



Научная статья

УДК 631.417.1

doi: 10.55186/25876740_2023_66_2_192

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

В.А. Сидорова¹, М.Г. Юркевич¹, О.Н. Бахмет²¹Институт биологии, Карельский научный центр Российской академии наук, Петрозаводск, Россия²Отдел комплексных научных исследований, Карельский научный центр Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

Аннотация. Характеристика распределения содержания органического углерода по почвенному профилю является одной из важнейших задач при оценке запасов углерода и секвестрирующей способности почв. На основании данных (2019-2021 гг.) по 78 почвенным профилям, заложенным на трех ключевых участках в южной Карелии, мы исследовали влияние типа землепользования на вертикальное распределение углерода на глубине 0-100 см в почвах, различающихся по степени гидроморфизма (минеральные и торфяные). Установлено, что содержание органического углерода постепенно уменьшается с глубиной. Минеральные почвы под лесом характеризуются высоким содержанием углерода у поверхности, но резким снижением содержания с глубиной. На антропогенно-трансформированных минеральных почвах формируется пахотный горизонт, за счет которого повышенные значения содержания углерода сохраняются и на больших глубинах. Независимо от типа землепользования, на минеральных почвах распределение содержания углерода по почвенному профилю достаточно хорошо описывается экспоненциальной моделью. На торфяных почвах вертикальное распределение содержания углерода имеет более сложный характер и кроме типа землепользования определяется также мощностью торфяного слоя.

Ключевые слова: углерод, почвенный профиль, тип землепользования

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания № FMEN 2022-0012 и FMEN 2022-0036.

Original article

MODELING OF VERTICAL DISTRIBUTION OF CARBON CONTENT IN SOILS UNDER DIFFERENT TYPES OF LAND USE

V.A. Sidorova¹, M.G. Yurkevich¹, O.N. Bakhmet²¹Institute of Biology, Karelian Research Centre the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia²Department of Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Research Centre the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Abstract. The characteristic of the distribution of organic carbon content across the soil profile is one of the most important tasks in assessing carbon stocks and sequestering capacity of soils. This study based on data from 78 soil profiles and was conducted in 2019-2021 at three sites in South Karelia to determine the effect of land use and site factors on C stocks and its vertical distribution to 100 cm in soils differing in hydromorphisms (peat and mineral). It is established that the organic carbon content showed a progressive decline from land surface to bedrock. Mineral soils under the forest are characterized by high carbon content at the surface, but a sharp decrease in the content with depth. An arable horizon is formed on anthropogenically transformed soils. As a result, increased values of carbon content are preserved at great depths. Regardless of the type of land use, on mineral soils, the distribution of organic carbon content over the soil profile is well described by an exponential model. On peat soils, the vertical distribution of carbon content is more complex and, in addition to the type of land use, is also determined by the thickness of the organic layer.

Keywords: carbon, soil profile, type of land use

Acknowledgments: the research was carried out within the framework of the scientific projects № FMEN 2022-0012 and FMEN 2022-0036.

Введение. Почва является многокомпонентной системой и служит центральным компонентом биологического круговорота веществ в наземных экосистемах, обеспечивает протекание процессов выветривания и удержание биофильных элементов, в том числе на поверхностях глинистых минералов. В почве создаются и удерживаются новые возобновляемые биогенные природные тела — подстилка и гумус, чью роль трудно переоценить.

Современное содержание органического вещества в почве зависит от большого числа факторов, среди которых условия климата, структура ландшафта, тип растительного покрова, характер землепользования, особенности физико-химических и биологических свойств почвы относятся к числу наиболее важных. Связывание углерода в почве играет важную роль

в смягчении антропогенного увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере [1].

В последнее время актуальным стал вопрос о необходимости получения объективных данных о влиянии антропогенной деятельности на баланс углерода в почвах. Вследствие экономических преобразований в аграрном секторе страны наблюдается прекращение возделывания земель и перевод значительных площадей пахотных угодий в залежные и кормовые [2].

Динамика содержания и запасов органического углерода определяется типом землепользования, который, в свою очередь, определяет характер поступающих в почву растительных остатков, в то время как интенсивность постагрогенной динамики контролируется природными свойствами почвы. Любые изменения в системе использования почв неизбежно приводят

к изменениям запасов органического углерода. В зависимости от типа использования земель и способов ведения хозяйства это может вызвать эмиссию углекислого газа в атмосферу, его поглощение почвами, а также безвозвратный вынос с поверхностной эрозией в водоемы [3].

Интенсификация сельского хозяйства и вырубка естественных лесов способствуют потере почвенного органического углерода, изменяют микробную биомассу и ее активность и воздействуют на качество почвы [4]. Преобразование естественных пастбищ в пахотные земли может сместить равновесие между поступлением углерода с растительностью и выходом углерода в результате разложения органического вещества с последующим снижением запасов углерода в почве [5]. Методы управления, связанные с культивацией, такие как обработка почвы



и внесение удобрений и извести, способствуют микробному разложению органического вещества, что может привести к изменению pH почвы и способности почвы удерживать углерод [6]. И наоборот, преобразование пахотных земель в леса или пастбища может увеличить поступление углерода в растительность и способствовать секвестрации углерода [7].

Трансформация атмосферного углерода в почвенный при возделывании пахотных почв, по современным агротехнологиям имеет ограниченную результативность — обеспечивают абсолютный прирост содержания органического вещества (ОВ) в верхнем слое почвы до 0,1% С. Таким образом пахотные земли могут играть существенную роль в секвестрации атмосферного CO₂, только после их перевода в залежь [8].

Распределение содержания и запасов углерода по профилю является одним из важнейших показателей генезиса почвы и ее окультуренности. Запасы гумуса в корнеобитаемом слое определяют производительность почв и в большой мере способствуют устойчивости урожая сельскохозяйственных культур благодаря способности органического вещества к накоплению и сохранению почвенной влаги во время засухи и поддержанию благоприятного воздушного режима в период избыточного увлажнения [9].

При оценке содержания и запасов углерода в почвах большинство исследователей делают акцент на поверхностный слой, где аккумулируется большая часть органического углерода [10]. Однако в ряде работ [11, 12] показано, что, хотя подпочвенные горизонты имеют более низкие концентрации, они содержат значительное количество углерода, которое может быть защищено от антропогенного воздействия сильнее, чем в верхних слоях почвы. Следовательно, анализ содержания и запасов углерода в почве должен включать весь профиль.

Целью настоящей работы являлось изучение и моделирование профильного распределения углерода в естественных и антропогенно- трансформированных почвах среднетаежной зоны республики Карелия.

Объекты и методы. Почвенный покров Карелии отличается сложным строением, значительной степенью мозаичности и мелкоконтурности, вызванной высокой степенью расчлененности рельефа и частой сменой почвообразующих пород. Умеренно холодный и влажный климат Карелии и преобладание лесной растительности обусловили широкое крупных невыветрившихся обломков кристаллических пород.

Объектами исследований служили: озёрно-ледниковые заболоченные и осушенные ландшафты (Корзинская низина), относительно молодые ландшафты дренированных озёрных равнин (Олонецкая равнина) и специфические ландшафты, формирующиеся на элювии шунгитовых сланцев (Заонежье).

Корзинская низина (61°49'с.ш., 33°10'в.д.) расположена в среднетаежной зоне Карелии. Болотный массив Корзинской низины имеет озерное происхождение. Торфяная залежь подстилается ленточными глинами или песчаными отложениями. Преобладающая часть почв представлена подзолисто-глееватыми, подзолисто-глеевыми, торфянисто- и торфяно-подзолисто-глеевыми почвами, а также дерново-слабоподзолистыми и среднеподзолистыми почвами [13].

Олонецкая равнина (60°59'с.ш., 32°58'в.д.) относится к суглинистым и глинистым равнинам. Ближе к окраинам равнины расположены заболоченные почвы: иловато-болотные на сапропелитовых супесях, торфянисто-подзолисто-глеевые и торфяно-болотные переходного типа на ленточной глине. Большое распространение имеют заболоченные дерново-глеевые иловато-суглинистые почвы, занимающие пониженное положение среди лугов, а также темноцветные подзолисто-глеевые, суглинистые и супесчаные лесные торфянисто-подзолистые почвы и подзолисто- глеевые на двучленном наносе. [14].

В районе Заонежья (62°30'с.ш., 35°16'в.д.) почвообразующими породами служат как коренные породы, так и рыхлые четвертичные наносы. На большей части территории почвы образуются на элюво-делювии шунгитовых сланцев, что способствуют развитию на них буроземов темноцветных (обогащенные железом и элементами минерального питания, с пониженной кислотностью) [15].

Основным критерием выбора участков послужило разнообразие ландшафтов, почв и подстилающих пород. А также, для исследования антропогенно-трансформированных почв использовались поля (как используемые, так и выведенные из севооборота) крупнейших действующих хозяйств республики Карелия: ЗАО «Эссоила» (Пяряжский район), ОАО «Совхоз Аграрный» (Олонецкий район) и ОАО «Совхоз Толвуйский» (Медвежьегорский район).

Основой исследований были традиционные методы почвенной съемки (заложение разрезов и полуям). В районе исследования в период 2019 — 2021 гг. было заложено 78 разрезов на разных отложениях, под разными типами растительных сообществ и с разной долей использования земель в сельском хозяйстве. В каждой точке фиксировались координаты по GPS, описание окружающей территории, тип землепользования, описание растительности, элементы рельефа, морфологические признаки почвы. В каждом почвенном горизонте отбирались образцы для последующего анализа физико-химических свойств. В случае мощных горизонтов, отбиралось несколько образцов из одного горизонта, но с разных глубин. В случае торфяных почв, где затруднительно выделение отдельных почвенных горизонтов, образцы отбирались каждые 10 см.

Определение содержания органического углерода проводилось методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе TOC-L CPN «Shimadzu» (Япония).

В последние годы было предпринято много попыток использовать различные педометрические методы для моделирования варьирования почвенных свойств с глубиной. Для моделирования варьирования почвенных свойств с глубиной чаще всего используется экспоненциальная функция [16]

$$C = C_0 * \exp(-k*z), \quad (1)$$

где C — содержание углерода на глубине z от поверхности.

Преимуществом данной модели является то, что коэффициенты имеют практический смысл: C₀ характеризует содержание углерода у поверхности почвы и k — коэффициент уравнения, характеризующий скорость убывания содержания углерода с глубиной и зависящий от вида растительного покрова, наличия

антропогенного воздействия, гранулометрического состава почвы и других факторов.

Представленная формула позволяет также быстро оценить запасы углерода в почвенном слое различной мощности:

$$C_z = C_0/k * [1 - \exp(-k*z)], \quad (2)$$

где C_z — запасы углерода в слое мощности Z.

Параметры C₀ и k определялись путем минимизации суммы квадратов разностей между наблюдаемыми значениями содержания в горизонтах и вычисленных с помощью модели. Для оценки качества подгонки вычислялась средне-квадратическая ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_i^*)^2}{n}} \quad (3)$$

где n — количество горизонтов (слоев), C_i и C_i^{*} — наблюдаемое и вычисленное значение содержания углерода в горизонте i.

Статистический анализ полученных данных проводили по стандартным методикам с использованием программы Statistica 8.

Результаты и обсуждение. Варьирование почвенных свойств по профилю обычно рассматривается как непрерывное. В типичном почвенном профиле первые несколько сантиметров имеют очень высокое содержание органического углерода. С глубиной это содержание резко уменьшается. Так, например, в минеральных почвах наиболее богат органическим веществом перегнойно-аккумулятивный (гумусовый) горизонт, содержащий от <1.0 (подзолы, почвы пустынь) до 6–8% C_{орг} (черноземы, рендзины, луговые почвы). Вниз по профилю количество органического вещества уменьшается по сравнению с гумусовым горизонтом в несколько раз. Подобное утверждение справедливо для большинства почв, которые характеризуются аккумулятивным профильным распределением гумуса [17], то есть для почв, которые либо исходно имеют аккумулятивное вертикальное распределение органического вещества в профиле, либо приобретают его за счёт формирования пахотного горизонта, обогащенного органическим веществом. Однако для некоторых почв эти условия нарушаются. В почвах со сложным гумусовым профилем, имеющим изначально элювиальное или элювиально-иллювиальное распределение, возможен второй максимум содержания гумуса в средней части профиля. К таким почвам относятся иллювиально-гумусовые подзолы, разнообразные почвы со вторым гумусовым горизонтом и так далее. Резкие изменения содержания органического углерода характерны также для почв, подвергшихся интенсивному антропогенному воздействию, например осушение, интенсивное сельское хозяйство и т.д. [18]. В этих случаях требуется отдельное моделирование функций распределения почвенных свойств по почвенному профилю.

В минеральных почвах на исследованных нами участках наиболее богат органическим углеродом гумусовый горизонт. В этом случае для моделирования содержания углерода вполне подойдет экспоненциальная функция (1). Коэффициенты и среднеквадратическая ошибка представлены в таблице 1. Кривые распределения содержания органического углерода представлены на рисунке 1. Традиционно считается,



что основным источником углерода в лесной почве являются надземный растительный опад от деревьев и подлеска, а также значительный вклад в пул почвенного углерода вносят подземные корни и связанные с корнями грибы [19]. Как видно из рисунка и таблицы, лесные почвы отличаются наибольшим значением содержания углерода у поверхности (примерно до 10 см).

Данное утверждение согласуется и с другими исследованиями. Так в работе [20] утверждается, что преобразование естественных лесов в сады и посадки многолетних культур приводит к снижению содержания углерода в верхнем (0-15 см) слое почвы, а на участках под однолетними овощными культурами содержание углерода снижается в два раза, по сравнению с лесными почвами. В работе [11] также отмечено, что модели распределения органического углерода по почвенному профилю в лесных массивах, пастбищах и пахотных землях были схожими; однако их значения органического углерода значительно различались. Содержание углерода в поверхностном горизонте уменьшалось в порядке: лес-пашня-пастбище. Авторы предполагают, что подобное уменьшение связано с тем, что различные виды землепользования часто тесно связаны с растительностью, что приводит к большим различиям в характеристиках

распределения углерода из-за различий в продуктивности и качестве растений.

Модель распределения углерода по профилю лесных почв отличается и наибольшим значением степенного коэффициента k , что на рисунке 1 выражается более резким изгибом кривой. Под влиянием окультуривающих факторов, главным образом внесения большого количества органических удобрений, в окультуренных почвах формируется пахотный горизонт, содержащий довольно большое количество гумуса. Благодаря периодическим обработкам пахотный горизонт довольно однороден, в результате чего высокое содержание органического углерода наблюдается и на глубине до 30 см.

Изменения свойств почв в залежный период происходят неоднозначно и зависят от климатических условий, типа почвы, времени пребывания почвы в режиме залежи и ее изначального гумусного состояния. В ряде работ отмечено, что в процессе зарастания пашни и сенокоса лесом происходит дифференциация бывшей пахотной толщи на два подгоризонта по содержанию углерода. Начиная с 40-летнего возраста залежи, статистически подтверждается дифференциация старопашотной толщи на два горизонта по содержанию и запасам углерода, наиболее выраженная в лесных почвах возрастом 90-100 лет [21].

Органический углерод почвы является ключевым компонентом глобального пула почвенного углерода водно-болотных угодий, который играет решающую роль в круговороте углерода. Однако исследований накопления углерода в болотных почвах, особенно подверженных влиянию деятельности человека, относительно мало.

Около трети территории Карелии занимают болота и заболоченные земли. При этом наибольшая заболоченность характерна для озерно-ледниковых равнин. В то же время на них сосредоточена большая часть всех сельскохозяйственных угодий республики. Во влажных почвах происходит процесс аккумуляции органического вещества и торфонакопления. В этом случае, в зависимости от мощности торфяного горизонта, мы имеем либо равномерное распределение содержания органического углерода по профилю с незначительными колебаниями в зависимости от зольности торфа, либо резкое изменение на границе перехода торфяного горизонта и подстилающих пород [22]. В случае с мощными торфяными почвами (мощность торфяного слоя больше 1 м) мы имеем практически равномерное распределение углерода по всему профилю, которое описывается либо постоянным значением, либо линейной функцией, что согласуется с результатами других исследований [23]. Антропогенно-трансформированные почвы отличаются пониженным содержанием углерода в пахотном (или старопашотном) горизонте (рис. 2А).

Вызвано это тем, что осушение и окультуривание торфяных почв приводит к коренному улучшению их водно-физических свойств. Содержание общего углерода в результате длительного окультуривания несколько снижается, что является следствием усиления процесса минерализации торфа и увеличения в результате этого его зольности. В разных почвах это проявляется в неодинаковой степени в зависимости от длительности окультуривания и ботанического состава торфов. Также заметное влияние на содержание общего углерода оказывает внесение извести, которое резко увеличивает зольность торфов.

В случае с торфяно-минеральными почвами, мощность торфяного горизонта в которых не превышает 30 см, или просто верхний горизонт оторфован, мы имеем резкое (в десятки раз) изменение содержания на границе перехода между торфяным слоем и нижележащими горизонтами (рис. 2Б). В этом случае необходимо отдельно моделировать распределение содержания углерода в торфяном слое и в минеральном слое. Следует также отметить, что хотя кривые распределения для лесных и для антропогенно-трансформированных почв в этих случаях аналогичны, содержание органического углерода в торфяном горизонте лесных почв несколько выше. Помимо перечисленных ранее причин, снижение содержания органического углерода в пахотном горизонте может быть вызвано удалением части торфянистого горизонта в результате культивации, а также перемешивание с нижележащими минеральными горизонтами в результате интенсивной обработки.

Примерно такую же ситуацию мы наблюдаем в случае лесных почв с мощностью торфяного горизонта меньше 1 м (рис. 2Б).

Но наибольший интерес представляют собой агроторфяно-минеральные почвы. Изначально

Таблица 1. Коэффициенты и среднеквадратическая ошибка экспоненциальной функции для моделирования содержания углерода

Table 1. Coefficients and standard error of the exponential function for carbon content modeling

	C_0	k	RMSE
Лес	9,644	0,108	1,599
Сенокос	6,597	0,032	1,656
Залежь	5,730	0,041	0,953
Пастбище	4,436	0,032	0,367

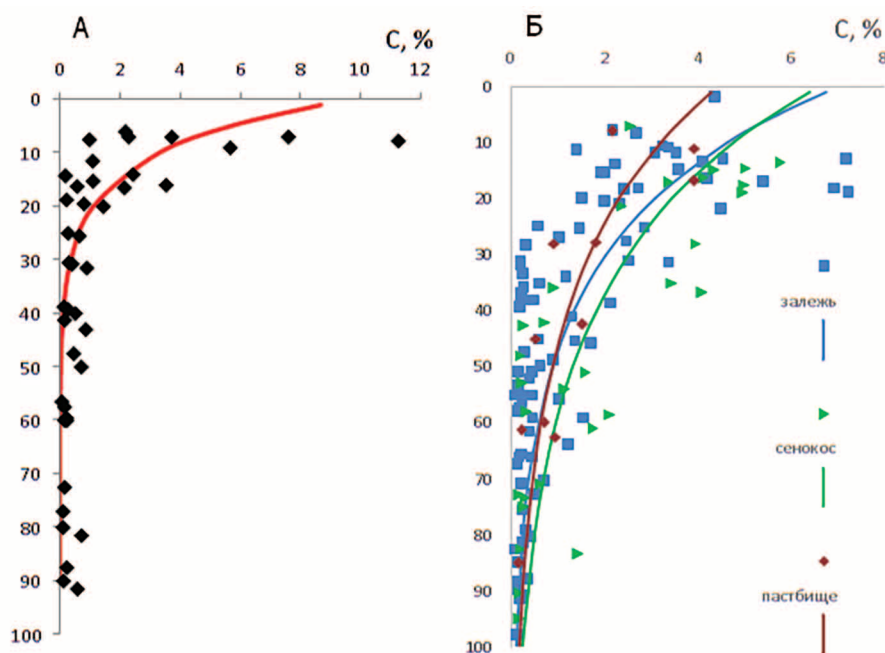


Рисунок 1. Кривые распределения содержания органического углерода в минеральной почве: А — лесные почвы, Б — антропогенно-трансформированные почвы. Здесь и далее: точки — экспериментальные данные, линии — модели

Figure 1. Vertical distribution of organic carbon content in mineral soil: A — forest soils, B — anthropogenic-transformed soils. Here and further: points — experimental data, lines — models



это были болотные почвы с мощностью торфяного слоя около 60 см. Но в результате проведения осушительных мероприятий, вспашки, удобрений, верхний слой (30 см) оказался нарушен и представляет собой смесь торфяных и минеральных частиц в различных пропорциях.

Вследствие чего содержание углерода в этом слое резко уменьшается, но на глубине 30-60 см остается нетронутая прослойка торфа с максимальным содержанием углерода (рис. 2В).

Таким образом, для вертикального распределения содержания органического углерода

в самом общем виде, лучше всего использовать блочную функцию вида [18]:

$$c = \begin{cases} c_1, & z \leq d_1 \\ c_2, & d_1 < z \leq d_2 \\ c_3 \exp(-k * z), & d_2 < z \end{cases} \quad (4)$$

где c_1, c_2, c_3 — содержание органического углерода на верхней границе торфяных и минеральных слоев, d_1 и d_2 — мощности этих слоев. Данная формула справедлива для всех рассмотренных выше вариантов распределения содержания органического углерода. В случае минеральных почв, $d_1=d_2=0$. Для торфяных почв с мощностью торфяного горизонта больше 1 м, принимается $d_2=1$ м, а третья часть блока не используется, а в случае антропогенно-трансформированных почв d_1 = мощность нарушенного горизонта. Для лесных торфяно-минеральных почв $d_1=d_2$ и $c_1=c_2$.

Выводы. Результаты наших исследований показали, что содержание углерода в поверхностных горизонтах определяется в первую очередь типом землепользования. Максимальные значения наблюдаются на лесных почвах. На минеральных почвах на участках, активно используемых в сельском хозяйстве, в результате вспашки, известкования и внесения удобрений происходит образование пахотного горизонта, обогащенного углеродом. При переводе сельскохозяйственных земель в залежь максимальное содержание по-прежнему отмечается в старопашотном горизонте (на глубине до 30 см), в то время как на лесных почвах отмечается резкое снижение содержания углерода начиная с глубины 10 см. Независимо от типа землепользования, на минеральных почвах распределение содержания углерода по почвенному профилю достаточно хорошо описывается экспоненциальной моделью.

На торфяных почвах, помимо типа землепользования определяющей является и мощность торфяного горизонта. В общем виде распределения содержания органического углерода лучше всего описывается блочной функцией, являющейся комбинацией линейной и экспоненциальной функций.

Список источников

1. Novák J., Jankowski K., Sosnowski J., Ma-Linowska E. Influence of plant species and grasslands quality on sequestration of soil organic carbon // *Ekológia* (Bratislava). 2020. Vol. 39. №. 3. С. 289-300. doi: 10.2478/эко-2020-0023
2. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Щенисенко Е.А., Нефедова Т.Т. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
3. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // *Почвы и окружающая среда*. 2022. Том 5. № 2. e169. doi: 10.31251/pos.v5i2.169
4. Lagomarsino A., Benedetti A., Marinari S. Soil organic C variability and microbial functions in a Mediterranean agro-forest ecosystem // *Biol. Fertil. Soils*. 2011. V. 47. P. 283-291. doi: 10.1007/s00374-010-0530-4
5. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528. P. 60-68. doi: 10.1038/nature16069
6. Osher L.J., Matson P.A., Amundson R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii // *Biogeochemistry*. 2003. V. 65(2). P. 213-232. doi: 10.1023/A:1026048612540
7. Veloso M.G., Dieckow J., Zanatta J.A. Reforestation with loblolly pine can restore the initial soil carbon stock relative to a subtropical natural forest after 30 years //

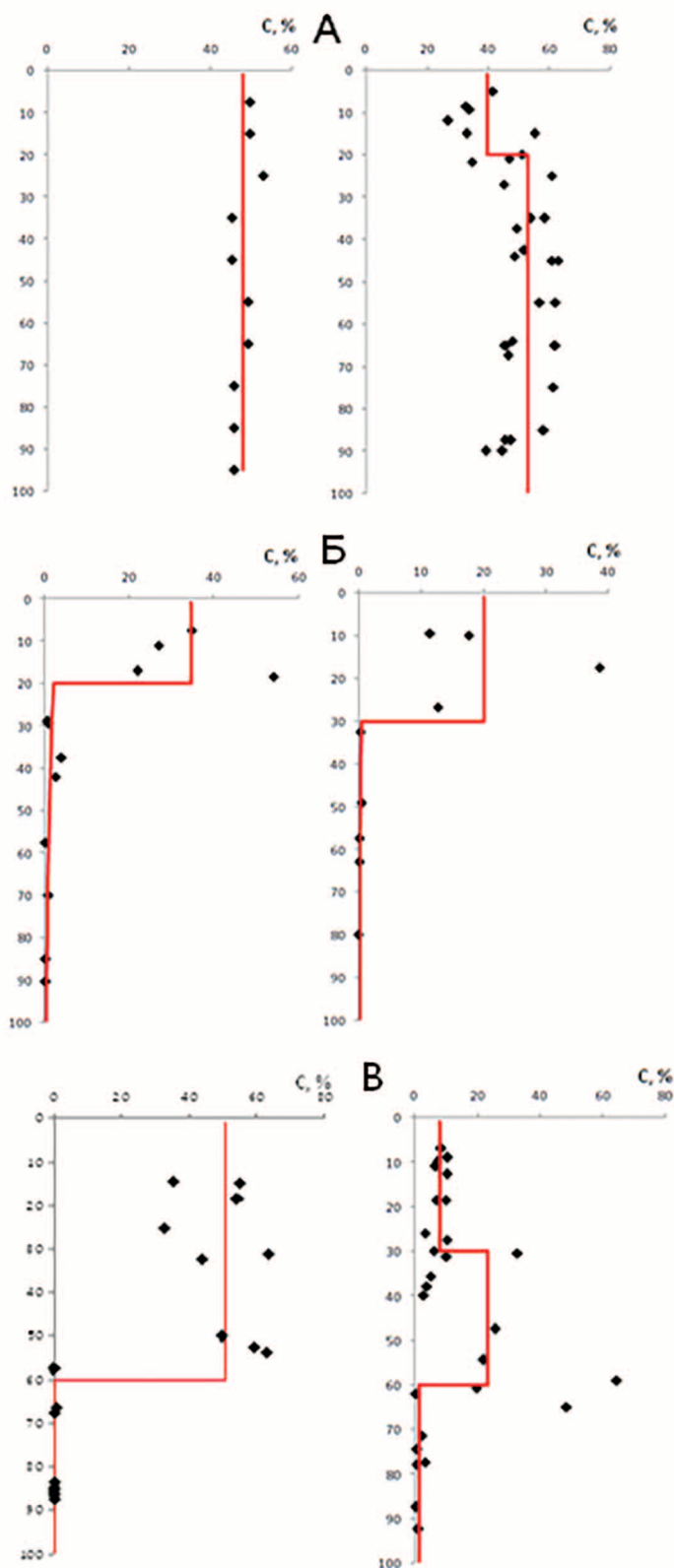


Рисунок 2. Кривые распределения содержания органического углерода в торфяной (А), торфяно-перегнойной (Б) и торфяно-минеральной (В) почве. Слева — лесные почвы, справа — антропогенно-трансформированные почвы
Figure 2. Vertical distribution of organic carbon content in peat (A), peat-humus (B) and peat-mineral (C) soil. On the left — forest soils, on the right — anthropogenic-transformed soils





Eur. J. Forest Res. 2018. Vol. 137. P. 593-604. doi: 10.1007/s10342-018-1127-y

8. Шарков И.Г., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e175. doi: 10.31251/pos.v5i2.175

9. Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения различных систем удобрения на органофильные основные зональные типы почв // Плодородие. 2019. № 2. e107. doi: 10.25680/S19948603.2019.107.01

10. Ledo A., Smith P., Zerihun A., Whitaker J., Vicente J., Qin Zh., Mcnamara N., Zinn Y., Llorente M., Liebig M., Kuhnert M., Dondini M., Don A., Diaz-Pines E., Datta A., Bakka H., Aguilera E., Hillier J. Changes in soil organic carbon under perennial crops // *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. 1-11. doi: 10.1111/gcb.15120.

11. Yu H., Zha T., Zhang X., Ma L. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China // *Sci. Total Environ*. 2019. 693:133632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133632

12. Nottingham A., Meir P., Velasquez E., Turner B. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest // *Nature*. 2020. Vol. 584. №. 7820. P. 234-237. doi: 10.1038/s41586-020-2566-4.

13. Дубровина И.А., Тонконогов В.Д. Корректировка содержания крупномасштабной почвенной карты с использованием новой классификации почв России // Почвоведение. 2008. № 11. С. 13-22.

14. Морозова Р.М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184с.

15. Бахмет О.Н., Федорев Н.Г. Почвенный покров. Сельские ландшафты Заонежского полуострова: природные особенности, история освоения и сохранение. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013 С. 60-65

16. Minasny B., McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Odeh I.O.A., Guyon, B. Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley // *Australian J. Soil Res*. 2006. Vol. 44. P. 233-244.

17. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Академический проект, 2004. 432 с.

18. Kempen B., Brus D.J., Stoorvogel J.J. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions // *Geoderma*. 2011. Vol. 162. P. 107-123.

19. Ransedokken Y., Asplund J., Ohlson M. Vertical distribution of soil carbon in boreal forest under European beech and Norway spruce // *Eur. J. Forest Res*. 2019. Vol. 138. P. 353-361. doi: 10.1007/s10342-019-01176-4

20. Ansari M.A., Choudhury B.U., Mandal S., Jat S., Meitei Ch.B. Converting primary forests to cultivated lands: Long-term effects on the vertical distribution of soil carbon and biological activity in the foothills of Eastern Himalaya // *J. Environ. Manag*. 2022. Vol. 301. 113886. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113886

21. Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova A.A. Dynamics of soil properties and carbon stocks structure in postagrogenic ecosystems of southern taiga during natural reforestation // *Eurasian Soil Science*. 2020. T. 53. № 2. С. 240-252.

22. Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Брехов П.Т. Пространственное варьирование запасов органического углерода в торфяных почвах и глееземах на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2021. № 2. С. 211-223. doi: 10.31857/S0032180X21020088

23. Xinyu L., Xixi L., Ruihong Y., Heyang S., Xiangwei L., Xiang L., Zhen Q., Tingxi L., Changwei L. Distribution and storage of soil organic and inorganic carbon in steppe riparian wetlands under human activity pressure // *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 139. 108945. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108945

References

1. Novak J., Jankowski K., Sosnowski J., Ma-Linowska E., Wiśniewska-Kadzaján B. (2020). Influence of Plant Species and Grasslands Quality on Sequestration of Soil Organic Carbon. *Ekológia (Bratislava)*, vol. 39, no. 3, pp. 289-300. doi: 10.2478/eko-2020-0023.

2. Ljuri D.I., Gorjachkin S.V., Karavaeva N.A., Shhenisenko E.A., Nefedova T.T. (2010). *Dinamika sel'skhozjajstvennyh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochvy* [Dynamics of agricultural lands of Russia in the XX century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils]. Moscow: GEOS.

3. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. (2022). Pilotnyj karbonovyy polygon v Rossii: analiz zapasov ugleroda v pochvah i rastitel'nosti [Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation]. *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, vol. 5, no. 2, e169. doi: 10.31251/pos.v5i2.169

4. Lagomarsino A., Benedetti A., Marinari S. (2011). Soil organic C variability and microbial functions in a Mediterranean agro-forest ecosystem. *Biol Fertil Soils*, vol. 47, pp. 283-291. doi: 10.1007/s00374-010-0530-4

5. Lehmann J. & Kleber M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, vol. 528, pp. 60-68. doi: 10.1038/nature16069

6. Osher L.J., Matson P.A., Amundson R. (2003). Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. *Biogeochemistry*, vol. 65, no. 2, pp. 213-232. doi: 10.1023/A:1026048612540

7. Veloso M.G., Dieckow J., Zanatta J.A. (2018). Reforestation with loblolly pine can restore the initial soil carbon stock relative to a subtropical natural forest after 30 years. *Eur. J. Forest Res*, vol. 137, pp. 593-604. doi: 10.1007/s10342-018-1127-y

8. Шарков И.Н. & Антипина П.В. (2022). Nekotorye aspekty uglerod-sekvestirirujushhej sposobnosti pahotnyh pochv [Some aspects of carbon sequestration capacity of arable soils]. *Pochvy i okruzhajushhaja sreda*, vol. 5, no. 2, e175. doi: 10.31251/pos.v5i2.175

9. Sychov V.G., Shevtova L.K., Belichenko M.V., Rukhovich O.V., Ivanova O.I. (2019). Vlijanie dlitel'nogo primeneniya razlichnyh sistem udobreniya na organoprofil' osnovnyh zonal'nyh tipov pochv soobshhenie 1. Derno- podzolistye pochvy [Effect of long-term application of various fertilizer systems on organoprofile of main zonal soil types]. *Plodородие*, no. 2, e107. doi: 10.25680/S19948603.2019.107.01

10. Ledo A., Smith P., Zerihun A., Whitaker J., Vicente J., Qin Zh., Mcnamara N., Zinn Y., Llorente M., Liebig M., Kuhnert M., Dondini M., Don A., Diaz-Pines E., Datta A., Bakka H., Aguilera E., Hillier J. (2020). Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology*, vol. 26, 1-11. doi: 10.1111/gcb.15120.

11. Yu, H., Zha, T., Zhang, X. & Ma, L. (2019). Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China. *Sci. Total Environ*, vol. 693, PMID: 31377373. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133632

12. Nottingham A., Meir P., Velasquez E. & Turner B. (2020). Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest. *Nature*, vol. 584, pp. 234-237. doi: 10.1038/s41586-020-2566-4

13. Dubrovina I.A., Tonkonogov V.D. (2008). Correction of a large-scale soil map with the use of the new classification system of Russian soils. *Eurasian Soil Sc*, vol. 41, pp. 1148-1155. doi: 10.1134/S1064229308110021

14. Morozova R.M. (1991). *Lesnye pochvy Karelii* [Forest soils of Karelia], Leningrad: Nauka.

15. Bakhmet O.N., Fedorec N.G. (2013). Pochvennyj pokrov [Soil cover]. In: *Sel'govye landshafty Zaonezhskogo poluostrova: prirodnye osobennosti, istorija osvoeniya i sohraneniye* [Selka landscapes of the Zaonezhskii peninsula: natural characteristics, land use, conservation]. Petrozavodsk: KarRC RAS press, pp. 60-65.

16. Minasny B., McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Odeh I.O.A. & Guyon, B. (2006). Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Australian J. Soil Res*, vol. 44, pp. 233-244.

17. Rozanov B.G. (2004). *Morfologiya pochv* [Soil morphology]. Moscow: Academic project.

18. Kempen B., Brus D.J., Stoorvogel, J.J. (2011). Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. *Geoderma*, vol. 162, pp. 107-123.

19. Ransedokken Y., Asplund J., Ohlson M. (2019). Vertical distribution of soil carbon in boreal forest under European beech and Norway spruce. *Eur. J. Forest Res*, vol. 138, pp. 353-361. doi: 10.1007/s10342-019-01176-4

20. Ansari M.A., Choudhury B.U., Mandal S., Jat S. & Meitei Ch.B. (2022). Converting primary forests to cultivated lands: Long-term effects on the vertical distribution of soil carbon and biological activity in the foothills of Eastern Himalaya. *J. Environ. Manag*, vol. 301, 113886. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113886

21. Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova, A.A. (2020). Dynamics of soil properties and carbon stocks structure in postagrogenic ecosystems of southern taiga during natural reforestation. *Eurasian Soil Sc*, vol. 53, pp. 240-252. doi: 10.1134/S1064229320020106

22. Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V., Brekhov P.T. (2021). Spatial variation of organic carbon stocks in peat soils and gleyzems in the northeast of Sakhalin Island. *Eurasian Soil Sc*, vol. 54, pp. 226-237. doi: 10.1134/S1064229321020083

23. Xinyu L., Xixi L., Ruihong Y., Heyang S., Xiangwei L., Xiang L., Zhen Q., Tingxi L. & Changwei L. (2022). Distribution and storage of soil organic and inorganic carbon in steppe riparian wetlands under human activity pressure. *Ecological Indicators*, vol. 139, 108945. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108945

Информация об авторах:

Сидорова Валерия Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории экологии и географии почв, Институт биологии, Карельский научный центр Российской академии наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4474-4450>, SPIN-код: 9800-1530, val.sidorova@gmail.com

Юркевич Мария Геннадьевна, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией экологии и географии почв, Институт биологии, Карельский научный центр Российской академии наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0458-5734>, SPIN-код: 6772-7333, svirinka@mail.ru

Бахмет Ольга Николаевна, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, генеральный директор, руководитель Отдела комплексных научных исследований, Карельский научный центр Российской академии наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5093-3285>, SPIN-код: 3989-0330, obahmet@mail.ru

Information about the authors:

Valeriia A. Sidorova, candidate of agricultural sciences, researcher, Laboratory for Soil Ecology and Soil Geography, Institute of Biology, Karelian Research Centre the Russian Academy of Sciences, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4474-4450>, SPIN: 9800-1530, val.sidorova@gmail.com

Maria G. Yurkevich, candidate of agricultural sciences, head of the Laboratory for Soil Ecology and Soil Geography, Institute of Biology, Karelian Research Centre the Russian Academy of Sciences, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0458-5734>, SPIN: 6772-7333, svirinka@mail.ru

Olga N. Bakhmet, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, doctor of biological sciences, director general, head of the department of multidisciplinary scientific research, Karelian Research Centre the Russian Academy of Sciences, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5093-3285>, SPIN: 3989-0330, obahmet@mail.ru