



Научная статья

# Особенности профильного распределения и запасы биогенных элементов в осушенных торфяных почвах

И.А. Дубровина 

Институт биологии КарНЦ РАН, 185910, Россия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11

vorgo@mail.ru

Поступила в редакцию: 01.06.2022

Доработана: 14.06.2022

Принята к печати: 04.07.2022

Опубликована онлайн: 19.05.2023

DOI: 10.23859/estr-220601

УДК 631.615 + 631.41

**Аннотация.** Исследовано профильное распределение и запасы органического углерода, общего азота и фосфора, соотношение C/N, рН<sub>KCl</sub>, плотность сложения в осушенном торфяном массиве (Южная Карелия, Фенноскандия) для оценки влияния длительного сельскохозяйственного использования под луговой растительностью на почвы различного строения и мощности. Наибольшая степень разложения торфа отмечена в мелких торфяно-глеевых почвах. Практически во всех почвах в верхней части профиля наблюдается повышенное содержание азота и фосфора, и, напротив, более низкое содержание углерода и соотношение C/N. В торфяных эутрофных почвах и торфоземах запасы углерода в метровом слое близки и составляют порядка 700 т/га. Запасы общего азота зависят от степени минерализации органического вещества и последовательно снижаются с 24 т/га в торфяных эутрофных до 13 т/га в минерально-торфяных почвах. Запасы валового фосфора значительно выше в торфяно-глеевых почвах (5.5 т/га) и торфоземах (7.4 т/га), по сравнению со слаборазрушенными торфяными эутрофными почвами (3.2 т/га). В торфяных эутрофных почвах и торфоземах все исследованные показатели имеют довольно близкие значения глубже 40 см, что обусловлено более высокой степенью увлажнения глубоких слоев торфяника.

**Ключевые слова:** осушенные торфяники, изменение землепользования, запасы, органический углерод, общий азот, общий фосфор, луговая растительность

*Для цитирования.* Дубровина, И.А., 2023. Особенности профильного распределения и запасы биогенных элементов в осушенных торфяных почвах. *Трансформация экосистем* 6 (2), 49–63. <https://doi.org/10.23859/estr-220601>

## Article

# Features of profile distribution and nutrient stocks in drained peat soils

Inna A. Dubrovina 

Institute of Biology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya 11, Petrozavodsk, 11185910 Russia

vorgo@mail.ru

Received: 01.06.2022  
Revised: 14.06.2022  
Accepted: 04.07.2022  
Published online: 19.05.2023

DOI: 10.23859/estr-220601  
UDC 631.615 + 631.41

Translated by S.V. Nikolaeva

**Abstract.** The profile distribution and stocks of organic carbon, total nitrogen and phosphorus, as well as C/N ratio,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  and bulk density were studied on drained peat array in soils of various structure and thickness (southern Karelia, Fennoscandia) to assess the impact of long-term agricultural use of land with meadow vegetation. The highest degree of peat decomposition was characteristic of the shallow *Histic Gleysols*. In almost all the studied soils the content of nitrogen and phosphorus in the upper part of the soil profiles was higher than in the lower parts, while carbon content and the C/N ratio were lower. In *Drainic Eutric Histosols* and *Murshic Eutric Histosols* the carbon stocks in the 1-meter layer are similar and amount to about 700 t/ha. The total nitrogen stock depends on the degree of organic matter mineralization and decreases from 24 t/ha in *Drainic Eutric Histosols* to 13 t/ha in *Histic Gleysols*. The total phosphorus stocks are significantly higher in *Histic Gleysols* (5.5 t/ha) and *Murshic Eutric Histosols* (7.4 t/ha) compared to slightly disturbed *Drainic Eutric Histosols* (3.2 t/ha). All the studied properties have almost similar values in layers deeper than 40 cm in the *Drainic Eutric Histosols* and *Murshic Eutric Histosols*, which is due to higher water content and more stable hydrological regime in the deep layers of the peatland.

**Keywords:** *Histosols*, *Histic Gleysols*, land use change, stocks, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, meadow vegetation

To cite this article. Dubrovina, I.A., 2023. Features of profile distribution and nutrient stocks in drained peat soils. *Ecosystem Transformation* 6 (2), 49–63. <https://doi.org/10.23859/estr-220601>

## Введение

Болотные экосистемы преимущественно распространены в северном полушарии (в России, США, Канаде и странах Северной Европы) из-за преобладания здесь холодного и влажного климата. Общая площадь болот мира составляет 420 млн. га, около 3% площади суши. В России на болота приходится примерно 8% земельного фонда (Вомперский и др., 2005; Strack, 2008). В естественном состоянии болотные экосистемы считаются чистыми поглотителями углерода, поскольку в них скорость производства биомассы преобладает над скоростью ее разложения, что обеспечивает постоянный рост болот. Углерод в болотах связывается в виде торфа, представляющего собой биомную продукцию фотосинтеза (Net Biome Production) со временем пребывания углерода сотни и тысячи лет (Кудеяров, 2015). По разным оценкам за тысячелетия в болотах накопилось от 120 до 460 млрд. т С (Gorham, 1991; Turunen et al., 2002). Торфяники содержат треть почвенного пула углерода, который примерно равен общему количеству углерода в атмосфере или углероду всей наземной биомассы (Joosten and Clarke, 2002).

В XX-м веке порядка 25% болот мира подверглись осушению, в основном в бореальной и умеренной зонах. Около 15 млн. га северных торфяников были осушены для целей лесного хозяйства (Koskinen et al., 2011; Strack, 2008). Большая часть осушенных болот Европы используется в основном под пастбища (Tubiello et al., 2016). Около 25 млн. га осушенных торфяников по всему миру используются в сельском хозяйстве, в том числе 5 млн. га в России. Осушение и сельскохозяйственное использование торфяных болот значительно изменяют их гидрологические и биогеохимические процессы. Потери углерода и азота в виде гуминовых веществ и нитратов из осушенных почв происходят с дренажными водами, загрязняя водоемы стока (Yli-Halla et al., 2022). Аэробное разложение и мобилизация органического вещества в сочетании с азотной минерализацией способствуют увеличению выбросов углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) из торфяных почв. Так торфяники из поглотителей углерода превращаются в источник парниковых газов, что оказывает значительное влияние на климат (Gorham, 1991; Limpens et al., 2008). Считается, что осушенные торфяные болота в результате изменения землепользования являются основным антропогенным поставщиком  $\text{CO}_2$  (Grønlund et al., 2008; Holden et al., 2004; Frohling et al., 2011).

Одним из эффективных способов регулирования изменений климата является сохранение существующих запасов почвенного углерода, особенно в почвах с высоким содержанием органического вещества, в том числе торфяных.

Восстановление и рациональное использование торфяников считается приоритетной политикой в области управления земельными ресурсами. Частичное обводнение либо повторное заболачивание территории может приводить к прекращению сельскохозяйственного производства с сохранением высоких выбросов парниковых газов, а также к загрязнению водоемов высвобождающимися фосфатами (Berglund et al., 2019). Экологически обоснованными считаются такие меры, как переход на экстенсивное сельскохозяйственное и лесохозяйственное использование. Поддержание устойчивого функционирования торфяных угодий защищает большую часть углерода и связанного с ним азота органического вещества от минерализации, что способствует долгосрочному депонированию углерода почв (Молчанов и др., 2020; Wilson et al., 2016). Изучение закономерностей распределения и динамики биогенных элементов торфяных почв важно как для оценки антропогенного влияния на осушенные торфяники, так и для прогноза их эволюции в перспективе дальнейшей эксплуатации. Исследования на объектах, подвергавшихся длительным антропогенным нагрузкам, вносят значительный вклад в понимание особенностей функционирования биогеохимических циклов и помогают в принятии обоснованных решений для рационального землепользования. Цель работы заключалась в изучении профильного распределения и запасов биогенных элементов в осушенных торфяных почвах различного строения и мощности для оценки влияния на них длительного сельскохозяйственного использования.

## Материалы и методы

Район исследования расположен в пределах среднетаежной подзоны Карелии и представлен западным сектором Шуйской аккумулятивной озерно-ледниковой впадины – осушенным болотным массивом Корзинская низина (Рис. 1), площадью порядка 2000 га (N 61°49'; E 33°12').

Климат Карелии умеренно-холодный, переходный от морского к континентальному. Согласно агроклиматическому районированию Карелии исследованный участок находится в Южном агроклиматическом районе: средняя температура января  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ , июля  $+16\text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность безморозного периода 105–115 дней (Агроклиматические ресурсы, 1974). Сумма эффективных температур за вегетационный период составляет  $1450\text{ }^\circ\text{C}$  при 650–725 мм осадков в год. Ленточные глины – основные подстилающие породы на исследуемом участке (Елина, 1977). В северо-западной части низины преобладают легкие по гранулометрическому составу песчаные и супесчаные моренные и флювиогляциальные отложения. Осушение центральной части Корзинской низины с торфяной залежью низинного типа было начато

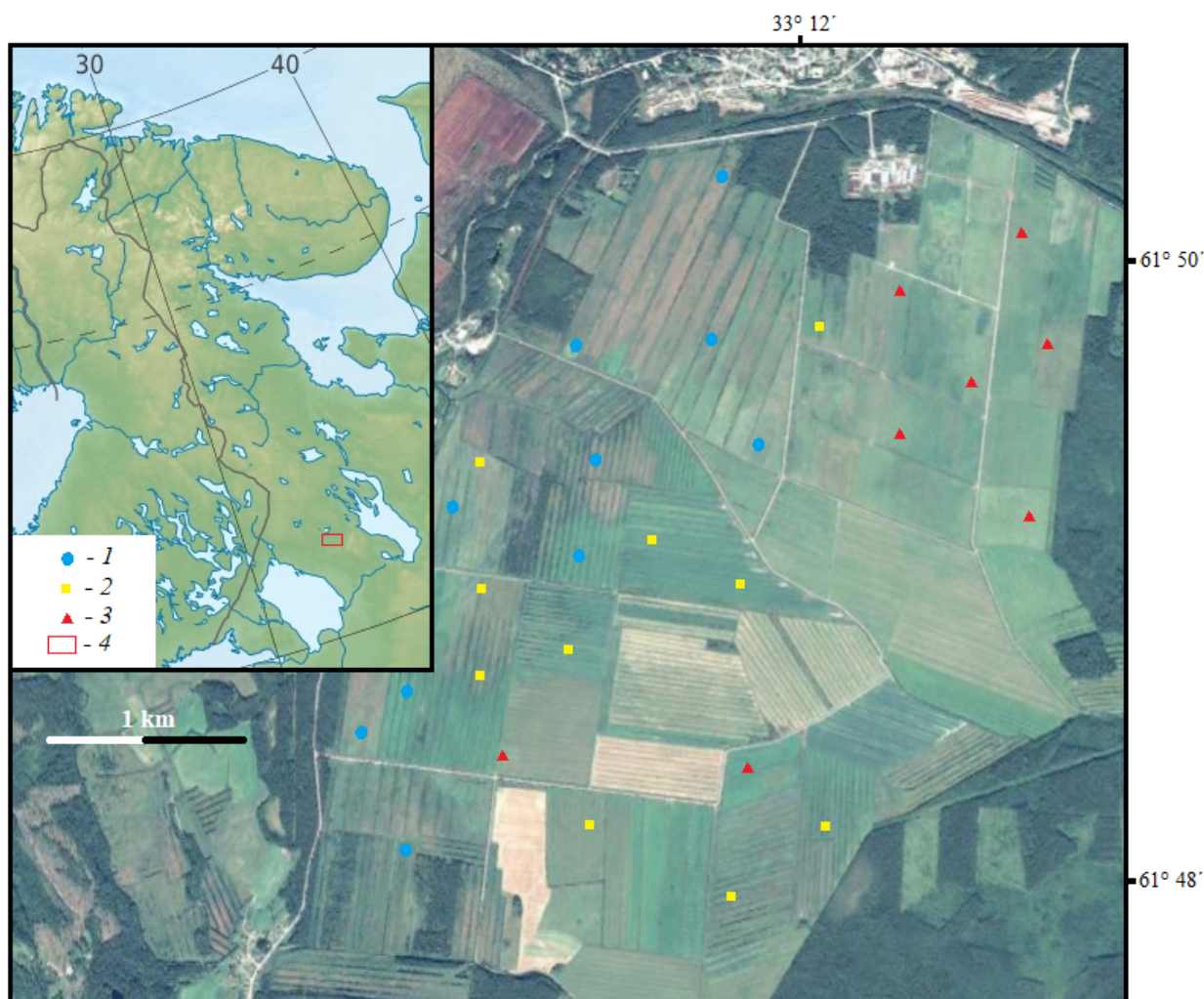


Рис. 1. Корзинская низина с почвенными разрезами: 1 – торфяные эутрофные; 2 – торфоземы агроминеральные; 3 – агроземы и агроторфяно-глееземы минерально-торфяные; 4 – район исследования.

в 1962 г. Участок осушен с использованием открытого дренажа. Расстояние между дренами составляет 20 и 40 м. После осушения торфяной массив был засеян многолетними травами и в течение пятидесяти лет использовался как сенокос и пастбище (Дубровина и Богданова, 2016).

Полевые исследования проводили методами традиционной почвенной съемки. Почвенные разрезы закладывали с учетом глубины торфяной залежи, расположения мелиоративной сети и степени нарушенности верхнего горизонта. Было исследовано 28 почвенных профилей. Почвы диагностировали согласно «Классификации и диагностике почв России» (Шишов и др., 2004), а также World Reference Base (2014). Профильное распределение элементов и основных физико-химических свойств было проанализировано в 3-х группах почв, сильно различающихся по строению и мощности (Рис. 2).

Близкие по строению к естественным аналогам почвы диагностированы как торфяные эутрофные

(TE-TT) (*Drainic Eutric Histosols*). Незначительная антропогенная трансформация наблюдается в верхней части (20–30 см) эутрофно-торфяных горизонтов TE, ниже они имеют естественное строение и подстилаются в основном среднемощной и мощной торфяной залежью (Рис. 2А). Торфяники с сильно преобразованным в ходе освоения верхним горизонтом диагностированы как торфоземы агроминеральные (PTR-TT) (*Murshic Eutric Histosols*). Мощность агроторфяно-минеральных горизонтов PTR составляет в среднем порядка 35 см, и это в основном мало- и среднемощные почвы (Рис. 2В). Почвы с мощностью торфа < 50 см (в WRB < 40 см) представляют собой массивы агроземов минерально-торфяных (PTmr-Cg) и агроторфяно-глееземов минерально-торфяных (PTmr-T-G-CG) (*Histic Gleysols (Drainic)*). Эти почвы имеют значительно трансформированные минерально-торфяные горизонты PTmr мощностью около 30 см, подстилаемые оглеенной минеральной породой (Рис. 2С).

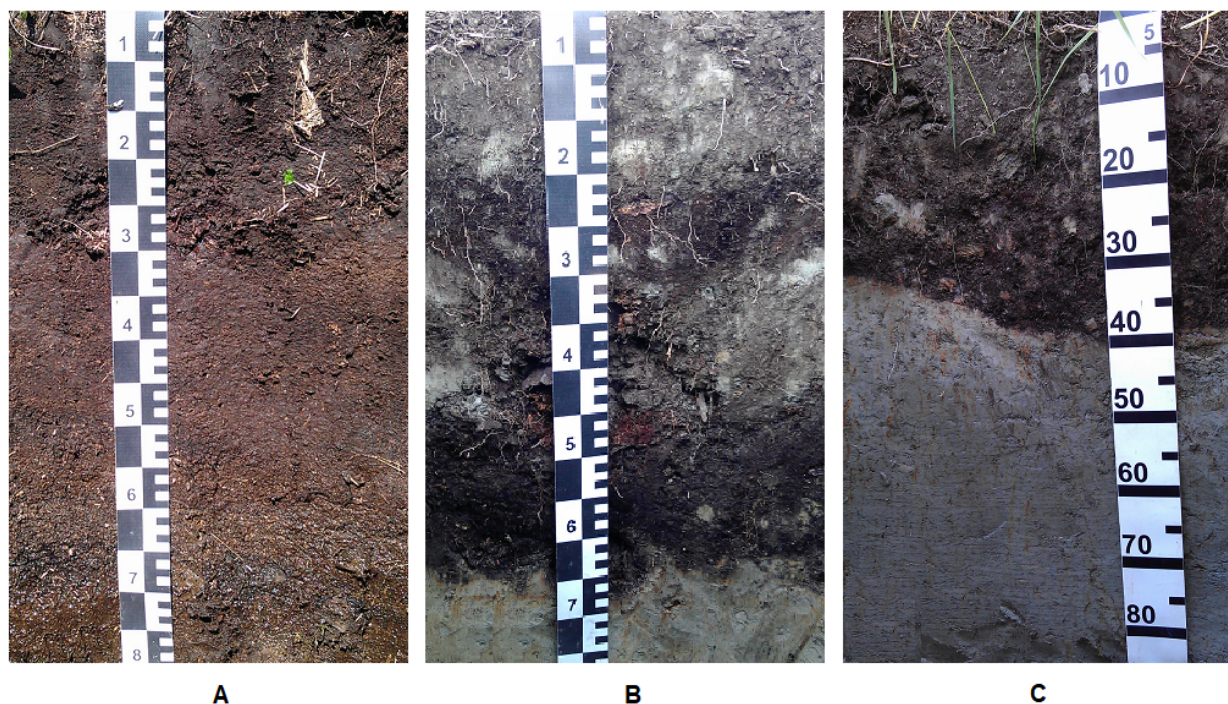


Рис. 2. Профили исследованных почв: А – торфяная эутрофная; В – торфозем агроминеральный; С – агрозем минерально-торфяной.

Отбор образцов проводили в 2015–2017 гг. по-слойно через каждые 10 см торфяной залежи, не глубже 1 м. В торфяных эутрофных почвах было выполнено 10 разрезов, отобрано 98 образцов; в торфоземах агроминеральных – 10 разрезов, 72 образца; в агроземах и агроторфяно-глееземах минерально-торфяных – 8 разрезов, 25 образцов. В образцах торфа определяли следующие показатели: рН солевое (KCl) потенциметрически с использованием ион-селективного электрода на иономере АНИОН 4100 “Инфраспак-Аналит”; содержание органического углерода (С) – методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе TOC-L CPN “Shimadzu”; содержание общего азота (N) – по Кьельдалю с использованием Kjeltac system “Tecator”; содержание валового фосфора ( $P_2O_5$ ) – по ГОСТ 26261–84<sup>1</sup> со спектрофотометрическим окончанием на спектрофотометре UV-1800 “Shimadzu”; плотность сложения – весовым методом, а также рассчитывали соотношение C/N (Теория и практика..., 2006; Теории и методы..., 2007). Запасы элементов в торфяной залежи (не глубже 1 м) рассчитывали как сумму запасов в каждом слое. Запасы элементов в слое определяли по следующей формуле (Wang et al., 2021):

$$S = Q \times h \times p,$$

где  $S$  – запасы элемента для слоя, т/га;  $Q$  – содержание определяемого элемента, %;  $h$  – мощность слоя, см;  $p$  – плотность сложения, г/см<sup>3</sup>.

Результаты анализа представлены в виде средних и предельных значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации по всем показателям для каждого типа почв. Для оценки тесноты связи показателей использовали коэффициент корреляции Пирсона. Статистический анализ данных и построение графиков проводились в программах Microsoft Excel 2007 и PAST Statistics 2.09.

## Результаты

Исследованный торфяной массив представляет собой неоднородный комплекс мало-, средне- и мощных торфяных почв, а также торфяно-глеевых почв (Дубровина, 2009). Торфяные эутрофные почвы близки по строению к целинным низинным торфяникам, они наиболее кислые из исследованных почв: среднее рН составляет 4.4, а плотность сложения в среднем равна  $0.13 \pm 0.01$  г/см<sup>3</sup> (Табл. 1). Данные параметры мало меняются с глубиной (Рис. 3). Торфяные почвы содержат наибольшее количество углерода в профиле: лишь в верхней части горизонта TE его содержание составляет 47%, а глубже – в среднем  $52.81 \pm 0.97\%$ . Содержание азота в торфяных почвах в среднем составляет 1.7%, наибольшие значения отмечены в верхней части горизонта TE. Соотношение C/N широкое, в

<sup>1</sup> ГОСТ 26261–84. Почвы. Методы определения валового фосфора и валового калия

**Табл. 1.** Статистические параметры исследованных показателей.  $M \pm m$  – среднее  $\pm$  ошибка среднего; min–max – предельные значения;  $V$  – коэффициент вариации.

Показатель	Тип почв			
	Торфяные эутрофные	Торфоземы агроминеральные	Агроземы и агроторфяно-глееземы минерально-торфяные	
Мощность торфа, см	$M \pm m$	128.0 $\pm$ 11.2	76.5 $\pm$ 5.5	31.9 $\pm$ 2.3
	min–max	90–200	55–110	25–45
	$V$ , %	1256.7	300.3	42.4
С, %	$M \pm m$	52.81 $\pm$ 0.97	41.62 $\pm$ 1.06	21.55 $\pm$ 3.65
	min–max	38.7–63.5	19.6–59.2	12.7–30.5
	$V$ , %	59.8	83.5	53.4
N, %	$M \pm m$	1.71 $\pm$ 0.05	1.47 $\pm$ 0.06	0.67 $\pm$ 0.08
	min–max	1.1–2.8	0.8–2.2	0.3–1.6
	$V$ , %	0.16	0.17	0.12
C/N	$M \pm m$	37.67 $\pm$ 1.03	34.72 $\pm$ 2.01	27.52 $\pm$ 1.14
	min–max	29.0–40.4	21.3–42.4	24.7–29.7
	$V$ , %	10.6	40.2	5.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	$M \pm m$	0.16 $\pm$ 0.02	0.26 $\pm$ 0.03	0.24 $\pm$ 0.04
	min–max	0.03–0.61	0.07–1.06	0.08–0.42
	$V$ , %	0.02	0.05	0.01
Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	$M \pm m$	0.13 $\pm$ 0.01	0.27 $\pm$ 0.06	0.77 $\pm$ 0.07
	min–max	0.10–0.19	0.10–0.62	0.62–0.92
	$V$ , %	0.01	0.04	0.02
pH <sub>KCl</sub>	min–max	3.0–5.5	3.0–5.5	3.6–5.6

среднем достигает  $37.67 \pm 1.03$  и лишь в верхней части горизонта TE составляет около 29. Содержание фосфора наибольшее в горизонте TE (до 0.35%) и убывает с глубиной; среднее содержание в метровой толще составляет около  $0.16 \pm 0.02\%$ .

Торфоземы агроминеральные в основном среднекислые и с большей плотностью сложения: в среднем  $0.27 \pm 0.06$  г/см<sup>3</sup>. С глубиной кислотность данных почв возрастает, а плотность снижается. Содержание углерода наименьшее в горизонте PTR – 24% и возрастает с глубиной, достигая значений, близких торфяным эутрофным почвам (до 50%). Содержание азота в торфоземах в среднем составляет  $1.47 \pm 0.06\%$ , наибольшее содержание наблюдается в средней части профиля. Соотношение C/N в горизонте PTR не превышает 30, а ниже по профилю достигает 42. Содерж-

жание фосфора в горизонте PTR 0.4%; глубже по профилю снижается до 0.1%.

Торфяно-глеевые почвы имеют средние значения pH 4.8, сдвигающиеся с глубиной в кислую сторону. Плотность сложения в среднем составляет  $0.77 \pm 0.07$  г/см<sup>3</sup> и возрастает с глубиной до  $0.92$  г/см<sup>3</sup>, что близко к показателям минеральных почв. Содержание углерода в торфяно-глеевых почвах наименьшее и составляет около 13% в верхней части горизонта PTmg, увеличиваясь с глубиной до 30%. Содержание азота также самое низкое среди изученных почв: в верхней части профиля оно равно 0.7%, с глубиной возрастает до 1.2%. Соотношение C/N в среднем по профилю достигает  $27.52 \pm 1.14$ . Содержание фосфора в верхней части профиля составляет 0.3%, а глубже снижается до 0.16%.

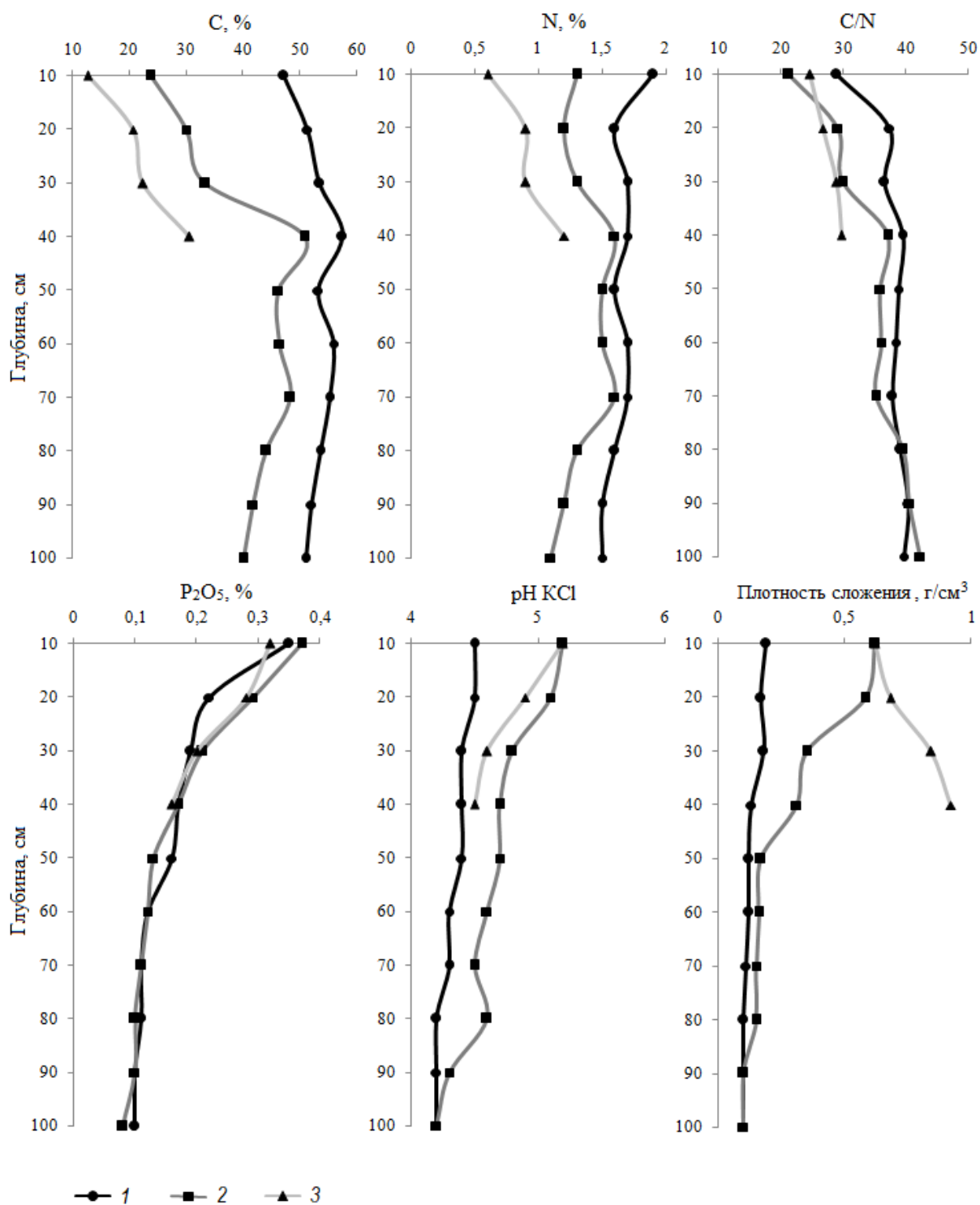


Рис. 3. Изменение исследованных показателей по глубине торфяной залежи. Приведены средние данные по типам почв. 1 – торфяные эутрофные; 2 – торфоземы агроминеральные; 3 – агроземы и агроторфяно-глееземы минерально-торфяные.

**Табл. 2.** Коэффициенты корреляции между исследованными показателями. Жирным шрифтом выделены коэффициенты, значимые при  $p \leq 0.05$  ( $n = 195$ ).

Показатель	C, %	N, %	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	pH <sub>KCl</sub>	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>
C, %	1.00	–	–	–	–	–
N, %	<b>0.89</b>	1.00	–	–	–	–
C/N	<b>0.82</b>	<b>0.49</b>	1.00	–	–	–
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	<b>-0.61</b>	-0.27	<b>-0.87</b>	1.00	–	–
pH <sub>KCl</sub>	<b>-0.76</b>	<b>-0.53</b>	<b>-0.84</b>	<b>0.77</b>	1.00	–
Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	<b>-0.85</b>	<b>-0.68</b>	<b>-0.81</b>	<b>0.58</b>	<b>0.65</b>	1.00

Корреляционный анализ выявил сильную положительную взаимосвязь между содержанием углерода и азота, величиной pH и содержанием фосфора (Табл. 2). Отмечена положительная достоверная связь между плотностью сложения и содержанием фосфора, а также величиной pH. Обнаружена отрицательная тесная зависимость между показателем C/N и плотностью сложения, C/N и pH, а также C/N и содержанием фосфора. Прослеживается отрицательная сильная корреляция между содержанием углерода и плотностью сложения, а также между содержанием углерода и pH. Выявлена отрицательная взаимосвязь средней силы между содержанием углерода и фосфора, содержанием азота и плотностью сложения, содержанием азота и pH.

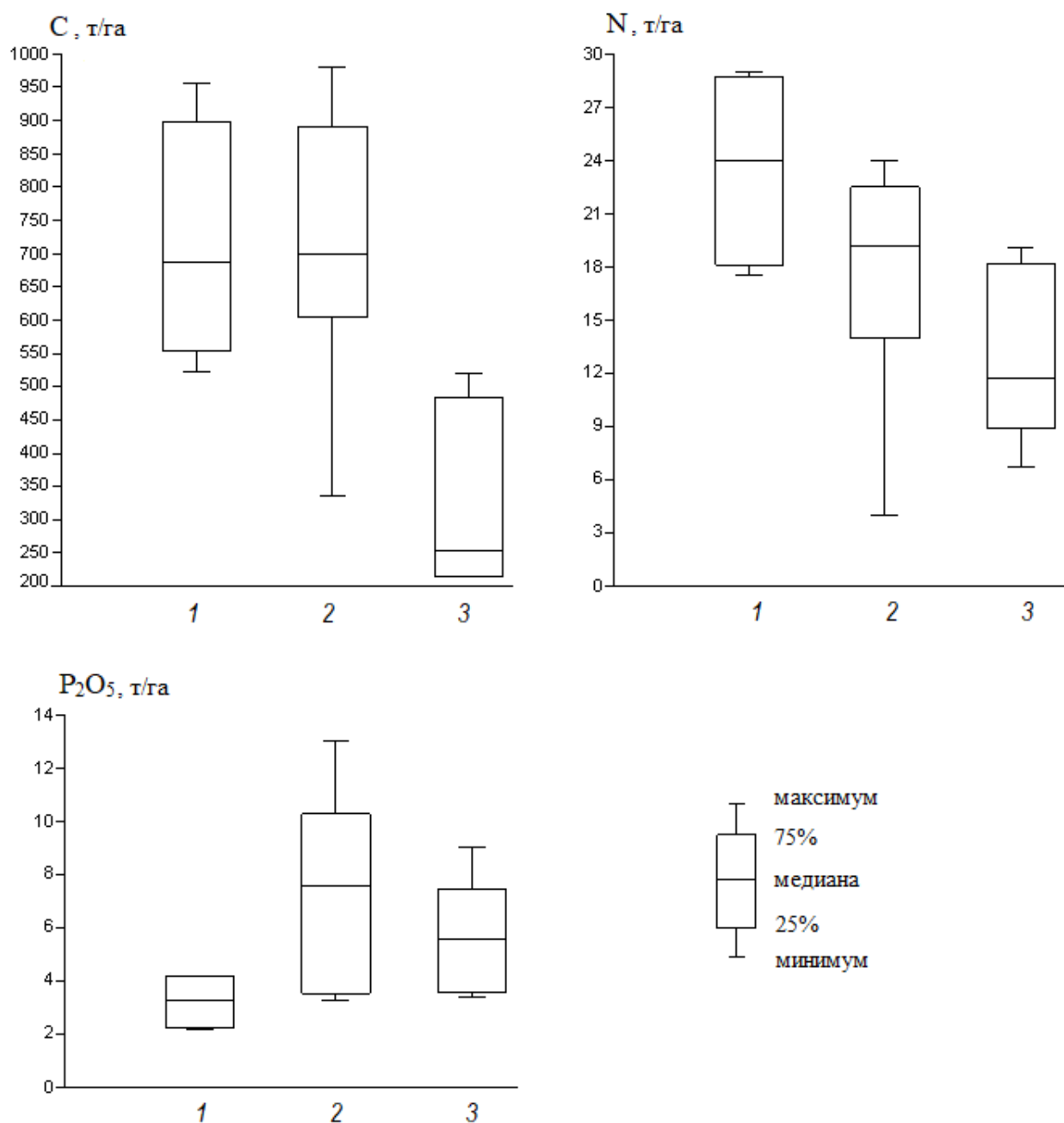
В метровой толще торфяных эутрофных почв содержится в среднем 714 т/га углерода, в торфоземах – 705 т/га. Медианные значения запасов углерода в этих почвах близки и составляют 690–700 т/га. В торфоземах отмечена более высокая вариабельность величин (Рис. 4). В торфяных горизонтах торфяно-глеевых почв среднее значение запасов углерода достигает 330 т/га, а медианное близко к нижнему квартилю и составляет 253 т/га, что показывает низкие значения запасов C в большем количестве случаев. Запасы азота максимальны в торфяных эутрофных почвах: 24 т/га. В торфоземах запасы азота составляют около 18 т/га, а в торфяно-глеевых почвах – 13 т/га, при этом наиболее высокая вариабельность значений отмечается для торфоземов. Максимальные запасы фосфора характерны для торфоземов и составляют 7.4 т/га, несколько ниже они в торфяно-глеевых почвах – 5.5 т/га. В торфяных эутрофных почвах запасы фосфора минимальны и в среднем составляют 3.2 т/га. Для азота и фосфора средние и медианные значения запасов близки.

## Обсуждение

Известно, что осушение и планировка торфяника приводит к значительным изменениям в строении верхней части профиля почв и уменьшению мощности торфяной залежи. Особенно интенсивно этот процесс происходит в первые десятилетия после осушения (Дубровина, 2009; Grønlund et al., 2008). Исследования показывают зависимость содержания органического углерода, общего азота и соотношения C/N от мощности торфяной залежи. Наблюдается снижение этих показателей при уменьшении средней глубины торфа. Напротив, величина pH, плотность сложения и содержание валового фосфора (показатели сельскохозяйственной освоенности) выше в почвах с меньшей мощностью торфа – агроземах и агроторфяно-глееземах минерально-торфяных. Следовательно, чем мельче торфяная залежь, тем в большей степени выражены признаки ее нарушенности. В профильном распределении элементов характерной тенденцией для всех изученных почв является более низкое содержание углерода в верхних горизонтах по сравнению с нижележащими. В них же наблюдается более высокое содержание фосфора и азота (за исключением торфяно-глеевых почв) и снижение соотношения C/N. Подобные закономерности типичны для осушенных торфяных почв, поскольку верхние горизонты теряют углерод вследствие ускоренного разложения торфа под воздействием мелиоративных мероприятий и сельскохозяйственной эксплуатации (Лученок, 2020; Wüst-Galley et al., 2016).

Большинство исследованных показателей имеют высокую и среднюю силу корреляционной связи между собой. Кислотность, плотность сложения и обеспеченность фосфором статистически значимо взаимосвязаны и определяют интенсивность сельскохозяйственного освоения почв.





**Рис. 4.** Запасы элементов в торфяной залежи (в среднемощных и мощных почвах не глубже 1 м). Приведены средние данные по типам почв. 1 – торфяные эутрофные; 2 – торфоземы агроминеральные; 3 – агроземы и агроторфяно-глееземы минерально-торфяные.

Степень минерализации торфа обратно пропорциональна содержанию углерода. Установлено, что содержание органического углерода отрицательно коррелирует с плотностью сложения, величиной pH и содержанием фосфора. Соотношение C/N также отрицательно коррелирует с pH и плотностью сложения. Перечисленные взаимосвязи хорошо изучены и являются показателями потерь углерода в торфах (Schwalm and Zeitz, 2015). Некоторые исследователи отмечают сильную взаимосвязь между циклами азота и фосфора в тор-

фяных почвах, где выбросы закиси азота зависят от уровня содержания фосфатов (Liimatainen et al., 2018). В настоящем исследовании выявлена отрицательная корреляция между содержанием валового фосфора и соотношением C/N. Это согласуется с предположением о том, что увеличение содержания фосфатов в торфяных почвах увеличивает степень их минерализации (Saurich et al., 2019).

Агроземы и агроторфяно-глееземы минерально-торфяные характеризуются наименьшими

запасами углерода и азота в профиле не только за счет малой мощности торфяной залежи, но и вследствие высокой степени разложения торфа (наименьшее среднепрофильное соотношение C/N = 28). Эти почвы отличаются наибольшими значениями рН и плотности сложения среди исследованных почв. Для торфоземов характерна высокая вариабельность значений запасов элементов, поскольку почвы этого типа неоднородны: встречаются как практически ненарушенные торфяные, так и близкие по свойствам к сильно нарушенным торфяно-глеевым. Запасы общего азота последовательно снижаются от торфяных эутрофных до минерально-торфяных почв, отражая степень минерализации органического вещества торфов. Запасы валового фосфора в торфоземах, напротив, превышают запасы в торфяных эутрофных почвах более чем в 2 раза. Сельскохозяйственное освоение, мелиоративные мероприятия и удобрение торфов способствуют накоплению в них фосфатов, которое происходит в основном в верхней части залежи (Дубровина, 2018; Shenker et al., 2005). В связи с этим, а также из-за более высокой плотности сложения запасы валового фосфора значительно выше в торфяно-глеевых почвах и торфоземах по сравнению со слабонарушенными торфяными эутрофными почвами, несмотря на однородное среднепрофильное распределение  $P_2O_5$ . Мощность торфоземов в среднем меньше, чем у торфяных эутрофных, но из-за более высокой плотности сложения запасы углерода в метровом слое данных почв близки и составляют порядка 700 т/га. Полученное значение сопоставимо с запасами углерода в торфяниках в сходных климатических условиях. Так, в южной тайге экосистемы низинных болот накапливают до 650 т/га углерода в торфяной залежи (Чернова и др., 2018). В условиях Финляндии запасы углерода в пределах 1 м на осушенных торфяниках составляют 680–790 т/га (Krüger et al., 2016). Для осушенных лесов Швейцарии запасы углерода в метровом слое колеблются в пределах 300–700 т/га (Wüst-Galley et al., 2016).

Следует отметить, что в почвах с более мощной торфяной залежью – торфяных эутрофных и торфоземах – горизонты глубже 40 см практически не различаются по всем исследованным показателям. Возможно, это является признаком стабильного уровня увлажнения в более глубоких слоях почв. Например, в осушенных торфах Швейцарии также отмечали более высокую вариабельность и низкие запасы углерода (146 т/га) в верхнем 30 см слое по сравнению с метровым (Wüst-Galley et al., 2016). Исследование в Финляндии показало, что влияние дренажа на запасы углерода менее выражено в глубоких слоях торфа (Krüger et al., 2016). Ряд авторов отмечает, что потери органиче-

ского углерода в глубоких слоях почв не так велики, как принято считать, и они не теряют углерод так интенсивно, как верхние почвенные горизонты (Wang et al., 2017; Wiesmeier et al., 2015).

Гидрологический режим торфяников считается основным фактором, влияющим на их биогеохимическую трансформацию. Поскольку осушенные торфяные почвы в глубине торфяной залежи могут оставаться увлажненными, торф не подвергается процессам интенсивного разложения и мобилизации углерода. Известно, что степень и глубина минерализации торфа с высокой достоверностью отрицательно связана с уровнем влажности почвы (Ефремова и Овчинникова, 2007; Leiber-Sauheitl et al., 2014). Для защиты органического вещества торфяных почв от ускоренного разложения большое значение имеет не только степень увлажнения, но и тип растительного сообщества. Так, известно, что посевы многолетних трав на осушенных торфяниках предпочтительнее по сравнению с другими фитоценозами (Maljanen et al., 2010; Šlepeticienė et al., 2010). В целом, использование осушенных торфяных массивов в качестве полуестественных лугов является щадящим типом землепользования и может быть рекомендовано как одно из приоритетных направлений в обороте осушенных торфяников (Суворов и др., 2015; Deru et al., 2018).

## Заключение

Исследование особенностей профильного распределения и запасов валовых форм углерода, азота и фосфора, а также кислотности, плотности сложения и соотношения C/N в осушенном торфяном массиве показало, что характерной тенденцией для всех изученных почв является снижение содержания углерода и соотношения C/N в верхней части профиля при более высоком содержании фосфора и азота. Верхние горизонты торфяных почв подвергаются ускоренному разложению под воздействием сельскохозяйственного освоения. Степень разложения торфа зависит от мощности торфяной залежи: чем мельче залежь, тем значительно выражены признаки потери углерода. Наиболее уязвимыми почвами исследованной территории являются агроземи и агроторфяно-глееземы минерально-торфяные. Эти почвы отличаются наиболее низкими показателями кислотности и соотношения C/N, высокой плотностью сложения и незначительными запасами углерода (330 т/га) в торфяной толще. Запасы общего азота зависят от степени минерализации органического вещества торфов и снижаются в ряду торфяные эутрофные (24 т/га) – торфоземы (18 т/га) – торфяно-глеевые почвы (13 т/га). Более высоким содержанием фосфатов отличаются верхние горизонты торфяников, поэтому почвы

с более высокой плотностью сложения характеризуются значительными запасами  $P_2O_5$ . Запасы валового фосфора составляют 7.4 т/га в торфоземах, 5.5 т/га в торфяно-глеевых почвах и 3.2 т/га в слабонарушенных торфяных эутрофных почвах. В торфяных эутрофных почвах и торфоземах запасы углерода в метровом слое близки и составляют порядка 700 т/га. Практически все изученные показатели в данных почвах глубже 40 см имеют довольно близкие значения. Стабильность органического вещества в почвах с мощной торфяной залежью объясняется более высокой степенью увлажнения глубоких слоев торфяника.

## ORCID

И.А. Дубровина  [0000-0001-7229-6611](https://orcid.org/0000-0001-7229-6611)

## Финансирование

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук” в рамках госзадания № FMEN-2022-0012.

## Список литературы

- Агроклиматические ресурсы Карельской АССР, 1974. Бугинова, Г.И. (ред.). Гидрометеиздат, Ленинград, СССР, 115 с.
- Вомперский, С.Э., Сирин, А.А., Цыганова, О.П., Валяева, Н.А., Майков, Д.А., 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия. *Известия РАН. Серия географическая* **5**, 21–33.
- Дубровина, И.А., 2009. Почвенный покров Корзинской низины в новой классификации почв России. В: Красильников, П.В. (ред.), *Экология и география почв*. Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия, 91–104.
- Дубровина, И.А., 2018. Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании. *Вестник Томского государственного университета. Биология* **41**, 27–41. <https://doi.org/10.17223/19988591/41/2>
- Дубровина, И.А., Богданова, Т.В., 2016. Корзинский научный стационар – полвека на службе науке. *Труды Карельского научного центра РАН* **6**, 3–15. <https://doi.org/10.17076/eb273>
- Елина, Г.А., 1977. Типы болот Шуйской равнины. В: Пьявченко, Н.И. (ред.), *Стационарное изучение болот и заболоченных лесов в связи с мелиорацией*. КФ АН СССР, Петрозаводск, СССР, 5–19.
- Ефремова, Т.Т., Овчинникова, Т.М., 2007. Оценка методами многомерной статистики состояния органического вещества осушенных торфяных почв в связи с условиями среды. *Почвоведение* **12**, 1452–1462.
- Кудеяров, В.Н., 2015. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России. *Почвоведение* **9**, 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
- Лученок, Л.Н., 2020. Азотный режим торфяных почв Беларуси. *Агрехимия* **6**, 41–47. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060071>
- Молчанов, А.Г., Суворов, Г.Г., Ильясов, Д.В., Сирин, А.А., 2020. Потоки диоксида углерода при разном режиме использования сенокоса на осушенной торфяной почве. *Агрехимия* **9**, 48–64. <https://doi.org/10.31857/S0002188120090094>
- Суворов, Г.Г., Чистотин, М.В., Сирин, А.А., 2015. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области. *Агрехимия* **11**, 51–62.
- Теории и методы физики почв, 2007. Шеин, Е.В., Карпачевский, Л.О. (ред.). Гриф и К, Москва, Россия, 616 с.
- Теория и практика химического анализа почв, 2006. Воробьева, Л.А. (ред.). ГЕОС, Москва, Россия, 400 с.
- Чернова, О.В., Рыжова, И.М., Подвезенная, М.А., 2018. Влияние исторических и региональных особенностей землепользования на величину и структуру запасов углерода в южной тайге и лесостепи европейской России. *Почвоведение* **6**, 747–758. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18060114>
- Шишов, Л.Л., Тонконогов, В.Д., Лебедева, И.И., Герасимова, М.И., 2004. Классификация и диагностика почв России. Ойкумена, Смоленск, Россия, 342 с.
- Berglund, Ö., Berglund, K., Jordan, S., Norberg, L., 2019. Carbon capture efficiency, yield, nutrient uptake and trafficability of different grass species

- on a cultivated peat soil. *Catena* **173**, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.007>
- Deru, J.G.C., Bloem, J., de Goede, R., Keidel, H., Kloen, H. et al., 2018. Soil ecology and ecosystem services of dairy and semi-natural grasslands on peat. *Applied Soil Ecology* **125**, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.12.011>
- Frolking, S., Talbot, J., Jones, M.C., Treat, C.C., Kauffman, J.B., Tuittila, E.-S., Roulet, N., 2011. Peatlands in the Earth's 21st century climate system. *Environmental Reviews* **19**, 371–396. <https://doi.org/10.1139/a11-014>
- Gorham, E., 1991. Northern Peatlands: role in carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* **1** (2), 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>
- Grønlund, A., Hauge, A., Hovde, A., Rasse, D.P., 2008. Carbon loss estimates from cultivated peat soils in Norway: a comparison of three methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **81** (2), 157–167. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9171-5>
- Holden, J., Chapman, P.J., Labadz, J.C., 2004. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* **28** (1), 95–123. <https://doi.org/10.1191/0309133304pp403ra>
- Joosten, H., Clarke, D., 2002. Wise use of mires and peatlands. Background and principles including a framework for decision making. International Mire Conservation Group and International Peat Society, Saarijärvi, Finland, 324 p.
- Koskinen, M., Sallantausta, T., Vasander, H., 2011. Post-restoration development of organic carbon and nutrient leaching from two ecohydrologically different peatland sites. *Ecological Engineering* **37** (7), 1008–1016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.036>
- Krüger, J.P., Alewell, C., Minkinen, K., Szidat, S., Leifeld, J., 2016. Calculating carbon changes in peat soils drained for forestry with four different profile-based methods. *Forest Ecology and Management* **381**, 29–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.006>
- Leiber-Sauheitl, K., Fuss, R., Voigt, C., Freibauer, A., 2014. High CO<sub>2</sub> fluxes from grassland on Histic Gleysol along soil carbon and drainage gradients. *Biogeosciences* **11**, 749–761. <https://doi.org/10.5194/bg-11-749-2014>
- Liimatainen, M., Voigt, C., Martikainen, P.J., Hytönen, J., Regina, K., Óskarsson, H., Maljanen, M., 2018. Factors controlling nitrous oxide emissions from managed northern peat soils with low carbon to nitrogen ratio. *Soil Biology and Biochemistry* **122**, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.006>
- Limpens, J., Berendse, F., Blodau, C., Canadell, J., Freeman, C. et al., 2008. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences* **5**, 1475–1491. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1475-2008>
- Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Guðmundsson, J., Óskarsson, H., Huttunen, J.T., Martikainen, P.J., 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. *Biogeosciences* **7**, 2711–2738. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2711-2010>
- Säurich, A., Tiemeyer, B., Don, A., Fiedler, S., Bechtold, M., Amelung, W., Freibauer, A., 2019. Drained organic soils under agriculture – The more degraded the soil the higher the specific basal respiration. *Geoderma* **355**, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113911>
- Schwalm, M., Zeitz, J., 2015. Concentrations of dissolved organic carbon in peat soils as influenced by land use and site characteristics – A lysimeter study. *Catena* **127**, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.007>
- Shenker, M., Seitelbach, S., Brand, S., Haim, A., Litaor, M.I., 2005. Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland. *European Journal of Soil Science* **56**, 515–525. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00692.x>
- Šlepetienė, A., Šlepetys, J., Liaudanskienė, I., 2010. Chemical composition of differently used Terric Histosol. *Zemdirbystė-Agriculture* **97** (2), 25–32.
- Strack, M., 2008. Peatlands and Climate Change. International Peat Society, Jyväskylä, Finland, 223 p.
- Tubiello, F.N., Biancalani, R., Salvatore, M., Rossi, S., Conchedda, G., 2016. A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils. *Sustainability* **8** (4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8040371>
- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., Reinikainen, A., 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* **12** (1), 69–80. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl522rp>

- Wang, Y., Paul, S.M., Jocher, M., Espic, C., Alewell, C., Szidat, S., Leifeld, J., 2021. Soil carbon loss from drained agricultural peatland after coverage with mineral soil. *Science of the Total Environment* **800**, 149498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149498>
- Wang, Z., Liu, S., Huang, C., Liu, Y., Bu, Z., 2017. Impact of land use change on profile distributions of organic carbon fractions in peat and mineral soils in Northeast China. *Catena* **152**, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.022>
- Wiesmeier, M., von Lutzow, M., Sporlein, P., Geuss, U., Hangen, E. et al., 2015. Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: the importance of soil types. *Soil & Tillage Research* **146**, 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.003>
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C.D., Murdiyarso, D. et al., 2016. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat* **17**, 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- World Reference Base for Soil Resources, 2014. IUSS Working Group WRB, World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, Italy, 181 p.
- Wüst-Galley, C., Mössinger, E., Leifeld, J., 2016. Loss of the soil carbon storage function of drained forested peatlands. *Mires and Peat* **18**, 1–22. <https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.189>
- Yli-Halla, M., Lötjönen, T., Kekkonen, J., Virtanen, S., Marttila, H. et al., 2022. Thickness of peat influences the leaching of substances and greenhouse gas emissions from a cultivated organic soil. *Science of the Total Environment* **806**, 150499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150499>
- uptake and trafficability of different grass species on a cultivated peat soil. *Catena* **173**, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.007>
- Chernova, O.V., Ryzhova, I.M., Podvezennaya, M.A., 2018. The effect of historical and regional features of land use on the size and structure of carbon pools in the southern taiga and forest-steppe zones of European Russia. *Eurasian Soil Science* **51**, 709–719. <https://doi.org/10.1134/S106422931804004X>
- Deru, J.G.C., Bloem, J., de Goede, R., Keidel, H., Kloen, H. et al., 2018. Soil ecology and ecosystem services of dairy and semi-natural grasslands on peat. *Applied Soil Ecology* **125**, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.12.011>
- Dubrovina, I.A., 2009. Pochvennyi pokrov Korzinskoi niziny v novoi klassifikatsii pochv Rossii [Soil cover of the Korza lowland in the new classification of Russian soils]. In: Krasilnikov, P.V. (ed.), *Ekologiya i geografiya pochv [Ecology and geography of soils]*. Institute of Biology of Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia, 91–104. (In Russian).
- Dubrovina, I.A., 2018. Izmenenie sodержaniia obshchego ugleroda, azota i fosfora v pochvakh taezhnoi zony Respubliki Kareliia pri sel'skokhoziaistvennom ispol'zovanii [Change in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in the boreal soils of the Republic of Karelia when used in agriculture]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya [Tomsk State University Journal of Biology]* **41**, 27–41. (In Russian). <https://doi.org/10.17223/19988591/41/2>
- Dubrovina, I.A., Bogdanova, T.V., 2016. Korzinskii nauchnyi statsionar – polveka na sluzhbe nauke [Korza research station – half a century at the serving of science]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of Karelian Research Centre RAS]* **6**, 3–15. (In Russian). <https://doi.org/10.17076/eb273>
- Efremova, T.T., Ovchinnikova, T.M., 2007. The assessment of the organic matter state in drained peat soils as related to the environmental conditions by the methods of multidimensional statistics. *Eurasian Soil Science* **40** (12), 1298–1307. <https://doi.org/10.1134/S106422930712006X>
- Elina, G.A., 1977. Tipy bolot Shuiskoi ravniny [Bog Types of the Shuya Plain]. In: P'yavchenko, N.I. (ed.), *Statsionarnoe izuchenie bolot i zabolochennykh lesov v svyazi s melioratsiei [Stationary study of bogs and waterlogged forests in relation to reclamation]*. Karelian Branch of the

## Funding

The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal Research Center “Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” within the framework of state task No. FMEN-2022-0012.

## References

- Agroklimaticheskie resursy Karel'skoi ASSR [Agroclimatic resources of the Karelian ASSR], 1974. Buginova, G.I., (ed.). Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 115 p. (In Russian).
- Berglund, Ö., Berglund, K., Jordan, S., Norberg, L., 2019. Carbon capture efficiency, yield, nutrient

- Academy of Sciences of the USSR, Petrozavodsk, USSR, 5–19. (In Russian).
- Frolking, S., Talbot, J., Jones, M.C., Treat, C.C., Kauffman, J.B., Tuittila, E.-S., Roulet, N., 2011. Peatlands in the Earth's 21st century climate system. *Environmental Reviews* **19**, 371–396. <https://doi.org/10.1139/a11-014>
- Gorham, E., 1991. Northern Peatlands: role in carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications* **1** (2), 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>
- Grønlund, A., Hauge, A., Hovde, A., Rasse, D.P., 2008. Carbon loss estimates from cultivated peat soils in Norway: a comparison of three methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **81** (2), 157–167. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9171-5>
- Holden, J., Chapman, P.J., Labadz, J.C., 2004. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* **28** (1), 95–123. <https://doi.org/10.1191/0309133304pp403ra>
- Joosten, H., Clarke, D., 2002. Wise use of mires and peatlands. Background and principles including a framework for decision making. International Mire Conservation Group and International Peat Society, Saarijärvi, Finland, 324 p.
- Koskinen, M., Sallantausta, T., Vasander, H., 2011. Post-restoration development of organic carbon and nutrient leaching from two ecohydrologically different peatland sites. *Ecological Engineering* **37** (7), 1008–1016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.036>
- Krüger, J.P., Alewell, C., Minkinen, K., Szidat, S., Leifeld, J., 2016. Calculating carbon changes in peat soils drained for forestry with four different profile-based methods. *Forest Ecology and Management* **381**, 29–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.006>
- Kudeyarov, V.N., 2015. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration. *Eurasian Soil Science* **48** (9), 923–933. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
- Leiber-Sauheitl, K., Fuss, R., Voigt, C., Freibauer, A., 2014. High CO<sub>2</sub> fluxes from grassland on Histic Gleysol along soil carbon and drainage gradients. *Biogeosciences* **11**, 749–761. <https://doi.org/10.5194/bg-11-749-2014>
- Liimatainen, M., Voigt, C., Martikainen, P.J., Hytönen, J., Regina, K., Óskarsson, H., Maljanen, M., 2018. Factors controlling nitrous oxide emissions from managed northern peat soils with low carbon to nitrogen ratio. *Soil Biology and Biochemistry* **122**, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.006>
- Limpens, J., Berendse, F., Blodau, C., Canadell, J., Freeman, C. et al., 2008. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences* **5**, 1475–1491. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1475-2008>
- Luchenok, L.N., 2020. Azotnyi rezhim torfianykh pochv Belarusi [Nitrogen regime of peat soils of Belarus]. *Agrokhimia [Agrochemistry]* **6**, 41–47. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120060071>
- Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Guðmundsson, J., Óskarsson, H., Huttunen, J.T., Martikainen, P.J., 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. *Biogeosciences* **7**, 2711–2738. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2711-2010>
- Molchanov, A.G., Suvorov, G.G., Il'iasov, D.V., Sirin, A.A., 2020. Potoki dioksida ugleroda pri raznom rezhime ispol'zovaniia senokosa na osushennoi torfianoi pochve [Carbon dioxide fluxes under different haymaking regime on drained peat soil]. *Agrokhimia [Agrochemistry]* **9**, 48–64. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120090094>
- Säurich, A., Tiemeyer, B., Don, A., Fiedler, S., Bechtold, M., Amelung, W., Freibauer, A., 2019. Drained organic soils under agriculture – The more degraded the soil the higher the specific basal respiration. *Geoderma* **355**, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113911>
- Schwalm, M., Zeitz, J., 2015. Concentrations of dissolved organic carbon in peat soils as influenced by land use and site characteristics – A lysimeter study. *Catena* **127**, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.007>
- Shenker, M., Seitelbach, S., Brand, S., Haim, A., Litaor, M.I., 2005. Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland. *European Journal of Soil Science* **56**, 515–525. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00692.x>
- Shishov, L.L., Tonkonogov, V.D., Lebedeva, I.I., Gerasimova, M.I., 2004. Klassifikatsiia i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of

- Russian soils]. Oikumena, Smolensk, Russia, 342 p. (In Russian).
- Šlepetienė, A., Šlepetys, J., Liaudanskienė, I., 2010. Chemical composition of differently used Terric Histosol. *Zemdirbystė-Agriculture* **97** (2), 25–32.
- Strack, M., 2008. Peatlands and Climate Change. International Peat Society, Jyväskylä, Finland, 223 p.
- Suvorov, G.G., Chistotin, M.V., Sirin, A.A., 2015. Poteri ugleroda pri dobyche torfa i sel'skokhoziaistvennom ispol'zovanii osushennogo torfianika v Moskovskoi oblasti [The carbon losses from a drained peatland in Moscow oblast used for peat extraction and agriculture]. *Agrokhimia [Agrochemistry]* **11**, 51–62. (In Russian).
- Teorii i metody fiziki pochv [Theories and methods of soil physics], 2007. Shein, E.V., Karpachevskii, L.O. (eds.). Grif i K, Moscow, Russia, 616 p. (In Russian).
- Teoriia i praktika khimicheskogo analiza pochv [Theory and practice of soil chemical analysis], 2006. Vorob'eva, L.A. (ed.). GEOS, Moscow, Russia, 400 p. (In Russian).
- Tubiello, F.N., Biancalani, R., Salvatore, M., Rossi, S., Conchedda, G., 2016. A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils. *Sustainability* **8** (4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8040371>
- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., Reinikainen, A., 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* **12** (1), 69–80. <https://doi.org/10.1191/0959683602hl522rp>
- Vomperskii, S.E., Sirin, A.A., Tsyganova, O.P., Valiaeva, N.A., Maikov, D.A., 2005. Bolota i zabolochennye zemli Rossii: popytka analiza prostranstvennogo raspredeleniia i raznoobrazii [Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya [Proceedings of the RAS. Series geographic]* **5**, 21–33. (In Russian).
- Wang, Y., Paul, S.M., Jocher, M., Espic, C., Alewell, C., Szidat, S., Leifeld, J., 2021. Soil carbon loss from drained agricultural peatland after coverage with mineral soil. *Science of the Total Environment* **800**, 149498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149498>
- Wang, Z., Liu, S., Huang, C., Liu, Y., Bu, Z., 2017. Impact of land use change on profile distributions of organic carbon fractions in peat and mineral soils in Northeast China. *Catena* **152**, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.022>
- Wiesmeier, M., von Lutzow, M., Sporlein, P., Geuss, U., Hangen, E. et al., 2015. Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: the importance of soil types. *Soil & Tillage Research* **146**, 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.003>
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C.D., Murdiyarsa, D. et al., 2016. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat* **17**, 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- World Reference Base for Soil Resources, 2014. IUSS Working Group WRB, World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, Italy, 181 p.
- Wüst-Galley, C., Mössinger, E., Leifeld, J., 2016. Loss of the soil carbon storage function of drained forested peatlands. *Mires and Peat* **18**, 1–22. <https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.189>
- Yli-Halla, M., Lötjönen, T., Kekkonen, J., Virtanen, S., Marttila, H. et al., 2022. Thickness of peat influences the leaching of substances and greenhouse gas emissions from a cultivated organic soil. *Science of the Total Environment* **806**, 150499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150499>