

Первичное почвообразование на субстратах разного гранулометрического состава в посттехногенных экосистемах таёжной зоны

© 2024. И. А. Лиханова, к. б. н., н. с., Е. Г. Кузнецова, к. б. н., н. с.,
Ю. В. Холопов, к. б. н., н. с., С. В. Денева, к. б. н., н. с.,
Е. М. Лаптева, к. б. н., зав. отд. почвоведения,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

Изучена специфика начального почвообразования в автоморфных условиях средней тайги европейского северо-востока России (Республика Коми) на посттехногенных территориях (карьеры по добыче полезных ископаемых – строительного песка) с разным составом субстрата (древнеаллювиальные пески; флювиогляциальные пески и супеси, моренные суглинки). Показано, что процессы почвообразования и развития растительного покрова на карьерах взаимосвязаны и определяются свойствами почвообразующих пород. В ряду изменения свойств субстрата от песчаного к суглинистому карьере увеличиваются биометрические показатели основных древостоев; в напочвенном покрове доминирование от лишайников переходит к мхам, а затем к травам. Темпы биогенной аккумуляции органического вещества ускоряются с утяжелением гранулометрического состава субстратов. В автоморфных условиях скорость накопления $C_{орг.}$ в почве песчаного карьера под разреженным формирующимся сосняком лишайниковым достигала 0,1, песчано-супесчаного под молодым сосняком разнотравно-моховым – 0,3, суглинистого под молодым сосняком злаково-разнотравным – 0,6 т/га/год. Во всех почвах уже в первые десятилетия сукцессии отмечены слабовыраженные процессы элювиирования и иллювиирования (начало подзолообразования), о чём свидетельствуют морфологические признаки (появление отбеленных кварцевых зёрен и белесоватости под органоминеральным горизонтом и в его нижней части), перераспределение соединений кремния, железа и алюминия, а также доли илстых частиц.

Ключевые слова: средняя тайга, карьеры, первичное почвообразование, почвенный углерод, подзолообразование.

Primary pedogenesis on different texture substrates in post-technogenic ecosystems of the taiga zone

© 2024. I. A. Likhanova ORCID: 0000-0001-8781-4768*
E. G. Kuznetsova ORCID: 0000-0002-9212-4056*, Yu. V. Kholopov ORCID: 0000-0002-5725-746X*
S. V. Deneva ORCID: 0000-0002-1813-7799*, E. M. Lapteva ORCID: 0000-0002-9396-7979*
Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

The paper focuses on the primary soil formation under automorphic conditions in the middle taiga sub-zone of the European North-East of Russia (Komi Republic) on the post-technogenic territories (quarries for the extraction of minerals (construction sand)) with different soil materials (ancient alluvial sands; fluvioglacial sands and sandy loams, moraine loams). In the quarries, the processes of soil formation and vegetation cover development are interdependent and are affected by the properties of soil-forming rocks. Along with the improvement of soil properties (from sandy loam to loam), the biometric parameters of pine stands increase; in the ground cover, dominating lichens are replaced by mosses, and then by grasses. The biogenic accumulation rates of organic matter increase along with the transition of soil material to fine-textured. In automorphic conditions, the accumulation rate of $C_{org.}$ in soil of sandy quarry under sparse young lichen pine forest reaches 0.1, in sandy loam under young forb-moss pine forest – 0.3, in loam under young grass-forb pine forest – 0.6 t/ha/year. Already in the first succession decades, every study soil demonstrates weakly expressed processes of eluviation and illuviation (the beginning of podzolization). These processes are evidenced by morphological signs (the appearance of bleached quartz grains and whitish patches under organic horizon and in its lower part), redistribution of silicon, iron, and aluminum compounds, as well as of silty particles proportion.

Keywords: middle taiga, quarries, primary soil formation, soil carbon, podzol formation.

Разработка месторождений полезных ископаемых карьерным способом приводит к значительным негативным воздействиям на природные экосистемы, прежде всего уничтожению почвенно-растительного покрова. Формирующиеся на территории карьеров в процессе восстановления посттехногенных экосистем почвы как при самозарастании, так и после проведения рекультивации представляют собой одну из наиболее распространённых групп антропогенных почв. Они привлекают внимание многих исследователей, так как позволяют изучать развитие почв в первые десятилетия сукцессии [1]. Установлено, что основные процессы, определяющие формирование профиля «молодых» почв, – это биогенная аккумуляция и трансформация органического вещества [1–4]. Специфика почвенного органического вещества на разных стадиях сукцессии во многом определяется видовым составом и структурой растительного сообщества [4–7]. Существенное влияние на почвообразование оказывают особенности состава материнских пород [8]. В процессе лесовосстановления изменения химических и морфологических свойств почв, свидетельствующие о развитии подзолообразования, могут наблюдаться, по одним данным – через несколько десятков [9], по другим – через несколько сотен лет [10]. Исследования формирования почв на карьерах разного типа позволяют получать фактический материал о скорости и направленности почвообразования в различных условиях.

Цель работы – выявить особенности почвообразования на карьерах после добычи полезных ископаемых (строительного песка) в процессе восстановления лесных экосистем в зависимости от свойств почвообразующих пород в биоклиматических условиях средней тайги европейского северо-востока России.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в подзоне средней тайги на карьерах, расположенных в окрестностях г. Сыктывкара. Район характеризуется умеренно холодным климатом со среднегодовой температурой воздуха $+0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; сумма температур выше $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $1454\text{ }^{\circ}\text{C}$ при продолжительности периода активной вегетации 100 дней. Количество осадков за год 560 мм. Согласно почвенно-географическому районированию [11], участок исследований относится к Луза-Сысольскому округу подзолистых и болотно-

подзолистых почв подзоны средней тайги. По ботанико-географическому районированию [12], территория приурочена к полосе среднетаёжных лесов Кольско-Печорской подпровинции Североевропейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойно-лесной) области.

Объектами исследования послужили карьеры с разными по гранулометрическому составу субстратами: древнеаллювиальные пески (карьер «Язель»); флювиогляциальные пески и супеси (карьер «Даса»), моренные суглинки (карьер «Важелью»). В качестве фоновых выбраны участки с ненарушенным почвенно-растительным покровом в окрестностях карьеров. Почвы на фоновых участках: вблизи карьера «Язель» под сосняком лишайниковым – подзол иллювиально-железистый, карьера «Даса» под сосняком бруснично-зеленомошным – подзол иллювиально-железистый, карьера «Важелью» под еловым травяно-чернично-зеленомошным лесом – подзолистая грубогумусовая потёчногумусовая. На карьере «Язель» ($61^{\circ}57'37''$ с.ш., $50^{\circ}36'20''$ в.д.) за период около 50 лет в процессе самозарастания в дренированных условиях сформировался молодой сосняк лишайниковый. Площадь карьера 8 га. На территории карьеров «Даса» ($61^{\circ}43'55''$ с.ш., $50^{\circ}38'31''$ в.д.) и «Важелью» ($61^{\circ}38'43''$ с.ш., $50^{\circ}40'40''$ в.д.) около 20 лет назад была проведена биологическая рекультивация с использованием 2-летних сеянцев сосны (*Pinus sylvestris*). Посадка лесных культур проводилась без внесения удобрений и посева трав. Площадь карьера «Даса» – 5,8 га, «Важелью» – 5 га. Густота посадки на карьере «Даса» – 4 тыс. шт./га, на карьере «Важелью» – 5 тыс. шт./га. Ширина междурядий составила 2,5–3 м.

В период 2018–2021 гг. были выполнены геоботанические описания, проведено морфологическое описание почвенных разрезов. Гранулометрический состав определяли по Качинскому [13], pH водной суспензии потенциметрически (ГОСТ 26423-85); содержание карбонатов – объёмно-метрическим методом (ISO 10693). Содержание общего азота оценивали методом газовой хроматографии на элементном CHNS-O анализаторе EA 1110 (Carlo Erba, Италия). Для определения элементного (валового) состава использовали приближённо-количественный метод на рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (Shimadzu, Япония). Содержание органического углерода определяли по Тюрину с фотометрическим окончанием [14].

Расчёт запасов элементов (Q) в отдельных горизонтах (слоях) почв проводили с учётом 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 (слоёв). Для диагностики и идентификации почв использовали «Полевой определитель почв России» [15].

Результаты и обсуждение

Техногенно-поверхностные образования (абралиты) днищ карьера «Язель» имеют песчаный состав с преобладанием фракции мелкого ($\sim 80\%$) и крупного ($\sim 15\%$) песка, карьера «Даса» – песчано-супесчаный (доля фракции мелкого песка $\sim 80\%$); карьера «Важелью» – суглинистый (фракции мелкого песка составляют 28–38%, ила – 19–28% и крупной пыли – 14–25%) (рис. 1).

Абралиты карьера «Язель» характеризуются кислой реакцией среды (рН около 6). Реакция среды пород карьеров «Даса» и «Важелью» – слабощелочная (рН около 8) из-за присутствия карбонатов (2–3%). Для абралитов карьеров «Язель», «Даса», «Важелью» характерно низкое содержание органического углерода (0,1; 0,2; 0,3% соответственно) и азота (0,001; 0,02; 0,03%). Распределение кислотности и элементов равномерное по профилю.

Посадка сосны на территории карьеров «Даса» и «Важелью» обусловила ускоренное формирование древостоя. К концу наблю-

дений в ряду от песчаного к супесчаному и суглинистому карьерам увеличиваются биометрические показатели деревьев, формирующих древостой. В мелком подросте песчаного и песчано-супесчаного карьера преобладает сосна, суглинистого – берёза и ель. В нижних ярусах растительных сообществ песчаного карьера преобладают раннесукцессионные лишайники, супесчаного – пионерные мхи, суглинистого – луговые и опушечные травы (табл. 1).

На песчаном субстрате карьера «Язель» в ходе сукцессии изменение субстрата в основном наблюдается в верхних 10–12 см в связи с постепенным обособлением горизонта лесной подстилки и гумусово-слаборазвитого слоя. Подстилку мощностью до нескольких миллиметров образует опад из хвои, листьев, отмерших остатков лишайников. Под подстилкой выделяется органо-минеральный горизонт: в верхней части тёмно-серый за счёт окрашивания гумусом, в нижней – белесоватый. Минеральная часть профиля дифференцирована слабо. На глубине 43–70 см субстрат более увлажнён по сравнению с верхней частью и здесь чётко выражены редкие ржавые пятна и стяжения. Строение профиля: $W1(0-0,2) - W2(0,2-2) - We(2-10) - C^{\cdot\cdot}(10-40) - C^{\cdot}g(40-70 \text{ см})$. Почва: псаммозём гумусовый оподзоленный глееватый (Arenosols (Nechic, Stagnic)).

На территории песчано-супесчаного карьера «Даса» на 18-й год сукцессии около 80% поверхности покрыто сосновой хвоей. В профиле почвы под подстилкой образуется подгоризонт We с признаками оподзоливания

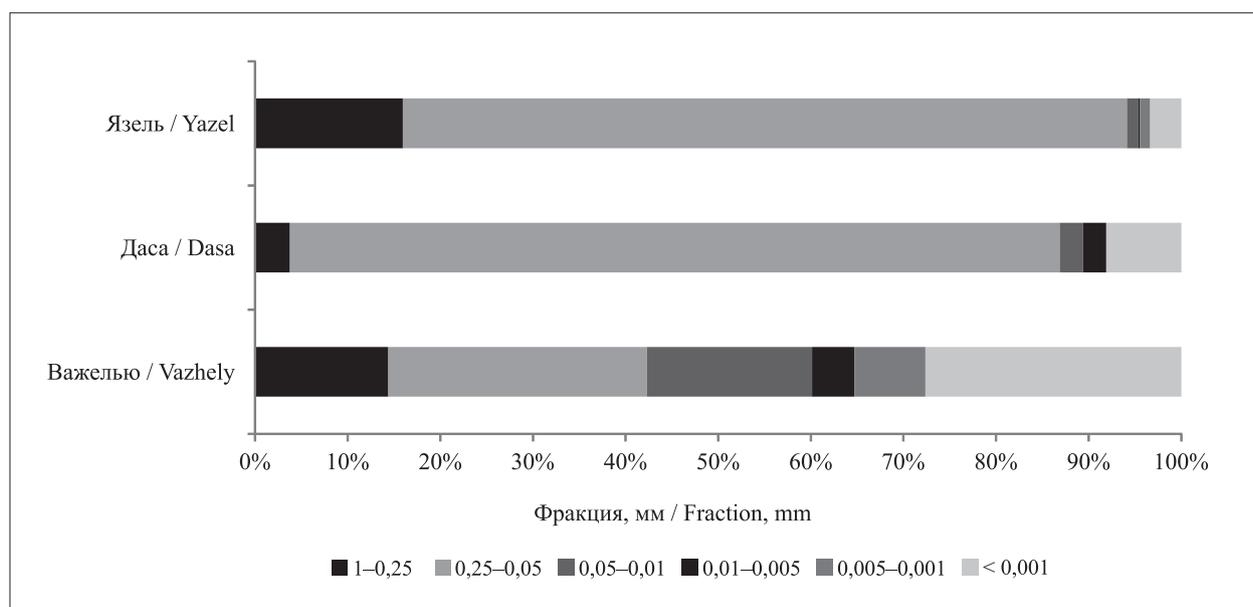


Рис. 1. Гранулометрический состав техногенно-поверхностных образований на территории карьеров
Fig. 1. Soil texture of the technogenic surface formations of quarries

Таблица 1 / Table 1

Некоторые характеристики растительных сообществ карьеров и фоновых участков
Some characteristics of plant communities of quarries and background plots

Участок Plot	Характеристика древостоя Stand characteristics					Проективное покрытие яруса, % / преобладающие виды Projective cover of layer, % / dominant species	
	Состав Compo- sition	Сомкну- тость крон Canopy density	Густота, тыс. шт./га Density, thousand pieces/ha	Высота, м Height, m	Диаметр, см Diameter, cm	Травяно- кустарнич- ковый Herb-shrub	Мохово- лишай- никовый Moss- lichen
Фоновые участки в окрестностях карьеров / Background plots in the vicinity of quarries							
«Язель» (фон) Yazel (back- ground)	10С	0,5	1,4	12	12	5 / <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Festuca ovina</i> , <i>Antennaria dioica</i>	70 / <i>Cladonia arbuscula</i> , <i>C. rangiferina</i> , <i>C. stellaris</i>
«Даса» (фон) Dasa (back- ground)	10С	0,6	0,9	22	20	40 / <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i>	95 / <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i> , <i>Dicranum sp.</i>
«Важелью» (фон) Vazhely (back- ground)	6ЕЗП10с	0,6	0,8	22	22	60 / <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Rubus saxatilis</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i>	30 / <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i>
Участки на территории карьеров / Plots on the territory of quarries							
«Язель» (песчаный) Yazel (sand)	10С	<0,1	0,55	2,7	4,9	1 / <i>Festuca ovina</i>	80 / <i>Cladonia mitis</i>
«Даса» (песчано- супесчаный) Dasa (sand- and-sandy loam)	10С	0,4	2,9	5	6	20 / <i>Agrostis tenuis</i> , <i>Calamagrostis epigejos</i> , <i>Chamaenerion angustifolium</i> , <i>Hieracium umbellatum</i>	40 / <i>Ceratodon purpureus</i> , <i>Pohlia nutans</i> , <i>Polytrichum juniperinum</i> , <i>P. piliferum</i>
«Важелью» (сугли- нистый) Vazhely (loam)	10С	0,5	2,3	7	8	85 / <i>Chamaenerion angustifolium</i> , <i>Equisetum sylvaticum</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i>	10 / <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i>

(присутствуют белесоватые пятна на общем тёмно-сером фоне). На глубине 10 см и ниже в профиле почвы появляются сизовато-серые и охристые пятна, свидетельствующие о протекании здесь глеевых процессов. Строение профиля: W_{а0}(0–2)–W_{1e}(2–3)–W_{2e}(3–5)–

С₁са(5–10)–С₂са,g(10–55 см). Почва: псаммозём гумусовый грубогумусированный оподзоленный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Arenosol (Nechic, Stagnic)).

На суглинистом карьере «Важелью» на 18-й год сукцессии в междурыдье подстилка

представлена остатками трав, в меньшей мере мхов и хвоей разной степени разложения. Под кроной сосны травостой изрежен, поверхность покрыта хвоей сосны, что обусловило появление грубогумусированного горизонта Wao. Под подстилкой формируется подгоризонт Wel с признаками элювирования (наличие осветлённых минеральных зёрен). В минеральной толще профиля (20–50 см) имеются ржаво-охристые и сизые пятна, что свидетельствует о неустойчивом характере окислительно-восстановительных условий. В междурадьё выражен сильнее дерновый процесс, под сосной – признаки элювирования. Строение профиля: Wao(0–1,5)–W1el(1,5–2)–W2el(2–4)–C=ca, g(4–10)–C=ca, g(10–40 см). Почва: пелозём гумусовый грубогумусированный элювированный остаточно-карбонатный глееватый (Calcaric Regosol (Relocatic, Stagnic)).

Во втором десятилетии значения pH водных вытяжек значительно уменьшаются в верхней части профиля почв карьеров. Максимальные величины кислотности приурочены к горизонту W. На 18-й год сукцессии на карьере «Даса» pH_{H_2O} в данном горизонте снижается до 6,3, на карьере «Важелью» – до 6,7 при pH_{H_2O} в почвообразующих породах 7,8–8,1. На карьере «Язель» исходный субстрат характеризовался слабокислой реакцией водного раствора (pH_{H_2O} – 6,1–6,3). В пятом десятилетии сукцессии в горизонте W pH_{H_2O}

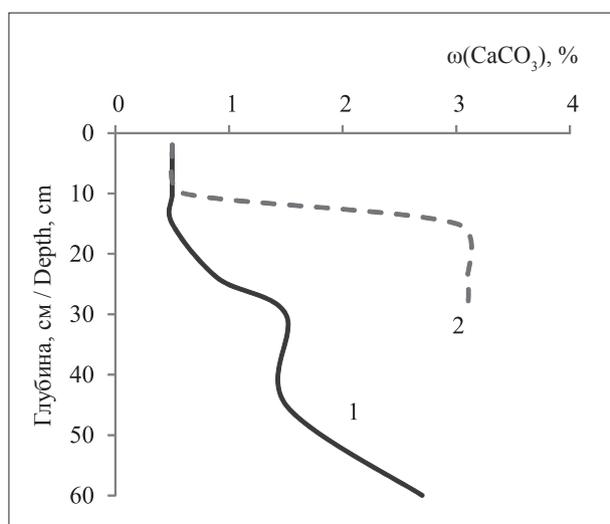


Рис. 2. Распределение карбоната кальция ($CaCO_3$) в верхней части профиля почв, формирующихся на песчано-супесчаном субстрате (1, «Даса») и суглинистом (2, «Важелью») на 18-й год наблюдений

Fig. 2. Calcium carbonate ($CaCO_3$) distribution of in the upper part of soil profile formed on sand-and-sandy loam (1, “Dasa”) and loam (2, “Vazhely”) at the 18th observation year

снизился до 4,8. Процесс подкисления почв связан с формированием органических кислот в результате разложения растительной морт-массы, а также, в случае карьеров «Даса» и «Важелью», с выщелачиванием карбонатов из верхних горизонтов молодых почв (рис. 2). Карбонатность почв снижает темпы подкисления почвенного профиля, что отмечено и в работе [2]. Почвы фоновых участков вблизи всех трёх карьеров характеризуются кислой реакцией (pH_{H_2O} – 4,0–5,7).

В почвах фоновых участков выражен элювиально-иллювиальный характер распределения илестых частиц и валовых форм соединений алюминия и железа. В молодых почвах в верхней части профиля отмечено некоторое уменьшение валового содержания Al и Fe на фоне увеличения содержания Si. Подтверждает начало подзолообразования в почвах карьеров характер распределения илестых частиц по профилю (рис. 3). Причём на карьере «Язель» мощность подгоризонта с выраженными признаками оподзоливания выше, чем на карьерах «Даса» и «Важелью», что, по-видимому, связано с большей длительностью процесса формирования почв. Таким образом, наши исследования подтверждают выводы Е.В. Абакумова и др. [9] о формировании подзолистого горизонта уже в первые десятилетия сукцессионного процесса.

В почвах карьеров в соответствии с дифференциацией горизонтов W на грубогумусовую и гумусо-аккумулятивную части количества $C_{орг.}$ и $N_{общ.}$ в них приближаются к таковым в органических горизонтах фоновых почв, но ещё не достигают их значений. Вниз по профилю отношение C/N во всех почвах закономерно уменьшается.

В ходе сукцессии идёт накопление $C_{орг.}$ в почвах карьеров. Запасы $C_{орг.}$ в формирующихся почвах в 2–4 раза меньше по сравнению с фоновыми подзолистыми почвами (рис. 4). В автоморфных условиях скорость накопления $C_{орг.}$ в почве песчаного карьера составляла 0,1, песчано-супесчаного – 0,3, суглинистого – до 0,6 т/га/год. Более быстрые темпы накопления органического углерода в почвах, формирующихся на суглинистых породах, по сравнению с песчано-супесчаными и песчаными связаны с лучшим развитием растительного покрова, обусловленным, в свою очередь, более высоким содержанием в почвообразующей породе глинистых частиц. Близки к полученным характеристикам данные по скорости накопления $C_{орг.}$ (0,2–0,3 т/га/год) в почвах начальных этапов развития

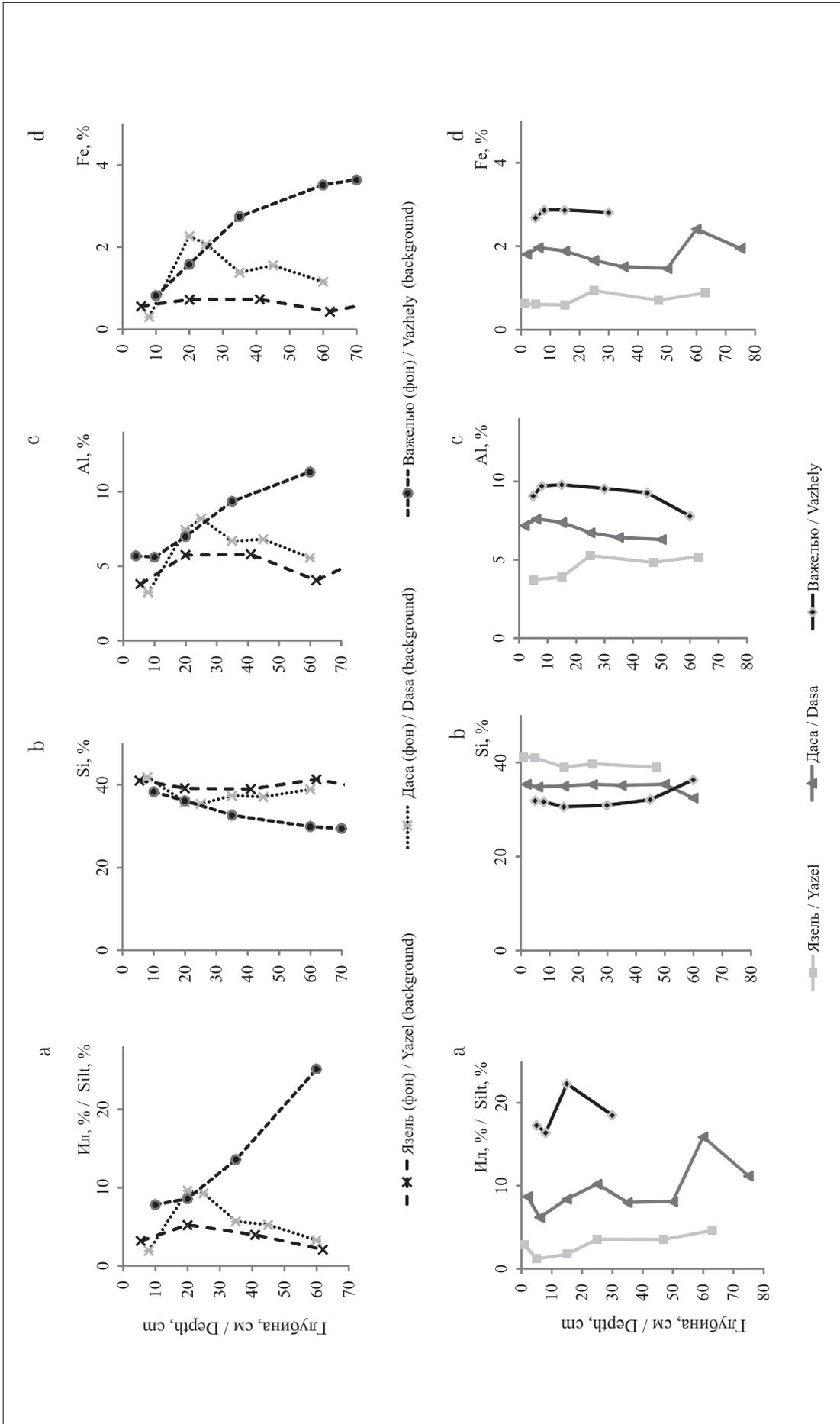


Рис. 3. Профильное распределение илстых частиц (а), валового содержания Si (b), Al (c) и Fe (d) в почвах фоновых участков (верхний ряд) и карьеров (нижний ряд)
Fig. 3. The distribution of silt particles (a) and Si (b), Al (c), and Fe (d) total content in soil profile of the background plots (upper row) and quarries (lower row)

Таблица 2 / Table 2

Содержание углерода и азота и отношение C/N в профилях фоновых и молодых почв
Carbon and nitrogen content and C/N ratio in the background and young soil profiles

Горизонт, глубина, см Horizon, depth, cm	C, %	N, %	C/N	Горизонт, глубина, см Horizon, depth, cm	C, %	N, %	C/N	Горизонт, глубина, см Horizon, depth, cm	C, %	N, %	C/N
Фоновый сосняк лишайниковый Lichen pine forest Подзол иллювиально-железистый Iron-illuvial podzol				Фоновый сосняк бруснично-зеленомошный / Background redberry green-moss pine forest Подзол иллювиально-железистый Iron-illuvial podzol				Фоновый еловый травяно-чернично-зеленомошный лес Background herb-bilberry green-moss pine-spruce forest Почва подзолистая грубогумусовая потёчногумусовая Coarse-humus humic-infiltrated podzolic soil			
O 0–2	36,6	0,864	42,4	O 0–5	42,6	1,100	38,7	Oao 0–8	35,7	1,630	21,9
E 2–11	0,73	0,024	30,4	Eh 5–6	17,0	0,380	44,7	ELh 8–10	0,75	0,051	14,7
BF 11–30	0,42	0,023	18,0	E 6–10(18)	0,25	0,022	11,4	EL 10–17	0,43	0,043	10,0
Bg 30–52	0,06	0,006	10,0	BHF 10–23	0,42	0,036	11,7	BEL 17–25	0,30	0,031	9,7
BC 52–100	0,03	0,003	10,0	BHF 23–31	0,26	0,023	11,3	BT 25–40	0,22	0,033	6,7
Карьер «Язель» (песчаный) Yazel quarry (sand) Псаммозём гумусовый Podzolized gleyic humus psammozem				Карьер «Даса» (песчано-супесчаный) / Dasa quarry (sand-and-sandy loam) Псаммозём гумусовый Podzolized gleyic humus psammozem				Карьер «Важелью» (суглинистый) Vazhely quarry (loam) Пелозём гумусовый / Podzolized gleyic humus pelozem			
W1 0–0,2	24,6	0,467	52,7	Wao 0–2	15,2	0,55	27,6	Wao 0–1,5	18,0	0,70	25,7
W2 0,2–2	0,66	0,023	28,6	W1e 2–3	0,67	0,054	12,4	W1el 1,5–2	5,58	0,310	18,0
We 2–10	0,12	0,007	17,1	W2e 3–5	0,18	0,013	13,9	W2el 2–4	1,00	0,076	13,2
C ^h 10–40	0,04	0,002	20,0	C ^h ca 5–10	0,18	0,019	9,5	C ^h ca 4–10	0,49	0,047	10,4
C ^g 40–70	0,03	0,003	10,0	C ^h ca, g 10–20	0,10	0,014	7,1	C ^h ca, g 10–22	0,24	0,029	8,3

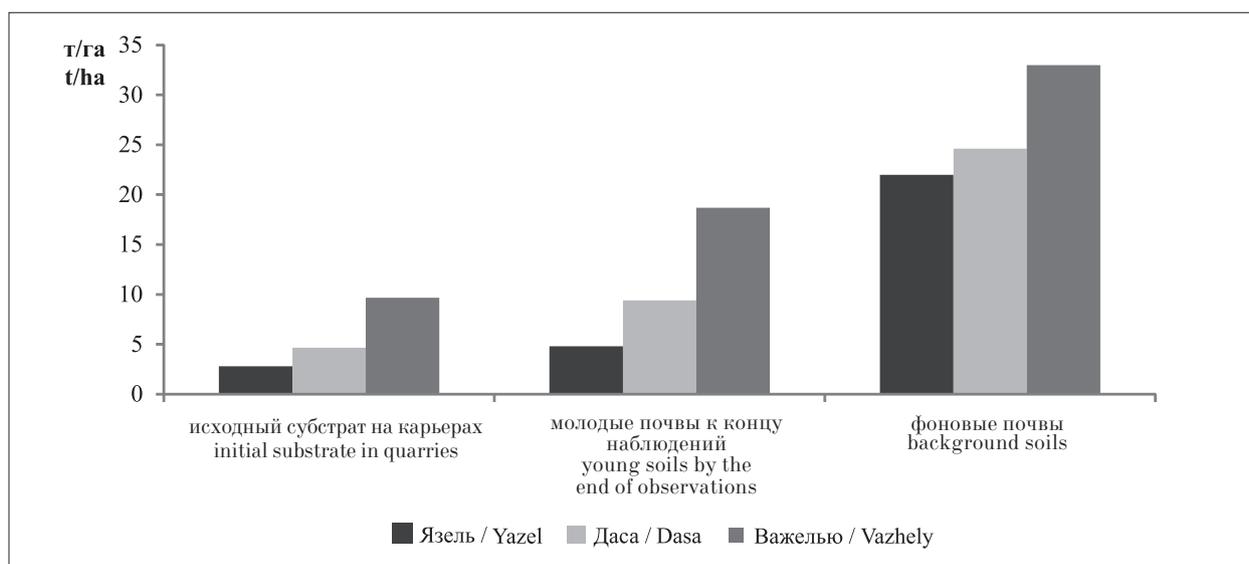


Рис. 4. Динамика запасов органического углерода в верхнем двадцатисантиметровом почвенном слое
Fig. 4. The organic carbon reserve dynamics in the upper 20-cm soil layer

на песчаных карьерах северо-запада России [1] и на промышленных отвалах в таёжной зоне Урала [2]. В более благоприятных биоклиматических условиях Польши скорость накопления углерода на отвалах и карьерах в районах добычи полезных ископаемых колеблется в пределах от 0,7 до 5,3 т/га/год [16].

Заключение

Процессы начального почвообразования и развития растительного покрова взаимосвязаны и взаимообусловлены и в значительной степени определяются свойствами почвообразующих пород. В ряду улучшения свойств субстрата (от песчаного к суглинистому карьере) увеличиваются биометрические показатели сосновых древостоев; в напочвенном покрове доминирование от лишайников переходит к мхам, а затем к травам.

Скорости накопления органического углерода возрастают в ряду увеличения содержания илстой фракции в почвообразующих породах. Скорость накопления $C_{\text{орг}}$ в почве песчаного карьера составила (т/га/год): 0,1, песчано-супесчаного – 0,3, суглинистого – 0,6.

В почвах, формирующихся в дренированных условиях на различных по гранулометрическому составу субстратах, уже в первые десятилетия сукцессии выражены процессы элювиирования и иллювиирования (начало подзолообразования), о чём свидетельствуют морфологические признаки, перераспределение соединений кремния, железа и алюминия, а также доли илстых частиц. С увеличением длительности сукцессии эти признаки выражены заметнее.

Процессы первичного почвообразования идут в соответствии с климатическими условиями таёжной зоны. Основные характеристики молодых почв, формирующихся на карьерах, стремятся к свойствам почв фоновых участков, но за период исследования не достигают их. Как правило, основные параметры молодых почв существенно ниже аналогичных показателей фоновых почв.

Работа выполнена в рамках темы НИР отдела почвоведения на 2022–2024 гг. «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов», регистрационный номер: 122040600023-8.

Литература

1. Абакумов Е.В., Гагарина Э.И. Почвообразование в посттехногенных экосистемах карьеров на Северо-Западе Русской равнины. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2006. 208 с.
2. Махонина Г.И. Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2003. 356 с.
3. Macdonald S.E., Landhäusser 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. No. 46. P. 703–732. doi: 10.1007/s11056-015-9506-4
4. Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г., Лиханова И.А., Панюков А.Н., Хабибуллина Ф.М., Виноградова Ю.А. Формирование лесных экосистем на посттехногенных территориях в таёжной зоне / Под ред. И.Б. Арчеговой. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2015. 140 с.
5. Olson J.S. Rates of succession and soil changes on Southern Lake Michigan sand dunes // *Botanical Gazette*. 1958. V. 119. No. 3. P. 125–130. doi: 10.1086/335973
6. 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. No. 1–2. P. 203–214. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.05.001
7. Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г., Хабибуллина Ф.М., Панюков А.Н. Особенности изменения почв и растительности в процессе самовосстановительной сукцессии в подзоне средней тайги // *Теоретическая и прикладная экология*. 2010. № 4. С. 32–39. doi: 10.25750/1995-4301-2010-4-032-039
8. Середина В.П., Двуреченский В.Г., Пронина И.А., Акинина А.Н. Вещественный состав эмбриозёмов, формирующихся на отвалах железорудных месторождений юга Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2017. № 40. С. 25–43. doi: 10.17223/19988591/40/2
9. Abakumov E., Trubetskoj O., Demin D., Celi L., Cerli C., Trubetskaya O. Humic acid characteristics in podzol soil chronosequence // *Chemistry and Ecology*. 2010. V. 26. No. 2. P. 59–66. doi: 10.1080/02757540.2010.497758
10. Mokma D.L., Yli-Halla M., Lindqvist K. Podzol formation in sandy soils of Finland // *Geoderma*. 2004. V. 120. No. 3–4. P. 259–272. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.09.008
11. 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 (на песчаных почвообразующих породах)*. Л.: Наука, 1981. С. 118–152.
12. Растительность Европейской части СССР / под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1980. 429 с.

13. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

14. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

15. Полевой определитель почв России / Зав. ред.-изд. группой К.Т. Острикова. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.

16. Pietrzykowski M., Krzaklewski W. Potential for carbon sequestration in reclaimed mine soil on reforested surface mining areas in Poland // *Natural Science*. 2010. V. 2. No. 9. P. 1015–1021. doi: 10.4236/ns.2010.29124

References

1. Abakumov E.V., Gagarina E.I. Soil formation in post-mining ecosystems on the North-West of the Russian Plain. Sankt-Peterburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2006. 208 p. (in Russian).

2. Mahonina G.I. Ecological aspects of soil formation in technogenic ecosystems of the Urals. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2003. 356 p. (in Russian).

3. Macdonald S.E., Landh usser 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. No. 46. P. 703–732. doi: 10.1007/s11056-015-9506-4

4. Archegova I.B., Kuznecova E.G., Likhanova I.A., Panyukov A.N., Habibullina F.M., Vinogradova Yu.A. Formation of forest ecosystems in post-technological territories in the taiga zone / Ed. I.B. Archegova. Syktyvkar: Komi SC UB RAS, 2015. 140 p. (in Russian).

5. Olson J.S. Rates of succession and soil changes on Southern Lake Michigan sand dunes // *Botanical Gazette*. 1958. V. 119. No. 3. P. 125–130. doi: 10.1086/335973

6. 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. No. 1–2. P. 203–214. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.05.001

7. Archegova I.B., Kuznecova E.G., Habibullina F.M., Panyukov A.N. Changes of soil and vegetation state in the process of self-remediation succession in middle taiga sub-zone // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 4. P. 32–39 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-4-032-039

8. Seredina V.P., Dvurechenskiy V.G., Pronina I.A., Akinina A.N. Material composition of embriozems developing on dumps of iron ore deposits in the south of Western Siberia // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017. No. 40. P. 25–43 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/40/2

9. Abakumov E., Trubetskoj O., Demin D., Celi L., Cerli C., Trubetskaya O. Humic acid characteristics in podzol soil chronosequence // *Chemistry and Ecology*. 2010. V. 26. No. 2. P. 59–66. doi: 10.1080/02757540.2010.497758

10. Mokma D.L., Yli-Halla M., Lindqvist K. Podzol formation in sandy soils of Finland // *Geoderma*. 2004. V. 120. No. 3–4. P. 259–272. doi: 10.1016/j.geoderma.2003.09.008

11. Rudneva E.N., Zaboeva I.V., Urusevskaja I.S. Soil-geographical zoning of the central and eastern parts of the European territory of the USSR // *Podzolic soils of the central and eastern parts of the European USSR (on sandy soil-forming rocks)*. Leningrad: Nauka, 1981. P. 118–152 (in Russian).

12. *Vegetation of the European part of the USSR* / Eds. S.A. Gribova, T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russian).

13. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical soil properties. Moskva: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).

14. *Theory and practice of chemical analysis of soils* / Ed. L.A. Vorobyova. Moskva: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).

15. *Field guide on soils of Russia* / Ed. K.T. Ostriкова. Moskva: Soil Dokuchaev Inst., 2008. 182 p. (in Russian).

16. Pietrzykowski M., Krzaklewski W. Potential for carbon sequestration in reclaimed mine soil on reforested surface mining areas in Poland // *Natural Science*. 2010. V. 2. No. 9. P. 1015–1021. doi: 10.4236/ns.2010.29124