

**ЭКОЛОГИЯ
ECOLOGY**

УДК 631.483+631.487

Ф. Н. Лисецкий

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород, Россия
E-mail: liset@bsu.edu.ru

**УГЛЕРОДОДЕПОНИРУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭМБРИОНАЛЬНЫХ ПОЧВ
НА ВСКРЫШНЫХ ПОРОДАХ СТАРООСКОЛЬСКОГО
ЖЕЛЕЗОРУДНОГО РАЙОНА**

Сложившийся дисбаланс между площадями нарушенных земель вследствие железорудного производства в зоне Курской магнитной аномалии и рекультивированных земель в посттехногенных геосистемах может быть частично преодолен, если использовать имеющийся территориальный базис для реализации климатических проектов, нацеленных, в частности, на получение их верифицированных результатов (углеродных единиц). Изучены особенности формирования разновозрастных эмбриональных почв и установлены различия в депонировании ими органического углерода, которые обусловлены мозаикой субстратно-фитоценологических условий на отвалах вскрышных пород при их самозарастании. Определены четыре основных типа экосистем, которые по результатам кластерного анализа различались по разнообразию высших растений, мощности гумусовых горизонтов, содержанию в них органического углерода, валового азота, карбонатов и железа. Установлено, что за первые 30–40 лет почвообразования потенциал депонирования органического углерода различается между контрастными типами экосистем в 1,4 раза, в первую очередь, за счёт отличий гранулометрического состава материнских пород. Полученные данные об эффективности ренатурации нарушенных земель показывают перспективность создания «карбоновых ферм» при внедрении технологий, обеспечивающих поддержание наиболее комплементарных траекторий воспроизводства почвенно-растительного покрова на горнопромышленных отвалах с максимальной эффективностью депонирования в молодых почвах органического углерода при данных биоклиматических условиях.

Ключевые слова: горные отвалы, рекультивация земель, экологическая реабилитация, восстановление почв, депонирование углерода почв.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания №FZWG-2023-0011.

Для цитирования: Лисецкий Ф. Н. Углерододепонирующий потенциал эмбриональных почв на вскрышных породах Старооскольского железорудного района // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». 2023. Т. 16. № 2. С. 59–77.

F. N. Lisetskii

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

E-mail: liset@bsu.edu.ru

CARBON-STORING POTENTIAL OF EMBRYONIC SOILS ON OVERBURDEN ROCKS OF THE STAROOSKOL IRON-ORE DISTRICT

The current imbalance between the areas of disturbed lands due to iron ore production in the zone of the Kursk Magnetic Anomaly and reclaimed lands in posttechnogenic geosystems can be partially overcome if the existing territorial basis is used to implement climate projects aimed, in particular, at obtaining their verified results (Carbon credit). Features of the formation of embryonic soils of different ages and differences in the deposition of organic carbon by them, which are due to the mosaic of substrate-phytocenotic conditions on overburden dumps during their self-overgrowing, were studied. Four main types of ecosystems, which, according to the results of cluster analysis, differed in the diversity of higher plants, the thickness of humus horizons, the content of organic carbon, gross nitrogen, carbonates and iron in them, were determined. It has been established that over the first 30–40 years of soil formation, the potential for organic carbon deposition differs between contrasting types of ecosystems by a factor of 1.4, primarily due to differences in the granulometric composition of parent rocks. The obtained data on the efficiency of renaturation of disturbed lands show the prospect of creating “carbon farms” with the introduction of technologies that ensure the maintenance of the most complementary trajectories of soil and vegetation cover reproduction on mining dumps with the maximum efficiency of organic carbon deposition in newly formed soils under given bioclimatic conditions.

Keywords: mine dumps, land reclamation, environmental rehabilitation, soil restoration, soil carbon sequestration.

Acknowledgments. *The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. FZWG-2023-0011.*

For citation: Lisetskii F. N. (2023), Carbon-storing potential of embryonic soils on overburden rocks of the Starooskol iron-ore district, *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of the Pskov State University. Series “Natural and physical and mathematical sciences”], vol. 16, no. 2, pp. 59–77. (In Russ.).

Введение. Органический углерод почв (Сорг) играет важнейшую роль в экосистемах, контролируя химические и биофизические процессы, но кроме того выполняет ряд функций и сервисов: формирование почвенной структуры, удержание питательных веществ и воды, поддержка биоразнообразия почвы и контроль выбросов парниковых газов [33]. В почвенном покрове мира депонировано порядка 2344 Гт Сорг, при этом его запасы отражают баланс между разложением органиче-

ского вещества и стабилизацией ассимилированного углерода почвенными микроорганизмами, и этот баланс может изменяться в зависимости от различных биофизических условий [34]. Почвенно-растительный покров Российской Федерации вносит глобальный вклад в секвестрацию углерода за счёт ежегодного прироста новой фитомассы, позволяющего изымать диоксид углерода из атмосферы, и в депонирование Сорг в почвах. По современным оценкам [9] верхние горизонты почв страны способны аккумулировать около 23 % глобальных запасов почвенно-органического вещества. Помимо того, что в почвах наряду с процессом гумификации происходит и минерализация органического вещества (ОВ), балансовая величина ОВ в определённых биоклиматических условиях характеризует потенциал депонирования Сорг как преграждающего механизма его возврата из почвы в атмосферу. Молодые почвы в горнопромышленных ландшафтах, как и в других типах антропогенных ландшафтов с датированным нуль-моментом [12], выступают информативными натурными моделями для изучения особенностей углерододепонирующего процесса на отдельных стадиях педогенеза в конкретных зонально-климатических условиях.

Цель исследования — провести всестороннюю оценку потенциала депонирования органического углерода почв в контексте влияния основных факторов почвообразования и эдафических условий на разновозрастных отвалах железорудного производства в Белгородском регионе Курской магнитной аномалии.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

– изучить динамику формирования гумусного состояния эмбриональных почв при самозарастании отвалов вскрышных пород от 10 до 45 лет и получить количественные оценки основных параметров этого процесса (мощности гумусовых горизонтов, содержания органического углерода и его удельной величины, обогащённости гумуса азотом);

– установить различия величин депонирования органического углерода и факторы дифференциации в типах экосистем со сформированными за первые три десятилетия эмбриональными почвами на отвалах вскрышных пород;

– определить максимальные возможности вовлечения углерода во внутрипочвенные процессы с целью его долгосрочного депонирования в условиях самозарастания отвалов для обоснования перспектив создания «карбоновых ферм» на землях, нарушенных в результате деятельности железорудного производства.

Территориальный объект исследования. Из 14 месторождений железных руд на территории Белгородской области, на которые приходится свыше 40 % всего разведанного железорудного сырья России, в пределах Оскольского рудного района находится 9 месторождений, включая Лебединское и Стойленское [7]. Вблизи Старооскольско-Губкинской агломерации основу горнопромышленных ландшафтов района составляют два крупных железорудных карьера («Лебединский» и «Стойленский»), у которых глубина достигла уже 300 м, а также многочисленные отвалы высотой от 60 до 100 м и хвостохранилища, занимающие площадь в несколько десятков квадратных километров [28]. Два крупнейших предприятия области: Лебединский ГОК в Губкинском районе и Стойленский ГОК в Старооскольском районе, ведущие работы по добыче полезных ископаемых, вносят определяющий вклад в формирование нарушенных земель. Оценки перемещения почвогрунтов в результате различных видов антропогенной деятельности на территории Белгородской области показали, что после 1945 г. суммарный объём выработки горных пород составил более 3 км³

[26]. Отвалы вскрышных пород занимают сопоставимую площадь с самими карьерами. При разработке месторождений открытым способом нарушение поверхности и последующее формирование карьерно-отвального рельефа приводит к созданию горнопромышленного ландшафта, в котором литогенная основа при самозарастании отвалов выступает новой ареной почвообразовательных процессов (рис. 1).

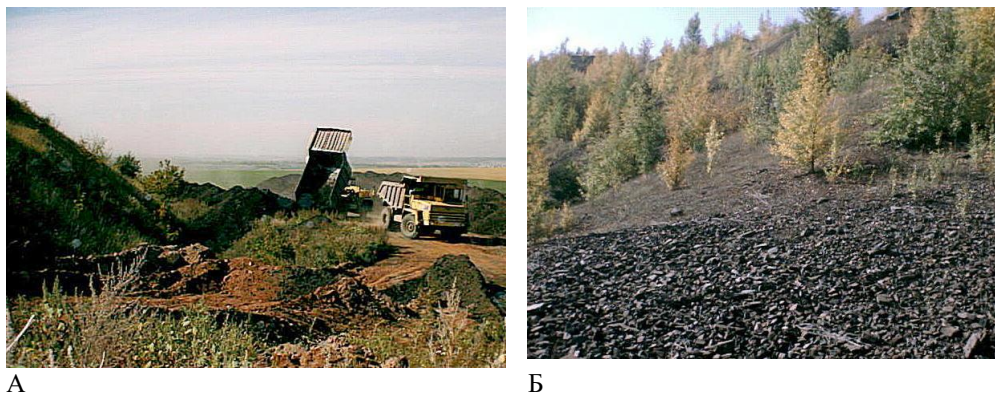


Рис. 1. Формирование горнопромышленного ландшафта (А) и самозарастание отвала вскрышных пород (Б) на территории Лебединского ГОКа

Субстраты отвалов рыхлой вскрыши стали материнскими породами молодых примитивных почв — эмбриозёмов, которые имеют органогенный слаборазвитый горизонт, т. е. они по существу являются литогенными почвами [11]. Особенности формирования почвенно-растительного покрова исследовали на территории Лебединского ГОКа: отвалы окисленных железистых кварцитов и дамбы обвалования гидроотвала «Березовый Лог», которые находятся под самозарастанием от 10 до 44 лет.

Для сравнения были привлечены данные по заповедным участкам (участок «Ямская степь» государственного биосферного заповедника «Белогорье» и «Стрелецкая степь»). Техногенные ландшафты Старооскольско-Губкинского промышленного района практически граничат с участком «Ямская степь», который находится в 8 км от г. Губкина. Фоновые почвы в «Ямской степи» — чернозём миграционно-мицеллярный мощный тяжелосуглинистый глубококарбонатный на лессовидных суглинках. Фоновая растительность — южный вариант ковыльно-разнотравно-луговой степи.

Основными методами исследования являются методы изучения почв (генетики-морфологический и химико-аналитические), методы геоботаники и статистики. Описание видового состава растительности проводили на стандартных площадках с дифференциацией по семействам, родам и видам растений. Определяли проективное покрытие ярусов (при наличии) и подстилки, высоту травостоя. Датировки эмбриональных почв получены по архивным материалам при помощи сотрудников НИИ КМА (г. Губкин). В дополнение при наличии возрастной древесной растительности применяли дендрохронологический метод датирования. Замеры мощности горизонтов у эмбриональных почв А и АВ (на рыхлых породах) А и АС (на

скальных породах) проводили в количестве, позволяющем сформировать малую выборку для расчёта абсолютной ошибки средних величин. Отбор образцов для оценки плотности сложения проводили, используя метод режущего кольца. Все данные о мощности почв из-за наличия той или степени сформированности дерновинного горизонта, а также субстратно-фитоценологических различий педогенеза были приведены к сопоставимой (равновесной) величине. Окраску почв определяли для образцов в порошкообразном виде для сухого и влажного (*dry/moist*) состояния по атласу цветов Манселла [32]. Массовую долю органического вещества (ОВ) определяли по ГОСТ 26213-91, который опирается на метод окисления органического вещества раствором $K_2Cr_2O_7$ в серной кислоте с последующим определением трёхвалентного хрома, эквивалентного содержанию органического вещества, на фотоэлектроколориметре. Содержание $С_{орг}$ рассчитано традиционным путём умножения содержания ОВ на 0,579. При этом следует заметить: исходя из принятого условия, что углерод составляет около 58 % содержания ОВ, традиционно применяется переводной коэффициент от содержания углерода ($С_{орг}$) к содержанию ОВ, равный 1,724, хотя было показано, что величина указанного коэффициента варьирует от 1,4 до 2,5 в зависимости от типа почвы [35]. Позиция эмбриональных почв в этом диапазоне пока не ясна. Для определения общего содержания азота использован метод Кьельдаля (путём озоления органического вещества почвы концентрированной серной кислотой при кипячении проведён количественный учёт образующегося азота). Качество органического вещества можно оценить по атомному отношению C:N, которое характеризует степень обогащения гумуса азотом: если $C:N < 5$, то очень высокое, если $C:N < 14$, то очень низкое [19]. Большинство гумусных горизонтов почв зонально-генетического ряда имеют высокую и среднюю степень обогащения гумуса азотом при отношении C:N порядка 5–8 и 8–10 соответственно.

Основным показателем оценки эффективности депонирования $С_{орг}$ разновозрастными эмбриональными почвами может выступать удельная величина содержания $С_{орг}$ на каждые 10 мм гумусового горизонта, что позволяет нормировать углерододепонирующую эффективность у почв, имеющих как неодинаковую мощность гумусового профиля, так и возраст. Это обусловлено тем, что после первоначальной аккумуляции ОВ в горизонте А с наибольшей концентрацией корней наблюдается перемещение гумуса вниз по профилю по мере увеличения времени педогенеза.

Содержание CO_2 карбонатов определяли объёмным (ацидиметрическим) методом, предполагающему обработку навески почвы титрованным раствором HCl . Величину рН водной вытяжки определяли согласно ГОСТ 27753.3-88. При выветривании железистых минералов образуются аморфные соединения железа, выделяемые реактивом Тамма (оксалатным буферным раствором ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O + (NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$) с рН=3).

По результатам кластерного анализа (метод Уорда, Евклидова дистанция, значения нормированы по среднеквадратическому отклонению), выполненного в программе *Statistica 10*, определяли классификационное сходство гумусовых горизонтов эмбриоземов (гор. А, АВ) по семи показателям (количество видов высших растений, мощность горизонтов А(АВ), содержание CO_2 , Fe, $С_{орг}$, Нвал., соотношение C:N), значения которых были нормированы по среднеквадратическому отклонению).

Результаты исследования. Земли, где способы биологической рекультивации не задействованы, наблюдаемое самозаращение отвалов находится под управляемым процессом воспроизводства почвенно-растительного покрова. Многолетние

исследования на разновозрастных отвалах карьеров и насыпей возле заброшенных шахт [16] показали, что в природной обстановке практически не обнаружено горных пород, за исключением сильно фитотоксичных, которые бы со временем не зарастали. При оценке эффективного плодородия техногенных комплексов наибольшее эколого-биологическое соответствие возникает на полиминеральных и полидисперсных горных породах. Так как скорости педогенеза при самозарастании невелики, то лишь через 10(12) лет и более на нарушенных землях становится доминирующей дифференциация видового состава растений, и формируется устойчивый растительный покров с ярусами и сезонной динамикой [5]. Как показали ботанические исследования отвалов рыхлой вскрыши (нерекультивированные субстраты) и старых гидроотвалов Лебединского ГОКа [1], при их самозарастании растительные сообщества не обладают устойчивой эколого-ценотической структурой по сравнению со слабонарушенными фитоценозами участка «Ямская степь» заповедника «Белогорье». Исследования динамики растительного покрова в процессе самозарастания отвалов КМА [18] показали, что по прошествии 15 лет количество видов трав и древесно-кустарниковой растительности достигло 24 и 10 семейств соответственно. По результатам наших исследований в техногенных ландшафтах Лебединского ГОКа установлено, что к 32–35 годам самозарастания отвалов насчитывается от 6 до 43 видов высших растений на стандартной площадке. При участии в самозарастании отвалов древесной растительности (*Populus tremula*, *Betula pendula*, *Salix caprea*, *Acer negundo*, *Hippophae rhamnoides*, *Elaeagnus argentea*, *Cornus sanguinea*) возраст наиболее зрелых экземпляров, который определяли дендрохронологическим методом, варьировал от 5 до 15 лет. Исследование биоты на угольных отвалах со значительным возрастом (40–100 лет) показало [31], что структура группировок водорослей становится сходной со структурой на почвах фоновых территорий и по преобладающим видам детектируется степной процесс почвообразования. На отвалах рыхлой вскрыши и особенно на гидроотвалах Лебединского ГОКа формируются травянистые сообщества с надземной продуктивностью 2–3,5 т/га сухого вещества, что способствует активному развитию дернового почвообразовательного процесса.

Эмбриональные почвы отличаются по субстратно-фитоценотическим условиям и поэтому при диапазоне возраста от 18 до 45 лет (в среднем — 36 лет) характеризуются значительным размахом величин объёмной массы в горизонте А+АВ/АС от 0,94 до 1,36 г/см³ (в среднем $\bar{X} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}$: 1,17±0,13 г/см³). Поэтому корректно провести приведение фактической мощности горизонтов А+АВ/АС (с учётом различий плотности сложения в гор. А (при его наличии) и АВ) к равновесной (сопоставимой) величине объёмной массы: для суглинистых почв — 1,15 г/см³, для супесчаных и скальных пород — 1,25 г/см³ (рис. 2). Величины средней фактической и приведённой мощности гумусового горизонта составили $\bar{X} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}$ (Min ÷ Max): 51,9±19,1 (25 ÷ 81) и 48,1±15,0 (27 ÷ 70) мм соответственно. В среднем фактическая (полевая) мощность гумусового горизонта больше приведённой на 10 %, причём после 30 лет почвообразования эти различия возрастают. Это позволяет корректно оценить среднегодовую скорость формирования гумусового горизонта, которая в данном случае составила: $\bar{X} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}$ (Min ÷ Max) = 1,41±0,36 (0,8 ÷ 2,0) мм в год.

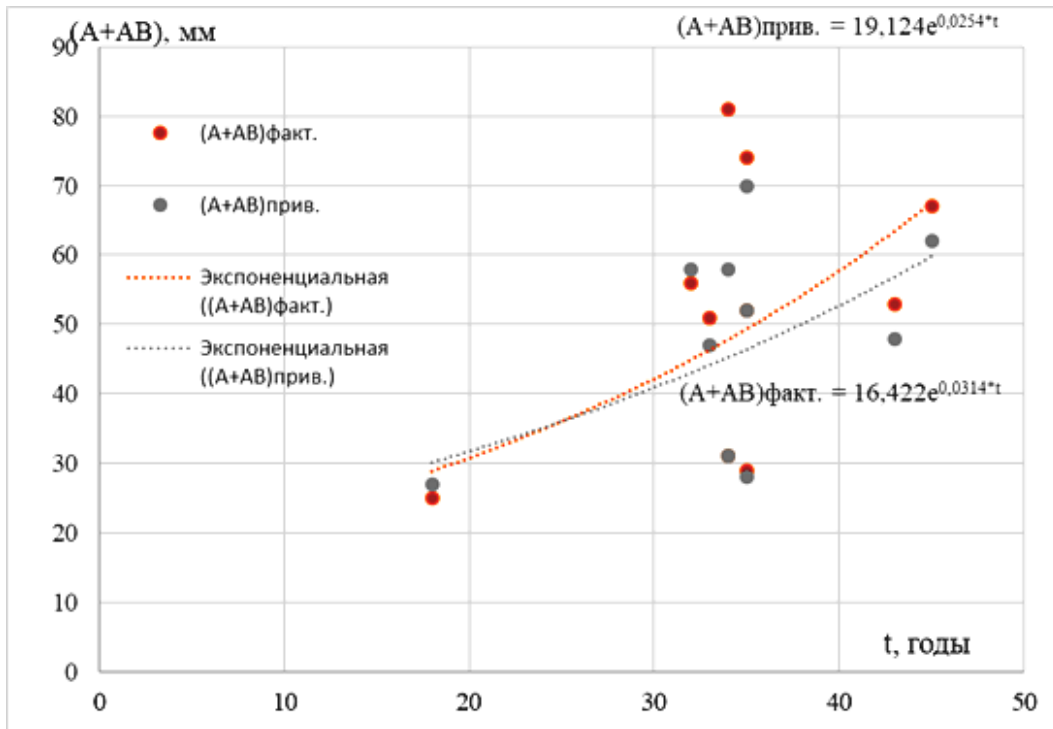


Рис. 2. Изменение фактической и приведенной мощности горизонтов А+АВ/АС эмбриональных почв во времени (t, годы)

Длительность периода биологической активности почв (ПБА), который диагностирует время с благоприятными условиями для вегетации растений и высокой активностью микробиологических и биохимических процессов, для зоны формирования чернозёмов типичных составляет 154 дня [19]. Этот параметр имеет прямое отношения и к процессам гумусообразования, так как ранее была установлена аналитическая связь ПБА с глубиной гумификации органического вещества $H \approx C_{ГК}/C_{ФК}$ [17]. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Богородицкое-Фенино составляет 6,5 °С, норма суммы осадков — 583 мм. По климатическим данным величина годовых затрат радиационной энергии на почвообразование (Q), рассчитанная по [2] для района исследований, составляет 1082 МДж/(м²·год), что соответствует среднему значению для территории ЦЧР [14]. Связь длительности периода биологической активности (ПБА, дни/год) и энергopotенциала почвообразования (Q, МДж/(м²·год)) выражается уравнением ПБА = 36,198 + 0,112*Q (r = 0,87). Таким образом, для района исследований величина показателя ПБА оценивается в 157 дней, когда температура воздуха устойчиво превышает 10°С, а запас продуктивной влаги составляет не менее 1–2 %. Климатический период, на протяжении которого происходило формирование эмбриональных почвах на отвалах, по данным метеостанции Богородицкое-Фенино характеризовался нарастанием положительных аномалий температур воздуха за летний период и увеличением продолжительности периода активной вегетации при увеличении количества осадков с 70-х гг. XX в. [27].

Специфической особенностью техногенных геосистем является большая неоднородность их литологической основы, представленной вскрышными горными породами, перемещенными в отвалы сухим способом или в виде пульпы при гидронамыве. Эти горные породы принадлежат к разным геологическим формациям (от мела и мергеля верхнемеловой системы до аллювиальных песков голоцена и лессовидных суглинков плейстоцена) и в большинстве случаев не выступают материнскими породами для природных ландшафтов. В составе вскрышных пород и отвалов эти породы обычно присутствуют в виде неоднородных (реже — однородных (на гидроотвалах)) смесей, редко — в чистом виде. В поликомпонентных техногенных смесях благоприятность их экологических свойств и потенциала для ренатурации определяется соотношением горных пород вскрыши, которые различаются по литологии, возрасту и гранулометрическому, геохимическому составу, водопроницаемостью, причём вследствие их непредсказуемого смешивания возникают техногенные субстраты с эмерджентными свойствами [3].

Важно отметить, что инициальное почвообразование на отвалах вскрышных горных пород не начинается с нуля, т. к. горные породы при наличии органического вещества обладают плодородием. На нарушенных землях горные породы среднего и тяжёлого гранулометрического состава содержат макро- и микроэлементы, необходимые для питания растений, в достаточных количествах, за исключением азота и фосфора [16]. Химические свойства семи различных типов вскрышных пород КМА (из Лебединского, Стойленского и Михайловского ГОКа) характеризуются следующими диапазонами параметров: содержание органического вещества варьирует от 0,10 до 0,44 % (лишь у глин келловей — 2,31 %), азота общего — 0,01–0,10 %, величина соотношения C:N — 8,5–13,4 [21]. Интересный феномен деградации Сорг со временем установлен для келловейских глин, когда на отвалах 5–8-летнего возраста содержание Сорг снижается в сравнении со свежей породы из карьера с 2 % до 1,4 %, что объясняется его минерализацией при резком увеличении аэрации верхнего, легко выветриваемого слоя [29]. Проведённый автором сравнительный анализ девяти типов вскрышных горных пород техногенных ландшафтов КМА показывает, что первоначально по содержанию органического вещества наиболее обеспечены лессовидные суглинки (0,4 %), им уступают серо-зелёные глины миоцена, мергели верхнемеловой системы, красно-бурые суглинки постплиоцена (от 0,15 до 0,21 %), а наименее обеспечены мел рыхлый и плотный, красно-бурые глины плиоцена, серо-зелёные супеси миоцена (0,05–0,12 %).

Почвы, находящиеся в неравновесном состоянии, быстрее воспроизводят ресурсы почвенного плодородия, согласованные с параметрами данных биоклиматических условий, включая гумусное состояние. Использование метода меченых атомов [25] показало, что на безгумусной породе процесс обновления гумусовых веществ происходит в 3–4 раза сильнее, чем в почве. Результаты моделирования [30] показали, что при исходном содержании ОВ в почве от 1 до 3,5 % средняя скорость аккумуляции Сорг составляет 52–61 г/м² в год, а при увеличении содержания ОВ до 5,5 % депонирующая скорость снижается до 13–45 г/м² в год. На нарушенных землях наиболее активно аккумуляция Сорг наблюдается в период от 5 до 20 лет, а затем темпы этого процесса снижаются [5]. На лёссовых отвалах степной зоны содержание Сорг в слое 0–60 мм удваивается при увеличении возраста самозаращения от 11 до

29 лет, однако обзор данных по изучению рекультивированных молодых почв показал, что замедление скорости ежегодного накопления Сорг отмечается после относительно короткого времени — 20–30 лет [8].

Для всего массива, полученных нами эмпирических данных ($n = 22$, при диапазоне датированных почвенностей от 13 до 44 лет), средние величины гумусного состояния новообразованных горизонтов почв на вскрышных породах (при средней мощности 44 мм) составляют $\bar{X} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}$ (Min ÷ Max) : Сорг=1,92±0,72 (0,21 ÷ 3,07) %, Nвал. = 0,26 ±0,11 (0,03 ÷ 0,48) %, C:N = 6,9±2,4 (4 ÷ 12) (высокая обогащённость гумуса азотом). У эмбриональных почв, сформированных на отвалах за 10–45 лет, величина C:N меняется в среднем от 5 до 8 (рис. 3). А у полноголоценовых почв чернозёмного ряда ($n=13$) при среднем содержании Сорг $\bar{X} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}$ (Min ÷ Max): 4,31±1,67 (1,91 ÷ 7,54) % и валового азота 0,35±0,16 (0,18 ÷ 0,72) % величина соотношения C:N составляет 13,0±3,5 (8 ÷ 20). Таким образом, можно прогнозировать, что при дальнейшем депонировании Сорг в результате приближения почв к кваликлиматскому состоянию, соотношение C:N будет увеличиваться в 2–3 раза, т. е. обогащённость гумуса азотом будет меняться от высокой до низкой степени за счёт опережающих темпов аккумуляции углерода по отношению к валовому азоту.

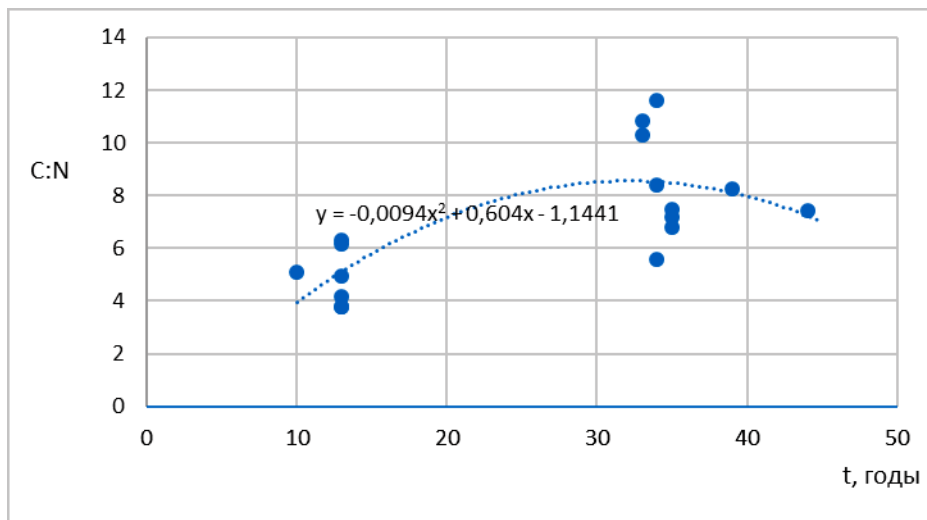


Рис. 3. Зависимость соотношения содержания органического углерода (Сорг) к содержанию валового азота (N) от возраста (t) эмбриональных почв на отвалах месторождений КМА

Необходимость использования удельного показателя в виде соотношения содержания органического углерода на каждые 10 мм толщины почвы (Сорг/Н) обусловлена требованием к сопоставимости анализируемых разновозрастных объектов. Это связано с тем, что после начального накопления органического вещества в горизонте А почвы, который отличается наибольшей концентрацией корней, органическое вещество перераспределяется вниз по профилю по мере увеличения времени почвообразования. Роль фитоценозов, формирующихся на отвалах вскрышных пород в условиях самозарастания, является ключевой для образования гумусовых веществ и их закрепления в виде органоминеральных соединений. Наряду со складываю-

щемся в профиле климатом почвы (термическим, влажностным, воздушным режимами) напряжённость микробиологических процессов и гумусообразования определяется количеством поступающего растительного вещества, прежде всего за счёт корнеотпада в верхних слоях почвы. В зональных фитоценозах с доминированием ковыля (*Stipa capillata*) в фенофазу его максимального развития в слое почвы 0–20 см содержится корней 2423 г (сух. вещ.) / кв. м, причём на долю верхних 10 см почвы приходится 80,5 %, в т. ч. мортмассы — 60,5 %. Углерододепонирующие возможности почв меняются не только во времени, но и по вертикальному профилю эмбриональных почв. В частности, в дерново-литогенных почвах стабилизация Cорг в верхнем 0–10 см слое происходит через 60 лет с содержанием 1,40–1,45 %, а в слое 60–70 см — через 40 лет с содержанием 0,35 % соответственно [6].

Как общую тенденцию, отражаемую на рисунке 4, можно отметить постепенное снижение удельной величины содержания Cорг после 30 лет педогенеза эмбрионов на отвалах железорудных месторождений КМА.

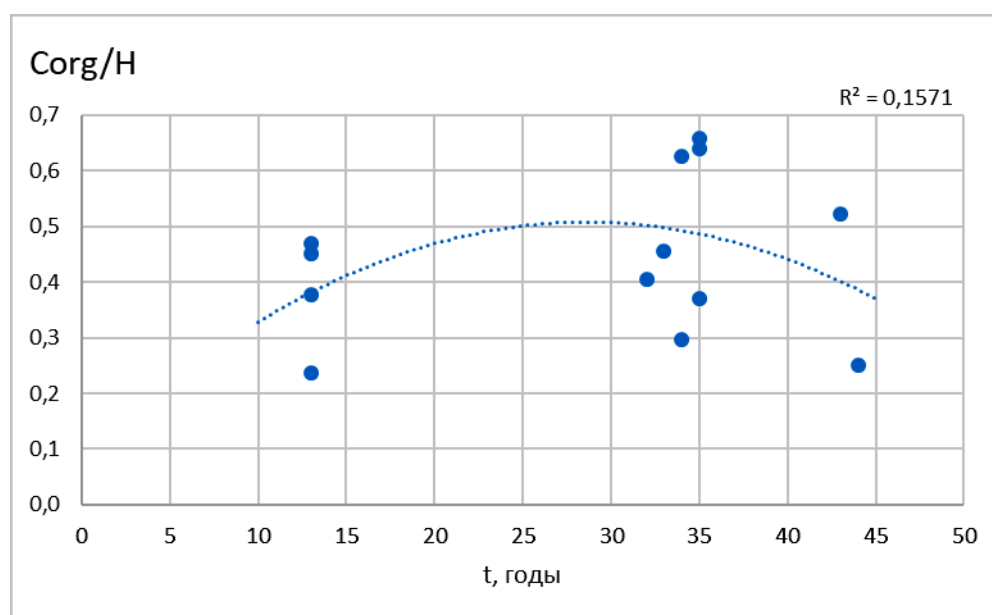


Рис. 4. Изменение удельной величины содержания органического углерода (Cорг) от возраста (t) эмбриональных почв на отвалах месторождений КМА

По прошествии 15 лет формирования эмбриональных почв при полевом морфологическом описании профилей могут быть выделены основные генетические горизонты, а, начиная с 30–40-летнего возраста, выражена парагенетическая ассоциация в профиле почв, включая горизонты АВ и ВС, если почвообразовательный процесс реализуется на суглинистых или супесчаных материнских породах. Хорошим индикатором, характеризующим зрелость морфологического строения почвенного профиля, выступает соотношение мощности горизонтов А/АВ. В частности, в первые 30 лет педогенеза, когда аккумуляция Cорг в корненасыщенном слое происходит *in situ*, величина соотношения А/АВ > 1, но в дальнейшем из-за усиления профиль-

ного перераспределения Сорг почвенные процессы выходят за пределы зоны активного гумусонакопления, что диагностируется сужением соотношения A/AB [3]. Результаты изучения техногенных почв [6] показывают, что в отличие от корненоасыщенного слоя почвы в более глубоких горизонтах из-за замедления темпов трансформации органического вещества процесс аккумуляции углерода сдерживается. Эти механизмы объясняют и закономерное изменение параметра Сорг/Н во времени (см. рис. 4).

Так как в ходе природного педогенеза по мере увеличения гумусированности почв в широком диапазоне величин (рис. 5) наблюдается закономерное увеличение и содержания валового азота, но при этом отмечается рост соотношения C:N в среднем с 12 до 14, то есть от низкой до очень низкой степени обогащённости гумуса азотом (по шкале [20, с. 387]), то процесс закономерного опережения скорости гумусонакопления по сравнению с аккумуляцией азота в целинных чернозёмных почвах неправомерно оценивать с отрицательной коннотацией, как это можно интерпретировать по указанной шкале.

Если полноголоценовые почвы чернозёмного ряда, формирующиеся под степной растительностью, характеризуются закономерным увеличением концентрации валового азота от 0,2 до 0,7 % при повышении содержания Сорг от 2 до 7,5 % (см. рис. 5), то в разновозрастных эмбриональных почвах на отвалах месторождений КМА при диапазоне варьирования Сорг от 1,5 до 3 % содержание азота не сбалансированно (рис. 6). Характерный пример — почва из разр. 11, сформированная на карбонатном песке с обильным включением меловой дресвы, где низкое содержание азота, сильно отстаёт от аккумуляции углерода (табл.).

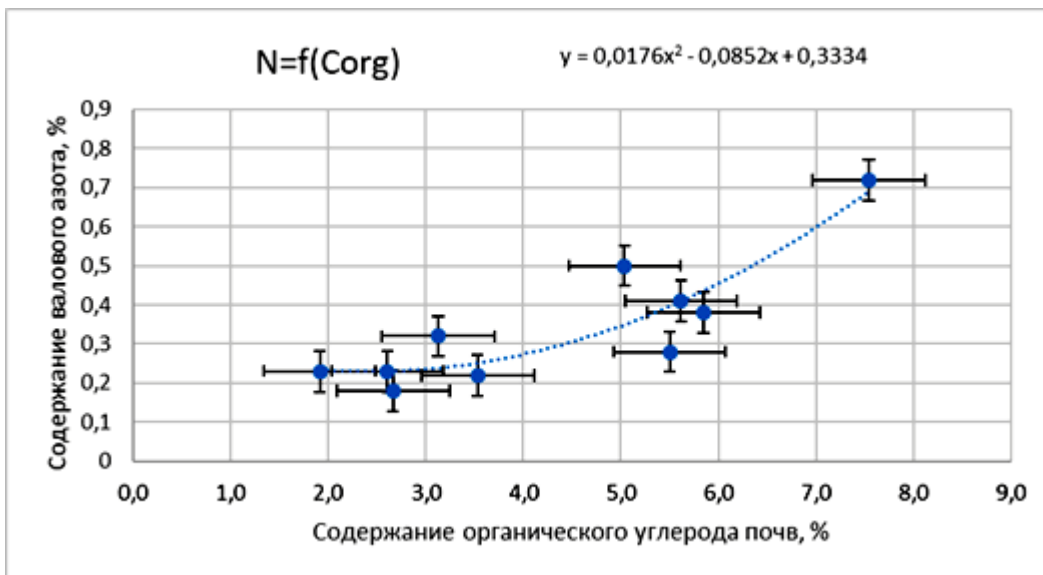


Рис. 5. Зависимость содержания валового азота (N) от органического углерода (Corg) в зональных почвах (по данным [23])

Из всего массива изученных эмбриональных почв на отвалах вскрышных пород в пределах Лебединского ГОКа была определена выборка с близким возрастом самозаращания отвалов (32–35 лет) (см. табл.), что позволяет установить влияние

субстратно-фитоценологических условий и химических свойств, унаследованных от материнских пород, в молодых почвах одинаковой стадии онтогенетического развития. Окраску почвенных образцов наиболее значительно отличалась для эмбриозема № 11 (светло-серый песок (2.5 Y 7/2 (*dry*) [32]), для эмбриозема № 9 (красновато-коричневая (5 YR 4/3 (*dry*) и темно-коричневая (7.5 YR 3/3 (*moist*) скальная железённая порода). Все другие объекты имели в сухом состоянии близкую окраску (от коричневой и тёмно-серовато-коричневой (у поликомпонентных смесей) до очень тёмно-серовато-коричневой (у суглинков)).

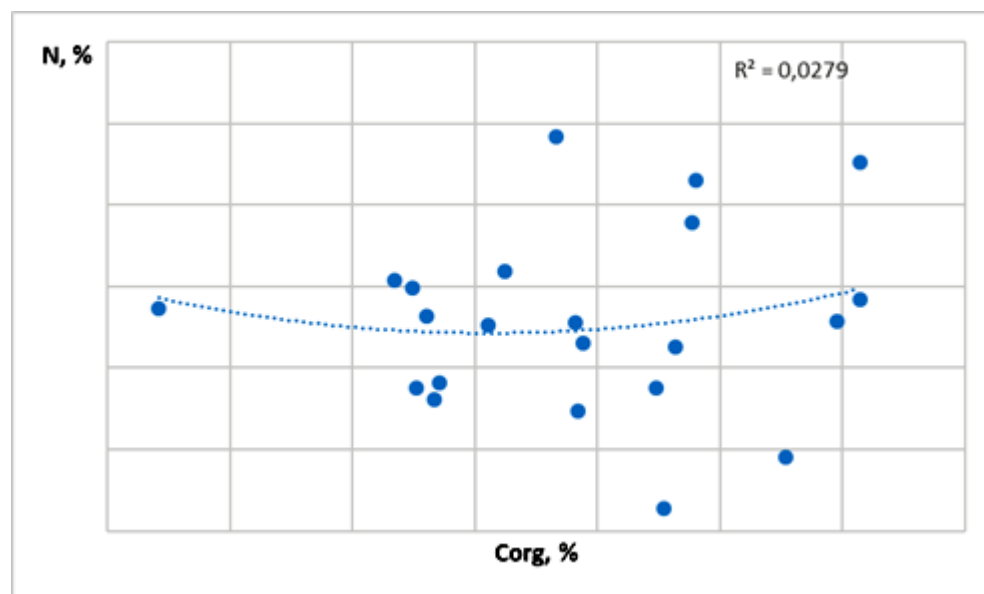


Рис. 6. Зависимость содержания валового азота (N) от органического углерода (Corg) в эмбриональных почвах на отвалах месторождений КМА

В полноголоценовых аналогах верхняя часть горизонта А содержит Сорг от 2,8 % (0–15 см) в заповеднике «Стрелецкая степь» до 4,5–5,8 % в «Ямской степи». Исследования почв в «Ямской степи» показали, что в горизонте АU1 содержание Сорг меняется от 5,4 % (0–10 см) до 4,5 % (10–20 см) при оценке его радиоуглеродного возраста гуминовых кислот в нём 850 ± 70 лет [22]. Величины рН водной вытяжки колеблются у изученных почв от 7,8 до 8,8 (т. е. от слабощелочной до щелочной степени), составляя в среднем $8,24 \pm 0,25$ ед. (щелочная реакция). Тогда как в почве заповедного участка величина рН водной вытяжки равна 6,0. Сравнение средних величин по всем 11 гумусовым горизонтам эмбриональных почв с верхней частью гор. А (0–20 см) из заповедной степи (Фон-1,2 в табл.) показало, что помимо более высокого содержания CO_2 карбонатов (в 2,6 раза) молодые почвы за 34 года почвообразования уступают зональным аналогам по содержанию железа и видовому богатству высших растений 40–50 отн. %, а по содержанию органического углерода и валового азота 60–70 отн. %.

Таблица

Химические свойства эмбриональных почв в техногенных ландшафтах
Лебединского ГОКа

Тип*	Объект	Горизонт	Возраст (t, годы)	Число видов растений	H(A+AB), мм	CO ₂ , %	Fe, %	Сорг, %	Nвал., %	C:N	ОГА**
1	11	A+AB	32	16	56	12,08	0,05	2,27	0,03	—	—
2	1AB	AB	35	15	29	4,27	0,23	1,91	0,26	8	высокая
	8A	A	35	26	35	4,38	0,42	2,24	0,18	13	низкая
	8AB	AB	35	26	74	3,94	0,50	1,26	0,18	7	высокая
	7	A+AB	35	26	52	3,52	0,56	1,92	0,15	13	низкая
3	5A	A	33	43	23	2,00	0,76	3,07	0,28	11	средняя
	5AB	AB	33	43	51	2,10	0,69	2,32	0,23	10	средняя
4	10AB	AB	34	6	81	0,81	2,65	2,40	0,43	6	высокая
	9	A+AB	34	15	31	1,58	3,70	1,94	0,23	8	высокая
	10A	A	34	6	27	1,08	2,10	2,98	0,26	12	низкая
	1A	A	35	15	16	4,50	0,31	3,07	0,45	7	высокая
ФОН	Фон-1	A	>10000	>40	0-10	1,05	0,32	7,54	0,72	11	средняя
	Фон-2	A	>10000	>40	10-20	1,74	3,36	5,75	0,38	15	очень низкая

*По результатам кластерного анализа (см. рис. 1). **ОГА — обогащённость гумуса азотом [19].

Эффективность депонирования органического углерода в почвах повышается при обилии гуматов кальция, которые закреплены на поверхности высокодисперсных глинистых минералов. В адсорбции гумусовых кислот показана решающая роль таких насыщающих катионов, как Fe³⁺ Al³⁺, а также существенное участие оксидов и гидроксидов железа и алюминия, присутствующих в почве как свободные минералы или в виде плёнок на поверхности алюмосиликатных минералов [20, с. 387]. Наличие в почвенных растворах катионов железа и алюминия стимулирует образование алюмо-железогумусовых соединений комплексной природы. В грунтосмесьх отвалов железорудных месторождений потенциально может быть представлено то или иное количество магнетитов и кварцитов. Например, различные виды железистых кварцитов региона КМА в среднем содержат 36 % общего железа и до 11,3 % Al₂O₃. По нашим данным, в молодых почвах техногенных ландшафтов Лебединского

и Стойленского ГОКов максимальное содержание аморфного железа варьировало от 3,7 до 5,7 %. Помимо железа и алюминия, катионы таких элементов, как Cu, Zn, Co, Pb, Ca, Mn, формируют ранжированный ряд по способности образовывать соединения с гуминовыми веществами [20, с. 355]. Современная дневная почва «Ямской степи» в верхней части гор. А (10–20 см) содержит общего железа 3,4 %, СаО — 2,2 %, микроэлементов (мг/кг): Cu — 14,3, Pb — 14,5, Zn — 44,7. Почва, экранированная насыпью обвалования заповедного участка «Ямской степи», содержит в более мощной толще гор. А (0–27 см) общего железа 3,2 %. СаО — 1,3 %, микроэлементов (мг/кг): Cu — 41,3, Pb — 17,7, Zn — 86,2. Как показал геохимический анализ почвообразующей породы с глубины 180–200 см на участке «Ямской степи» лессовидный суглинок уступает по содержанию указанных элементов горизонту А почвы только цинку и марганцу (на 30 %), а также кобальту (на 40 %). Роль суглинков среднего и лёгкого гранулометрического состава отражается в возможности почв, сформированных на отвалах с их участием, накапливать до 4,1–5,3 % органического вещества всего лишь за 30–40 лет почвообразования.

Известно, что ряд микроэлементов в зависимости от их содержания в почве могут быть и как эссенциальными элементами, так и элементами-загрязнителями. Внешний ареал экологического воздействия деятельности ГОКов в санитарно-защитных зонах и на более дальние территории может распространяться на расстояние до 20 км, а в пределах этого ареала часть территории (более 5 %) занята техногенными ландшафтами, включая карьеры, хвостохранилища и отвалы вскрышных пород [15]. На территории Губкинско-Старооскольского промышленного узла фоновое региональное загрязнение почвенного покрова тяжёлыми металлами из аэрозолей обусловлено функционированием железорудного производства на протяжении последних 60 лет. На формирование состава почвенной микробиоты и её влияния на интенсивность трансформации как растительного вещества, так и специфических гумусовых веществ, способны оказывать основные, установленные для этого района поллютанты: кадмий, свинец, цинк и медь [13].

Кластерный анализ проведён по совокупности семи показателей для 11 объектов (отдельных горизонтов эмбриональных почв на отвалах вскрыши горных пород), используя данные табл. Иерархическая классификация гумусовых горизонтов эмбриональных почв (гор. А, АВ) позволила определить четыре типа экосистем, которые обобщённо различаются по величинам семи показателей (количество видов высших растений, мощность горизонтов А(АВ), содержание CO₂, Fe, Сорг, Nвал., соотношение С:N), представленных в табл. Третий тип экосистемы отличается от всех объектов высоким разнообразием флоры на отвалах (растительная группировка состоит из 43 видов различных эколого-ценотических групп, что сближает его с фоновым сообществом), а также имеет лишь три отличительных признака от 4-го типа экосистемы (более низкое содержание валового азота, но особенно железа, а также большую величину соотношения С:N). Оба типа экосистем сформированы на смеси легких суглинков и щебня скальных пород, но в формировании растительности IV-го типа экосистем помимо люцерно-тысячелистникового сообщества из 6 видов принимала участие древесная растительность (из 5 видов). В результате, типы экосистем III и IV сформировали общий кластер на высоком уровне объединения (D = 5,5, правая часть рис. 7). Второй тип экосистемы существенно отличается от третьего типа:

из семи показателей по четырём их величины меньше (видовое богатство флоры, содержание Fe, Сорг, Nвал), а по двум — больше (по общей мощности гумусового горизонта, а особенно по содержанию карбонатов кальция (9,2 %)). Вейниково-люцерновое и вейниково-пырейное сообщества (из 26 видов) и мятликово-молочайное сообщество (из 15 видов), сформированные на среднем суглинке с участием скальных пород, определили почвенно-генетическую специфику второго типа экосистемы, что отразилось в обособлении отдельного кластера (D = 6, левая часть рис. 7). На дендрограмме изолировано (при максимальной величине порогового расстояния) расположен объект № 11 (на гидроотвале, намытом из песчано-меловой смеси вскрышных пород ГОКа), который был назван 1-м типом экосистемы. Субстратом для этого типа выступил карбонатный песок с участием меловой дресвы (содержание CaCO₃ 27,5 %), на котором сформировалась мятликово-полынная группировка из 16 видов (ОПП=15 %), а также древесно-кустарниковая растительность со средней высотой 3 м и ОПП=50 % из 4-х видов (*Hippocrepis retusa*, *Populus tremula*, *Robinia pseudo-acacia*, *Elaeagnus argentea*, *Salix caprea*), сформировавшая лесную подстилку мощностью 9 мм. Это определило максимальную среди всех объектов мощность гумусового горизонта, что характерно для супесчаных почв, но при крайне низком содержании валового азота (0,03 %) и железа. Типологическая обособленность профиля почвы, сформированной на карбонатном песке гидроотвала, характеризует ведущую роль литолого-гранулометрического фактора в педогенезе, по крайней мере на его ранних этапах реализации. Особенность этого объекта была также отмечена в другом исследовании на том же железнодорожном отвале Лебединского ГОКа [24]: под влиянием насаждения облещихи крушиновой в субстрате отвала рыхлой вскрыши при увеличении возраста от 1 до 38 лет содержание Сорг увеличилось с 0,29 до 0,80 %, а азота общего с 0,001 до 0,07 %.

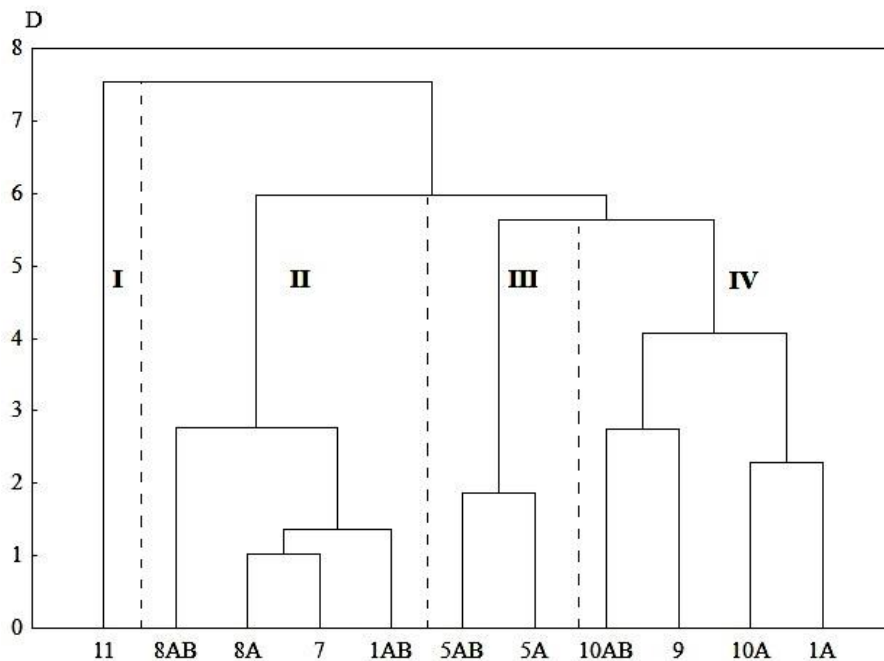


Рис. 7. Дендрограмма кластерного анализа гумусовых горизонтов эмбриозёмов на отвалах Лебединского ГОКа (D — пороговое расстояние)

В первые 30–40 лет педогенеза эффективность депонирования органического углерода почв наиболее корректно можно выразить путём представления удельных величин его аккумуляции на каждые 10 мм мощности новообразованной почвы определённого возраста (Сорг/Н) в виде ранжированного убывающего ряда типов экосистем (в скобках указаны средние величины Сорг/Н, %): II (0,56) > IV (0,52) > III (0,49) > I (0,39). Таким образом, наибольший потенциал депонирования Сорг имеют эмбриоземы, сформированные на суглинках с участием ожелезнённых скальных пород под сообществами с доминированием злаков. Эмбриоземы на карбонатном песке, хотя и отличаются максимальной мощностью гумусового горизонта при богатой представленности флоры с широкой экологической амплитудой, но из-за ограничения в количестве тонкодисперсных фракций гранулометрического состава, характеризуются наименьшим потенциалом депонирования Сорг.

Обобщая, отметим, что за первые три десятилетия формирования на отвалах эмбриональных почв в среднем потенциал депонирования ими органического углерода составляет 9,4 т/га, но при наличии оптимальных субстратно-фитоценологических условий достигает 15,4 т/га (1540 г/м²). Это показывает перспективу управления углерододепонирующей эффективностью почвообразования путём замены автогенного процесса формирования сукцессий растительности и почв на технологии ренатурации, способных обеспечить управляющими воздействиями поддержание наиболее комплементарных траекторий воспроизводства почвенно-растительного покрова на горнопромышленных отвалах при данных биоклиматических условиях.

Выводы. При общей площади нарушенных земель в Белгородской области 6,4 тыс. га преобладающий вклад в их формирование вносит разработка месторождений полезных ископаемых и проведение геологоразведочных работ (порядка 90 %), а с учётом различных в отдельные годы темпов работ по рекультивации земель в среднем потребуется порядка 100 лет для полного восстановления нарушенных земель с целью вовлечения их в оборот (при условии сохранения в будущем тех же темпов рекультивации). Поэтому предложено [4] завершающую часть технического этапа рекультивации, обычно связанную с перемещением плодородного слоя почвы из временных отвалов и нанесением его на подготовленную поверхность, заменить на ренатурацию земель, один из вариантов которой уже применяли при рекультивации земель для лесохозяйственного использования. При ограниченности свободных земель в таких сильно антропогенно преобразованных регионах, как Белгородская область, полигоном для создания «карбоновых ферм» могут выступать нарушенные земли. Научное обоснование эффективного функционирования «карбоновых ферм» на постпромышленных территориях со специфическими условиями эдафотопы требует всестороннего изучения его потенциала для быстрого вовлечения углерода во внутрипочвенные процессы с целью его долгосрочного депонирования [10].

Для создания карбоновых ферм у горнодобывающих предприятий имеется территориальный базис в виде некультивированных земель. В НИУ «БелГУ» в 2022 г. был создан карбоновый полигон на базе Ботанического сада с целью ведения мониторинга потоков парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в атмосферном воздухе и разработки технологий связывания атмосферного углерода в растительной биомассе и органическом веществе почв. Помимо ботсада как центральной площадки региональной системы мониторинга углеродного баланса, в перспективе составной частью этой системы станет карбоновый полигон на предприятиях горнодобывающей

промышленности. Материально-техническая база карбонового полигона будет использована в деятельности Центра валидации и верификации углеродных единиц для экспериментального обоснования климатических проектов компаний.

Литература

1. *Архипова М. В.* Особенности формирования растительного покрова на отвалах (на примере Лебединского ГОК) // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: Материалы годичной сессии. Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 20–21 марта 2008 года / Отв. ред. В. И. Осипов. Выпуск 10. М.: Издательство ГЕОС, 2008. С. 187–191.
2. *Волобуев В. Р.* Энергетика почвообразования // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1959. № 1. С. 45–54.
3. *Голеусов П. В., Лисецкий Ф. Н.* Воспроизводство почв в антропогенно нарушенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 210 с.
4. *Голеусов П. В., Лисецкий Ф. Н.* Воспроизводство почвенно-растительного покрова в посттехногенных геосистемах КМА и перспективы их ренатурирования // Горный журнал. 2014. № 8. С. 69–74.
5. *Голованов А. И., Зимин Ф. М., Сметанин В. И.* Рекультивация нарушенных земель. М.: КолосС, 2009. 325 с.
6. *Демидов О. А.* Особливості і прогноз гумусонакопичення в рекультивованих ґрунтах // Агроекологічний журнал. 2013. № 4. С. 56–60.
7. *Дунай Е. И., Белых В. И., Погорельцев И. А.* Промышленный потенциал минерально-сырьевых ресурсов Белгородской области // Горный журнал. 2014. № 8. С. 36–40.
8. *Етеревская Л. В., Лехциер Л. В., Михновская А. Д., Ланта Е. И.* Почвообразование в техногенных ландшафтах на лессовых породах // Техногенные экосистемы. Организация и функционирование. Новосибирск: Наука, 1985. С. 107–135.
9. *Иванов А. Л., Савин И. Ю., Столбовой В. С., Духанин Ю. А., Козлов Д. Н., Баматов И. М.* Глобальный климат и почвенный покров-последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2021. № 107. С. 5–32.
10. *Когут Б. М., Семенов В. М.* Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2020. № 102. С. 103–124.
11. *Корнилов А. Г., Кичигин Е. В., Колмыков С. Н. и др.* Экологическая ситуация в районах размещения горнодобывающих предприятий региона Курской магнитной аномалии. Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2015. 157 с.
12. *Лисецкий Ф. Н., Голеусов П. В., Судник-Войциковская Б., Мойсиенко И. И.* Особенности микроразнообразия почв и растительности по катенам курганных сооружений // Сибирский экологический журнал. 2014. Т. 21. № 3. С. 373–388.
13. *Лисецкий Ф. Н., Чендев Ю. Г., Голеусов П. В., Чепелев О. А.* Загрязнение почвы тяжелыми металлами в зоне Курской магнитной аномалии // Научные труды Федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана. 2004. № 10. С. 286–291.

14. *Лисецкий Ф. Н., Чепелев О. А.* Климатическая обусловленность почвообразования в Центральном Черноземье // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2003. № 2. С. 15–23.

15. *Лысых С. А., Соловьев А. Б., Чуева А. А.* Специфика современного землепользования в районах добычи железной руды региона Курской Магнитной Аномалии // ИНТЕРНАУКА. 2023. № 2-1 (272). С. 65–69.

16. *Масюк Н. Т.* Экология нарушенных горных пород: состав, свойства, ресурсы, классификация // Проблемы охраны, рационального использования и рекультивации чернозёмов. М.: Наука, 1989. С. 113–132.

17. *Морозов А. И.* О связи периода биологической активности (ПБА) и глубины гумификации // Почвоведение. 1993. № 5. С. 118–120.

18. *Никитина О. В., Стифеев А. И., Лазарев В. И.* Создание фитоценозов на техногенных ландшафтах Курской магнитной аномалии как оптимальный способ их биологической рекультивации // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 3 (66). С. 108–116.

19. *Орлов Д. С., Бирюкова О. Н.* Гумусное состояние почв как функция их биологической активности // Почвоведение. 1984. № 8. С. 39–49.

20. *Орлов Д. С., Садовникова, Л. К., Суханова Н. И.* Химия почв. М.: Высш. школа, 2005. 558 с.

21. *Пигорев И. Я., Буланова Ж. А.* Агрохимические свойства вскрышных пород, как условие почвообразовательного процесса и рекультивации КМА // Актуальные проблемы экологии и природопользования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Лесниково, 18 мая 2017 года. Лесниково: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т. С. Мальцева, 2017. С. 111–114.

22. *Русаков А. В.* Почвы и почвенный покров Ямской степи. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2012. 216 с.

23. *Соловиченко В. Д., Лукин С. В., Лисецкий Ф. Н., Голусов П. В.* Красная книга почв Белгородской области. Белгород: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», 2007. 138 с.

24. *Трещевская Э. И., Тихонова Е. Н., Малинина Т. А., Голядкина И. В.* Использование облепихи крушиновой (*Hipporhae rhamnoides* L.) для лесной рекультивации техногенных ландшафтов // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 3 (31). С. 108–115.

25. *Фокин А. Д.* Участие различных соединений растительных остатков в формировании и обновлении гумусовых веществ почвы // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978. С. 60–64.

26. *Хрисанов В. А., Колмыков С. Н., Полушкин М. Ю.* Обострение эколого-геоморфологических ситуаций в результате перемещения на склонах почвогрунтов современными природными процессами и различными видами антропогенной деятельности на территории Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2017. № 25 (274). С. 132–145.

27. Чендев Ю. Г., Лебедева М. Г., Матвеев С. М. и др. Почвы и растительность юга Среднерусской возвышенности в условиях меняющегося климата. Белгород: Общество с ограниченной ответственностью «КОНСТАНТА», 2016. 326 с.

28. Budarina V. A., Lisetsky F. N., Kosinova I. I. Transformation of ecological-resource and ecological-geochemical functions of the lithosphere within the Stary Oskol–Gubkin mining district of the Kursk Magnetic Anomaly // *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 11), P. 57–62.

29. Dolgopolova N. V., Batrachenko E. A. Changes in physico-chemical and biological properties of rocks during weathering and soil formation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 421. No. 6. 062028.

30. Goleusov P. V., Lisetskii F. N., Chepelev O. A., Prisniy A. V. The rate of soil formation in regenerative ecosystems with various combinations of substratum and vegetation conditions // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. No. 10 (24). P. 45413–45416.

31. Kucher L., Poltoretskyi S., Vasylenko, O., Krasnoshtan I., Zamorskyi O., Manzii O., ... Beregniak E. Peculiarities of the primary process of the soil formation on the mine rock dumps under the influence of biotic factors // *Journal of Ecological Engineering*. 2022. No. 23 (11). P. 101–108.

32. Munsell A. H. Munsell soil color charts. New Windsor, N. Y.: Gretag Macbeth, 2000.

33. Mutio J. M., Kebeney S., Njoroge R., Churu H., Ng'etich W., Mugaa D., Alkamoi B., Wamalwa F. Effect of land rehabilitation measures on soil organic carbon fractions in semi-arid environment // *Front. Sustain. Food Syst*. 2023. No. 7. 1095865.

34. Okolo C. C., Gebresamuel G., Zenebe A., Haile M., Orji J. E., Okebalama C. B., ... Eze P. N. Soil organic carbon, total nitrogen stocks and CO₂ emissions in top-and sub-soils with contrasting management regimes in semi-arid environments // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. No. 1. 1117.

35. Pribyl D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor // *Geoderma*. 2010. Vol. 156. P. 75–83.

Сведения об авторе

Лисецкий Федор Николаевич — доктор географических наук, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра, Институт наук о Земле, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Россия.

E-mail: liset@bsu.edu.ru

About the authors

Prof. **Fedor Lisetskii**, Department of Nature Management and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia.

E-mail: liset@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023 г.

Поступила после доработки 16.04.2023 г.

Статья принята к публикации 05.06.2023 г.