гагарина Э.И.* Почвообразование в посттехногенных экосистемах карьеров на северо-западе Русской равнины. СПб: Изд-во СПбГУ, 2006. 208 с.
3. *Абакумов Е.В., Максимова Е.И., Лагода А.В., Копцева Е.М., Максимова Е.Ю.* Почвообразование на отвалах карьеров по добыче известняка и глин в районе г. Ухта // Почвоведение. 2011. № 4. С. 417–423.
4. *Аветов Н.А., Сопова Е.О., Головлева Ю.А., Кирюшин А.В., Красильников П.В.* Диагностика гидроморфизма в почвах автономных позиций Северососьвинской возвышенности (Западная Сибирь) // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1283–1292.
5. *Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы трансформации. Л.: Наука, 1980. 510 с.
6. *Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лягузова И.В., Мазная Е.А., Нешатаев В.Ю., Нешатаева В.Ю., Ставрова Н.И., Ярмишко В.Т., Ярмишко М.А.* Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИ-Химии СПбГУ, 2002. 240 с.
7. *Андреичева Л.Н.* Плейстоцен европейского Северо-Востока. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 210 с.
8. *Андроханов В.А., Курачев В.М.* Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.
9. *Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г., Лиханова И.А., Паников А.Н., Хабибуллина Ф.М., Виноградова Ю.А.* Формирование лесных экосистем на посттехногенных территориях в таежной зоне. Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 2015. 140 с.
10. Атлас почв Республики Коми. Сыктывкар: Изд-во ООО “Коми республиканская типография”, 2010. 356 с.
11. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа, 1997. 115 с.
12. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
13. *Водяницкий Ю.Н.* Железо в гидроморфных почвах. М.: АПР, 2017. 160 с.
14. *Голеусов П.В., Лисецкий Ф.Н.* Воспроизводство почв в антропогенно нарушенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 210 с.
15. *Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010040>
16. *Зайдельман Ф.Р.* Процесс глееобразования и его роль в формировании почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 316 с.
17. *Зверева Т.С., Стрелкова А.А., Толстогузов О.В.* Глееобразование в таежной зоне и изменение поверхностно-глеевых почв при сельскохозяйственном использовании. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1997. 240 с.
18. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / Под ред. Бобковой К.С., Галенко Э.П. СПб.: Наука, 2006. 334 с.
19. *Лиханова И.А., Ковалева В.А.* Одновременный посев луговых злаков и посадка древесных растений в ходе лесной рекультивации нарушенных земель в северной тайге Республики Коми // Лесоведение. 2018. № 6. С. 444–453. <https://doi.org/10.1134/S0024114818060050>
20. *Лиханова И.А., Лаптева Е.М., Ковалева В.А.* Продуктивность растительных сообществ и формирование органогенных горизонтов почв в ходе самовосстановительной сукцессии на техногенных субстратах // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 5. С. 182–189.
21. *Махонина Г.И.* Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. 356 с.
22. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 258 с.
23. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 271 с.
24. *Патова Е.Н., Кулюгина Е.Е., Денева С.В.* Процессы естественного восстановления почв и растительного покрова на отработанном угольном карьере (Большеземельская тундра) // Экология. 2016. № 3. С. 1–7.
25. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
26. Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 236 с.
27. *Руднева Е.Н., Забоева И.В., Урусевская И.С.* Почвенно-географическое районирование центральной и восточной частей европейской территории СССР // Подзолистые почвы центральной и восточной частей европейской территории СССР. Л.: Наука, 1981. С. 118–152.

28. Сафронова И.Н., Юрковская Т.К., Микляева И.М., Огуреева Г.Н. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. М.: ЭКОР, 1999. С. 64.
29. Середина В.П., Двуреченский В.Г., Пронина И.А., Акинина А.Н. Вещественный состав эмбриоземов, формирующихся на отвалах железорудных месторождений юга Западной Сибири // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2017. № 40. С. 25–43. <https://doi.org/10.17223/19988591/40/2>
30. Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижеский С.П., Доможакова Е.А., Лойко С.В. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири // Почвоведение. 2015. № 1. С. 106–117.
31. Структурно-функциональная организация почв и почвенного покрова европейского Северо-Востока. СПб.: Наука, 2001. 224 с.
32. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
33. Трофимов С.С., Таранов С.А. Особенности почвообразования в техногенных экосистемах // Почвоведение. 1987. № 11. С. 95–99.
34. Фаткулин Ф.А. Физические и физико-химические свойства молодых почв // Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1992. С. 61–84.
35. Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
36. Шугалей Л.С., Чупрова В.В. Почвообразование в техногенных ландшафтах лесостепи Назаровской котловины Средней Сибири // Почвоведение. 2012. № 3. С. 287–298.
37. Abakumov E., Trubetskoy O., Demin D., Celi L., Cerli C., Trubetskaya O. Humic acid characteristics in podzol soil chronosequence // Chem. Ecology. 2010. V. 26. P. 59–66. <https://www.researchgate.net/publication/233079163>
38. Barrett L.R., Schaetzl R.J. An examination of podzolization near Lake Michigan using chronofunctions // Can. J. Soil Sci. 1992. V. 72. P. 527–541.
39. Crocker R.L., Dickson B.A. Soil development on the recessional moraines of the Herbert and Mendenhall glaciers, southeastern Alaska. // J. Ecology. 1957. V. 45. P. 169–185.
40. Crocker R.L., Major J. Soil Development in Relation to Vegetation and Surface Age at Glacier Bay, Alaska // J. Ecology. 1955. V. 43. № 2. P. 427–448.
41. De Kovel C.G.F., Van Mierlo A.(J.) E.M., Wilms Y.J.O., Berendse F. Carbon and nitrogen in soil and vegetation at sites differing in successional age // Plant Ecology. 2000. V. 149(1). P. 43–50.
42. Fujisaki K., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Chotte J.-L., Chevallier T. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands // Geoderma. 2018. V. 313. P. 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.010>
43. Huot H., Simonnot M.-O., Morel J.L. Pedogenetic Trends in Soils Formed in Technogenic Parent Materials // Soil Sci. 2015. V. 180(4/5). P. 182–192. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000135>
44. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2015. № 106.
45. Jankowski M., Bednarek R. Quantitative and qualitative changes of properties as basis for distinguishing development stages of soils formed from dunes sand. // Polish J. Soil Sci. 2000. V. 33(2). P. 61–69.
46. Jauhiainen E. Age and degree of podzolization of sand soils on the coastal plain of northwest Finland. // Societas Scientiarum Fennica. Commentationes Biologicae. 1973. V. 68. P. 1–32.
47. Jauhiainen E. Rate of podzolization in a dune in northern Finland // Societas Scientiarum Fennica. Commentationes Physico-Mathematicae. 1972. V. 42. P. 33–44.
48. Macdonald S.E., Landhausser S.M., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions // New Forests. 2015. № 46. P. 703–732. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>
49. Mokma D.L., Yli-Halla M., Lindqvist K. Podzol formation in sandy soils of Finland // Geoderma. 2004. V. 120. № 3. P. 259–272. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.008>
50. Olson J.S. Rates of succession and soil changes on Southern Lake Michigan sand dunes // Botanical Gazette. 1958. V. 119. № 3. P. 125–130.
51. Penížek V., Zádorová T. Soil Toposequence under Man-Planted Vegetation in the Krkonoše Mts., Czech Republic // Soil Water Res. 2012(4). V. 7. P. 138–150. <https://doi.org/10.17221/11/2012-SWR>
52. Petäjä-Ronkainen A., Peuraniemi V., Aario R. On podzolization in glaciofluvial material in northern Finland. // Annales academiæ scientiarum Fennicæ. Ser. A, III, Geologica-geographica. 1992. № 156. P. 1–19.
53. Pietrzykowski M., Krzaklewski W. Potential for carbon sequestration in reclaimed mine soil on reforested surface mining areas in Poland // Natural Sci. 2010. V. 2. № 9. P. 1015–1021. <https://doi.org/10.4236/ns.2010.29124>
54. Šourková M., Frouz J., Šantrůčková H. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic) // Geoderma. 2005. V. 124. P. 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.001>
55. Switoniak M., Hulisz P., Różanski S., Kałucka I. Soils of the external dumping ground of the bełchatów open-cast lignite mine / Technogenic soils of Poland. Torun: Polish Soc. Soil Sci. 2013. P. 255–274.
56. Tanner L.H., Walker A.E., Nivison M., Smith D.L. Changes in Soil Composition and Floral Coverage on a Glacial Foreland Chronosequence in Southern Iceland // Open J. Soil Sci. 2013. V. 3. № 4. P. 191–198. <https://doi.org/10.4236/ojss.2013.34022>
57. Technogenic soils of Poland. Torun: Polish Soc. Soil Sci., 2013. 357 p.

Soil Development in the Quarries after Forest Reclamation in the Middle Taiga Subzone of the Northeast of European Russia

I. A. Likhanova^{1,*}, E. G. Kuznetsova¹, E. M. Lapteva¹, S. V. Deneva¹, and B. A. Makeev²

¹*Institute of Biology, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia*

²*Institute of Geology, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, 167982 Russia*

*e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

The research was conducted in the European northeast of Russia (Komi Republic), in reclaimed quarries for mining construction sand in the middle taiga subzone, two decades after the application of forest reclamation methods. We revealed the features of initial pedogenesis on substrates of different textures. On the sandy and loamy sandy substrates, the dynamic series of soils is represented by abralite (0-moment) → residual-calcareous humus psammozem (11th year) → raw-humified residual-calcareous gleyic psammozem (18th year). On the loamy substrate, the following soil series is formed: abralite → humic residual-calcareous pelozem (3rd and 11th years) → raw-humified residual-calcareous eluviated gleyic pelozem (18th year). The formation of litter and humus-accumulative horizons are the leading processes of soil formation. Their intensity is determined by the degree of development of the plant community. By the end of the second decade, humus-accumulative horizon (0–20 cm) of sandy loamy soils contains up to 2.7 Mg ha⁻¹ of organic carbon. Loamy soils contain up to 6.3 Mg ha⁻¹ of organic carbon. The stocks of soil nitrogen reach 0.1 and 0.4 Mg ha⁻¹, respectively. The rate of organic carbon accumulation in the soil reaches 0.16 (sandy and loamy substrates) and 0.37 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ (loamy substrates). The organic matter of humus-accumulative horizons in the young soils of quarries is characterized by a higher content of water-soluble and labile components of humus and a low degree of condensation of humic acids compared to the background soils. Initial pedogenesis on the quarry substrates is characterized by an increase in the acidity of soil water extracts from pH 8.0 in abralite to pH 6.3–6.7 in the horizon weakly developed humus (W) horizon of the psammozems and pelozems. The rate of acidification in loamy soils is lower than in sandy and loamy sandy soils. Carbonate leaching is confirmed by the absence of calcite and dolomite in the mineralogical composition of the upper W horizons of the forming soils, a decrease in the total content of calcium oxide from about 4% in abralite to 2–3% in the W horizon and in the content of calcium carbonates (3 and <0.5%, respectively). After 18 years, slightly expressed features of eluviation, illuviation, and gleyzation appeared in the soil profiles.

Keywords: initial soil development, quarries, middle taiga, northeast of European Russia, Albic Podzols, Albic Retisols, Regosols, Arenosols