

УДК 631.4

## ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ЛЕСНЫХ ПОЧВ В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ

© 2020 г. О. В. Чернова<sup>а</sup>, \*, И. М. Рыжова<sup>б</sup>, М. А. Подвезенная<sup>б</sup><sup>а</sup>Институт проблем экологии и эволюции им А.Н. Северцова РАН, Ленинский пр-т, 33, Москва, 119071 Россия<sup>б</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: ovcher@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2019 г.

После доработки 30.07.2019 г.

Принята к публикации 20.10.2019 г.

Обсуждаются результаты сравнения запасов органического углерода и их структуры в автоморфных и полугидроморфных почвах на основе анализа массива данных, характеризующих 289 профилей почв лесной зоны европейской территории России. Установлено, что запасы органического углерода (с учетом подстилки) в полугидроморфных почвах в среднем примерно в 3 раза больше, чем в автоморфных. С увеличением мощности рассматриваемого почвенного слоя различия уменьшаются от 3.2 раз для слоя 0–30 см до 2.6 раз для метровой толщи. Наиболее сильно различаются запасы углерода в органоминеральном слое сравнимых почв. В полугидроморфных почвах они в среднем составляют  $73 \pm 8.2$  т С/га, что в 7 раз выше, чем в автоморфных почвах. Пренебрежение вкладом полугидроморфных почв в общий запас органического углерода почв региона приводит к заниженным оценкам. Величина недооценки определяется структурой почвенного покрова изучаемой территории и мощностью рассматриваемой почвенной толщи. Проведенные на примере Карелии расчеты показали, что для разных ландшафтов недооценка запасов органического углерода почв варьирует от 10 до 40%. Для всей территории республики для слоев почвы 0–30, 0–50 и 0–100 см она составляет соответственно 22, 19 и 13%. На основе проведенного сравнительного анализа известных педотрансферных функций для расчета плотности почв показано, что для минеральных горизонтов лесных почв европейской территории России лучшие результаты ( $RMSE = 0.15$ ,  $R^2 = 0.36$ ) демонстрирует педотрансферная функция, предложенная О.В. Честных и Д.Г. Замолотчиковым.

**Ключевые слова:** полугидроморфные почвы, плотность почв, педотрансферные функции

**DOI:** 10.31857/S0032180X20030028

### ВВЕДЕНИЕ

Почвы играют ведущую роль в биогеохимическом цикле углерода. Пул почвенного углерода превышает его запасы в биомассе суши и атмосфере. В настоящее время в связи с проблемами глобального изменения климата и обеспечения продовольственной безопасности очень большое внимание уделяется уточнению оценок запасов почвенного органического вещества. Уровень накопления углерода в почве является результатом сложного взаимодействия процессов поступления, стабилизации и потерь органического вещества, интенсивность которых определяется множеством факторов (биоклиматических, литологических, геоморфологических, антропогенных и др.), что обуславливает его высокую пространственную вариативность в разных масштабах и затрудняет оценку запасов почвенного углерода. Для получения региональных оценок в настоящее время используются разные источники информации и разнообразные методы простран-

ственного анализа данных. Широкое распространение получил метод “измерения и умножения”, в основе которого лежит стратификация изучаемого региона по типу почв и (или) характеру землепользования. Для каждого выдела запас углерода в почве рассчитывается путем умножения среднего значения, полученного по результатам точечных измерений, на площадь. В этом случае не учитывается пространственная неоднородность почвенного покрова в пределах выдела. Ошибки, связанные с малым объемом выборок для расчета средних значений, могут быть существенным источником неопределенностей региональных оценок запасов почвенного углерода [29, 35]. От точности региональных оценок зависит качество глобальных оценок запасов почвенного углерода. Неопределенность региональных оценок запасов почвенного углерода в лесной зоне России может быть связана с тем, что далеко не всегда принимают во внимание полугидроморфные почвы. Как правило, учитывают только запасы углерода в преобладающих по пло-

щади автоморфных почвах, а также в гидроморфных почвах болот. Это объясняется недостатком экспериментальных данных о запасах углерода в полугидроморфных почвах и их большим разбросом.

Как показали расчеты на основе [12] на территории России на полугидроморфные почвы и комплексы с их преобладанием приходится около 26.0% территории (16.5 и 9.4 соответственно). Около 70% площади всех полугидроморфных почв России расположено в таежной зоне.

Хотя эти почвы занимают значительно меньшие площади по сравнению с автоморфными, они вносят заметный вклад в общие запасы почвенного углерода лесной зоны, поскольку запасы углерода в них могут быть в несколько раз больше, чем в автоморфных [1, 2, 11, 13].

Еще одной проблемой, с которой связана неопределенность оценок пула почвенного углерода в региональном, национальном и глобальном масштабах, является отсутствие данных о плотности почв во многих записях, характеризующих почвенные профили в базах данных, что связано с трудоемкостью определения этого параметра, необходимого для расчета запасов углерода в почве. По мнению ряда исследователей, недостаток данных о плотности является одной из основных причин неопределенности региональных оценок запасов углерода в почвах [34, 38]. Для решения этой проблемы предложены различные методы получения недостающих оценок плотности почв. Наиболее простым способом является использование средних значений или медиан, полученных по имеющимся ограниченному экспериментальным данным. Очень широкое распространение получили педотрансферные функции (ПТФ), позволяющие вычислить значение плотности почв по другим ее характеристикам, данные о которых доступны. Также используются концептуальные модели и методы интеллектуального анализа данных [27, 31, 36]. ПТФ являются эмпирическими, поэтому имеют ограниченную область применения. Их нужно использовать с осторожностью, особенно для регионов, отличных по своим характеристикам от тех, для которых ПТФ первоначально были построены.

Точность региональных оценок запасов почвенного углерода зависит от способа расчета плотности почв. Об этом свидетельствуют результаты специально проведенного исследования на примере почв Китая. Были выявлены различия в величинах запасов почвенного углерода, полученных на основе одного массива данных, включающего характеристики 1007 профилей почв Китая, но с использованием шести способов определения недостающих значений плотности почв [37]. Подбор ПТФ, позволяющих с наименьшей ошибкой определить плотность

почв конкретных регионов, является важной задачей [24–26, 30].

Задачами настоящей работы являются: выбор ПТФ для определения плотности лесных почв европейской территории России, сравнение запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных лесных почвах, определение вклада полугидроморфных почв в общие запасы почвенного углерода в региональном масштабе.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для определения запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесной зоны европейской территории России послужила информация, полученная из следующих источников: Почвенно-географическая база данных России (<https://soil-db.ru>), база данных “Запасы углерода в автономных почвах природных экосистем европейской территории России” [16, 17], дополненная опубликованными результатами точечных исследований различных авторов [3, 4, 6, 7, 10, 15, 18]. Данные были сведены в единый массив, который включает характеристики 289 разрезов почв лесной зоны России, главным образом, средней и южной тайги.

Из них 201 разрез характеризует автоморфные почвы и 88 разрезов – полугидроморфные почвы. Автоморфные почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми и иллювиально-гумусовыми (Albic Podzols), подзолистыми, дерново-подзолистыми и палево-подзолистыми почвами (Albic Retisols (Ochric)). Среди полугидроморфных почв чаще всего встречались подзолистые глееватые, торфяно-подзолисто-глеевые, дерново-подзолистые глееватые, дерново-подзолистые глеевые (Albic Gleyic Retisols (Ochric)), подзолы глееватые, подзолы глеевые иллювиально-железистые (Gleyic Albic Podzols). Названия почв приведены в соответствии с [9].

Вычисление запасов органического углерода в почвенных горизонтах проводили по данным об их мощности, содержании углерода и плотности. Данные о мощности горизонтов получали из описаний разрезов. При определении содержания углерода в минеральных горизонтах почв по данным о содержании гумуса использовали коэффициент пересчета 0.58.

Оценить содержание углерода в органомных горизонтах сложно из-за недостатка результатов прямых определений методом сухого сжигания и разнообразия органомных горизонтов. Если в автоморфных почвах органомный слой представлен подстилкой (O) и в некоторых почвах грубогумусовым горизонтом (АО), то в полугидроморфных почвах он может включать также перегнойный (H) и различные варианты торфяных и торфянистых (T, TO, TE, TJ) горизонтов [9].

**Таблица 1.** Описательная статистика почвенных свойств рядов данных, использованных для проверки точности методов оценки плотности почв

Показатель	Минеральные горизонты				Органогенные горизонты	
	плотность, г/см <sup>3</sup>	C <sub>орг</sub> , %	глина, %	песок, %	плотность, г/см <sup>3</sup>	C <sub>орг</sub> , %
Объем выборки	288	288	186	186	175	175
Среднее	1.37	0.81	42.55	12.46	0.10	38.71
Медиана	1.39	0.30	36.50	8.70	0.08	37.00
Минимум	0.77	0.02	2.00	0.10	0.01	10.60
Максимум	1.89	13.4	98.00	44.00	0.45	54.00
Ранг	1.12	13.38	96.00	43.90	0.44	43.4
Нижний квартиль	1.21	0.20	13.00	4.00	0.04	37.00
Верхний квартиль	1.52	0.76	68.80	17.70	0.15	42.00
Стандартное отклонение	0.197	1.44	29.922	10.91	0.076	5.03
Ошибка среднего	0.012	0.085	2.194	0.799	0.004	0.342

**Таблица 2.** Сравнимые методы оценки плотности почвенных горизонтов (BD, г/см<sup>3</sup>)

№ метода	Метод	Описание	Источник
1	Среднего	Для минеральных горизонтов принимается среднее значение в зависимости от градации по гранулометрическому составу и глубины. Для подстилки – среднее значение в зависимости от типа подстилки	[19]
2	ПТФ	$BD = a_1 - a_2 / (MID + a_3) + a_4 / (HUM + a_5)$ , $a_1 - a_5$ – параметры, определяемые типом почв	[20]
3	ПТФ	Для минеральных горизонтов $BD = 0.69794 + (0.750636 \exp(-0.230355OC) + (0.0008687sand) - (0.0005164clay))$ Для органогенных горизонтов $BD = 1.4903 - 0.33293 \ln OC$	[26]
4	ПТФ	$BD = 1.66 - 0.318OC^{1/2}$	[28]
5	ПТФ	$BD = 1.449 \exp(-0.03 OC)$	[23]

Примечание. BD – плотность почв, MID – глубина середины горизонта, см, HUM – содержание гумуса в горизонте, %, OC – содержание органического углерода, %, sand – содержание песка, %, clay – содержание глины, %.

В большинстве случаев в литературе в качестве характеристики обогащения горизонта органическим веществом приводятся сведения о потере при прокаливании (ППП). При наличии данных о ППП, содержание углерода в органогенном горизонте принимали равным 0.5ППП [19]. При отсутствии данных о ППП, содержание углерода оценивали в соответствии с видом горизонта и типом экосистем на основе среднестатистических данных или экспертных оценок [5, 19, 22].

Для многих профилей отсутствует информация о плотности горизонтов. Чтобы вовлечь данные по этим разрезам в расчеты запасов почвенного углерода попытались выбрать среди известных методов оценки плотности почвенных горизонтов наилучший для почв лесной зоны европейской территории России. При сравнении методов для проверки ис-

пользовали исходный массив данных с экспериментально определенными значениями плотности горизонтов, который был разбит на два ряда. Первый из которых объединял минеральные горизонты, а второй – органогенные. Общая статистическая характеристика некоторых почвенных свойств этих рядов данных представлена в табл. 1.

Проведено сравнение пяти методов оценки плотности почв (табл. 2). В большинстве работ при оценке запасов органического углерода в почвах России или ее регионов использовали экспертные оценки или средние значения плотности [14, 19, 21]. Поэтому метод средних был выбран первым для сравнения.

К настоящему времени разработано множество ПТФ, которые прогнозируют плотность горизонтов, используя другую доступную информацию о

**Таблица 3.** Точность методов оценки плотности минеральных горизонтов почв (BD, г/см<sup>3</sup>)

№ метода	МЕ	MAE, г/см <sup>3</sup>	MAPE, %	RMSE, г/см <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>
1	0.03	0.15	11.1	0.18	0.16
2	0.01	0.12	8.8	0.15	0.36
3	0.02	0.15	11.3	0.18	0.18
4	-0.05	0.13	10.6	0.17	0.21
5	-0.04	0.14	11.4	0.18	0.14

Примечание. МЕ – средняя ошибка, MAE – средняя абсолютная ошибка, MAPE – средняя относительная ошибка, RMSE – среднеквадратическая ошибка.

физических, химических и морфологических свойствах почв (содержание органического вещества, рН, гранулометрический состав, тип и глубина горизонтов), характере растительности, свойствах почвообразующих пород и др. [32]. Содержание органического углерода в почве является основной переменной для предсказания плотности [27]. Поэтому подавляющее большинство ПТФ является функциями только одной этой переменной. Во многих работах в качестве дополнительных переменных выступают гранулометрический состав почвы или глубина горизонта. Из множества ПТФ для сравнения выбраны функции, прогнозирующие плотность почвенных горизонтов в зависимости от содержания гумуса и середины глубины залегания горизонта (метод 2), содержания органического углерода и гранулометрического состава (метод 3 для минеральных горизонтов) и только от содержания органического углерода (метод 3 для органогенных горизонтов и методы 4, 5). Выбор именно этих функций обусловлен тем, что они получены на основе массивов данных, представляющих почвы России (метод 2) [20] или Европы (методы 3 и 4) [26, 28]. Последняя из рассмотренных ПТФ (метод 5) выбрана потому, что была признана лучшей при тестировании 48 формул, используемых для вычисления плотности почвенных горизонтов в широком диапазоне условий, на основе большого массива данных, характеризующего почвы США [23].

При сравнении точности методов оценки плотности в качестве основных показателей использованы среднеквадратическая ошибка RMSE (the root mean square error) – и  $R^2$ . Дополнительно рассчитывались средняя ошибка МЕ (the mean error), средняя абсолютная ошибка MAE (the mean absolute error) и средняя относительная ошибка MAPE (the mean absolute percentage error):

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

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i^* - \bar{x}_i^*)^2}, \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i), \quad (3)$$

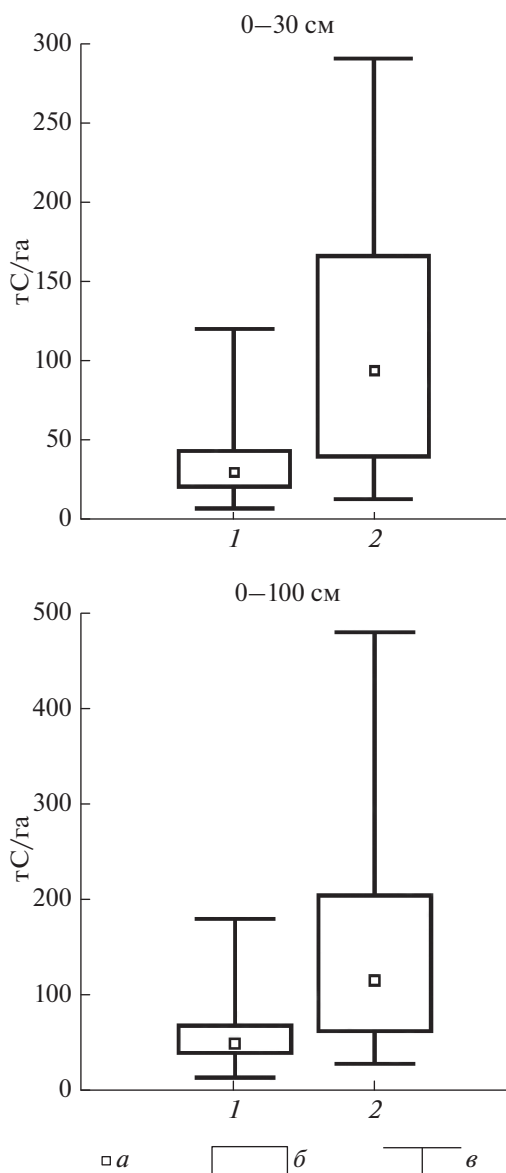
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i^* - x_i|, \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^* - x_i}{x_i^*} \times 100\% \right|. \quad (5)$$

Метод тем эффективнее, чем ниже RMSE и выше  $R^2$ . Величина средней ошибки (МЕ) указывает на среднюю тенденцию к переоценке или недооценке. У эффективных моделей МЕ должна быть близкой к нулю.

Результаты проведенного сравнения методов, выбранных для определения недостающих значений плотности минеральных горизонтов, показали (табл. 3), что лучшим оказался метод 2. В нем используется пятипараметрическая нелинейная функция, полученная на основе большого массива данных о почвах России (748 горизонтов) [20]. Этот метод характеризуется минимальными ошибками и самым высоким значением  $R^2$ . Неплохой результат демонстрирует метод 4, хотя он основан на функции, где содержание углерода является единственной независимой переменной. Эта ПТФ в среднем переоценивает плотность, о чем свидетельствует отрицательная величина средней ошибки. В нашем случае она демонстрирует среднюю точность. Согласно оценкам [23], у ПТФ со средней точностью  $0.20 < R^2 < 0.5$ ,  $0.17 < RMSE < 0.20$ .

Таким образом, для определения недостающих значений плотности минеральных горизонтов автоморфных и полугидроморфных почв лесной зоны ЕТР использовали метод 2 [20], поскольку он оказался наиболее эффективным из всех проанализированных.



**Рис. 1.** Статистические характеристики распределения запасов углерода в автоморфных (1) и полугидроморфных (2) лесных почвах европейской территории России (включая подстилку): *a* – медиана, *b* – 25–75%, *в* – минимум–максимум.

Расчет плотности органогенных горизонтов в зависимости от содержания в них углерода (метод 3) дал неудовлетворительный результат. Средняя ошибка  $ME = -0.18$ , что свидетельствует о значительно более высоких прогнозируемых величинах плотности по сравнению с экспериментальными данными. Низкая точность ПТФ для органогенных горизонтов отмечается многими исследователями [20, 26]. Это объясняется недостатком данных и высокой вариабельностью плотности подстилок, торфяных, оторфованных и перегнойных горизонтов. Коэффициент вариации в

рассматриваемом ряду данных плотности органогенных горизонтов составляет 76%. Поэтому в настоящей работе были использованы усредненные значения плотности органогенных горизонтов, полученные по оценкам из собранного массива данных и экспертные оценки с учетом вида горизонта и типа экосистемы.

На основании полученных величин запасов углерода в почвенных горизонтах для каждого профиля сформированного массива данных рассчитывали запасы органического углерода в слоях почвы мощностью 0–30, 0–50 и 0–100 см, включая подстилку, также оценивали запасы углерода отдельно в органогенной и минеральной толщах профилей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Запасы углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем в слоях 0–30, 0–50, 0–100 см*

Запасы углерода в почвах принято рассчитывать для слоев различной мощности в зависимости от целей исследования. Для обобщенных оценок обычно выбирают метровую толщу, поскольку в большинстве почв в ней сосредоточены основные запасы органического углерода, и она является зоной, активно участвующей в современном биологическом круговороте элементов. При агрохимических обследованиях и мониторинге земель сельскохозяйственного назначения в большинстве случаев ограничиваются пахотным слоем почвы мощностью 20–30 см. Слой 0–30 см предложен в качестве целевого при реализации проекта ФАО ООН Всемирная карта запасов органического углерода в почве (GSOC-17) [33]. Расчеты для слоя 0–50 см почвы часто используются в региональных оценках и исследованиях динамики запасов углерода при смене характера землепользования. Поэтому в качестве расчетных нами были выбраны слои мощностью 30, 50 и 100 см.

Запасы углерода в почвах таежных лесов характеризуются высокой пространственной изменчивостью, максимальные значения могут превышать минимальные в 20 раз. Диапазон изменений и межквартильный размах в полугидроморфных почвах значительно выше, чем в автоморфных (рис. 1). О значительно более высокой пространственной вариабельности запасов углерода в полугидроморфных почвах свидетельствуют большие в 4 раза значения стандартных отклонений и большие величины коэффициентов вариации. В автоморфных почвах для слоев разной мощности они равны 45–53%, а в полугидроморфных возрастают до 67–73% (табл. 4).

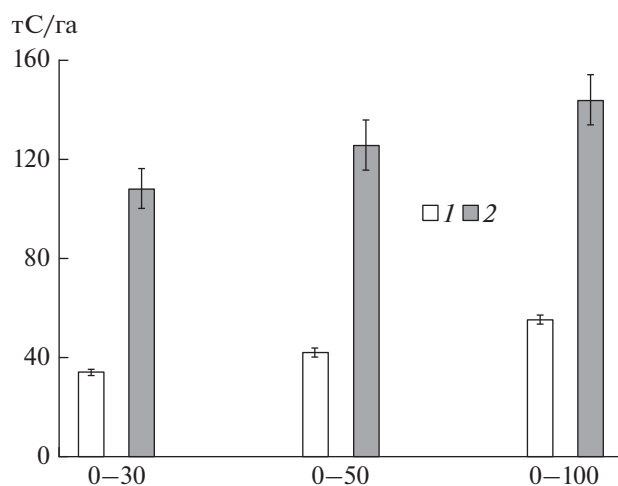
Полученные данные свидетельствуют о правосторонней асимметрии распределений запасов органического углерода во всех рассматриваемых слоях почв мощностью 30, 50 и 100 см. Как в слу-

**Таблица 4.** Описательная статистика распределения запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных лесных почвах европейской территории России (включая подстилку), т С/га

Показатель	Автоморфные почвы ( $n = 201$ )			Полугидроморфные почвы ( $n = 88$ )		
	слой, см					
	0–30	0–50	0–100	0–30	0–50	0–100
Среднее	33.9	41.9	55.0	108.1	125.9	143.8
Медиана	30.7	38.2	51.1	93.9	104.7	116.8
Минимум	6.6	9.1	13.4	12.7	18.4	26.9
Максимум	120.2	158.2	180.4	290.5	401.0	479.1
Нижний квартиль	21.1	26.6	39.4	39.7	49.7	62.8
Верхний квартиль	43.3	52.5	67.8	166.2	187.8	203.5
Стандартное отклонение	18.1	21.9	24.9	78.3	91.8	96.6
Коэффициент вариации, %	53.4	52.3	45.3	72.4	72.9	67.1

чае автоморфных, так и полугидроморфных почв медианы меньше среднего. Все коэффициенты асимметрии статистически значимы. Для распределений автоморфных почв коэффициенты асимметрии (1.45–1.85) больше, чем для полугидроморфных (0.67–1.00).

Величина средних запасов органического углерода в полугидроморфных почвах приблизительно в 3 раза выше, чем автоморфных (рис. 2). Различия уменьшаются с увеличением мощности сравниваемых слоев от 3.2 для слоя 0–30 см до 2.6 для метровой толщи. Это связано с тем, что большая часть пула органического углерода в изучаемых почвах сосредоточена в верхнем слое 0–30 см, на долю которого в полугидроморфных почвах приходится 75% общего запаса, а в автоморфных только 60%.



**Рис. 2.** Средние запасы углерода в слоях разной мощности автоморфных (1) и полугидроморфных (2) почв лесной зоны европейской территории России с учетом подстилки. Планки погрешности отображают ошибку среднего.

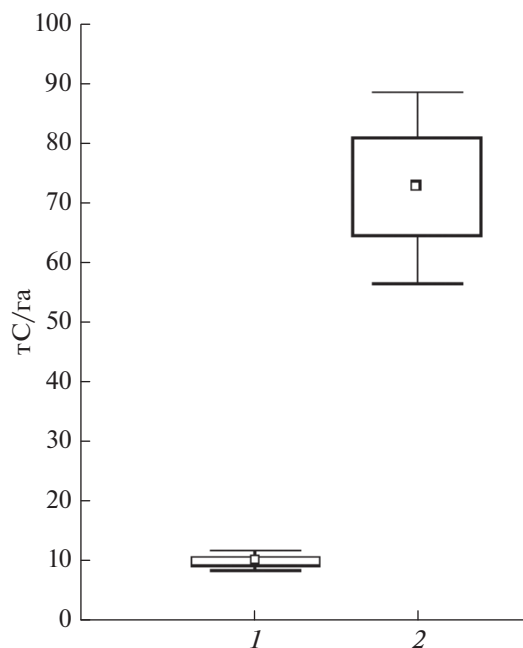
#### *Структура запасов органического углерода в автоморфных и полугидроморфных лесных почвах*

В лесных почвах значительная часть органического углерода сосредоточена в подстилке и других органогенных горизонтах, различающихся по составу и степени разложения растительных остатков. Запасы углерода в них повышаются с возрастанием степени гидроморфизма [2], однако конкретные величины определяются генезисом почв и местными условиями: гидротермическими, богатством почвообразующих пород, типом, возрастом и степенью нарушения растительных ассоциаций [1, 2, 19, 22].

По полученным данным средние запасы углерода в органогенных горизонтах автоморфных почв лесов составляют около  $10 \pm 0.8$  т С/га, увеличиваясь в полугидроморфных до  $73 \pm 8.2$  т С/га (рис. 3).

Сравнение запасов углерода в подстилках автоморфных и полугидроморфных почв показало, что при незначительном различии их мощностей (соответственно  $4.4 \pm 0.2$  и  $4.6 \pm 0.3$  см), запасы углерода различаются почти в два раза ( $10.1 \pm 0.8$  и  $18.5 \pm 3.4$  т/га). Большие различия в запасах углерода в органогенном слое автоморфных и полугидроморфных почв связаны со значительным накоплением углерода в перегнойных, торфянистых и торфяных горизонтах. Согласно нашим оценкам, общая мощность таких горизонтов в полугидроморфных почвах изменяется от 3 до 35 см (среднее  $14.5 \pm 1.1$ ), а запасы углерода в них варьируют от 18 до 290 т/га.

Структура запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах заметно различается. Так, в автоморфных условиях доля подстилки в общих запасах органического углерода слоя почв 0–30 см может достигать 30%, снижаясь в слое 0–50 см до 24% и до 18% в слое 0–100 см. В органогенных горизонтах почв с дополнительным увлаж-

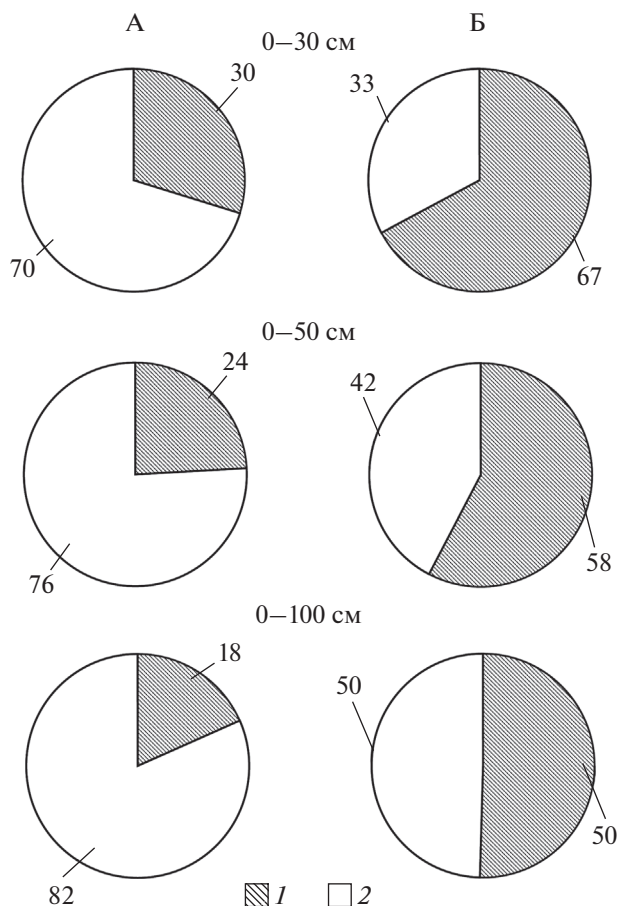


**Рис. 3.** Запасы углерода в органическом слое автоморфных (1) и полугидроморфных (2) лесных почв европейской территории России: *a* – среднее, *b* – ошибка среднего, *в* – доверительный интервал среднего.

нением сосредоточена большая часть углерода: около 67, 58 и 50% от общего его запаса в 30-, 50- и 100-сантиметровых слоях почвы соответственно (рис. 4).

Чтобы определить качество оценок запасов углерода в почвах лесных территорий на основе расчетов с использованием полученных средних значений для автоморфных и полугидроморфных почв проведено их сравнение с величинами запасов органического углерода в почвах ландшафтов Карелии. Эти величины получены Бахмет [2] по большому количеству данных о запасах углерода в автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных почвах и занятых ими площадях в конкретных типичных для этого региона ландшафтах.

Проведены расчеты для трех следующих типичных ландшафтов Карелии: L1 – озерных и озерно-ледниковых сильнозаболоченных равнин с преобладанием сосновых местообитаний, L2 – денудационно-тектонических с комплексами ледниковых образований холмисто-грядовых средне заболоченных с преобладанием сосновых местообитаний, L3 – скальных слабозаболоченных с преобладанием сосновых местообитаний. При этом использованы сведения о структуре почвенного покрова этих ландшафтов [2]. Средние значения запасов углерода в слое 0–50 см автоморфных почв и полугидроморфных почв (табл. 4). Для гидроморфных почв средняя величина запаса углерода в этом слое определена по литературным



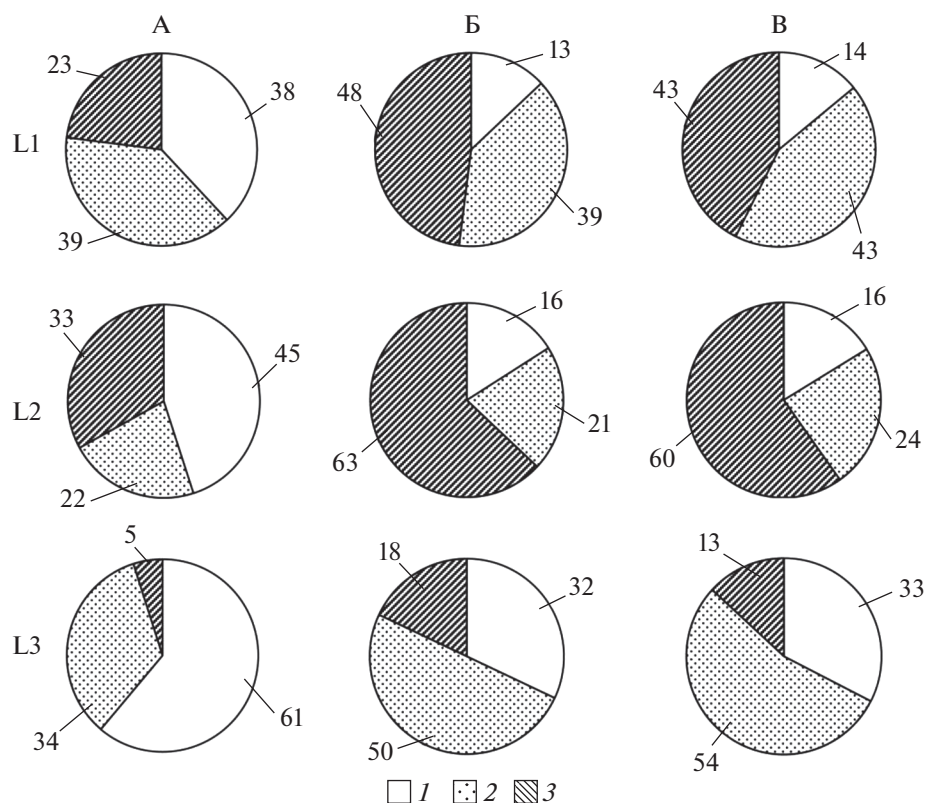
**Рис. 4.** Структура запасов органического углерода в слоях разной мощности автоморфных (А) и полугидроморфных (Б) почв лесной зоны европейской территории России, %. Горизонты: 1 – органические, 2 – минеральные.

данным [2, 5, 8]. Результаты сравнения (табл. 5) свидетельствуют о хорошем согласии оценок общих запасов органического вещества в почвах ландшафтов Карелии по полученным нами средним значениям с данными на основе специально проведенных в этом регионе полевых исследований. Относительная ошибка расчетной оценки составляет 3–14%.

Также хорошо согласуются оценки вклада автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных почв в общие запасы почвенного углерода типичных ландшафтов Карелии (рис. 5).

Таким образом, если отсутствуют данные о запасах углерода в полугидроморфных почвах или их очень мало, то при получении региональных оценок первого приближения для лесной зоны европейской территории России допустимо использовать приведенные в табл. 4 средние значения.

Так как во многих случаях из-за недостатка данных не принимают во внимание разницу в запасах углерода в полугидроморфных и автоморф-



**Рис. 5.** Вклад автоморфных (1), полугидроморфных (2) и гидроморфных (3) почв в общие запасы почвенного углерода типичных ландшафтов Карелии, %. А – площади почв. Вклад почв с разной степенью увлажнения в общие запасы почвенного углерода (%) в слое 0–50 см: Б – оценки Бахмет [2], В – расчет по средним значениям. Ландшафты: L1, L2, L3 см. табл. 5.

ных почвах и учитывают его запасы только в преобладающих по площади автоморфных почвах и гидроморфных почвах болот важно определить величину возникающей при этом недооценки запасов органического углерода в почвах региона.

Проведенные расчеты показали, что в масштабе ландшафтов недооценка запасов органиче-

ского углерода почв составляет 10–40% (табл. 6). Ее величина определяется соотношением площадей, занимаемых почвами разной степени увлажнения и мощностью рассматриваемой почвенной толщи. Относительная величина недооценки уменьшаются с увеличением мощности от 30 до 100 см, что обусловлено снижением различий в запасах

**Таблица 5.** Запасы органического углерода в слое почвы 0–50 см в ландшафтах Карелии

Ландшафт	Площадь, тыс. га	Общий запас органического углерода, тыс. т*		Относительная ошибка, %
		по [2]	расчет по средним значениям	
L1 – озерных и озерно-ледниковых сильно-заболоченных равнин	447.2	52361	50662	3
L2 – денудационно-тектонические с комплексами ледниковых образований холмисто-грядовых среднезаболоченных	687.0	92705	79577	14
L3 – скальные слабозаболоченные	54.8	3975	4311	8

\* В работе Бахмет [2] приведены запасы органического вещества. Коэффициент пересчета органического вещества в органический углерод принят равным 0.55. Учитывали различия в содержании углерода в органическом веществе подстилки, гумусовых, торфяных и перегнойных горизонтов, образующих толщу почвы 50 см.



**Таблица 6.** Недооценка запасов органического углерода в почвах региона в расчетах без учета вклада полугидроморфных почв на примере Карелии

Ландшафт/регион	Состав почвенного покрова, %			Недооценка запасов углерода, %		
	автоморфные почвы	полугидроморфные почвы	гидроморфные почвы	0–30 см	0–50 см	0–100 см
L1 – озерных и озерно-ледниковых сильнозаболоченных равнин	38	39	23	34	29	20
L2 – денудационно-тектонический с комплексами ледниковых образований холмисто-грядовый среднезаболоченный	45	22	33	20	16	10
L3 – скальный слабозаболоченный	61	34	5	40	36	29
Вся территория Карелии	68	18	14	22	19	13

углерода автоморфных и полугидроморфных почв с увеличением мощности почвенного слоя. Недооценка запасов органического углерода для всей территории республики Карелия при определении структуры почвенного покрова на основе [12] составляет для слоев почвы 30, 50 и 100 см соответственно 22, 19 и 13%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам сравнения методов расчета плотности почв на основании доступной информации установлено, что наиболее точные оценки для минеральных горизонтов лесных почв европейской территории России могут быть получены путем использования ПТФ, предложенной Честных и Замолотчиковым [20].

Анализ массива данных, характеризующих 289 профилей почв лесной зоны европейской территории России, показал, что запасы органического углерода (с учетом подстилки) в полугидроморфных почвах в среднем примерно в 3 раза выше, чем в автоморфных. С увеличением мощности рассматриваемого почвенного слоя различия уменьшаются. Это связано с тем, что в изучаемых почвах большая часть пула органического углерода сосредоточена в верхнем слое 0–30 см, на долю которого в полугидроморфных почвах приходится 75% от общего запаса, а в автоморфных только 60%.

Больше половины запаса органического углерода лесных полугидроморфных почв сосредоточено в органогенном слое. Его доля составляет 67, 58 и 50% соответственно в слоях 0–30, 0–50 и 0–100 см. Тогда как в автоморфных почвах на долю подстилки приходится в среднем только 30% от общего запаса С в слое 0–30 см, а

в слоях 0–50 и 0–100 см она уменьшается соответственно до 24 и 18%.

В тех случаях, когда при определении запасов углерода в регионах лесной зоны европейской территории России из-за недостатка данных опираются только на величину запасов углерода в преобладающих по площади автоморфных почвах с учетом гидроморфных почв болот, а вкладом полугидроморфных почв пренебрегают возможна недооценка запасов органического углерода в почвах региона. Проведенные расчеты на примере Карелии показали, что в масштабе ландшафтов недооценка запасов органического углерода почв составляет 10–40%. Ее величина определяется соотношением площадей, занимаемых почвами разной степени увлажнения и мощностью рассматриваемой почвенной толщи.

Недооценка запасов органического углерода для всей территории республики Карелия составляет для слоев почвы 30, 50 и 100 см соответственно 22, 19 и 13%.

Проведенное сравнение оценок запасов углерода в почвах лесных территорий на основе расчетов с использованием полученных нами средних значений с величинами, основанными на результатах детальных полевых исследований, свидетельствует об их хорошем согласии. Поэтому, на наш взгляд, при получении оценок запасов органического углерода в почвах регионов лесной зоны европейской территории России в первом приближении допустимо использовать полученные в настоящей работе средние значения запасов углерода в слоях 0–30, 0–50 и 0–100 см полугидроморфных почв.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахмет О.Н.* Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии // *Лесоведение*. 2018. № 1. С. 48–55.
2. *Бахмет О.Н.* Особенности органического вещества почв в лесных ландшафтах Карелии // *Лесоведение*. 2012. № 2. С. 19–27.
3. Биологические исследования в широколиственно-еловых лесах. М.: Наука, 1971. 224 с.
4. *Васнев И.И., Таргульян В.О.* Ветровал и таежное почвообразование. М.: Наука, 1995. 247 с.
5. *Волперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г.* Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // *Почвоведение*. 1994. № 12. С. 17–25.
6. *Головенко С.В., Лазукова Г.Г., Шуйцев Ю.К.* Уровни продуктивности коренных сообществ северной части Валдайской возвышенности // *Почвы и продуктивность растительных сообществ*. 1976. Вып. 3. С. 73–96.
7. *Зайдельман Ф.Р.* Минеральные и торфяные почвы полесских ландшафтов: Генезис, гидрология, агроэкология, мелиорация, защита от пожаров торфяников и лесов, рекультивация. М.: КРАСАНД, 2013. 440 с.
8. *Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнова О.Н.* Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // *Научный диалог*. 2012. Вып. № 7. Естественные и экология. С. 61–74.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
10. *Носова Л.М., Гельцер Ю.Г., Раськова Н.В., Корганова Г.А., Шапеченкова В.А.* Биологическая активность почв лесных и луговых биогеоценозов Подмоскovie // *Комплексные биогеоценологические исследования в лесах Подмоскovie*. 1982. С. 129–144.
11. *Осинов А.Ф., Кузнецов М.А.* Содержание органического углерода в болотно-подзолистых почвах хвойных лесов средней тайги европейского Северо-Востока России // *Лесоведение*. 2010. № 6. С. 65–70.
12. Почвенная карта РСФСР / Под ред. Фридланда В.М. М-6 1 : 2500000. М.: ГУГК, 1988 (скорректированная цифровая версия, 2007).
13. Регуляторная роль почвы в функционировании таежных экосистем. М.: Наука, 2002. 363 с.
14. *Рожков В.А., Вагнер В.В., Козут Б.М., Конюшков Д.Е., Шеремет Б.В.* Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // *Углерод в биогеоценозах: Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева*, XV. М.: Наука, 1997. С. 5–58.
15. *Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А.* Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // *Почвоведение*. 2014. № 12. С. 1426–1435.
16. *Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Запасы гумуса в автономных почвах природных экосистем Восточной-Европейской равнины и их чувствительность к изменениям параметров круговорота углерода // *Почвоведение*. 2003. № 9. С. 1043–1049.
17. *Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Теоретическая и экспериментальная оценка запасов гумуса в автономных почвах природных экосистем Восточно-Европейской равнины // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение*. 2001. № 3. С. 33–38.
18. *Скляр Г.А., Шарова А.С.* Почвы лесов европейского севера. М.: Наука, 1970. 272 с.
19. Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. Алексеева В.А., Бердси Р.А. Красноярск, 1994. 224 с.
20. *Честных О.В., Замолотчиков Д.Г.* Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // *Почвоведение*. 2004. № 8. С. 937–944.
21. *Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н.* Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // *Лесоведение*. 1999. № 2. С. 13–21.
22. *Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // *Почвоведение*. 2013. № 2. С. 123–132.
23. *Abdelbaki A.M.* Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils // *Ain Shams Engineering J*. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>
24. *Benites V.M., Machado P.L.O.A., Fidalgo E.C.C., Coelho M.R., Madari B.E.* Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil // *Geoderma*. 2007. V. 139. № 1–2. P. 90–97.
25. *Boschi R.S., Bocca F., Lopes-Assad M., Assad E.D.* How accurate are pedotransfer functions for bulk density for Brazilian soils? // *Sci. Agric*. 2018. V. 75. № 1. P. 70–78.
26. *Hollis J.M., Hannam J., Bellamy P.H.* Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils // *Eur. J. Soil Sci*. 2012. V. 63. P. 96–109.
27. *Jalabert S.S.M., Martin M.P., Renaud J.P., Boulonne L., Jolivet C., Montanarella L., Arrouays D.* Estimating forest soil bulk density using boosted regression modeling // *Soil Use and Management*. 2010. V. 26. P. 516–528.
28. *Manrique L.A., Jones C.A.* Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties // *Soil Sci. So. Am. J*. 1991. V. 55. P. 476–481.
29. *Meersmans J., De Ridder F., Canters F., De Baets S., Van Molle M.* A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium) // *Geoderma*. 2008. V. 143. P. 1–13.
30. *Nanko K., Ugawa S., Hashimoto S., Imaiya A., Kobayashi M., Sakai H., Ishizuka S., Miura S., Tanaka N., Takahashi M., Kaneko S.* A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash // *Geoderma*. 2014. V. 213. P. 36–45.
31. *Rodriguez-Lado L., Rial M., Taboada T., Cortizas A.* A pedotransfer function to map soil bulk density from limited data // *Procedia Environmental Sciences*. 2015. V. 27. P. 45–48.
32. *Sequeira Cleiton H., Wills Skye A., Seybold Cathy A., West Larry T.* Predicting soil bulk density for incomplete databases // *Papers in Natural Resources*. 2014. Paper 397. <http://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/397>

33. Soil Organic Carbon: the hidden potential // Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome. Italy. FAO. 2017. 77 p. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ed16dbf7-b777-4d07-8790-798604fd490a/>
34. *Stolbovoi V.* Carbon in Russian soils // Climatic Change. 2002. V. 55. P. 131–156.
35. *Thompson J.A., Kolka R.K.* Soil Carbon Storage Estimation in a Forested Watershed using Quantitative Soil-Landscape Modeling // Soil Sci. Soc. Am. J. 2005. V. 69. P. 1086–1093.
36. *Tranter G., Minasny B., McBratney A.B., Murphy B., McKenzie N.J., Grundy M., Brough D.* Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density // Soil Use Management. 2007. V. 23. P. 437–443.
37. *Xu L., He N., Yu G.* Methods of evaluating soil bulk density: Impact on estimating large scale soil organic carbon storage // Catena. 2016. V. 144. P. 94–101.
38. *Xu L., He N.P., Yu G.R., Wen D., Gao Y., He H.L.* Differences in pedo-transfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: evidence from Chinese terrestrial ecosystems // J. Geophys. Res.: Biogeosci. 2015. V. 120. P. 1567–1575.

## Assessment of Organic Carbon Pools in Forest Soils on a Regional Scale

O. V. Chernova<sup>1,\*</sup>, I. M. Ryzhova<sup>2</sup>, and M. A. Podvezennaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

\**e-mail: ovcher@mail.ru*

Results of the comparison of organic carbon pools in the automorphic and semihydromorphic forest soils are discussed. The database includes information on 289 soil profiles in the forest zone of European Russia. On the average, the total organic carbon pool (including forest litter) in semihydromorphic soils is three times higher than that in automorphic soils. The difference decreases with an increase in the thickness of the considered soil layer from 3.2 times for the layer of 0–30 cm to 2.6 times for the layer of 0–100 cm. The greatest difference of carbon stocks is noted for the organic horizons; in semihydromorphic soils, the carbon storage in them averages  $73 \pm 8.2$  t C/ha; in automorphic soils, it is seven times smaller. The neglect of the contribution of semihydromorphic soils results in underestimation of the total soil organic carbon pool of the region. The degree of underestimation depends on the soil cover pattern of particular areas and on the thickness of the considered soil layer. Calculations made for Karelia show that the underestimation of organic carbon stocks in various landscapes ranges from 10 to 40%. For the total area of this republic, it is estimated at 22, 19, and 13% for the soil layers of 0–30, 0–50, and 0–100 cm, respectively. A comparative analysis of known pedotransfer functions for calculating soil bulk density shows that the best results (RMSE = 0.15;  $R^2 = 0.36$ ) for mineral horizons of forest soils in European Russia are provided by the pedotransfer function suggested by O.V. Chestnykh and D.G. Zamolodchikov.

*Keywords:* semi-hydromorphic soils, regional scale, soil bulk density, pedotransfer functions