

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 631.618

doi: 10.17223/19988591/63/8

Органическое вещество почв отвалов угольных предприятий Сибири: количественная и качественная оценка

Денис Александрович Соколов¹, Евгения Александровна Гуркова²,
Мария Алексеевна Осинцева³, Надежда Владимировна Бурова⁴

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

^{3,4} *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-7859-7244>, sokolovdenis@issa-siberia.ru

² <https://orcid.org/0000-0003-3379-230X>, gurkova@issa-siberia.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-4045-8054>, klmarial@inbox.ru

⁴ centrla@mail.ru

Аннотация. В настоящее время в связи актуализацией вопросов, связанных с эмиссией и секвестрацией углерода, особый интерес заслуживают техногенные ландшафты, представленные отвалами угольных месторождений. С одной стороны, это обусловлено содержанием в отвалах значительных количеств потенциальных источников климатически активных газов в виде углистых частиц. С другой стороны, в результате почвообразования на поверхности техногенных ландшафтов происходит аккумуляция органического углерода в виде гумусовых веществ. Учитывая то, что площадь нарушенных угледобычей территорий в отдельных регионах составляет сотни тысяч гектар и продолжает увеличиваться, исследования отвалов угольных месторождений необходимы для разработки мер достижения углеродной нейтральности. В данной работе проведен анализ содержания органического вещества в почвах отвалов угледобывающих регионов Сибири. Сопоставлены данные по содержанию почвенного углерода, определенного методами мокрого (метод И.В. Тюрина) и сухого сжигания. Результаты исследований показали устойчивость органического вещества к окислению и способность длительное время сохраняться без изменений в субстрате отвалов угольных месторождений. Наряду с процессами аккумуляции органического вещества в ходе почвообразования это позволяет сделать вывод о том, что отвалы угольных месторождений Сибири не выделяют углерод, а, наоборот, депонируют его.

Ключевые слова: техногенные почвы, почвообразование в техногенных ландшафтах, органическое вещество почв, отвалы угольных месторождений, Сибирь, Technosol

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р, комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для

жизни населения» («Чистый уголь – зеленый Кузбасс»), мероприятие 3.1 «Эко-полигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации» (соглашение № 075-15-2022-1200 от 28.09.2022 г.).

Для цитирования: 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

Original article

doi: 10.17223/19988591/63/8

Organic Matter in Soil of Coal Mine Dumps in Siberia: Quantitative and Qualitative Assessment

Denis A. Sokolov¹, Evgeniya A. Gurkova², Maria A. Osintseva³,
Nadezhda V. Burova⁴

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

^{3, 4} *Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-7859-7244>, sokolovdenis@issa-siberia.ru

² <https://orcid.org/0000-0003-3379-230X>, gurkova@issa-siberia.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-4045-8054>, k1marial@inbox.ru

⁴ centrla@mail.ru

Summary. Currently, due to the issues related to carbon emissions and sequestration, particular interest is being drawn towards technogenic landscapes represented by coal mine spoil heaps. First, this is due to the significant presence of potential sources of climate-active gases in the form of carbonaceous particles within the spoil heaps. Second, the accumulation of organic carbon in the form of humus substances occurs as a result of soil formation on the surface of technogenic landscapes. Given that the area of disturbed coal mining territories in certain regions amounts to hundreds of thousands of hectares and continues to increase, research on coal mine spoil heaps is necessary for the development of measures to achieve carbon neutrality.

The research was conducted on old dumps (over 30 years old) coal mining enterprises in the Kuznetsk (Kemerovo Oblast), Gorlovka (Novosibirsk Oblast), and Kansk-Achinsk (Krasnoyarsk Krai) coal basins, Minusinsk (Republic of Khakassia) and Ulu-Khem (Republic of Tuva) deposits, within lithogenetic and geographic sequences (see the Table). The dumps comprise fragmented dense sedimentary rocks and clayey rocks. The objects of the study were non-carbonate soils of coal mine spoil heaps – initial, organo-accumulative, soddy, and humus-accumulative embryossols (Spolic and Hyperskeletal Technossols). Field morphological descriptions of embryossol profiles were conducted using conventional soil science methods. The carbon and nitrogen content were determined by dry combustion using a CHN analyzer and by wet combustion method with oxidation of 0.4N K₂Cr₂O₇ in 50% sulfuric acid solution, heated to 150°C in a drying cabinet. The calculation of the ratio of carbon determination results provides an indication of the degree of pedogenic maturity of organic matter.

Research results have shown that the content of organic carbon determined by wet and dry combustion methods in embryossols significantly differs in evolutionary, geographical, and lithogenetic sequences of objects (see the Figures). The degree of pedogenic maturity expressed through the ratio of carbon determined by different methods has been applied to assess the qualitative state of organic matter systems and their

transformation. It has been demonstrated that the maximum values of pedogenic maturity were found in the studied embryosols of Brown Coal deposits, ranging from 63.8% to 100%. The minimum values were observed in embryosols on the spoil heaps of Anthracite deposits. It has been established that the degree of pedogenic maturity increases in the evolutionary sequence of embryosols, with humus-accumulative embryosols showing values within the range characteristic of zonal black soils (see the Figures). Research results have shown the stability of organic matter to oxidation and its ability to persist unchanged in the substrate of coal spoil heaps for a long time. Along with the processes of organic matter accumulation during soil formation, this allows us to conclude that the Siberian coal spoil heaps do not release carbon, but, on the contrary, sequester it.

The article contains 4 Figures, 1 Table, 42 References.

Keywords: Technosols, soil formation in technogenic landscapes, soil organic matter, coal mine dumps, Siberia

Fundings: The work was partially supported as part of the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1144-r as of May 11, 2022, a comprehensive scientific and technical program of a full innovation cycle ‘Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and mining of solid minerals, ensuring industrial safety, bioremediation, developing new products of deep coal processing while consistently reducing the environmental impact and eliminating risks to health and safety’ (Clean Coal – Green Kuzbass), Event 3.1 ‘World-class eco-test site for reclamation and remediation technologies’ (Agreement No. 075- 15-2022-1200 as of September 28, 2022).

For citation: 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

Введение

На сегодняшний день, когда угольная промышленность за счет открытой добычи занимает лидирующие позиции по масштабам нарушений земель, техногенные ландшафты стали привычным явлением не только для традиционно промышленных, но и других регионов мира [1]. В этой связи все больше актуализируются вопросы, связанные с преодолением последствий преобразования территорий и оценкой перспектив их дальнейшего использования. Важным аспектом в этом направлении является изучение систем органических веществ почв и специфики процессов их трансформации в ходе почвообразования. Своеобразие почв отвалов угольных месторождений проявляется не только в соотношении различных специфических (педогенных) и неспецифических (биогенных) веществ [2], но и в наличии унаследованных от почвообразующих пород литогенных органических соединений, а также продуктов их абиогенной (химической) трансформации [3]. Другими словами, если система органических веществ естественных почв формируется из поступающих веществ биогенной природы, то в почвах отвалов угольных разрезов к ним добавляются соединения, имеющие литогенное и/или хемогенное происхождение [4, 5].

Системы органических веществ техногенных почв, на наш взгляд, заслуживают особого внимания также и с позиций секвестрации углерода – процесса его депонирования ландшафтами и почвами, которому в последнее время уделяется все больше внимания со стороны общественности и государственных органов. Традиционным является представление о том, что техногенез и антропогенные процессы являются источниками выброса углерода в атмосферу [6–8]. В то же время существуют исследования, в которых фиксируется также обратный процесс – связывание и закрепление углерода в гумусовых веществах [9, 10]. Равновесие разнонаправленных процессов находится в зависимости как от условий почвообразования, так и от свойств органического вещества почв, унаследованного от почвообразующих пород.

В связи с этим целью настоящей статьи является оценка содержания органического вещества в почвах отвалов угледобывающих предприятий Сибири, а также оценка его качественного состояния.

Материалы и методы

Материалом для написания статьи послужили данные, полученные авторами при работе со старыми отвалами (более 30 лет) угольных разрезов Кузнецкого (Кемеровская область), Горловского (Новосибирская область) и Канско-Ачинского (Красноярский край) угольных бассейнов, а также Минусинского (Республика Хакасия), Улуг-Хемского (Республика Тыва) месторождений. Выбор участков исследования обусловлен дифференцированностью природно-климатических условий и субстрата, слагающего отвалы. Исследования проводились в литогенетическом ряду (буроугольные – каменноугольные – антрацитовые месторождения) и в климатическом ряду (от гумидных районов к аридным) (таблица).

Макроклиматические условия почвообразования в районах исследования
[Macroclimatic conditions of soil formation in the study areas]

Месторождение углей [Coal deposit]	Σ активных температур, °C [Σ active temperatures, °C]	Осадки за год, мм [Precipitation per year, mm]	Индекс аридности* [Aridity index]
Гумидный тип климата [Humid climate]			
Каменный уголь [Bituminous]	1500–1700	750–1400	–0,47
Субгумидный типа климата [Subhumid climate]			
Антрацит [Antracite]	1700–1900	400–500	0,02
Каменный уголь [Bituminous]	1700–1900	400–500	0,04
Бурый уголь [Brown coal]	1500–1700	400–450	0,01
Семиаридный тип климата [Semiarid climate]			
Каменный уголь [Bituminous]	1900–2000	250–350	0,23

Месторождение углей [Coal deposit]	Σ активных температур, °C [Σ active temperatures, °C]	Осадки за год, мм [Precipitation per year, mm]	Индекс аридности* [Aridity index]
Аридный тип климата [Arid climate]			
Каменный уголь [Bituminous]	2000–2200	220–270	0,41
Аридный экстроконтинентальный тип климата [Arid extra continental climate]			
Каменный уголь [Bituminous]	2100–2200	170–250	0,47

* Индекс аридности определяется как $\log_{10}(E/P)$, где E – испарение, а P – осадки [11]. Данные о потенциальной температуре, испарении и осадках были получены от местных метеорологических станций.

[The aridity index was defined as $\log_{10}(E/P)$, where E is evaporation and P is precipitation [11]. The potential temperature, evaporation and precipitation data were obtained from local meteorological stations].

Объектами исследования являются некарбонатные почвы отвалов угольных разрезов, сложенных а) обломками плотных осадочных пород (на каменно-угольных и антрацитовых месторождениях) и б) суглинистыми породами (на буроугольных месторождениях). В соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов, разработанной в ИПА СО РАН, на поверхности исследованных отвалов сформированы инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные эмбриоземы [12]. Согласно Всемирной справочной базе почвенных ресурсов [13], все объекты исследования относятся к реферативной группе *Technosol*. Главными квалификаторами являются *Spolic* и *Hyperskeletal*. Дополнительные квалификаторы выделены по наличию и свойствам органогенных и минеральных горизонтов *Technosol*. Так, *Protofolic* соответствуют органо-аккумулятивным, *Protohumic* и *Humic* – соответственно дерновым и гумусово-аккумулятивным эмбриоземам [1].

Полевые морфологические описания профилей эмбриоземов проведены по общепринятым в почвоведении методам [14]. Оценивались мощность горизонтов, их фрагментарность и особенности взаимодействия с породой, состав органо-аккумулятивных горизонтов. Более подробно морфологические свойства исследуемых почв описаны в работе [15].

Содержание углерода и азота определяли методом сухого сжигания ($C_{\text{сух}}$) при помощи *CHN-анализатора 2400 Series II* (Perkin Elmer, США). Содержание углерода устанавливали методом мокрого сжигания ($C_{\text{мок}}$) при окислении 0,4 н $K_2Cr_2O_7$ в 50%-ном растворе серной кислоты при нагревании до 150°C в сушильном шкафу [16]. Применение данного метода, благодаря неполному окислению образца, позволяет при использовании данных $C_{\text{сух}}$ рассчитать степень внутримолекулярной окисленности [17, 18], которая обратно пропорциональна степени педогенной зрелости (ПЗ) органического вещества [19]. Последняя может быть определена по формуле (1):

$$ПЗ = \frac{C_{\text{мок}}}{C_{\text{сух}}} \times 100\%, \quad (1)$$

где ПЗ – педогенная зрелость органического вещества, %; $C_{\text{мок}}$ – содержание органического углерода, определенное методом мокрого сжигания, %; $C_{\text{сух}}$ – содержание общего углерода, %.

Статистическую обработку данных проводили при помощи пакета программ Microsoft Office Excel, PAST V2.17.

Результаты исследования и обсуждение

Выполненные макроморфологические описания почв, сформированных на отвалах исследуемых угольных разрезов показали, что дифференциация молодых почв по морфологическим признакам происходит через образование системы органогенных горизонтов. Так, на исследуемых территориях были выделены инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные эмбриоземы, соответствующие стадиям техногенного почвообразования [20]. Для инициальных эмбриоземов характерно отсутствие морфологически выраженных горизонтов аккумуляции органического вещества. Их органическое вещество представлено унаследованными от почвообразующих пород включениями углистых частиц, которые отчасти способны выполнять определенные функции почвенного гумуса [21]. На исследуемых старых отвалах инициальные эмбриоземы распространены на участках с экстремальными эдафическими условиями. Принято считать, что процессы превращения органического вещества в подобных инициальным эмбриоземам почвах характеризуются только отрицательным балансом по причине минерализации органического вещества [22], горения отвалов [23, 24] или деуглификации углистых частиц [6, 25, 26], а также образованием способных к миграции органических соединений [27]. Однако интенсивность и масштабы этих процессов являются весьма скромными, так как углистые включения сохраняются в почвах отвалов длительное время и морфологически остаются неизменными [28].

Следующая за инициальной стадия эволюции почв техногенных ландшафтов – органо-аккумулятивных эмбриоземов – характеризуется формированием выраженного органогенного горизонта аккумуляции растительных остатков (подстилки). Подстилконакопление на отвалах является одним из основных механизмов депонирования углерода в почвах отвалов угольных разрезов и часто выступает ведущим процессом в условиях гумидного климата и бедности почвообразующих пород [29, 30].

В дерновых эмбриоземах аккумуляция органического вещества происходит не только в подстилке, но и в дернине. Их формирование осуществляется только на отвалах, располагающихся в менее аридных условиях климата. Тип почв, замыкающий эволюционный ряд технопедогенеза, представлен гумусово-аккумулятивными эмбриоземами. Они, помимо описанных выше горизонтов подстилки и дернины, имеют также горизонт аккумуляции гумуса. Данный тип почв распространен на отвалах каменно- и бурогольных месторождений и не формируется на отвалах отходов добычи антрацита. Его формирование возможно только в условиях умеренного не аридного климата на породах, содержащих достаточное количество тонкодисперсных минеральных частиц [5, 8, 31, 32]. Наряду с вышеописанными процессами, формирующими пул органического углерода, в исследуемых

почвах имеет место также углефикация растительных остатков, развивающаяся на пиритсодержащих породах [33], и мумификация, проявляющаяся при почвообразовании в аридных районах [28].

Часто процессы аккумуляции и превращения соединений углерода в углеродсодержащих почвах исследуют, дифференцируя органическое вещество на литогенное (унаследованное от почвообразующих пород) и педогенное (приобретенное в результате почвообразования). Для этого применяют термогравиметрию [34], ИК-спектроскопию [35], хроматографию [36], денситометрию [37], а также микроскопические [35], радиоуглеродные [38] и ЯМР методы [39]. Мы же полагаем, что разделение органического углерода почв по происхождению оправдано только при решении узких задач, в то время как при исследовании депонирующей способности техногенных ландшафтов необходимо прежде всего оценивать устойчивость почвенного органического вещества к окислению.

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что содержание органического углерода, определяемого методами мокрого и сухого сжигания в эмбриоземах, существенно отличается как в эволюционном, так в географическом и литогенетическом рядах объектов (рис. 1).

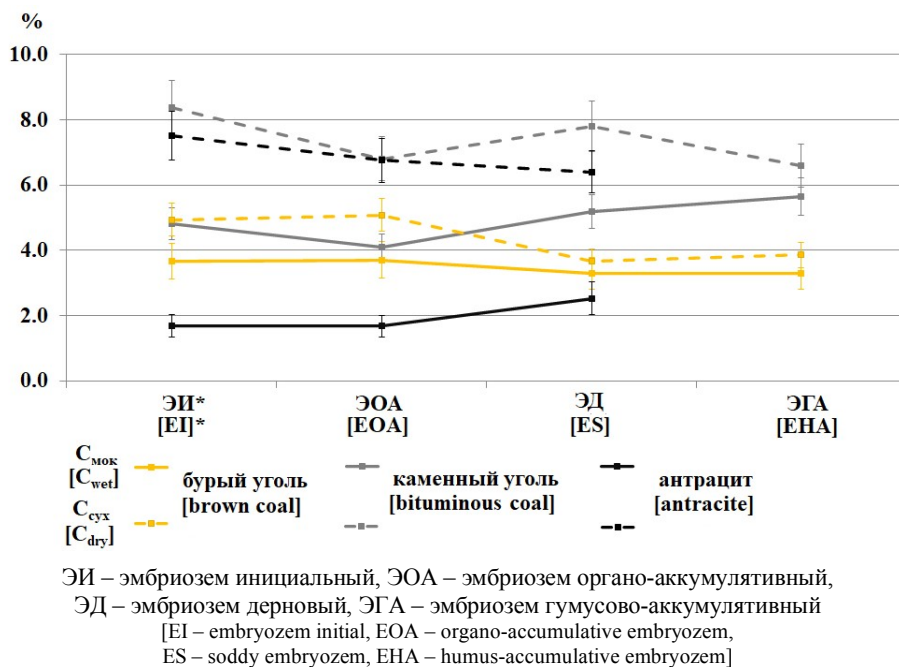
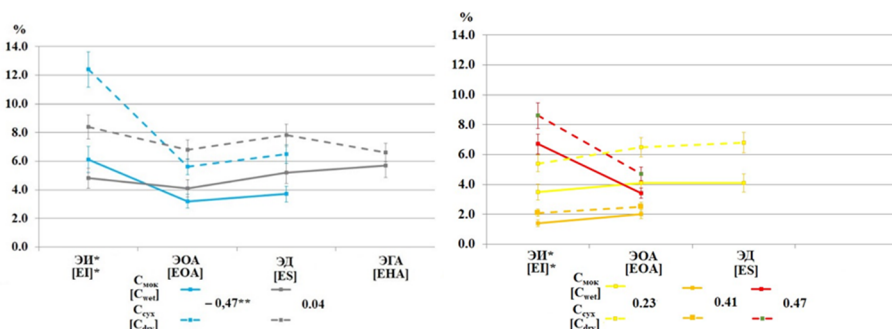


Рис. 1. Содержание углерода в верхнем 10-сантиметровом слое эмбриоземов литогенетического ряда объектов, определяемого методами сухого (С_{сух}) и мокрого (С_{мокр}) сжигания

[Fig. 1. Carbon content in the upper 10-centimeter layer of embryozems of a lithogenetic series of objects, determined by the methods of dry (C_{dry}) and wet (C_{wet}) combustion]

Как видим, в почвах различных месторождений и стадий эволюции оно варьирует от 1,7 до 8,4% и часто превышает содержание в естественных почвах, прилегающих к отвалам территорий [40–41]. Наибольшие расхождения выявлены в почвах, сформированных на отвалах отходов добычи антрацита, который выделяется наибольшей степенью метаморфизованности, а, следовательно, и устойчивости к окислению. Менее выражена эта разница в почвах отвалов буроугольных месторождений, содержащих наименее метаморфизованные угли. Здесь в дерновых и гумусово-аккумулятивных эмбриоземах значения $C_{\text{мок}}$ и $C_{\text{сух}}$ так сильно сближаются, что их разница не выходит за пределы стандартной ошибки используемых методов. В целом, общей чертой для всех рассматриваемых техногенных объектов является сближение величин содержания углерода, определяемого двумя методами, в эволюционном ряду почв. Это свидетельствует о том, что в процессе преобразования систем органических веществ эмбриоземов доля устойчивых к бихроматному окислению углерода углистых частиц со временем уступает таковой углерода, накапливающегося в почвах [3].

Высокие значения в содержании $C_{\text{мок}}$ и $C_{\text{сух}}$ (по сравнению с естественными почвами) отмечаются также и в географическом градиенте исследуемых объектов (рис. 2). При этом кривые $C_{\text{мок}}$ и $C_{\text{сух}}$ в эволюционном ряду эмбриоземов практически параллельны в почвах как гумидных, так и аридных районов. Исключением служат уже рассмотренные выше гумусово-аккумулятивные эмбриоземы, формирующиеся только на участках, где в верхней части профиля не встречаются угли.



ЭИ – эмбриозем инициальный, ЭОА – эмбриозем органо-аккумулятивный,
ЭД – эмбриозем дерновый, ЭГА – эмбриозем гумусово-аккумулятивный
[EI – embryozem initial, EOA – organo-accumulative embryozem,
ES – soddy embryozem, EHA – humus-accumulative embryozem]

Индекс аридности: –0,47 – гумидный климат; 0,04 – субгумидный климат;
0,23 – семиаридный климат; 0,41 – аридный климат;
0,47 – аридный экстраконтинентальный климат
[The aridity index: -0,47 - humid climate; 0,04 - subhumid climate;
0,23 - semiarid climate; 0,41 - arid climate; 0,47 - arid extra continental climate]

Рис. 2. Содержание углерода в верхнем 10-сантиметровом слое эмбриоземов географического ряда объектов, определяемого методами сухого ($C_{\text{сух}}$) и мокрого ($C_{\text{мок}}$) сжигания

[Fig. 2. Carbon content in the upper 10-centimeter layer of embryozems of a geographical series of objects, determined by the methods of dry (C_{dry}) and wet (C_{wet}) combustion]

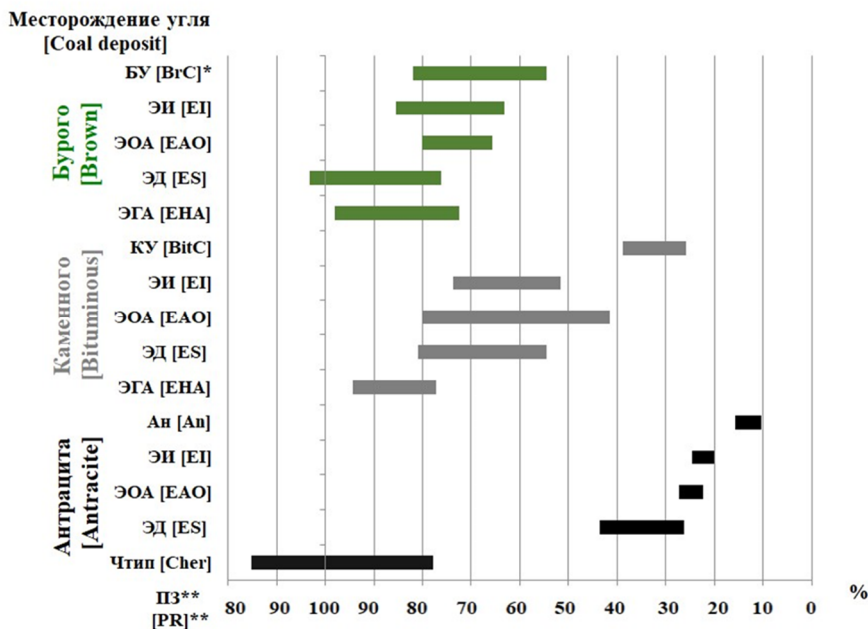
Фиксируемые значения $C_{\text{мок}}$ и $C_{\text{сух}}$ свидетельствуют о том, что при определении углерода методом мокрого сжигания при анализе регистрируется та часть углерода, который подвергается окислению двуххромовокислым калием. При таком анализе учитываются содержащиеся в почве гумусовые вещества, органические остатки растительного и животного происхождения. Определение углерода методом сухого сжигания также включает окисление отмеченных педогенных и биогенных органических веществ. Но по причине того, что этот анализ выполняется при более высоких температурах, когда в навеске образца окисляются угли, значения $C_{\text{сух}}$ почв складываются также из значений содержания углерода углистых частиц, устойчивых к окислению хромовой смесью. В связи с этим расхождения в значениях $C_{\text{мок}}$ и $C_{\text{сух}}$, выраженные с помощью процентного соотношения могут быть использованы для оценки качественного состояния систем органических веществ и их трансформации. Это соотношение предложено назвать степенью педогенной зрелости.

Такой подход к оценке качества органического вещества исследуемых почв не представляется перспективным, поскольку традиционные методы, основанные на фракционировании веществ по характеру их связи с минеральной частью почвы [18, 42], в данном случае малоприменимы. Специфика систем органических веществ углесодержащих почв проявляется в том, что устойчивость их к окислению достигается счет высокой степени конденсированности ароматической части углистого материала. Следовательно, наиболее приемлемыми для изучения таких почв представляются методы фракционирования, основанные на определении устойчивости органического вещества к окислению.

Проведенные нами исследования показали, что соотношение углерода, выраженное через степень педогенной зрелости, в эмбриоземах отвалов имеет определенные диапазоны значений для углей и почв в каждом из объектов литогенетического ряда исследований. Максимальные значения параметра установлены для органического вещества месторождений бурого угля – они составляют здесь 63,8–100% (рис. 3).

Величины степени педогенной зрелости органического вещества в почвах отвалов каменноугольных разрезов несколько отличаются от таковых в бурогоугольных. Так, ПЗ органического вещества эволюционного ряда эмбриоземов составляет здесь от 41,5 до 94,3%. Еще ниже она в почвах отвалов антрацитовых месторождений – от 20,1 до 43,5%.

Общим для всех исследуемых объектов является то, что степень педогенной зрелости органического вещества почв: 1) уступает таковой углей; 2) увеличивается в эволюционном ряду эмбриоземов; 3) в гумусово-аккумулятивных эмбриоземах находится в пределах значений, характерных для зональных черноземов. Учитывая последнее обстоятельство, можно предположить, что гумусово-аккумулятивные эмбриоземы формировались либо на породах, содержащих окисленные угли, либо на безугольных породах.



БУ – бурый уголь, КУ – каменный уголь, Ан – антрацит, ЭИ – эмбриоземы инициальные, ЭОА – эмбриоземы органо-аккумулятивные, ЭД – эмбриоземы дерновые, ЭГА – эмбриоземы гумусово-аккумулятивные, Чтип – чернозем типичный [BrC - brown coal, BitC - bituminous coal, An - anthracite, EI - embryozem initial, EOA - organo-accumulative embryozem, ES - soddy embryozem, EHA - humus-accumulative embryozem, Cher - chernozem]

Рис. 3. Диапазоны значений степени педогенной зрелости (ПЗ) органического вещества почв литогенетического ряда объектов
 [Fig. 3. Ranges of values of the degree of pedogenic ripeness (PR) of organic matter in soils of a lithogenetic series of objects]

Таким образом степень педогенной зрелости органического вещества почв отвалов зависит не только от наличия и количества, но и от вида включений угля. В итоге чем выше степень метаморфизации угля, содержащегося в эмбриоземах, тем выше его устойчивость, однако формирование системы органических веществ, схожей по своему качественному состоянию с таковой у зональных почв, осуществляется более низкими темпами.

Не менее интересными представляются данные по дифференциации значений педогенной зрелости органического вещества почв отвалов каменно-угольных месторождений, расположенных в различных природно-климатических районах (рис. 4). Здесь, так же как и в случае с буроугольными и антрацитовыми разрезами, отмечается увеличение значений ПЗ в эволюционном ряду почв. Однако наиболее ярко изменение описываемого показателя происходит в климатическом ряду однотипных эмбриоземов. К примеру, ПЗ в инициальных эмбриоземах, сформированных в условиях аридного экстроконтинентального климата, выше, чем у таковых других

территорий и почти вдвое превосходит значения, отмечаемые в почвах гумидного климата. Эту тенденцию увеличения ПЗ в ряду усиления аридности климата можно отметить также и в органо-аккумулятивных эмбриоземах. В дерновых эмбриоземах, формирующихся в более узком диапазоне природно-климатических условий, отмеченная тенденция проявляется в меньшей степени.

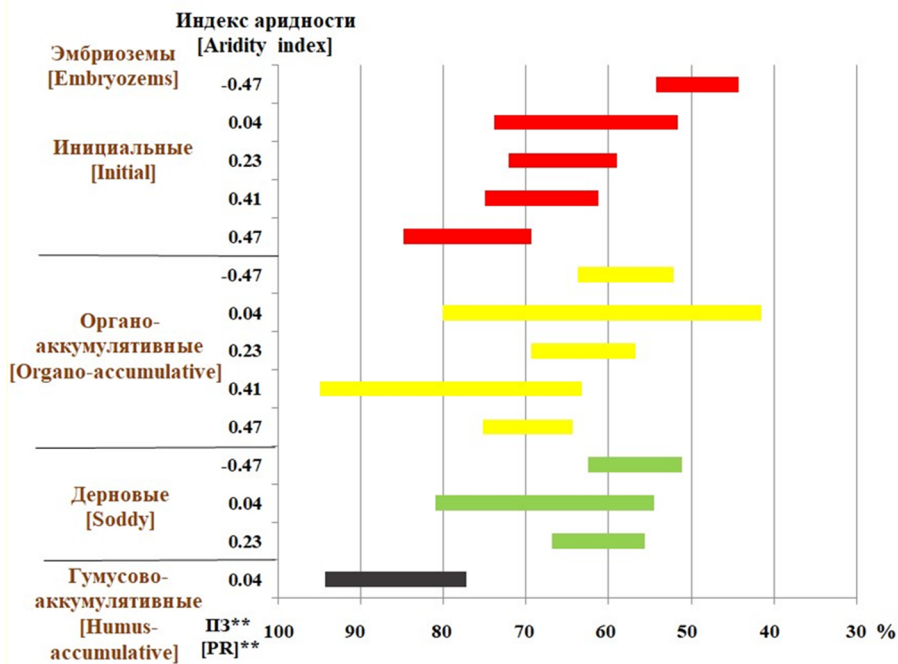


Рис. 4. Диапазоны значений педогенной зрелости (ПЗ) органического вещества почв географического ряда объектов
 [Fig. 4. Ranges of values of the degree of pedogenic ripeness (PR) of organic matter in soils of a geographical series of objects]

Таким образом, проведенные исследования показывают, что значения степени педогенной зрелости органического вещества эмбриоземов отвалов различных угольных месторождений Сибири имеют широкую амплитуду колебаний. В первую очередь, эта амплитуда определяется стадией почвообразования, поскольку по мере развития эмбриоземов значения ПЗ приближаются к таковым в зональных черноземах. Кроме того, на качество органического вещества углесодержащих почв также влияют такие факторы, как степень метаморфизации углистых включений и природно-климатические условия почвообразования. В итоге использование предлагаемого подхода позволило установить, что трансформация литогенного органического вещества в почвах отвалов происходит крайне медленно и, по всей видимости, не приводит к его окислению с образованием углекислого газа.

Заключение

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что формирование систем органических веществ в почвах отвалов угольных месторождений Сибири начинается не на «стерильном» субстрате, а на содержащем литогенное органическое вещество, унаследованное от почвообразующих пород. Значения содержания углерода, определяемого методами мокрого и сухого сжигания, в почвах старых отвалов часто оказываются выше, чем в зональных почвах. Больше половины органического вещества исследуемых почв окисляется только при высокотемпературном сухом сжигании и не учитывается при анализе традиционным методом мокрого сжигания (метод Тюрина). Это говорит о высокой устойчивости органического вещества почв к минерализации в условиях техногенных ландшафтов. В почвах отвалов угольных месторождений устойчивость органического вещества к окислению уменьшается в ряду: антрацитовые – каменноугольные – буроугольные месторождения.

Наряду с сохранением органического вещества углей в процессе почвообразования происходит также аккумуляция менее устойчивого к окислению органического вещества педогенной и биогенной природы. Это проявляется в сближении как значений содержания углерода $C_{\text{мок}}$ и $C_{\text{сух}}$, так рассчитанной на их основе величины степени педогенной зрелости. Последняя увеличивается не только в эволюционном ряду почв, но и в однотипных почвах географического ряда объектов, что свидетельствует о более высоких темпах трансформации литогенного органического вещества в почвах техногенных ландшафтов аридных областей.

Таким образом, проведенные исследования по оценке содержания и качественного состояния органического вещества почв показывают, что техногенные ландшафты отвалов угольных месторождений Сибири являются скорее поглотителями, нежели источниками углекислого газа.

Список источников

1. Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Abakumov E.V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021. № 56. PP. 6–32. doi: 10.17223/19988591/56/1
2. Дергачева М.И. Система гумусовых веществ почв. Новосибирск : Наука СО, 1989. 110 с.
3. Androkhanov V.A., Sokolov D.A. Fractional composition of redox systems in soils of coal mine dumps // *Eurasian Soil Science*. 2012. № 45. PP. 399–403. doi: 10.1134/S1064229312020032
4. Соколов Д.А. Специфика определения органических веществ педогенной природы в почвах техногенных ландшафтов Кузбасса // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2012. № 2 (18). С. 17–25.
5. 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. Vol. 73. PP. 643–648. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.086

6. 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. Vol. 33 (3). PP. 393–399. doi: 10.1016/S0146-6380(01)00169-3
7. Querol X., Zhuang X., Font O., Izquierdo M., Alastuey A., Castro I., van Drooge B.L., Moreno T., Grimalt J.O., Elvira J., Cabañas M., Bartoli R., Hower J.C., Ayora C., Plana F., López-Soler A. Influence of soil cover on reducing the environmental impact of spontaneous coal combustion in coal waste gobs: A review and new experimental data // *International Journal of Coal Geology*. 2011. Vol. 85 (1). PP. 2–22. doi: 10.1016/j.coal.2010.09.002
8. Frouz J., Vindušková O. Soil organic matter accumulation in postmining sites: Potential drivers and mechanisms // *Soil Management and Climate Change*. London : Academic Press, 2018. Chapter 8. PP. 103–20. doi: 10.1016/B978-0-12-812128-3.00008-2
9. Ruiz F., Resmini Sartor L., de Souza Júnior V.S., Barros dos Santos J.C., Ferreira T.O. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (SE-Brazil) // *Geoderma*. 2020. Vol. 374. PP. 114439. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114439
10. 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
11. Dai X., Jia X., Zhang W.P., Bai Y.Y., Zhang J.Y., Wang Y., Wang G. Plant height-crown radius and canopy coverage-density relationships determine above-ground biomass-density relationship in stressful environments // *Biology Letters*. 2009. № 5. PP. 571–573. doi: 10.1098/rsbl.2009.0228
12. Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // *Сибирский экологический журнал*. 2002. № 3. С. 255–261.
13. 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.
14. Jahn R., Blume H.P., Asio V., Spaargaren O., Schád P. FAO Guidelines for Soil Description. FAO Viale delle Terme di Caracalla: Rome, Italy, 2006. 98 p.
15. Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижский С.П., Лойко С.В., Доможакова Е.А. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменно-угольных разрезов Сибири // *Почвоведение*. 2015. № 1. С. 106–117.
16. Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Учение о почвенном гумусе. М. : Сельхозгиз, 1937. 287 с.
17. Абакумов Е.В., Попов А.И. Определение в одной пробе почвы углерода, азота, окисляемости органического вещества и углерода карбонатов // *Почвоведение*. 2005. № 2. С. 186–194.
18. Пономарева В.В., Плотнокова Т.А. Некоторые данные о степени внутримолекулярной окисленности гумуса разных типов почв (к вопросу о переводном коэффициенте с углерода на гумус) // *Почвоведение*. 1967. № 7. С. 85–95.
19. Соколов Д.А. Диверсификация почвообразования на отвалах угольных месторождений Сибири : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2019. 45 с.
20. Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // *Сибирский экологический журнал*. 2002. № 3. С. 255–261.
21. 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
22. Shrestha Raj K., Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation // *Geoderma*. 2011. Vol. 161. PP. 168–176. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.12.015
23. Querol X., Zhuang X., Font O., Izquierdo M., Alastuey A., Castro I., van Drooge B.L., Moreno T., Grimalt J.O., Elvira J., Cabañas M., Bartoli R., Hower J.C., Ayora C., Plana F., López-Soler A. Influence of soil cover on reducing the environmental impact of

- spontaneous coal combustion in coal waste gobs: A review and new experimental data // International Journal of Coal Geology. 2011. Vol. 85 (1). PP. 2–22. doi: 10.1016/j.coal.2010.09.002
24. Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest-steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass // Eurasian Soil Science. 2014. № 7. PP. 723–733. doi: 10.1134/S1064229314050032
25. 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) PP. 67–75. doi: 10.1016/j.soilbio.2003.08.020
26. 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. № 37. PP. 957–976. doi: 10.1016/j.orggeochem.2006.02.002
27. Соколов Д.А., Морозов С.В., Пчельникова Т.Г., Соколова Н.А. Источники полициклических ароматических углеводородов в компонентах ландшафтов зоны влияния Горловского антрацитового месторождения // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. № 31. С. 700–711. doi: 10.15372/KhUR2023517
28. 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.
29. Hu P., Zhang W., Chen H., Li D., Zhao Y., Zhao J., Xiao J., Wu F., He X., Luo Y., Wang K. Soil carbon accumulation with increasing temperature under both managed and natural vegetation restoration in calcareous soils // Science of The Total Environment. 2021. № 767 (1). 145298. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145298
30. Filcheva E., Noustorova M., Gentcheva-Kostadinova S., Haigh M.J. Organic accumulation and microbial action in surface coal-mine spoils, Pernik, Bulgaria // Ecological Engineering. 2000. № 15 (1-2). PP. 1–15. doi: 10.1016/S0925-8574(99)00008-7
31. Шугалей Л.С. Первичное почвообразование на отвалах вскрышных пород под культурой сосны // Почвоведение. 1997. № 2. С. 247–253.
32. Čížková B., Woś B., Pietrzykowski M., Frouz J. Development of soil chemical and microbial properties in reclaimed and unreclaimed grasslands in heaps after opencast lignite mining // Ecological Engineering. 2018. № 123. PP. 103–111. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.09.004
33. Солнцева Н.П., Рубилина Н.Е., Герасимова М.И., Алистратов С.В. Изменение морфологии выщелоченных черноземов в районах добычи угля // Почвоведение. 1992. № 1. С. 17–29.
34. Maharaj S., Barton C.D., Karatkanasis T.A.D., Rowe H.D., Rimmer S.M. Distinguishing “new” from “old” organic carbon on reclaimed coal mine sites using thermogravimetry: I. Method development // Soil Science. 2007. № 172. PP. 292–301. doi: 10.1097/SS.0b013e31803146e8
35. 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. № 86. PP. 123–142. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00036-6
36. Frouz J., Cajthaml T., Kribek B., Schaeffer P., Bartuska M., Galer-tova R., Rojik P., Kristufek V. Deep, subsurface microflora after excavation respiration and biomass and its potential role in degradation of fossil organic matter // Folia Microbiologica. 2011. № 56. PP. 389–396. doi: 10.1007/s12223-011-0062-9
37. Куляпина Е.Д., Курачев В.М. Специфика накопления органических компонентов в почвах техногенных ландшафтов // Сибирский экологический журнал. 2004. Т. 11, № 3. С. 345–353.
38. Morgenroth G., Kretschmer W., Scharf A., Uhl T., Fettweis U., Bens, O., Huttli R.F. ¹⁴C measurement of soil in post-mining landscapes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2004. № 223. PP. 568–572. doi: 10.1016/j.nimb.2004.04.105

39. Simpson M.J., Hatcher P.G. Determination of black carbon in natural organic matter by chemical oxidation and solid-state ¹³C Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy // *Organic Geochemistry*. 2004. № 35. PP. 923–935. doi: 10.1016/j.orggeochem.2004.04.004
40. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Земельные ресурсы Новосибирской области и пути их рационального использования. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. 348 с.
41. Хмелев В.А., Танасиенко А.А. Почвенные ресурсы Кемеровской области и основы их рационального использования. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2013. 477 с.
42. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М. : ГЕОС, 2015. 233 с.

References

1. Sokolov DA, Androkhonov 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
2. Dergacheva MI. Sistema gumusovykh veshchestv [System of humic substances]. Novosibirsk: Nauka Siberian branch Publishing House; 1992. 112 p. In Russian
3. Androkhonov VA, Sokolov DA. Fractional composition of redox systems in the soils of coal mine dump. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(4):399-403. doi: 10.1134/S1064229312020032
4. Sokolov DA. Spetsifika opredeleniya organicheskikh veshchestv pedogennoy prirody v pochvakh tekhnogennykh landshaftov Kuzbassa [Specificity of determination of paedogenic organic substances in soils of man-caused landscapes of Kuzbass]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2012;2: 17-25. In Russian
5. Vinduřková 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
6. 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. Vol. 33(3). PP. 393–399. doi: 10.1016/S0146-6380(01)00169-3.
7. Querol X, Zhuang X, Font O, Izquierdo M, Alastuey A, Castro I, van Drooge BL, Moreno T, Grimalt JO, Elvira J, Cabañas M, Bartoli R, Hower JC, Ayora C, Plana F, López-Soler A. Influence of soil cover on reducing the environmental impact of spontaneous coal combustion in coal waste gobs: A review and new experimental data. *International Journal of Coal Geology*. 2011;85(1):2-22. doi: 10.1016/j.coal.2010.09.002.
8. Frouz J, Vinduřková O. Soil organic matter accumulation in postmining sites: Potential drivers and mechanisms. *Soil Management and Climate Change*; Muñoz MA, Zornoza R. Eds.; Academic Press: London, United Kingdom, 2018. Chapter 8. PP. 103-20. doi: 10.1016/B978-0-12-812128-3.00008-2.
9. Ruiz F, Resmini Sartor L, de Souza Júnior VS, Barros dos Santos JC, Ferreira TO. Fast pedogenesis of tropical Technosols developed from dolomitic limestone mine spoils (SE-Brazil). *Geoderma*. 2020;374:114439. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114439.
10. Ussiri DAN., Jacinthe P-A, 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.
11. Dai X, Jia X, Zhang WP, Bai YY, Zhang JY, Wang Y, Wang G. Plant height-crown radius and canopy coverage-density relationships determine above-ground biomass-density relationship in stressful environments. *Biology Letters*. 2009;5:571-573. doi: 10.1098/rsbl.2009.0228.10.
12. Kurachev VM, Androkhonov VA. Klassifikatsiya pochv tekhnogennykh landshaftov [Classification of soils of techogenic landscapes]. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2002;3:255-261. In Russian

13. 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.; International Union of Soil Sciences (IUSS): Vienna, Austria, 2022. 234 p.
14. Jahn R, Blume HP, Asio V, Spaargaren O, Schäd P. FAO Guidelines for Soil Description. FAO Viale delle Terme di Caracalla: Rome, Italy, 2006. 98 p.
15. Sokolov DA, Androkhanov VA, Kulizhskiy SP, Domozhakova EA, Loiko SV. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015;1(48):95-105. doi 10.1134/S1064229315010159
16. Tjurin IV. *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rolj v pochvoobrasovanii i plodorodii. Uchenie o pochvennom gumuse* [Soil organic matter and its role in soil formation and fertility. The doctrine of soil humus]. Moscow, Seljhosgis, 1937, 287 p. In Russian
17. Abakumov EV, Popov AI. Determination of the carbon and nitrogen contents and oxidizability of organic matter and the carbon of carbonates content in one soil sample. *Eurasian Soil Science*. 2005;38(2):165-172.
18. Ponomareva VV, Plotnikova TA. Nekotoryye dannyye o stepeni vnutrimolekulyarnoy oksislennosti gumusa raznykh tipov pochv (k voprosu o perevodnom koeffitsiyente s ugleroda na gumus) [Some data on the degree of intramolecular oxidation of humus in different types of soils (on the issue of the conversion factor from carbon to humus)]. *Pochvovedenie – Soviet Soil Science*. 1967;7:85-95. In Russian
19. Sokolov DA. *Diversifikatsiya pochvoobrazovaniya na otvalakh ugol'nykh mestorozhdeniy Sibiri* [Diversification of soil formation on the dumps of coal deposits in Siberia. DoctSci. Dissertation, Soil science]. Novosibirsk: Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS. 2019. 329 p. In Russian
20. Kurachev VM, Androkhanov VA. Klassifikatsiya pochv tekhnogennykh landshaftov [Classification of soils of techogenic landscapes]. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2002;3:255-261. In Russian
21. 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
22. Shrestha RK, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma*. 2011;161:168-176. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.12.015.
23. Querol X, Zhuang X, Font O, Izquierdo M, Alastuey A, Castro I, van Drooge BL, Moreno T, Grimalt JO, Elvira J, Cabañas M, Bartroli R, Hower JC, Ayora C, Plana F, López-Soler A. Influence of soil cover on reducing the environmental impact of spontaneous coal combustion in coal waste gobs: A review and new experimental data. *International Journal of Coal Geology*. 2011;85(1):2-22. doi: 10.1016/j.coal.2010.09.002
24. Bragina PS, Tsibart AS, Zavadskaya 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 10.1134/S1064229314050032
25. 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
26. 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
27. Sokolov DA, Morozov SV, Pchelnikova TG, Sokolova NA. Istochniki politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov v komponentakh landshaftov zony vliyaniya Gorlovskogo antratsitovogo mestorozhdeniya [Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in landscape components of the zone of influence of the Gorlovskoye anthracite deposit]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya – Chemistry for sustainable development*. 2023;31:700-711. doi: 10.15372/KhUR2023517 In Russian

28. 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
29. Hu P, Zhang W, Chen H, Li D, Zhao Y, Zhao J, Xiao J, Wu F, He X, Luo Y, Wang K. Soil carbon accumulation with increasing temperature under both managed and natural vegetation restoration in calcareous soils. *Science of The Total Environment*. 2021;767(1):145298. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145298
30. Filcheva E, Noustorova M, Gentcheva-Kostadinova S, Haigh MJ. Organic accumulation and microbial action in surface coal-mine spoils, Pernik, Bulgaria. *Ecological Engineering*. 2000;15(1-2):1-15. doi: 10.1016/S0925-8574(99)00008-7
31. Shugaley LS. Pervichnoe pochvoobrazovanie na otvalakh vskryshnykh porod pod kul'turoy sosny [Initial soil formation on the tailings of strip mines under pine cultures]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1997;2:247-254. In Russian
32. Čížková B, Woś B, Pietrzykowski M, Frouz J. Development of soil chemical and microbial properties in reclaimed and unreclaimed grasslands in heaps after opencast lignite mining. *Ecological Engineering*. 2018;123:103-111. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.09.004
33. Solntseva NP, Rubilina NE, Gerasimova MI, Alistratov SV. Izmenenie morfologii vshchelochennykh chernozemov v rayonakh dobychi uglya [Morphological transformations of leached chernozems in coal mining areas (at the example of Moscow brown coal basin)]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1992;1:17-29. In Russian
34. 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;172:292-301. doi: 10.1097/SS.0b013e31803146e8
35. 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;86:123-142. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00036-6
36. Frouz J, Cajthaml T, Kribek B, Schaeffer P, Bartuska M, Galer-tova R, Rojik P, Kristufek V. Deep, subsurface microflora after excavation respiration and biomass and its potential role in degradation of fossil organic matter. *Folia Microbiologica*. 2011;56:389-396. doi: 10.1007/s12223-011-0062-9
37. Kulyapina ED, Kurachev VM. Spetsifika nakopleniya organicheskikh komponentov v pochvakh tekhnogennykh landshaftov [Specifics of accumulation of organic components in soils of technogenic landscapes]. *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2004;11:345-353. In Russian
38. Morgenroth G, Kretschmer W, Scharf A, Uhl T, Fettweis U, Bens O, Huttel RF. 14C measurement of soil in post-mining landscapes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2004;223:568-572. doi: 10.1016/j.nimb.2004.04.105
39. Simpson MJ, Hatcher PG. Determination of black carbon in natural organic matter by chemical oxidation and solid-state ¹³C Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy. *Organic Geochemistry*. 2004;35:923-935. doi: 10.1016/j.orggeochem.2004.04.004
40. 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. 348 p. In Russian
41. Khmelev VA, Tanasienko AA. Pochvennyye resursy Kemerovskoy oblasti i osnovy ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya [Soil resources of the Kemerovo region and the basis of their rational use]. Novosibirsk: Publishing house SB RAS; 2013. 477 p. In Russian
42. Semenov VM, Kogut BM. Pochvennoye organicheskoye veshchestvo [Soil organic matter]. Moscow: GEOS Publ; 2015. 233 p. In Russian

Информация об авторах:

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3409-9745>

E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3379-230X>

E-mail: gurkova@issa-siberia.ru

Осинцева Мария Алексеевна – доцент, канд. техн. наук, начальник управления проектной деятельности, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4045-8054>

E-mail: k1marial@inbox.ru

Бурова Надежда Владимировна – руководитель центра ландшафтной архитектуры, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

E-mail: centr1a@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7859-7244>

E-mail: sokolovdenis@issa-siberia.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3379-230X>

E-mail: gurkova@issa-siberia.ru

Osintseva Maria A. – Associate Professor, Cand.Sci (Techn.), Head of Project Management Department at Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4045-8054>

E-mail: k1marial@inbox.ru

Burova Nadezhda V. – Head of the Landscape Architecture Center, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

E-mail: centr1a@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 16.05.2023;
одобрена после рецензирования 13.08.2023; принята к публикации 11.12.2023.*

*The article was submitted 16.05.2023;
approved after reviewing 13.08.2023; accepted for publication 11.12.2023.*