

Научная статья

УДК 631.618

doi: 10.17223/19988591/70/2

Содержание и структура запасов углерода в углесодержащих почвах техногенных ландшафтов (на примере Горловского антрацитового месторождения)

Денис Александрович Соколов¹, Евгения Александровна Гуркова²

^{1, 2} *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *sokolovdenis@issa-siberia.ru*

² *gurkova@issa-siberia.ru*

Аннотация. Выполнена оценка содержания углерода и запасов углерода в эмбриоземах (Hyperskeletal Spolic Technosol) отвалов Горловского антрацитового месторождения (Новосибирская область). Для почв разных стадий эволюции, возраста и положения в рельефе выявлены соотношения содержания и запасов углерода крупных корней ($C_{\text{ккорн}}$), крупнообломочных ($C_{\text{уг}}$) и дисперсных включений угля ($C_{\text{лит}}$), педогенного ($C_{\text{пед}}$) и неспецифического органического вещества ($C_{\text{несп}}$), а также углерода карбонатов ($C_{\text{неорг}}$). Показано, что основная часть углерода почв приходится на $C_{\text{уг}}$. Второе место как по содержанию, так и по запасам приходится на $C_{\text{лит}}$ и $C_{\text{несп}}$. По мере развития почв доля $C_{\text{уг}}$ и $C_{\text{лит}}$ уменьшается, в то время как содержание и запасы $C_{\text{несп}}$, $C_{\text{пед}}$ и $C_{\text{ккорн}}$ увеличиваются. Наиболее выражено это под травянистой растительностью на выровненных горизонтальных и особенно участках, сформированных рыхлыми осадочными породами. В почвах под лесной растительностью наблюдается сохранение систем органических веществ, характерных для начальных стадий почвообразования. В эмбриоземах техногенных ландшафтов вместе с секвестрацией органического углерода происходит также закрепление углерода в виде карбонатных натечков на поверхности камней. Общим для всех исследуемых почв отвалов антрацитовых месторождений является тот факт, что доля углерода, определяемого традиционным методом бихроматного окисления ($C_{\text{пед}}$), не превышает 7% в структуре общих запасов, что необходимо учитывать при оценке углеродного следа угледобычи.

Ключевые слова: эмбриоземы, углерод органических соединений почв, неорганический углерод, литогенное органическое вещество, педогенный углерод, секвестрация углерода, Hyperskeletal Spolic Technosol

Источник финансирования: отбор проб почв, оценка содержания углерода различных пулов и интерпретация полученных данных выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00116), определение основных физических свойств почв выполнено в рамках проекта государственного задания ИПА СО РАН.

Для цитирования: Соколов Д.А., Гуркова Е.А. Содержание и структура запасов углерода в углесодержащих почвах техногенных ландшафтов (на примере Горловского антрацитового месторождения) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 70. С. 26–52. doi: 10.17223/19988591/70/2

Original article

doi: 10.17223/19988591/70/2

Content and structure of carbon stocks in coal-containing soils of technogenic landscapes: a case study from the Gorlovskoe anthracite deposit

Denis A. Sokolov¹, Evgeniya A. Gurkova²

^{1,2} *Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation*

¹ *sokolovdenis@issa-siberia.ru*

² *gurkova@issa-siberia.ru*

Summary. The estimation of organic matter stocks in technogenic soils is a topic of active discussion. The significance of studying the carbon balance in natural landscapes is underscored by large-scale projects; however, there is an increasing acknowledgment of the necessity to incorporate technogenically altered areas into climate research. This need arises not only from their heightened emissions of greenhouse gases but also from their potential for long-term carbon sequestration through the implementation of advanced reclamation technologies. The aim of this study is to evaluate the carbon content, total stocks, and stock structure in coal-enriched soils found in the spoil heaps of coal mining enterprises.

The objects of the study were the technogenic soils from the external transport spoil heaps of the Gorlovka coal deposit in Novosibirsk Oblast. The research was conducted in 2023 across ten representative sites of dumps with varying ages, heterogeneous relief conditions, rock types, vegetation, and soil characteristics (*see Table 1*). Soil samples were collected from layers at depths of 0-5, 5-10, and 10-20 cm. A single sample was obtained from the 0-20 cm layer of initial embryozems at dump sites less than four years old. In the laboratory, the samples were air-dried at room temperature. Subsequently, all samples were sieved through standard sieves for fractions of 1-3, 3-5, 5-10, and >10 mm. Coal particles and large roots (remaining on sieves > 1 mm) were manually selected from separated sieved samples of each fraction and weighed. The total carbon content, the carbon content in coal particles, and the carbon content of large roots were determined using an automatic Perkin CHN analyzer, the 2400 Series II. The inorganic carbon content was measured using the manometric method for the fine fraction and the gravimetric method for the stony fraction. The proportions of organic carbon pools were established using oxidative fractionation. One soil sample, after the manual removal of small roots, was subjected to oxidation using potassium bichromate, following Tyurin's method. The resulting data were attributed to the pool of pedogenic carbon. A second portion of the same sample was oxidized in a muffle furnace at a temperature exceeding 525°C, employing the dry combustion method. The organic matter that remained unoxidized at this temperature contains lithogenic carbon, represented by inclusions of unoxidized anthracite. At this temperature, a portion of carbonaceous particles, along with products of their transformation, small roots, and other organic matter of biogenic origin, is combusted. Consequently, the values obtained for losses during calcination, accounting for losses of hygroscopic moisture, were multiplied by a coefficient of 0.58. After deducting pedogenic carbon, these values were accepted as the carbon content of non-specific organic matter. The total carbon content is calculated as the sum of the various pools (*see Fig. 1*). Carbon stocks by pools were estimated while considering soil density.

The studied soils are characterized by high rockiness and density (see Table 2), which significantly influences the content of carbon pools and the structure of their stocks. The total carbon content ranges from 0.6% to 27.1% (see Table 3). Similar to other properties, this carbon content is not evenly distributed across different sites or within the vertical profile of the soils. In sites with organo-accumulative embryozems on aged dumps, the minimum total carbon content is observed under herbaceous communities (up to 10%), while it increases to 27.1% in the 0-5 cm layer beneath forest plant communities. A substantial portion of the total carbon content in embryozems on coal-containing substrates is derived from coal particles (see Table 3). The highest concentrations are found in initial embryozems (site 2IE_y) and organo-accumulative embryozems (sites 7-8OAE_p) that have developed under forest plant communities.

During field observations, it was noted that the fine fraction exhibited no significant reaction to the application of 10% HCl. However, accumulations of secondary carbonates, in the form of cutans and clusters of crystals, were observed on the surfaces of stony inclusions, both on the soil surface and within the profile (see Fig. 2). Additionally, it was determined that the contribution of pedogenic carbon to the total carbon content of embryozems is minimal, ranging from 0.01% to 1.0% (see Table 3). The maximum concentration of pedogenic carbon is found in sites with hilly microrelief in organo-accumulative embryozems enriched with coal inclusions. This phenomenon can be attributed to several factors, including the presence of numerous weathered carbonaceous inclusions and the accumulation of organic matter in the depressions between hillocks. The carbon content of non-specific organic matter ranges from 0.12% to 6.34%. The distribution of this organic matter in soils, both spatially and vertically, is highly heterogeneous and lacks distinct regularities. The predominance of non-specific organic matter carbon content over pedogenic carbon has been observed, primarily due to the low content of the physical clay fraction in embryozems (see Table 3) and the dominance of coarse organic matter accumulation processes (such as plant residues) over humus accumulation. This combination is not conducive to the establishment of organomineral interactions and the formation of proper humus in soils of technogenic landscapes. In general, the soils in designated areas of stony rock dumping exhibit a progression from initial to soddy embryozem, characterized by an increase in the content of pedogenic carbon and non-specific organic matter. This trend is also evident in the pool of carbon from large roots, although its quantity in the studied soils is relatively small (see Table 3). The research has shown that the total carbon stocks in the examined embryozems range from 87.5 to 473.9 t/ha (see Fig. 3). The largest carbon stocks are found in initial embryozem (1-4IE), while the minimum stocks are present in soddy embryozem (9-10SE) and organo-accumulative embryozems under herbaceous vegetation (5OAE_h). The carbon from coal particles in the stony fraction of the soils predominates in the carbon stock structure of most of the studied soils, accounting for up to 96.7% of the stocks in initial embryozems. The accumulation of lithogenic carbon in horizontal sites (3IE_o and 9SE_h) is associated with the lack of removal of fine coal particles due to slope processes. All of this occurs against the backdrop of uneven coal content in soils, which is influenced by the characteristics of non-standard anthracite in both coal and host seams, as well as the specifics of dump formation. The carbon stocks of organic matter that are less resistant to oxidation - such as pedogenic carbon, carbon from non-specific organic matter, and large roots - tend to increase as a proportion of total stocks in the evolutionary series of soils, ranging from initial to soddy embryozems (see Fig. 3). The carbon stocks associated with large roots are characterized as minimal. This is attributed to the high stoniness of the soils and the density of stony detachments (see Table 2), which results in a relatively small mass of roots compared to the large mass of stones (see Table 3). In the embryozems of anthropogenic landscapes, alongside the sequestration of organic carbon, carbon fixation also occurs in

the form of carbonate deposits on stone surfaces. The stocks of carbonate carbon are characterized by minimal values (*see Table 3*), ranging from 0.2% to 0.5% of total stocks (up to 2 t/ha). A common feature of all investigated soils in anthracite deposit dumps is that the share of carbon determined by the traditional method of bichromate oxidation (pedogenic carbon) does not exceed 7% of the total carbon stocks. This factor should be considered when assessing the carbon footprint of coal mining. To minimize the negative consequences associated with the transformation of coals in coal mining waste dumps and to enhance the carbon sequestration potential of technogenic soils, the surfaces of dumps should be composed of loose sedimentary rocks.

The article contains 3 Figures, 3 Tables, 48 References.

Keywords: embryozem, soil organic carbon, inorganic carbon, lithogenic organic carbon, pedogenic carbon, black carbon, carbon sequestration, Hyperskeletal Spolic Technosol

Fundings: soil sampling, assessment of carbon content of pools and interpretation of the obtained data were carried out with the supported by Russian Scientific Foundation (project No. 23-24-00116), determination of the physical properties of soils was carried out within the framework of the state assignment project of the Institute of Soil Science and Agricultural Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

For citation: Sokolov DA, Gurkova EA. Content and structure of carbon stocks in coal-containing soils of technogenic landscapes: a case study from the Gorlovskoe anthracite deposit. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;70:26-52. doi: 10.17223/19988591/70/2

Введение

Вопросы, связанные с накоплением органического вещества в почвах, процессами его трансформации и минерализации, всегда занимали и, очевидно, будут занимать ведущие позиции в учении о почвах. И это закономерно, поскольку состояние систем органических веществ отвечает за функции, которые отличают почвы от горных пород и других поверхностных образований естественного или антропогенного происхождения. К этим функциям относятся плодородие, способность почв депонировать химические элементы и выступать в качестве среды обитания для множества организмов, участвовать в геохимических циклах, в том числе большом и малом круговоротах веществ [1].

В последнее время особое внимание почвоведов и специалистов из смежных наук уделяется секвестрации почвами углерода климатически активных газов, что связано с оценкой регулирующей роли почв в глобальном балансе углерода и изменении климата. В России с целью исследования процессов депонирования соединений углерода создана сеть карбоновых полигонов [2], организована национальная система мониторинга климатически активных веществ в атмосфере, а также углеродного баланса природных и антропогенно-измененных экосистем [3], проводятся масштабные исследования по оценке запасов углерода в почвах сельскохозяйственных [4] и лесных угодий [5, 6]. В связи с этим особое внимание стоит уделять землям промышленности. Необходимость их включения в климатические проекты вызвана не только часто повышенной эмиссией парни-

ковых газов с техногенно преобразованных территорий, но и высоким потенциалом техногенных ландшафтов к долгосрочному депонированию углерода, что достигается при реализации высокоэффективных технологий рекультивации [7, 8]. В наибольшей степени внимания заслуживают земли, нарушенные при разработке угольных месторождений. В первую очередь, это продиктовано тем, что угольная промышленность занимает лидирующую позицию по масштабам нарушений. По разным оценкам, только в Сибири суммарная площадь земель, нарушенных добычей и транспортировкой угля, сегодня приближается к 500 тыс. га и продолжает увеличиваться за счет активной разработки новых месторождений в республиках Саха, Хакасии и Туве, в Новосибирской области, а также в пределах Таймырского угольного бассейна [9–14]. Другим важным аспектом, обязывающим уделять повышенное внимание углеродному балансу техногенных экосистем угледобывающих регионов, является состав складированных на поверхность отходов добычи.

Как известно, специфика почвообразующих пород отвалов угольных месторождений состоит в обогащенности литогенным (геогенным) органическим веществом, представленным включениями угля [15, 16] и керогена [17]. Угли в почвах техногенных ландшафтов в различных условиях способны как сохраниться практически в неизменном виде [18], так и трансформироваться при минерализации [19, 20], а также вовлечении в формирующиеся в почвах системы гумусовых веществ [21, 22]. Результатом всех этих процессов, наряду с эмиссией углекислого газа, может также являться образование ряда органических поллютантов [23, 24].

В настоящее время в научной литературе уделяется достаточного много внимания органическому веществу техногенных почв, в том числе и в вопросах углеродного баланса. Однако низкая точность оценки запасов углерода в углесодержащих почвах не позволяет масштабировать полученные результаты на значительные территории и тем самым использовать их в климатических проектах. Причиной тому служит, во-первых, высокая пространственная неоднородность почвенного покрова, которая в силу хаотичности состава почвообразующих пород [25, 26] в большей степени выражена по сравнению с естественными почвами [27], что усложняет выделение участков для экстраполяции даже в пределах одного почвенного контура. Во-вторых, затруднительность определения содержания педогенного углерода в присутствии включений угля [28, 29] при том, что все существующие методы нацелены на оценку содержания углерода во фракции < 1 мм и не позволяют охватить крупнообломочные фракции почв.

В связи с вышеотмеченным целью настоящей работы стала оценка содержания углерода, его запасов и структуры запасов в углесодержащих почвах на отвалах угледобывающих месторождений. В задачи исследования входили оценка запасов углерода органических соединений не только в мелкозем, но и скелетной части почв, а также исследование содержания и запасов углерода корней и карбонатов.

Материалы и методы

Объекты исследования. Объектами исследования выбраны техногенные почвы внешних транспортных отвалов Горловского месторождения антрацита. Месторождение расположено в юго-восточной части Новосибирской области и находится в пределах Предалтайской лесостепной провинции серых и темно-серых лесных почв и черноземов оподзоленных средне-мощных среднегумусных [30], что свидетельствует о благоприятных климатических условиях для развития аккумулятивно-гумусовых процессов в почвах.

Исследования проводились на участках, дифференцированных по возрасту, рельефу, характеру пород, типам растительности и почв (табл. 1). Субстрат на 9 участках представлен хаотичной смесью различных по размеру обломков вскрышных и вмещающих пород, включающей аргиллиты, алевролиты, песчаники и уголь. На одном из участков поверхность отсыпана безугольными рыхлыми породами, представленными глинами мел-палеогеновой коры выветривания (10ЭД_р). Участки располагаются как на склонах отвалов, так и на спланированных вершинах с выровненным или бугристо-ячеистым микрорельефом. Неоднородность пород, рельефа, а также возраста участков обуславливают дискретность и неоднородность растительного покрова, формирующегося посредством самозарастания. Пионерные растительные группировки характеризуются разреженностью и «очаговостью» с преобладанием куртин донника желтого (*Melilotus officinalis* L.) и синяка обыкновенного (*Échium vulgäre* L.) и тяготеют преимущественно к участкам относительно недавней отсыпки плотных каменных пород (участки 1ЭИ_м, 2ЭИ_м и 3ЭИ_с). Также пионерная травянистая

Таблица 1 [Table 1]

Характеристика объектов исследования
[Research objects characteristics]

Участок [Site number]	Координаты [Coordinates]	Возраст участка, лет [Site age, years]	Рельеф и почвообразующие породы [Relief, parent materials]	Растительность [Plant communities]	Почва (по WRB [31]) [Soils, WRB [31]]
1	2	3	4	5	6
1ЭИ _м [1E _γ]	N54,571074° E83,610814°	4	Выровненный горизонтальный участок (плотные каменные углистые) [levelled horizontal site, dense rocky coal-bearing material]	Отсутствует [no plant communities]	Эмбриозем инициальный (Hyperskeletal Spolic Technosol (Eutric)) [Initial embryozem]
2ЭИ _м [2E _γ]	N54,570809° E83,612614°	4	Горизонтальный участок с бугристым микрорельефом (плотные каменные углистые) [horizontal site with hilly microrelief, dense rocky carbonaceous material]		

1	2	3	4	5	6
3ЭИ _с [3IE _с]	N54,566392° E83,601247°	10–15	Выровненный горизонтальный участок (плотные каменистые углистые) [levelled horizontal site, dense rocky coal-bearing material]	Пионерная травянистая (разнотравье с участием сорных видов) [pioneer herbaceous vegetation (forbs including weed species)]	Эмбриозем органо-аккумулятивный (Hyperskeletal Spolic Technosol (Eutric, Protofolic)) [Organo-accumulative embryozem]
4ЭИ _с [4IE _с]	N54,568476° E83,614646°	35–40	Южный склон крутизной 25°–30° (плотные каменистые углистые) [south slope of 25°-30°, dense rocky coal-bearing material]		
5ЭОА _т [5OAE _т]	N54,569594° E83,613478°	25–30	Выровненный горизонтальный участок (плотные каменистые углистые) [levelled horizontal site, dense rocky coal-bearing material]	Простая травянистая (разнотравная) [simple herbaceous (cereal-forb)]	
6ЭОА _д [6OAE _д]	N54,564628° E83,605135°	20–25	Выровненный участок южного склона крутизной 7°–10° (плотные каменистые углистые) [straight site of south slope of 7°-10°, dense rocky carbonaceous material]	Простая древесная (мелколиственно-сосновая) [simple woody communities (small-leaves trees and pines)]	
7ЭОА _д [7OAE _д]	N54,574766° E83,612481°	35–40	Северный склон крутизной 35°–40° (плотные каменистые углистые) [north slope of 25°-30°, dense rocky coal-bearing material]		
8ЭОА _д [8OAE _д]	N54,569026° E83,614797°	35–40	Горизонтальный участок с бугристым микрорельефом (плотные каменистые углистые) [horizontal site with hilly microrelief, dense rocky coal-bearing material]		

1	2	3	4	5	6
9ЭД _п [9SE _h]	N54,569230° E83,612814°	25–30	Выровненный горизонтальный участок (плотные каменные углистые) [levelled horizontal site, dense rocky coal-bearing material]	Сложная травянистая (разнотравно-злаковая) [complex herbaceous vegetation (forb-cereal)]	Эмбриозем дерновый (Hyperskeletal Spolic Technosol (Eutric, Humic)) [Soddy embryozem]
10ЭД _р [10SE _l]	N54,568144° E83,609856°	20–25	Горизонтальный участок с бугристым микрорельефом (рыхлые глинистые безуглистые) [horizontal site with hilly microrelief, loose clay coal-free material]		Эмбриозем дерновый (Spolic Technosol (Clayic, Eutric)) [Soddy embryozem]

Примечание. ЭИ_м – эмбриоземы инициальные на молодых отвалах, ЭИ_с – те же на старых отвалах; ЭОА_г – эмбриоземы органо-аккумулятивные под травянистыми сообществами; ЭОА_д – то же под древесными насаждениями; ЭД_п – эмбриоземы дерновые на плотном каменном субстрате; ЭД_р – то же на рыхлом глинистом субстрате.

[Note. IE_y - initial embryozem on young dumps, IE_o - the same on the old dumps, OAE_h - organo-accumulative embryozem under herbaceous plant communities, OAE_t - the same under woody communities, SE_h - soddy embryozem on dense rocky substrate, SE_l - the same on loose clay substrate].

растительность встречается на южных склонах участков старой отсыпки (более 35 лет) (участок 4ИЭ_с), где в ее состав добавляются икотник серый (*Bertéroa incána* L.) и желтушник левкойный (*Erysimum cheiranthoides* L.) [32]. Площадь проективного покрытия пионерных сообществ составляет 10–15% [32]. Преобладают на таких участках инициальные эмбриоземы. Для них характерны отсутствие оформленных генетических горизонтов [33], сильная каменистость и высокая плотность. Органическое вещество биогенного происхождения присутствует на поверхности в виде дискретного тонкого опада этого года, а также в слое 0–20 см в виде немногочисленных корней и корневых остатков.

На участках отвалов возрастом 20–40 лет (участки 5–8ЭОА) с каменным углесодержащим субстратом развиваются две группы растительных группировок – травянистые и древесные (см. табл. 1). Травянистые сообщества в основном простые, разнотравные, с преобладанием донника желтого (*M. officinalis* L.), земляники зеленой (*Fragaria viridis* Duch.), отдельными куртинами встречаются ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) и костер ржаной (*Bromus secalinus* L.), занимают горизонтальные спланированные поверхности (участок 5ЭОА_г) [32]. Древесная растительность распространена на участках с бугристым рельефом и на склонах (6–8ЭОА_д). Здесь произрастают мелколиственно-сосновые леса, состоящие из березы (*Betula pendula* Roth.), осины (*Pópulus trémula* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvéstris* L.) с разнотравным травянистым и моховым напочвенным покровом. Высота и состав древостоя варьируют в широких пределах в силу неоднородности состава пород, особенностей рельефа и разновозрастности участков. Единичные представители травянистого яруса – донник желтый

(*M. officinalis* L.), ежа сборная (*D. glomerata* L.) и мать-и-мачеха (*Tussilágo fárfara* L.). Проективное покрытие достигает 80% [32]. Такое сообщество является характерным для отвалов лесостепной зоны Западной Сибири [34]. На рассматриваемых участках в составе почвенного покрова преобладают эмбриоземы органо-аккумулятивные [33]. Их основное отличие – выраженный горизонт накопления слаборазложившегося органического вещества. Горизонт представлен подстилкой из отмерших частей травянистой растительности или древесным опадом. Мощность подстилочного горизонта неоднородна и зависит как от положения в тессере (совокупности приствольного, подкронового и межкroнового пространств), так и от возраста участка и состава древостоя.

Наиболее сложные и развитые растительные сообщества распространены на старых (старше 25 лет) участках отсыпки каменистого (с выровненным рельефом) и рыхлого глинистого (с бугристым рельефом) субстрата. В составе сообществ – наибольшее число видов, максимальная площадь проективного покрытия (до 80–100%), а также ярусная дифференциация. Преобладают злаки: ежа сборная (*D. glomerata* L.), костер ржаной (*B. secalinus* L.), мятлик узколистный (*Poa angustifolia* L.). В формирующемся фитоценозе с корневищными или корнеотпрысковыми растениями с мощной корневой системой более активно происходит освоение внутрипочвенного пространства. В результате этого под сложными растительными группировками формируются дерновые эмбриоземы [33]. В них, наряду с горизонтом подстилки (опада), образуется дерновый горизонт. На рыхлых породах он обильно пронизывает верхнюю часть минеральной толщи корнями травянистых растений (10ЭД_p), на плотных – фрагментарен и заметно дифференцирован от субстрата (9ЭД_п). Таким образом, по причине того, что описываемые сукцессии биоценозов сопровождаются сменой стадий почвообразования, изменением свойств исходного субстрата и параметров микроклимата, исследуемые почвы следует рассматривать в качестве эволюционного ряда ЭИ-ЭОА-ЭД [8].

Согласно коррелятивной системе WRB [33], все изученные эмбриоземы относятся к реферативной группе Technosol (см. табл. 1). В «Классификации и диагностике почв России» наиболее близкими к описываемым почвам являются литостраты, литоземы и петроземы [35]. Более подробно морфологическое строение эмбриоземов приведено в ранее опубликованных работах [33].

Отбор проб на исследуемых участках проводился в июле–августе 2023 г. Учитывая то, что генетические горизонты исследуемых техногенных образований маломощны, а более 90% корней сосредоточено в верхней 20-сантиметровой толще, образцы почв отбирались послойно, с глубин 0–5, 5–10 и 10–20 см. При этом подстилка в исследуемую толщу не включалась. В инициальных эмбриоземах на участках возрастом не более 4 лет по причине слабой переработанности субстрата почвенными, биологическими и процессами выветривания отбирался единый образец для слоя 0–20 см. Из каждого слоя весь вынимаемый субстрат упаковывал-

ся в плотные полиэтиленовые пакеты. В зависимости от степени каменистости почв масса среднего образца составляла от 3 до 10 кг. В лабораторных условиях отобранные образцы сушили на воздухе при комнатной температуре. Затем проводили рассев всех образцов на стандартных ситах по фракциям 1–3, 3–5, 5–10 и > 10 мм. Из отсеянных образцов каждой фракции вручную отбирали и взвешивали углистые частицы и крупные корни (остающиеся на ситах > 1 мм).

Методы исследований. В полевых условиях пенетрометром Wile Soil измеряли твердость эмбриоземов, по значениям которой при помощи функции зависимости [36] определялась плотность почв. Общее содержание углерода ($C_{\text{общ}}$), содержание углерода в углистых частицах ($C_{\text{уг}}$) и углерода крупных корней ($C_{\text{ккорн}}$) устанавливали на автоматическом CHN-анализаторе Perkin Elmer 2400 Series II. Предварительно образцы мелкозема, углистых частиц и корней измельчали в ступке до состояния пудры. Содержание неорганического углерода (карбонатов) ($C_{\text{неорг}}$) определяли согласно ГОСТ 34467-2018 гравиметрическим методом в крупноземе и манометрическим в мелкоземе.

Долю отдельных пулов углерода в мелкоземе устанавливали посредством окислительного фракционирования [37], что позволяет условно дифференцировать пулы по происхождению. Одну навеску почвы после ручного отбора мелких корней подвергали окислению бихроматом калия (по методу Тюрина в модификации согласно ГОСТ 26213-91). Полученный результат с определенными условностями можно отнести к пулу педогенного углерода ($C_{\text{пед}}$). Условность состоит в том, что под педогенным в данном случае мы подразумеваем не только углерод специфического органического вещества, представленного гумусом, но и той части органического вещества углей (в мелкоземе), которая способна выполнять его функции. К этим функциям, наряду со слабой устойчивостью к окислению, относится способность углей поглощать из растворов катионы [38] и депонировать азот [28]. Другую навеску той же пробы окисляли в муфельной печи при температуре 525°C согласно ГОСТ 23740-2016. Так, органическое вещество, не окисляемое при указанной температуре, содержит литогенный (геогенный) углерод ($C_{\text{лит}}$), представленный включениями неокисленного антрацита [29, 39]. Традиционно сжигание в муфельной печи используется для оценки содержания органического вещества в торфяных почвах. Предположительно при данной температуре в исследуемых пробах сгорают часть углистых частиц, продуктов их трансформации, мелкие корни и другие органические вещества биогенного происхождения. Поэтому значения потерь при прокаливании с учетом потерь гигроскопической влаги умножались на коэффициент 0,58 (1/1,724), используемый в традиционных методах мокрого сжигания для пересчета содержания органического вещества (гумуса) на углерод. Полученные значения после вычитания $C_{\text{пед}}$ были приняты нами как содержание углерода неспецифического органического вещества ($C_{\text{несп}}$). Возможность и непротиворечивость применения такого подхода к разделению $C_{\text{лит}}$ и $C_{\text{несп}}$ подтверждается тем, что содержание углерода, получаемое при сжигании навески в муфельной печи, не превы-

шает содержание, фиксируемое при помощи CHN-анализатора. Таким образом, общее содержание углерода ($C_{\text{общ}}$) исследуемых почв формируется как сумма пулов:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{пед}} + C_{\text{несп}} + C_{\text{ккорн}} + C_{\text{неорг}} + C_{\text{лит}} + C_{\text{ут}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пед}}$ – углерод педогенного органического вещества, определяемый бихроматным окислением; $C_{\text{несп}}$ – углерод неспецифического органического вещества, определяемый как разница между значениями потерь при прокаливании, умноженных на коэффициент 0,58 и $C_{\text{пед}}$; $C_{\text{ккорн}}$ – углерод крупных корней, определяемый при помощи CHN-анализатора; $C_{\text{неорг}}$ – углерод карбонатов, определяемый как сумма значений, полученных гравиметрическим и манометрическим методами; $C_{\text{лит}}$ – углерод литогенного органического вещества, определяемый как разница между значениями углерода мелкозема, полученного при помощи CHN-анализатора, и суммой значений, полученных по потерям при прокаливании и углерода карбонатов в мелкоземе; $C_{\text{ут}}$ – углерод углистых частиц, определяемый в CHN-анализаторе (рис. 1).

Все оцениваемые показатели, полученные как для мелкозема, так и для скелетной части эмбриоземов, рассчитывались на всю почву с учетом доли каждой фракции (< 1, 1–3, 3–5, 5–10 и > 10 мм).

Расчет запасов углерода в целом и по пулам для исследуемых почв осуществлялся с учетом плотности почв следующим образом:

$$C_{\text{зап}} = C \cdot H \cdot P, \quad (2)$$

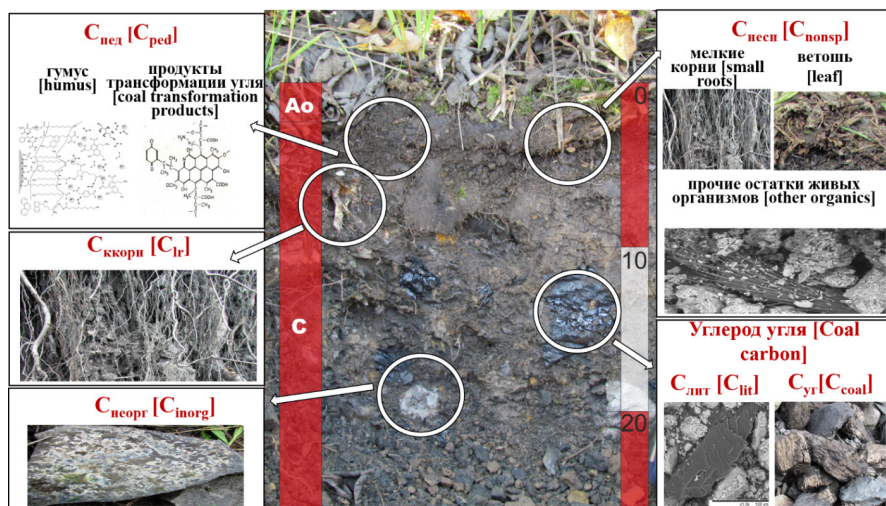


Рис. 1. Структура пулов углерода в эмбриоземах: $C_{\text{неорг}}$ – неорганический углерод (карбонатов), $C_{\text{пед}}$ – педогенный углерод, $C_{\text{лит}}$ – литогенный углерод, $C_{\text{несп}}$ – углерод неспецифического органического вещества, $C_{\text{ккорн}}$ – углерод крупных корней, $C_{\text{ут}}$ – углерод углистых частиц

[Fig. 1. Structure of carbon pools in embryozems: C_{inorg} - inorganic carbon, C_{ped} - pedogenic carbon, C_{lit} - lithogenic carbon, C_{nonsp} - carbon of nonspecific organic matter, C_{kr} - carbon of large roots, C_{coal} - carbon of coal particles]

где $C_{\text{зап}}$ – запасы углерода, в т/га; C – содержание углерода пула во фракции исследуемого слоя, в %; H – мощность исследуемого слоя, в см; P – плотность исследуемого слоя, в г/см³. Запасы углерода в слое 0–20 см рассчитывались при сложении его запасов по фракциям в слоях 0–5, 5–10 и 10–20 см.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа (SNEDECOR V5.6), различия значений оценивались по критерию наименьшей существенной разницы на уровне значимости $p \leq 0,05$ (НСР₀₅).

Результаты исследования и обсуждение

В почвах репрезентативных участков изучен ряд свойств, которые оказывают влияние на содержание и запасы углерода. В первую очередь, это содержание каменистой фракции (скелетность) и плотность. Полученные данные показали большой разброс значений по указанным параметрам, что в целом является нормальным для эмбриоземов, формирующихся на неоднородном субстрате (табл. 2). Максимальное содержание крупнообломочной фракции (>3 мм) характерно для инициальных эмбриоземов, в них оно

Таблица 2 [Table 2]

Основные физические свойства эмбриоземов Горловского антрацитового месторождения

[Main physical properties of embryozems on damp of Gorlovskoe anthracite deposit]

Параметр [Feature]	Глубина, см [Depth, cm]	Эмбриозем* [Embryozem]			
		ЭИ _{м,с} (n = 14) [IE _{y,c}]	ЭОА _г (n = 12) [OAE _г]	ЭОА _д (n = 7) [OAE _д]	ЭД _{н,р} (n = 9) [SE _{н,р}]
Доля фракции > 3 мм, % [Fraction > 3 mm, %]	0–5	31,0–80,1	32,5–60,5	20,8–66,5	0,0–28,5
	5–10	45,8–84,1	55,0–66,1	50,2–85,3	0,0–36,7
	10–20	57,5–90,1	56,1–79,5	63,3–73,0	0,0–53,0
Доля фракции < 1 мм, % [Fraction > 1 mm, %]	0–5	1,4–47,0	28,1–46,1	24,2–69,5	50,4–100,0
	5–10	5,7–48,7	23,5–45,6	10,8–41,1	38,1–100,0
	10–20	4,7–35,7	20,3–30,9	21,0–32,4	21,5–100,0
Доля фракции < 0,01 мм, % [Fraction > 0,01 mm, %]	0–5	0,1–17,6	4,3–8,5	1,9–17,9	13,1–59,0
	5–10	0,5–17,0	3,5–4,1	2,0–11,9	14,3–61,0
	10–20	0,4–11,6	1,2–8,5	5,1–10,6	7,4–59,6
Плотность, г/см ³ [Density, g/cm ³]	0–5	1,5–2,3	1,5–1,8	1,2–1,5	1,3–1,4
	5–10	1,6–2,3	1,7–1,8	1,4–1,8	1,3–1,6
	10–20	1,5–2,4	1,7–2,1	1,7–2,2	1,4–2,1

Примечание: * Расшифровку сокращений см. в табл. 1.

[Note: * See abbreviation in table 1].

варьирует в широком диапазоне от 31% до 90%. Содержание включений угля в профиле исследуемых почв также варьирует в широких пределах и достигает 15%. Наименее каменистыми являются эмбриоземы дерновые. В последних интервал значений количества фракции наиболее узкий, а на участках отсыпки глин (ЭД_р) каменистая фракция отсутствует.

Плотность изученных почв отличается большими величинами, что обусловлено их сильной каменистостью, а также механическим уплотнением субстрата под воздействием транспорта при выравнивании поверхности отвалов. Повышению плотности способствует и своеобразная текстура эмбриоземов, когда более мелкие каменистые включения занимают пространство между более крупными, образуя компактный горизонт [18]. Изменения величины плотности изученных почв в целом повторяют тенденцию, выявленную для гранулометрического состава: в ряду от инициальных эмбриоземов к дерновым снижаются средние и медианные значения (см. табл. 2), что в числе прочего указывает на развитие растительных сообществ на отвалах, способствующих разуплотнению верхнего горизонта почв за счет рыхления корнями растений. Поэтому наибольшая плотность отмечается у инициальных эмбриоземов (участки 2ЭИ_м и 3-4ЭИ_с). В них она достигает 2,4 г/см³, при этом плотность увеличивается с глубиной. Наименее плотными можно назвать органо-аккумулятивные эмбриоземы (7ЭОА_д) склоновых участков и эмбриоземы дерновые на глинистых породах (10ЭД_р), но и здесь значения не опускаются ниже 1,2 г/см³.

Содержание углерода. Охарактеризованные особенности свойств эмбриоземов оказывают значительное влияние на содержание пулов углерода, а также на структуру их запасов. Общее содержание углерода, определяемого в CHN-анализаторе, составляет 0,6–27,1% (табл. 3). Как и в случае других свойств, эти значения содержания и запасов углерода характеризуются ненормальным распределением как по участкам, так и в вертикальном профиле и на одинаковых глубинах почв. Однако обнаруживаются некоторые признаки закономерности внутри групп участков. Так, на участках с эмбриоземами органо-аккумулятивными на старовозрастных отвалах минимальное количество С_{общ} выявлено под травянистыми сообществами (до 10%), тогда как под древесными насаждениями оно возрастает до 27,1% (в слое 0–5 см). Количество общего углерода в эмбриоземах инициальных на свежееотсыпанных отвалах (до 4 лет) сильно отличается: на участке 2ЭИ_м без растительности определено 15,8% С_{общ}, на первом участке (1ЭИ_м) – всего 6,0% (см. табл. 3). На более старых отвалах (участки 3–4ЭИ_с) под пионерными растительными сообществами содержание С_{общ} в эмбриоземах инициальных варьирует в пределах 8,2–14,8%. На самых старых отвалах под сложными растительными сообществами с эмбриоземами дерновыми С_{общ} варьирует в диапазоне 3,5–10,1%.

Доля различных пулов углерода в С_{общ} эмбриоземов изменяется в зависимости от типов почв и характера почвообразующих пород. Существенный вклад в общее содержание углерода эмбриоземов на каменистом угле-содержащем субстрате дает углерод углистых частиц (С_{уг}) (см. табл. 3). Наибольшее количество С_{уг} – в инициальных эмбриоземах (участок 2ЭИ_м)

Таблица 3 [Table 3]

Общее и содержание углерода по пулам в эмбриоземах
[Structure and content of carbon pools in embryozems]

Участок [Site]	C _{общ} , % [C _{tot} , %]	Пулы углерода, в % [Carbon pools, %]					
		C _{неорг} [C _{inorg}]	C _{пед} [C _{ped}]	C _{лит} [C _{lit}]	C _{несп} [C _{nonsp}]	C _{ккорн} [C _{lr}]	C _{уг} , % [C _{coal} , %]
1ЭИ _м [1E _z]	6,0	0,07	0,10	0,45	0,31	0,00	5,1
2ЭИ _м [2E _z]	15,8	0,01	0,07	0,53	0,08	0,00	15,1
3ЭИ _с [3E _o]	12,9/8,2/ 9,1	0,04/0,04/ 0,04	0,34/0,47/ 0,15	2,19/4,36/ 2,36	1,30/2,76/ 2,65	0,02/0,00/ 0,00	12,9/8,2/ 9,1
4ЭИ _с [4E _o]	13,6/14,2/ 14,8	0,06/0,05/ 0,06	0,10/0,01/ 0,01	0,63/0,07/ 0,00	0,32/0,17/ 0,12	0,02/0,00/ 0,00	12,5/13,9/ 14,6
5ЭОА _г [5OAE _h]	5,1/2,4/ 2,2	0,03/0,01/ 0,01	0,47/0,09/ 0,08	1,60/0,11/ 0,23	1,95/1,08/ 0,50	0,14/0,15/ 0,00	0,9/0,9/ 1,4
6ЭОА _д [6OAE _r]	17,8/11,3/ 0,6	0,01/0,01/ 0,01	0,44/0,11/ 0,04	0,00/0,27/ 0,32	3,21/1,48/ 0,25	0,17/0,06/ 0,00	13,9/9,4/ 0,0
7ЭОА _д [7OAE _r]	13,5/13,3/ 22,3	0,02/0,03/ 0,04	0,19/0,05/ 0,25	0,48/0,16/ 3,62	0,88/0,46/ 1,31	0,09/0,02/ 0,00	11,9/12,6/ 17,0
8ЭОА _д [8OAE _r]	27,1/22,3/ 4,5	0,11/0,06/ 0,04	1,00/0,40/ 0,40	14,09/4,34/ 2,18	4,02/2,44/ 1,03	0,13/0,13/ 0,05	7,9/15,2/ 0,8
9ЭД _п [9SE _h]	5,5/5,5/ 4,4	0,02/0,01/ 0,01	0,36/0,30/ 0,33	0,00/2,69/ 1,27	3,86/1,78/ 1,51	0,53/0,05/ 0,09	0,7/0,6/ 1,2
10ЭД _р [10SE _r]	10,1/4,0/ 3,5	0,03/0,03/ 0,03	0,70/0,28/ 0,10	0,00/0,00/ 0,00	6,34/3,62/ 3,38	2,99/0,04/ 0,00	0,0/0,0/ 0,0
НСП ₀₅ [SSD ₀₅]	–	0,01	0,02	0,40	0,40	0,20	0,5

Примечание. Полу жирным выделены горизонтальные выровненные участки. Значения в таблице приведены для глубин 0–5/5–10/10–20 см. Значения для участков 1–2ЭИ_м приведены для глубины 0–20 см. НСП₀₅ – наименьшая существенная разница на уровне значимости $p \leq 0,05$. Расшифровку сокращений см. в табл. 1 и на рис. 1.

[Note. Horizontal aligned sections are highlighted in bold. The values are given for depths 0-5/5-10/10-20 sm. The values in soils of 1-2 sites are given for depths 0-20 sm. SSD₀₅ - the smallest significant difference at the significance level is $p \leq 0.05$. See abbreviation in table 1 and fig. 1].

и эмбриоземах органо-аккумулятивных (участки 7–8ЭОА_д), сформированных под лесными сообществами растений. При этом количество литогенного углерода C_{лит} (углистых частиц), определяемого в мелкозем, не коррелирует с C_{уг}, поскольку по количеству мелкозема почвы сильно различаются (см. табл. 2).

В изученных эмбриоземах определено от 0,01% до 0,11% неорганического углерода карбонатов (C_{неорг}). Наибольшее их количество присутствует в эмбриоземах инициальных (участки 1ЭИ_м и 4ЭИ_с) и органо-аккумулятивных на бугристых участках (участок 8ЭОА_д). Визуально при полевых наблюдениях отмечено отсутствие выраженной реакции мелкозема почв на

действие 10% HCl. Однако на гранях каменистых включений на поверхности почв и в профиле выявлены аккумуляции вторичных карбонатов в форме кутан и скоплений кристаллов (рис. 2).

В отличие от естественных почв вклад $C_{\text{пед}}$ в $C_{\text{общ}}$ эмбриоземов незначителен. В изученных почвах содержание $C_{\text{пед}}$ варьирует в сравнительно узком диапазоне – от 0,01% до 1,0% при средних значениях менее 0,5% (см. табл. 3). Максимальные значения $C_{\text{пед}}$ характерны для участка с бугристым микрорельефом в эмбриоземах органо-аккумулятивных, обогащенных углистыми включениями (8ЭОА_д). Это обусловлено сочетанием таких факторов, как наличие большого количества выветрелых углистых включений и скопления органики в понижениях между буграми. В группе эмбриоземов дерновых относительно большее количество $C_{\text{пед}}$ содержится в эмбриоземе на участке с рыхлыми почвообразующими породами (9ЭД_п).

Содержание углерода неспецифического органического вещества ($C_{\text{несп}}$) в эмбриоземах варьирует в диапазоне от 0,12% до 6,34%. Распределение в почвах этого пула как в пространстве, так и в вертикальном профиле крайне неоднородно и без выраженных закономерностей (см. табл. 3). Наибольшие значения для слоя 0–5 см (более 6%) зафиксированы в эмбриоземах дерновых, сформированных на рыхлых породах под сложными растительными сообществами (участок 10ЭД_р). Выявленное преобладание содержания $C_{\text{несп}}$ над $C_{\text{пед}}$ обусловлено, с одной стороны, невысоким содержанием фракции физической глины в эмбриоземах (см. табл. 2), а с другой стороны, преобладанием процессов аккумуляции грубого органического вещества (растительных остатков) над гумусонакоплением. Такое сочетание не благоприятствует установлению органо-минеральных взаимодействий и образованию собственно гумуса в почвах техногенных ландшафтов. Пул $C_{\text{пед}}$ выделен по количеству органического углерода, определяемого методом мокрого сжигания. Такой углерод является результатом процессов, близких к естественному гумусонакоплению [28], или является частью органического вещества, выполняющего некоторые функции гумуса [27, 38]. В ненарушенных черноземах содержание углерода гумуса снижается с глубиной. Такая же тенденция отмечена в наиболее «продвинутых», с точки зрения развитости процессов почвообразования, дерновых эмбриоземах на рыхлых породах, а также в органо-аккумулятивных эмбриоземах под травянистыми сообществами. В целом почвы спланированных участков отсыпки каменистых пород образуют ряд от инициальных к дерновым эмбриоземам, в котором отмечается повышение содержания $C_{\text{пед}}$ и $C_{\text{несп}}$ – $1ЭИ_{\text{м}} < 3ЭИ_{\text{с}} < 5ЭОА_{\text{т}} < 9ЭД_{\text{п}}$.

Отмеченная тенденция свойственна также и пулу углерода крупных корней $C_{\text{ккорн}}$. Его количество в изученных почвах невелико (см. табл. 3). Заметно выделяются эмбриоземы дерновые на рыхлых безуглистых породах (участок 10ЭД_р), в них содержание $C_{\text{ккорн}}$ достигает 2,99%. Пул предсказуемо отсутствует в эмбриоземах инициальных молодых участков (1ЭИ_м и 2ЭИ_м).

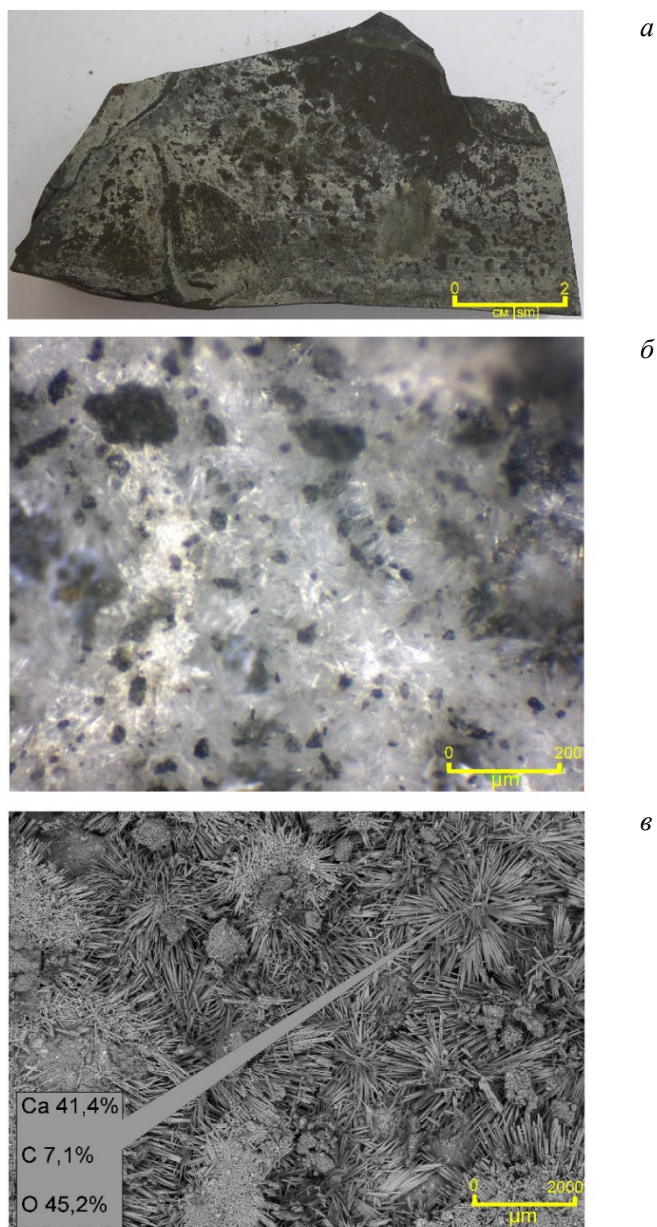


Рис. 2. Карбонатные новообразования на поверхности обломков с отвалов Горловского антрацитового месторождения: *а* – общий вид; *б* – снимок с оптического микроскопа; *в* – СЭМ-изображение с элементарным составом
[Fig. 2. Carbonate forms on the rock fragments from the dumps of the Gorlovskoye anthracite deposit: *a* - general view, *б* - microscopic view, *в* - SEM-picture with elemental composition]

Высокая неоднородность условий почвообразования в техногенном ландшафте и различный вклад отдельных пулов углерода обусловили от-

носителю большое содержание общего углерода в изученных эмбриоземах и его варьирование в широких интервалах (см. табл. 3). Как показали результаты, долевого вклад отдельных пулов углерода в общее содержание определяется возрастом отвала, спецификой почвообразующего субстрата и степенью развитости биологических процессов. Существенный сдвиг соотношения пулов в сторону углерода субстрата ($C_{лит}$ и $C_{уг}$) указывает на один из приоритетных источников формирования общего содержания углерода в техногенных ландшафтах – породы отвалов, в составе которых значительна доля углистых частиц. Однако в содержании $C_{уг}$ не прослеживаются выраженных закономерностей, что объясняется исходной высокой хаотичностью почвообразующих пород, формирующейся в ходе неселективной отсыпки отвалов. В то же время более высокие концентрации углерода органического вещества, образованного в результате развития эмбриоземов ($C_{пед}$, $C_{несп}$ и $C_{ккорн}$), отмечаются на участках с минимальным содержанием $C_{лит}$ и $C_{уг}$, что, вероятно, свидетельствует о негативном влиянии угля на депонирование углерода почвами.

Запасы углерода. В целом запасы общего углерода в изученных эмбриоземах варьируют в диапазоне от 87,5 до 473,9 т/га (рис. 3). Наибольшие запасы сосредоточены в эмбриоземах инициальных (1–4ЭИ), минимальные запасы – в эмбриоземах дерновых (9–10ЭД), а также органо-аккумулятивных под травянистой растительностью (5ЭОА_т). В структуре запасов большинства исследуемых почв преобладает углерод углистых частиц скелетной части почв ($C_{уг}$). На его долю приходится от 63,5% до 96,7% запасов

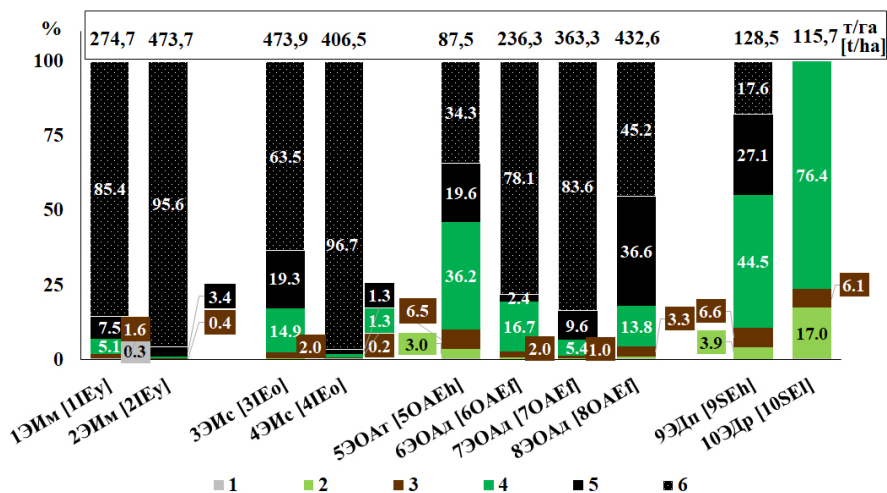


Рис. 3. Общие запасы углерода (в т/га) и структура запасов пулов углерода (%) в эмбриоземах: 1 – $C_{неорг}$, 2 – $C_{ккорн}$, 3 – $C_{пед}$, 4 – $C_{несп}$, 5 – $C_{лит}$, 6 – $C_{уг}$ (расшифровку сокращений см. табл. 1, рис. 1). Ось X – доля пулов углерода от общих запасов, ось Y – участки

[Fig. 3. Total stocks of carbon (t/ha) and the structure of carbon pools stocks in embryozems: 1 - C_{inorg} , 2 - C_{lr} , 3 - C_{peds} , 4 - C_{nonsp} , 5 - C_{lit} , 6 - C_{coal} (see abbreviations in table 1 and fig. 1). On X-axis - percentage of carbon pools in total amount stocks of carbon, on Y-axis - sites]

в инициальных эмбриоземах. В следующих в эволюционном ряду за инициальными эмбриоземах органо-аккумулятивных также отмечается преобладание $C_{\text{уг}}$ на склоновых участках (6–7ЭОА_д). На горизонтальных участках $C_{\text{уг}}$ составляет 1/3 от общих запасов, но при этом они сопоставимы с запасами $C_{\text{несп}}$ на участках с травянистой растительностью и $C_{\text{лит}}$ на бугристых участках под лесной растительностью. Накопление $C_{\text{лит}}$ здесь, как и на других горизонтальных участках (3ЭИ_с и 9ЭД_п), очевидно, связано с отсутствием выноса тонких угольных частиц в результате склоновых процессов. Все это происходит на фоне неодинакового содержания угля в почвах, которое определяется особенностями некондиционного антрацита в угольных и вмещающих пластах и спецификой формирования отвала.

Запасы углерода менее устойчивого к окислению органического вещества ($C_{\text{пед}}$, $C_{\text{несп}}$ и $C_{\text{ккорн}}$) имеют тенденцию к увеличению доли от общих запасов в эволюционном ряду почв (см. рис. 3). Наиболее наглядно это проявляется под травянистой растительностью на спланированных участках, сформированных плотными осадочными породами (1ЭИ_м < 3ЭИ_с < 5ЭОА_т < 9ЭД_п), что отражает развитие здесь почвенных и биологических процессов. Роль педогенеза повышается в более развитых почвах – в нашем случае – в эмбриоземах дерновых под сложными сообществами растительности на наиболее старых участках. В дерновых эмбриоземах в структуре запасов углерода более выраженный вклад в $C_{\text{общ}}$ вносит $C_{\text{несп}}$, нежели $C_{\text{пед}}$, оценку которого чаще всего проводят традиционным методом бихроматного окисления.

На склоновых и участках с бугристым рельефом в органо-аккумулятивных эмбриоземах (6–8ЭОА_д) соотношение запасов различных пулов сходно с таковым в инициальных эмбриоземах, представляющих начальные стадии почвообразования. Учитывая высокую долю в них $C_{\text{уг}}$, можно отметить, что наличие включений угля отрицательно сказывается на процессах почвообразования и депонирования углерода почвами. Эволюция почв под лесной растительностью останавливается на органо-аккумулятивной стадии. В то время как системы органических веществ, судя по соотношению запасов, в углеобогатенных почвах изменяются незначительно.

Запасы пула крупных корней $C_{\text{ккорн}}$ характеризуются как незначительные. Это связано с высокой каменистостью почв и плотностью каменистых отдельностей (см. табл. 2), на фоне большой массы которых масса корней мала (см. табл. 3) Тем не менее в распределении $C_{\text{ккорн}}$ отмечается постепенное увеличение значений в ряду от эмбриоземов инициальных к дерновым (см. рис. 3). Наибольшие запасы $C_{\text{ккорн}}$, как и $C_{\text{несп}}$, выявлены в почвах на рыхлом безуглистом субстрате (участок 10ЭД_р), где складываются наиболее благоприятные условия для развития корней. Фиксируемые здесь высокие значения запасов $C_{\text{несп}}$ обусловлены рядом причин. Первая состоит в том, что в $C_{\text{несп}}$ вошел углерод мелкозема фракции > 0,25 мм, содержание которого не учитывается при определении $C_{\text{пед}}$ традиционным методом бихроматного окисления. Вторая связана с более высоким содержанием в почвах данного участка как крупных корней, о чем свидетельствуют

значения $C_{\text{ккортн}}$ (см. табл. 2, рис. 3), так и, по всей видимости, мелких. Учитывая суммарные запасы углерода в этих почвах, а также их возраст, следует отметить, что за первые 20 лет скорость секвестрации углерода отвалами, отсыпанными рыхлыми породами, составляет около 5,8 т/га в год. Для сравнения, скорости секвестрации углерода в почвах под агроценозами за аналогичный период времени составили от 0,4 до 1 т/га в год [40], а в почвах под лесными насаждениями – от 0,2 до 1,98 т/га [41]. Более высокие скорости секвестрации углерода в эмбриоземах на рыхлых породах позволяют считать последние наиболее оптимальным субстратом для проведения рекультивации нарушенных территорий.

Еще одним заслуживающим внимание пулом является неорганический углерод (углерод карбонатов) $C_{\text{неорг}}$. В эмбриоземах, формирующихся на углесодержащих отвалах, карбонаты учитываются как одно из их свойств [42–44] и рассматриваются в качестве отдельной фракции общего углерода [45, 46]. Один из источников карбонатов в изученных эмбриоземах – породы, которыми сложен отвал (алевролиты и песчаники на известковом цементе). Обычно выветрелые породы складываются в нижние ярусы отвалов, а верхние, на поверхности которых образуется почвенный покров, сложены слабо- и трудно выветриваемыми аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Этим отчасти можно объяснить невысокое содержание карбонатов в изученных почвах – низкие темпы выветривания породы и небольшой промежуток времени для этого не способствовали активному накоплению карбонатных новообразований. Другим источником углерода карбонатов, по аналогии с естественными почвами, могут служить атмосферные выпадения, а также пылевые взвеси. Считается, что в естественных почвах карбонаты являются наиболее консервативным депо атмосферного углерода [47]. Хорошо выраженные в твердой фазе карбонаты (карбонатные новообразования) повсеместно и в большом количестве встречаются в аридных ландшафтах. В субгумидных условиях с большим количеством осадков, к которым относится район исследований, естественные автоморфные почвы выщелочены от карбонатов [48]. Проведенные нами полевые исследования показали, что на отвалах карбонатные новообразования встречаются на отдельных гранях обломков породы на поверхности отвалов, а также (в меньшем количестве) – в профиле. Морфологически новообразования представляют собой либо тонкие кутаны, либо сростки игольчатых кристаллов (см. рис. 2). По запасам углерод карбонатов отличается минимальными значениями (см. рис. 3) – 0,2–0,5% от общих запасов (до 2 т/га). Возможно, процессы аккумуляции карбонатов более выражены в аналогичных отвалах, расположенных аридных районах Сибири, где запасы закрепленного в почвах таким способом углерода могут быть сопоставимы с запасами биогенно и педогенно аккумуляированного.

Таким образом, полученные результаты показывают, что почвы отвалов отходов угледобычи не только отличаются повышенными запасами углерода, но и обладают высоким потенциалом его секвестрации. Особенно при складировании на поверхность отвалов рыхлых безугольных пород.

Проведение рекультивации, учитывающей эти особенности, позволит не только минимизировать углеродный след от открытой добычи угля, но и сделает техногенные ландшафты перспективными объектами для организации карбоновых полигонов и ферм.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что почвы (эмбриоземы) техногенных ландшафтов отвалов Горловского антрацитового месторождения характеризуются повышенным содержанием (до 27,1%) и запасами (до 473,9 т/га) углерода в слое 0–20 см. Основная часть углерода приходится на включения угля крупнообломочных фракций ($C_{\text{уг}}$). Максимальное содержание и запасы $C_{\text{уг}}$ характерны для инициальных эмбриоземов молодых участков, минимальные – для дерновых эмбриоземов. На втором месте как по содержанию, так и по запасам находится литогенный углерод мелкодисперсных углистых частиц ($C_{\text{лит}}$) и углерод неспецифического органического вещества ($C_{\text{несп}}$), включающего углерод мелких корней, других биогенных компонентов почв, а также продуктов трансформации углей. Наиболее высокие концентрации $C_{\text{лит}}$ зафиксированы в эмбриоземах старых участков, отсыпанных углесодержащими породами. Увеличение доли $C_{\text{лит}}$ в структуре запасов свидетельствует об их аккумуляции в почвах при дезинтеграции включений угля. В эмбриоземах техногенных ландшафтов вместе с секвестрацией органического углерода происходит также закрепление углерода ($C_{\text{неорг}}$) в виде карбонатных натечков на поверхностях камней.

Содержание и запасы $C_{\text{несп}}$, $C_{\text{пед}}$ и $C_{\text{ккор}}$ увеличиваются в эволюционном ряду эмбриоземов от инициальных к дерновым. Наиболее заметно это происходит под травянистой растительностью на выровненных горизонтальных участках и особенно выражено там, где поверхность сформирована рыхлыми осадочными породами. В последнем случае скорость секвестрации углерода почвами отвалов в первые 20 лет может достигать 5,8 т/га в год. В почвах склоновых и участков с бугристым рельефом, в том числе и старых отвалов, соотношение запасов различных пулов углерода аналогично почвам начальных стадий почвообразования и характеризуется преобладанием $C_{\text{уг}}$. Поскольку на участках с расчленённым рельефом доминирует древесная растительность, то можно сделать вывод, что под лесными сообществами на отвалах в верхней части почв (0–20 см) сохраняются системы органических веществ с преобладанием характерных для почвообразующих пород литогенных компонентов.

Общим для всех исследуемых почв отвалов антрацитовых месторождений является тот факт, что доля углерода, определяемого традиционным методом бихроматного окисления ($C_{\text{пед}}$), не превышает 7% в структуре общих запасов. Это необходимо учитывать при оценке углеродного следа угледобычи. С целью минимизации негативных последствий, связанных с трансформацией углей в отвалах отходов добычи угля, и повышения секвестрирующей способности техногенных почв поверхность отвалов необходимо формировать рыхлыми осадочными породами.

Список источников

1. Чуков С.Н., Перминова И.В., Заварзина А.Г., Абакумов Е.В., Холодов В.А., Лодыгин Е.Д. Органическое вещество почв: проблемы и задачи изучения // Почвы – стратегический ресурс России: матер. пленарных докладов VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Школы молодых ученых по морфологии и классификации почв. Москва; Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2022. С. 52–59. doi: 10.31140/book-2022-05
2. Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. doi: 10.1134/s106422932207002x
3. ВИП ГЗ Углерод в экосистемах: мониторинг [Электронный ресурс]. URL: <https://vipgz-igras.ru> (дата обращения: 02.02.2024).
4. Столбовой В.С., Филь П.П. Оценка содержания углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России для климатических проектов // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 568–583. doi: 10.31857/S2587556623040143
5. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1686–1702. doi: 10.31857/S0032180X23601329
6. Кузнецова А.И., Гераськина А.П., Лукина Н.В., Смирнов В.Э., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Ручинская Е.В. Влияние биотических и абиотических факторов на запасы почвенного углерода в лесах // Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем / под ред. Н.В. Лукиной. М.: ТНИ КМК, 2021. С. 131–152.
7. Shrestha R.K., Lal R. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil // Environment International. 2006. Vol. 32. PP. 781–796. doi: 10.1016/j.envint.2006.05.001
8. Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (review) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 56. С. 6–32. doi: 10.17223/19988591/56/1
9. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2022 г. Кемерово, 2023 [Электронное издание]. URL: http://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2023/11/Doklad_za_2022_01_07_2023_04.pdf (дата обращения: 10.02.2024).
10. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2022 г. Красноярск, 2023 [Электронное издание]. URL: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/23022_svod_28.06.2023.pdf (дата обращения: 10.02.2024).
11. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Республике Саха (Якутия) в 2022 г. Якутск, 2023 [Электронное издание]. URL: <https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredu> (дата обращения: 10.02.2024).
12. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 г. М.: Минприроды, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. 864 с. [Электронное издание]. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredu_rossijskoy_federatsii_v_2020/?special_version=Y (дата обращения: 10.02.2024).
13. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Юронен Ю.П., Заяц В.В. Угольные разрезы Красноярского края из космоса. Экология нарушенных земель // Уголь. 2017. № 2. С. 66–68. doi: 10.18796/0041-5790-2017-2-66-68
14. Зеньков И.В., Чинь Ле Хунг, Анищенко Ю.А., Вокин В.Н., Кирюшина Е.В., Веретенова Т.А., Маглинец Ю.А., Латынцев А.А., Расвич К.В., Кондрашов П.М., Павлова П.Л., Лунев А.С. Исследование результатов работ по лесовосстановительной

- экологии на породных отвалах угольных карьеров в регионах Ангаро-Енисейской Сибири // Экология и промышленность России. 2022. № 26 (10). С. 45–51. doi: 10.18412/1816-0395-2022-10-45-51
15. Rumpel C., Knicker H., Kogel-Knabner I., Skjemstad J.O., Huttli R.F. Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils // *Geoderma*. 1998. Vol. 86 (1–2). PP. 123–142. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00036-6
 16. Schmidt M.W.I., Knicker H., Hatcher P.G., Kogel-Knabner I. Impact of brown coal dust on the organic matter in particle-size fractions of a Mollisol // *Organic Geochemistry*. 1996. Vol. 25 (1–2). PP. 29–39. doi: 10.1016/S0146-6380(96)00104-0
 17. Vinduškova O., Dvořáček V., Prohasková A., Frouz J. Distinguishing recent and fossil organic matter – A critical step in evaluation of post-mining soil development – using near infrared spectroscopy // *Ecological Engineering*. 2014. Vol. 73. PP. 643–648. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.086
 18. Соколов Д.А., Кулижский С.П., Лойко С.В., Доможакова Е.А. Использование сканирующей электронной микроскопии для диагностики процессов почвообразования на поверхности отвалов каменноугольных разрезов Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2014. № 3 (27). С. 36–52.
 19. Брагина П.С., Цибарт А.С., Завадская М.П., Шарапова А.В. Почвы на отвалах вскрышных пород в лесостепной и горно-таежной зонах Кузбасса // *Почвоведение*. 2014. № 7. С. 787–788. doi: 10.7868/80032180X14050037
 20. Chabbi A., Rumpel C., Grootes P.M., Gonzalez-Perez J.A., Delaune R.D., Gonzalez-Vila F., Nixdorf B. Lignite degradation and mineralization in lignite-containing mine sediment as revealed by ¹⁴C activity measurements and molecular analysis // *Organic Geochemistry*. 2006. Vol. 37. PP. 957–976. doi: 10.1016/j.orggeochem.2006.02.002
 21. Rumpel C. Microbial use of lignite compared to recent plant litter as substrates in reclaimed coal mine soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 2004. Vol. 36 (1). PP. 67–75. doi: 10.1016/j.soilbio.2003.08.020
 22. Rumpel C., Kogel-Knabner I. The role of lignite in the carbon cycle of lignite-containing mine soils: evidence from carbon mineralization and humic acid extractions // *Organic Geochemistry*. 2002. Vol. 33 (3). PP. 393–399. doi: 10.1016/S0146-6380(01)00169-3
 23. Геннадиев А.Н., Цибарт А.С. Факторы и особенности накопления пирогенных полициклических ароматических углеводородов в почвах заповедных и антропогенно-измененных территорий // *Почвоведение*. 2013. № 1. С. 32–40. doi: 10.7868/S0032180X13010024
 24. Соколов Д.А., Морозов С.В., Абакумов Е.В., Андроханов В.А. Полициклические ароматические углеводороды в почвах отвалов антрацитовых месторождений Сибири // *Почвоведение*. 2021. № 6. С. 701–714. doi: 10.31857/S0032180X21060125
 25. Feng Y., Wang J., Bai Z., Reading L. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review // *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 191. PP. 12–25. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.02.015
 26. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость органического вещества почв: аналитический обзор // *Почвоведение*. 2023. № 12. С. 1493–1521. doi: 10.31857/S0032180X23600841
 27. Красильников В.П. Устойчивые соединения углерода в почвах: происхождение и функции // *Почвоведение*. 2015. № 9. С. 1131. doi: 10.1134/S1064229315090069
 28. Соколов Д.А., Кулижский С.П., Лим А.Г., Гуркова Е.А., Нечаева Т.В., Мерзляков О.Э. Сравнительная оценка методов определения педогенного органического углерода в углесодержащих почвах // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2017. № 39. С. 29–43. doi: 10.17223/19988591/39/2
 29. Ussiri D.A.N., Jacinthe P-A., Lal R. Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review // *Geoderma*. 2014. Vol. 214–215. PP. 155–167. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.09.015

30. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации // Географическая основа – 1 : 2 500 000, 25 км в 1 см / науч. ред. Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. М. : Талка+, 2013.
31. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed. Vienna, Austria : International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
32. Скотарева А.Е., Иванов Н.А., Соколов Д.А. Оценка факторов, определяющих скорость и направленность развития растительных сообществ на отвалах отходов добычи угля (на примере Горловского антрацитового месторождения) // Почвы и окружающая среда. 2024. Т. 7, № 2. e259. doi: 10.31251/pos.v7i2.259
33. Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2002. Т. 9, № 3. С. 255–261.
34. Кандрашин Е.Р. Сукцессии биоты в техногенных экосистемах (на примере Кузнецкого угольного бассейна) : дис. ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1989. 180 с.
35. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
36. Соколова Н.А., Госсен И.Н., Соколов Д.А. Оценка пригодности вегетационных индексов для выявления почвенно-экологического состояния поверхности отвалов антрацитовых месторождений // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 1. С. 62–68. doi: 10.18412/1816-0395-2020-1-62-68
37. Соколов Д.А., Гуркова Е.А., Осинцева М.А. Бурова Н.В. Органическое вещество почв отвалов угольных предприятий Сибири: количественная и качественная оценка // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023. № 63. С. 132–149. doi: 10.17223/19988591/63/8
38. Нечаева Т.В., Соколов Д.А., Соколова Н.А. Оценка поглотительной способности углей различной степени метаморфизации на примере фиксации калия // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2018. № 44. С. 6–23. doi: 10.17223/19988591/44/1
39. Maharaj S., Barton C.D., Karatkanasis T.A.D., Rowe H.D., and Rimmer S.M. Distinguishing “new” from “old” organic carbon on reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: I. Method development // Soil Science. 2007. Vol. 172 (4). PP. 292–301. doi: 10.1097/SS.0b013e31803146e8
40. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрехимия. 2021. № 5. С. 3–13. doi: 10.31857/S0002188121050070
41. Тебенькова Д.Н., Гичан Д.В., Гагарин Ю.Н. Влияние лесоводственных мероприятий на почвенный углерод: обзор // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5, № 4. С. 116. doi: 10.31509/2658-607x-202252-116
42. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Прикамья. Пермь : ПГНИУ, 2016. 256 с.
43. Колпакова Д.Е., Милентьева И.С., Асякина Л.К., Фотина Н.В., Просеков А.Ю. Особенности минералогического состава техногенных почв угольных отвалов Кузбасса // Юг России: экология, развитие. 2024. № 19 (2). С. 92–103. doi: 10.18470/1992-1098-2024-2-9
44. Швабенланд И.С., Середина В.П. Почвенно-геоботаническая характеристика техногенных ландшафтов Восточно-Бейского каменноугольного месторождения // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 366. С. 188–193.
45. Das R., Maiti S.K. Importance of carbon fractionation for the estimation of carbon sequestration in reclaimed coalmine soils – A case study from Jharia coalfields, Jharkhand, India // Ecological Engineering. 2016. Vol. 90. PP. 135–140. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.025
46. Baumgartl T., Chan J., Bucka F., Pihlap E. Soil organic carbon in rehabilitated coal mine soils as an indicator for soil health // Mine Closure 2021: Proceedings of the 14th International Conference on Mine Closure / ed. by A.B. Fourie, M. Tibbett, A. Sharkuu. Ulaanbaatar : QMC Group, 2021. doi: 10.36487/ACG_repo/2152_121

47. Schlezinger W.H. Inorganic carbon: Global carbon cycle // *Managing Global Resources and Universal Processes* / ed. by B.D. Fath, S.E. Jorgensen. Boca Raton : CRC Press, 2020. PP. 706–708.
48. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. 349 с.

References

1. Chukov SN, Perminova IV, Zavarzina AG, Abakumov EV, Kholodov VA, Lodygin ED. Organicheskoe veshchestvo pochv: problemy i zadachi izucheniya [Soil organic matter: problems and tasks of study]. In: *Pochvy - strategicheskiy resurs Rossii. Materialy plenarnykh dokladov VIII s"ezda Obshchestva pochvedov im. V.V. Dokuchaeva i Shkoly molodykh uchenykh po morfologii i klassifikatsii pochv* [Soils - strategic resource of Russia. Proc. of Sci. Conf. (Syktyvkar, Russia, 10-14 August 2022). Shoba CA, Savin IYu, Lapteva EM, editors. Moscow, Syktyvkar: Publ. of Institute of Biology Komi SC UrB RAN; 2022. pp. 52-59. In Russian
2. Abakumov EV, Polyakov VI, Chukov SN. Approaches and methods for studying soil organic matter in the carbon polygons of Russia (Review). *Eurasian Soil Science*. 2022;55:849-860. doi: 10.1134/s106422932207002x
3. VIP GZ Uglerod v jekosistemah: monitoring [The most important innovative project of national importance. Carbon in ecosystems: monitoring] [Electronic resource]. Available at: <https://vipgz-igras.ru> (accessed 02.02.2024). In Russian
4. Stolbovoy VS, Fil PP. Assessment of the carbon content in agricultural soils of the European Russia for climate projects. *Izvestiâ Rossijskoj Akademii Nauk. Seriâ Geograficheskââ*. 2023;87(4):568-583. doi: 10.31857/S2587556623040143. In Russian
5. Koptsik GN, Koptsik SV, Kupriianova IV, Kadulin MS, Smirnova IE. Estimation of carbon stocks in soils of forest ecosystems as a basis for monitoring climatically active substances. *Eurasian Soil Science*. 2023;12:1686-1702. doi: 10.31857/S0032180X23601329
6. Kuznetsova AI, Geras'kina AP, Lukina NV, Smirnov VE, Tikhonova EV, Gornov AV, Shevchenko NE, Teben'kova DN, Ruchinskaya EV. Vliyanie bioticheskikh i abioticheskikh faktorov na zapasy pochvennogo ugleroda v lesakh [The influence of biotic and abiotic factors on soil carbon stocks in forests]. In: *Bioraznoobrazie i funkcionirovanie lesnykh ekosistem* [Biodiversity and functioning of forest ecosystems]. Lukina NV, editor. Moscow: TNI KMK; 2021. pp. 131-152. In Russian
7. Shrestha RK, Lal R. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. *Environment International*. 2006;32:781-796. doi: 10.1016/j.envint.2006.05.001
8. Sokolov DA, Androkhanov VA, Abakumov EV. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (review). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2021;56:6-32. doi: 10.17223/19988591/56/1
9. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Kemerovskoy oblasti-Kuzbassa v 2022 godu [State report on the state and protection of the environment of the Kemerovo region - Kuzbass in 2022]. Kemerovo; 2023 [Electronic resource]. Available at: http://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2023/11/Doklad_za_2022_01_07_2023_04.pdf (accessed: 10.02.2024). In Russian
10. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy v Krasnoyarskom krae v 2022 godu [State report on the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk territory in 2022]. Krasnoyarsk; 2023 [Electronic resource]. Available at: http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/23022_svod_28.06.2023.pdf (accessed: 10.02.2024). In Russian
11. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy v Respublike Sakha (Yakutiya) v 2022 godu [State report on the state and protection of the environment in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2022]. Yakutsk; 2023 [Electronic resource].

- Available at: <https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy> (accessed: 10.02.2024). In Russian
12. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu [State report on the state and protection of the environment in the Russian Federation in 2020]. Moscow: Minprirody, MGU im. M.V. Lomonosova; 2021. 864 p. [Electronic resource]. Available at: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2020/?special_version=Y (accessed: 10.02.2024). In Russian
 13. Zenkov IV, Nefedov BN, Yuronen YuP, Zayats VV. Space view of the Kranoyarsk territory coal open-pit mines. Disturbed lands environment. *Ugol*. 2017;2:66-68. doi: 10.18796/0041-5790-2017-2-66-68. In Russian
 14. Zenkov IV, Trinh LH, Anischenko YuA, Vokin VN, Kiryushina EV, Veretenova TA, Maglinets YuA, Latyntsev AA, Raevich KV, Kondrashov PM, Pavlova PL, Lunev AS. Study of work product on reforestation on rock dumps of coal open-cuts in the area of Angara-Yenisei Siberia. *Ecology and Industry of Russia*. 2022;26(10):45-51. doi: 10.18412/1816-0395-2022-10-45-51. In Russian
 15. Rumpel C, Knicker H, Kogel-Knabner I, Skjemstad JO, Huttel RF. Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils. *Geoderma*. 1998; 86(1-2):123-142. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00036-6
 16. Schmidt MWI, Knicker H, Hatcher PG, Kogel-Knabner I. Impact of brown coal dust on the organic matter in particle-size fractions of a Mollisol. *Org. Geochem*. 1996;25(1-2):29-39. doi: 10.1016/S0146-6380(96)00104-0
 17. Vindušková O, Dvořáček V, Prohasková A, Frouz J. Distinguishing recent and fossil organic matter - A critical step in evaluation of post-mining soil development - using near infrared spectroscopy. *Ecological Engineering*. 2014;73:643-648. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.086
 18. Sokolov DA, Kulizhskiy SP, Loiko SV, Domozhakova EA. Using electronic scanning microscopy for diagnostics of soil-forming processes on the surface of coal mine dumps in Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2014;3(27):36-52. In Russian, English summary
 19. Bragina PS, Tsi bart AS, Zavads kaya MP, Sharapova AV. Soils on overburden dumps in the forest-steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*. 2014;47(7):723-733. doi: 10.7868/80032180X14050037
 20. Chabbi A, Rumpel C, Grootes PM, Gonzalez-Perez JA, Delaune RD, Gonzalez-Vila F, Nixdorf B. Lignite degradation and mineralization in lignite-containing mine sediment as revealed by ¹⁴C activity measurements and molecular analysis. *Organic Geochemistry*. 2006;37:957-976. doi: 10.1016/j.orggeochem.2006.02.002
 21. Rumpel C. Microbial use of lignite compared to recent plant litter as substrates in reclaimed coal mine soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 2004;36(1):67-75. doi: 10.1016/j.soilbio.2003.08.020
 22. Rumpel C, Kögel-Knabner I. The role of lignite in the carbon cycle of lignite-containing mine soils: evidence from carbon mineralization and humic acid extractions. *Organic Geochemistry*. 2002;33(3):393-399. doi: 10.1016/S0146-6380(01)00169-3
 23. Gennadiev AN, Tsi bart AS. Hydrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of reserved and anthropogenically modified areas: factors and features of accumulation. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(1):32-40. doi: 10.1134/S106422931301002X
 24. Sokolov DA, Androkhonov VA, Morozov SV, Abakumov EV. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of anthracite deposit dumps in Siberia. *Eurasian Soil Science* 2021;54(6):701-714. doi: 10.1134/S1064229321060120
 25. Feng Y, Wang J, Bai Z, Reading L. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews*. 2019;191:12-25. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.02.015

26. Khitrov NB, Nikitin DA, Ivanova EA, Semenov MV. Changeability of content and storage of soil organic matter: an analytical review. *Pochvovedenie*. 2023;12:1493-1521. doi: 10.31857/S0032180X23600841. In Russian
27. Krasilnikov VP. Stable carbon compounds in soils: their origin and functions. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(9):997-1008. doi: 10.1134/S1064229315090069
28. Sokolov DA, Kulizhskiy SP, Lim AG, Gurkova EA, Nechaeva TV, Merzlyakov OE. Comparative evaluation of methods for determination of pedogenic organic carbon in coal-bearing soils. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;39:29-43. doi: 10.17223/19988591/39/2. In Russian
29. Ussiri DAN, Jacinthe PA, Lal R. Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review. *Geoderma*. 2014;214-215:155-167. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.09.015
30. Karta pochvenno-ekologicheskogo rayonirovaniya Rossiyskoy Federatsii / geograficheskaya osnova - 1 : 2 500 000, 25 km v 1 sm [Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation / geographical basis - 1 : 2 500 000, 25 km in 1 cm]. Dobrovolskiy GV, Urusevskaya IS, editors. Moscow: Talka+; 2013. 31 p. In Russian
31. Kandrashin ER. *Suksessii bioty v tekhnogennykh ekosistemakh (na primere Kuznetskogo ugol'nogo basseyna)* [Biota succession in technogenic ecosystems (on the example of the Kuznetsk coal basin)] [CandSci. Dissertation, Soil Science]. Dnepropetrovsk; 1989. 180 p. In Russian
32. Skotareva AE, Ivanov NA, Sokolov DA. Assessment of factors determining the rate and direction of plant communities development on coal mining spoils (the case study of the Gorlovskoye anthracite deposit). *The Journal of Soils and Environment*. 2024;7,2:e259. doi: 10.31251/pos.v7i2.259. In Russian
33. Kurachev VM, Androkhanov VA. Klassifikatsiya pochv tekhnogennykh landshaftov [Classification of soils in technogenic landscapes]. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal*. 2002;9,3:255-261. In Russian
34. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS); 2022. 234 p.
35. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnosis of soil of Russia]. Smolensk: Oykumena; 2004. 342 p. In Russian
36. Sokolova NA, Gossen IN, Sokolov DA. Assessment of the suitability of vegetation indices to identify soil and ecological condition of the surface of anthracite deposits dumps. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(1):62-68. doi: 10.18412/1816-0395-2020-1-62-68. In Russian
37. Sokolov DA, Gurkova EA, Osintseva MA, Burova NV. Organic matter in soil of coal mine dumps in Siberia: quantitative and qualitative assessment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2023; 63:132-149. doi: 10.17223/19988591/63/8. In Russian, English summary
38. Nechaeva TV, Sokolov DA, Sokolova NA. Estimation of absorption capacity of coals metamorphosed to a different extent using the example of potassium fixation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;44:6-23. doi: 10.17223/19988591/44/1. In Russian, English summary
39. Maharaj S, Barton CD, Karatkanasis TAD, Rowe HD, Rimmer SM. Distinguishing "new" from "old" organic carbon on reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: I. Method development. *Soil Science*. 2007;172(4):292-301. doi: 10.1097/SS.0b013e31803146e8
40. Kogut BM, Semenov VM, Artemyeva ZS, Danchenko NN. Humus Depletion and Soil Carbon Sequestration. *Agrochemistry*. 2021;5:3-13. doi: 10.31857/S0002188121050070. In Russian

41. Tebenkova DN, Gichan DV, Gagarin YuN. Impact of silvicultural practices on soil carbon: a review. *Forest Science Issues*. 2022;5-4:116. doi: 10.31509/2658-607x-202252-116. In Russian
42. Eremchenko OZ, Shestakov IE, Moskvina NV. Pochvy i tekhnogennyye poverkhnostnyye obrazovaniya urbanizirovannykh territoriy Prikam'ya [Soils and technogenic surface formations of urbanized areas of the Kama region]. Perm: Perm State National Research University Publ.; 2016. 256 p. In Russian
43. Kolpakova DE, Milentjeva IS, Asyakina LK, Fotina NV, Prosekov AYu. Features of the mineralogical composition of technogenic soils of coal dumps in Kuzbass, Kemerovo Region, Russia. *South of Russia: Ecology, Development*. 2024;19(2):92-103. doi: 10.18470/1992-1098-2024-2-9. In Russian
44. Shvabenland IS, Seredina VP. Pochvenno-geobotanicheskaya karakteristika tehnogennykh landshaftov Vostochno-Beiskogo kamennougolnogo mestorozhdeniya [Geobotanical characteristic of soils of technogenic landscapes of East Beisk coal deposit]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Tomsk State University Journal*. 2013;366: 188-193. In Russian
45. Das R, Maiti SK. Importance of carbon fractionation for the estimation of carbon sequestration in reclaimed coalmine soils - A case study from Jharia coalfields, Jharkhand, India. *Ecological Engineering*. 2016;90:135-140. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.025
46. Baumgartl T, Chan J, Bucka F, Pihlap E. Soil organic carbon in rehabilitated coal mine soils as an indicator for soil health. In: *Mine Closure 2021*. Proceedings of the 14th International Conference on Mine Closure. Ulaanbaatar: QMC Group; 2021. doi: 10.36487/ACG_repo/2152_121
47. Schlezinger WH. Inorganic carbon: Global carbon cycle. In: *Managing Global Resources and Universal Processes*. Fath BD, Jorgensen SE, editors. Boca Raton: CRC Press; 2020. pp. 706-708.
48. Khmelev VA, Tanasienko AA. Zemel'nyye resursy Novosibirskoy oblasti i puti ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya [Land resources of the Novosibirsk region and ways of their rational use]. Novosibirsk: Publishing house SB RAS; 2009. 349 p. In Russian

Информация об авторах:

Соколов Денис Александрович, д-р биол. наук, зав. лабораторией рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия).

E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

Гуркова Евгения Александровна, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия).

E-mail: gurkova@issa-siberia.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Denis A. Sokolov, Dr. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

Evgeniya A. Gurkova, Cand. Sci. (Biol.), senior researcher in Laboratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation).

E-mail: gurkova@issa-siberia.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 18.07.2024;
одобрена после рецензирования 30.08.2024; принята к публикации 19.05.2025*

*The article was submitted 18.07.2024;
approved after reviewing 30.08.2024; accepted for publication 19.05.2025*