

Научная статья

УДК 631.417.1:630.90

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-83-97

Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов

Н.В. Малышева[✉], канд. геогр. наук, доц.; ResearcherID: [ABI-5705-2020](https://orcid.org/0000-0002-4264-3157),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4264-3157>

Т.А. Золина, вед. инж.; ResearcherID: [HNQ-4731-2023](https://orcid.org/0009-0009-1041-872X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-872X>

А.Н. Филипчук, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [HJB-1685-2022](https://orcid.org/0000-0003-4024-1696),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-1696>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; nat-malysheva@yandex.ru[✉], tzolina@gmail.com, aflipchuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.23 / Одобрена после рецензирования 10.09.23 / Принята к печати 14.09.23

Аннотация. В почвенном пуле содержатся основные запасы органического углерода преимущественно бореальных лесов России. Количественные оценки запасов углерода пула почв значительно варьируют. Это объясняется высокой временной и пространственной изменчивостью содержания органического углерода в почвах, недостатком эмпирических данных для ряда регионов, различием подходов к оценке углерода почв и плотности сложения почвенных горизонтов, принятой в расчет мощностью почвенного слоя, включением в почвенный пул запасов углерода лесной подстилки, слоя торфа и др. В 2020 г. выборочно-статистическим методом завершен 1-й цикл государственной инвентаризации лесов России. Получены лесотаксационные характеристики, экологические показатели и информация о лесорастительных условиях для 69,1 тыс. постоянных пробных площадей. Ограниченность данных полевых описаний почв обуславливает необходимость апробации комплексного подхода к использованию материалов государственной инвентаризации лесов в программной среде геоинформационных систем в сочетании с цифровыми ресурсами открытого доступа в целях оценки запасов углерода в почвенном пуле. Разработана и экспериментально опробована методика количественной оценки запасов углерода в пуле лесных почв. Предложенная методика включает: 1) геокодирование пробных площадей; 2) приведение исходных данных государственной инвентаризации лесов о типах почв к стандартной классификации; 3) использование цифровых ресурсов Мирового центра данных о почвах SoilGrids для получения эталонных средних запасов углерода на сети пробных площадей государственной инвентаризации лесов; 4) расчет общего запаса углерода в почвенном пуле лесных земель по средним запасам углерода SoilGrids и площадям стандартных типов почв по материалам государственной инвентаризации лесов. Экспериментальная апробация выполнена на примере Республики Карелии. Объем выборки составил 667 пробных площадей. По результатам исследования, преобладающий комплекс типов почв – подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые (без разделения) / подзолы иллювиально мало- и много-гумусовые – занимает площадь 7,28 млн га. Общий запас углерода почв в слое 0–30 см для лесных земель республики оценен в 773,9 Мт С при средних 79,1 т С/га.

Ключевые слова: запас углерода, почвы, государственная инвентаризация лесов, постоянные пробные площади, геоинформационные системы, цифровые картографические ресурсы, базы почвенных данных открытого доступа, Республика Карелия

Благодарности: Авторы выражают благодарность ФГБУ «Рослесинфорг» за предоставление материалов государственной инвентаризации лесов для модельного объекта. Исследование проведено в рамках госзадания ФБУ «ВНИИЛМ» на 2022 г., приказ Рослесхоза 23.12.2021 № 975. Код (шифр) темы – 1-Л21 ГИЛ (7/22).

Для цитирования: Малышева Н.В., Золина Т.А., Филипчук А.Н. Запасы углерода в почвах по материалам государственной инвентаризации лесов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 83–97. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>

Original article

Carbon Stocks in Soils Based on the State Forest Inventory Data

Nataliya V. Malysheva[✉], Candidate of Geography, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABI-5705-2020](https://orcid.org/0000-0002-4264-3157), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4264-3157>

Tatiana A. Zolina, Leading Engineer; ResearcherID: [HNQ-4731-2023](https://orcid.org/0009-0009-1041-872X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1041-872X>

Andrey N. Filipchuk, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [HJB-1685-2022](https://orcid.org/0000-0003-4024-1696),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-1696>

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow Region, 141202, Russian Federation; nat-malysheva@yandex.ru[✉], tzolina@gmail.com, afilipchuk@yandex.ru

Received on June 9, 2023 / Approved after reviewing on September 10, 2023 / Accepted on September 14, 2023

Abstract. The main organic carbon stocks in the predominantly boreal forests of Russia are contained in the soil pool. Quantitative estimates of soil pool carbon stocks vary considerably. This is due to the high temporal and spatial variability of the organic carbon content in soils, the lack of empirical data for a number of regions, the difference in approaches to assessing soil carbon and the density of soil horizons, the thickness of the soil layer taken into account, the inclusion of forest litter carbon stocks, the peat layer, etc. In 2020, the 1st cycle of the State Forest Inventory in Russia was completed using a selective statistical method. Forest inventory characteristics, environmental indicators and information on forest growth conditions have been obtained for 69.1 thousand permanent sample plots. The limited availability of field descriptions of soils necessitates the testing of an integrated approach to using the State Forest Inventory data in the software environment of geographic information systems in combination with open-access digital resources to assess carbon stocks in the soil pool. A methodology for quantitative assessment of carbon stocks in the forest soil pool has been developed and experimentally tested. The proposed methodology includes: 1) geo-referencing of sample plots; 2) bringing the initial data of the State Forest Inventory on soil types to a standard classification; 3) using the digital resources of the World Data Center for Soils (SoilGrids) to obtain reference average carbon stocks on the network of sample plots surveyed during the State Forest Inventory; 4) calculating the total carbon stock in the soil pool of forest lands based on the average carbon stocks of SoilGrids and areas of standard soil types based on the data of the State Forest Inventory. The experimental testing



has been carried out using the Republic of Karelia as an example. The sample size has been 667 permanent sample plots. According to the results of the study, the predominant complex of soil types – illuvial-ferruginous and illuvial-humus podzols (without division), illuvial low- and high-humus podzols – covers an area of 7.28 mln ha. The total carbon stock in the 0–30 cm soil layer for the forest lands of the Republic of Karelia is estimated at 773.9 Mt C with an average of 79.1 t C/ha.

Keywords: carbon stock, soils, State Forest Inventory, permanent sample plots, geographical information systems, digital cartographic resources, open-access soil databases, the Republic of Karelia

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the Federal State Budgetary Institution “Roslesinform” for providing the State Forest Inventory data for the model site. The research has been conducted within the framework of the state assignment for the Federal State Budgetary Institution “All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry” for 2022; order of the Federal Forestry Agency no. 975 dated December 23, 2021. The research topic code (cipher) – 1-L21 GIL (7/22).

For citation: Malysheva N.V., Zolina T.A., Filipchuk A.N. Carbon Stocks in Soils Based on the State Forest Inventory Data. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 83–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-83-97>

Введение

Почвенный пул является основным по запасу органического углерода для преимущественно бореальных лесов России. В верхних слоях почв (1 м) сосредоточено 20 % мировых запасов почвенного органического углерода, тогда как территория России составляет порядка 12,5 % общемировой площади суши [9]. По оценке ученых Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, лесные почвы содержат более 1/2 органического углерода почв России, или около 170 Гт С, из которых в болотах сосредоточено 100,9 Гт С, а в заболоченных землях – 12,6 Гт С. Углерод почвы превышает запасы углерода в биомассе лесов России в 7,5 раза, другими словами, 88 % общих запасов углерода, накопленных за столетия и тысячелетия, находится в почве [8, 9]. Среди всех углеродных пулов запасы углерода почв остаются наименее согласованными в региональном, национальном и глобальном масштабах. Методическое руководство Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [26] отмечает недостаточный уровень современных знаний для учета запасов углерода в почвенном пуле, значительную вариативность содержания углерода в почвах, вызванную спецификой лесорастительных условий, нарушениями природного и антропогенного характера, конверсией земель при смене типа землепользования, и, как следствие, высокий уровень неопределенности оценок. Отсюда вытекает отсутствие информации о плотности сложения почвенных горизонтов в базах данных с характеристиками профилей почв, что связано также с трудоемкостью определения этого параметра [19, 20, 33, 36].

Данные о запасах углерода лесных почв России имеют большой разброс, причины которого как в недостатке эмпирических сведений, особенно для регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока, так и в различии методических подходов. Влияние на результат оказывают методы оценки углерода в органическом веществе почв, плотности сложения почвенных горизонтов, мощности почвенного слоя, включение или исключение органического углерода, содер-

жащегося в лесных подстилках, слое торфа и др. В связи с важной ролью этого пула в биохимических процессах и неопределенностью его оценок разработка методов объективного учета запасов органического вещества лесных почв России актуальна.

Фундаментальные и прикладные исследования в рамках данного научного направления выполняются Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущинским научным центром биологических исследований, Институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Почвенным институтом им. В.В. Докучаева, Почвенным факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова, Институтом прикладного системного анализа (ИАСА), Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Институтом леса Карельского научного центра РАН и др. [3–5, 8–10, 14, 16, 17, 20–25, 27, 31, 33].

Первое обобщение данных о запасах органического углерода по группам почв и таксонам лесорастительного деления России сделано в работах [16, 27]. Масштабные по тематике и географическому охвату комплексные исследования, выполненные научным коллективом Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, позволили дополнить данные, собранные ранее преимущественно по литературным источникам [16, 27], и заложить основы методики оценки запасов углерода в почвенном пуле лесных территорий России [5, 25, 31]. Полученные разными авторами оценки запасов углерода в пуле лесных почв значительно варьируют (табл. 1).

Таблица 1

Запасы органического углерода в пуле лесных почв России
The organic carbon stocks in the forest soil pool of Russia

Характеристика почв	Запас углерода, Гт С	Источник данных
Минеральные горизонты почв, слой 0–50 см	86,3	[16, 27]
Торф	54,0	
Слой почв 0–30 см	84,5	[23]
0–50 см	104,3	
0–100 см	137,1	
Толща почвы 1 м, включая торфопокрытые избыточно увлажненные земли и подстилку	170,0	[13]
Толща почвы 1 м, включая подстилку	144,5	[24]
Толща почвы 1 м без подстилки	136,2	
Толща почвы 1 м, включая подстилку	144,5	[31]
	191,9	[25]
Управляемые* лесные земли (664,5 млн га), слой почв 0–30 см	60,0	[11]

*Согласно методологии МГЭИК [11, 15], управляемые – земли, на которых осуществляется систематическая антропогенная деятельность в целях реализации социальных, производственных и экологических задач.

В последние годы проведены масштабные работы по систематизации, обобщению и представлению сводных и средних запасов органического углерода почв на картах. В открытом доступе появились: единый государственный реестр почвенных ресурсов и цифровая карта почв России масштаба 1:2 500 000, предоставленные Почвенным институтом им. В.В. Докучаева [6];

почвенно-географическая база данных России и Национальный атлас почв России, поддерживаемые Почвенным дата-центром МГУ им. М.В. Ломоносова [2, 14].

Новым информационным источником, беспрецедентным по территориальному охвату и объему наземных измерений качественных и количественных характеристик лесов России, могут служить данные государственной инвентаризации лесов (ГИЛ). В 2020 г. в Российской Федерации выборочно-статистическим методом завершен 1-й цикл ГИЛ. На 69,1 тыс. постоянных пробных площадей (ППП) учтены 117 показателей, в т. ч. описан тип почв, установлены мощность гумусового горизонта, механический состав, влажность, наличие, тип и степень эрозии [18]. После статистической обработки сводные данные обследований ППП предоставлены в утвержденной Рослесхозом форме и опубликованы по субъектам. Оценка запасов углерода почвенного пула современным регламентом ГИЛ не предусмотрена.

Использование данных натуральных описаний лесных почв на ППП для оценки запасов углерода наталкивается на ряд методических ограничений. Определение типа почв по горизонту А, как предусмотрено нормативными документами, не позволяет достоверно отнести его к конкретной классификационной единице. Эти же нормативные документы содержат лишь рекомендацию использовать принятую классификацию почв России, а не указание на отдельный стандарт. Следовательно, исполнители могут свободно толковать типологические единицы, что приводит к разнородным описаниям почв, которые трудно систематизировать. Кроме того, получение необходимых показателей для оценки углерода: мощности горизонтов почв, плотности сложения по горизонтам, содержания органического вещества, крупных фракций и др. – требует владения методами специальных почвенных обследований. Помимо этого, необходимо закладывать не прикопки у границ ППП в соответствии с регламентом ГИЛ, а опорные почвенные разрезы до почвообразующей породы для их описания и отбора образцов по почвенному профилю, последующего лабораторного анализа образцов на специальном оборудовании и т. д. Такой анализ существенно увеличивает трудоемкость работ и неизбежно приведет к увеличению финансовых затрат на ведение ГИЛ.

Национальные инвентаризации лесов (НИЛ) в странах с многолетним опытом практического ведения таких работ включают сбор образцов по почвенному профилю на ППП и определение их количественных характеристик в лабораторных условиях. Подобные изучения навесок лесных почв выполняют при ведении НИЛ в Швеции [34], Финляндии [30, 35], США [28]. Однако и в этих странах учет запасов углерода лесных почв по данным лабораторных анализов образцов проводится не с 1-х циклов НИЛ: в Швеции – с 1983 г., т. е. с 12-го цикла НИЛ; в Финляндии – с 1971–1976 гг., 6-й цикл. Примечательно, что по результатам анализа образцов, собранных на ППП НИЛ в Швеции, получают не модельные [29], а фактические химические и физические характеристики почв: содержание углерода, азота, металлов по почвенному профилю, плотность сложения горизонтов, кислотность почв и др. (<https://www.slu.se/institutioner/mark-miljo/miljoanalys/markinfo/markkemi/>).

В нашей стране в ходе 1-го цикла ГИЛ подобные работы не проводились, поэтому описание лесных почв не подкреплено количественными значениями

мощности почвенных горизонтов, плотности сложения в зависимости от типа и гранулометрического состава почв и пр. Руководства МГЭИК [15, 26], задающие стандарты учета запасов и поглощения углерода лесными экосистемами, рекомендуют оценивать массу органического углерода почвы по образцам, взятым на ППП.

Признавая методически упрощенный подход к сбору данных о почвах в ходе ГИЛ, целесообразно принять во внимание выборку данных представительного объема для оценки запасов углерода почвенного пула. Можно попытаться использовать ее в сочетании с цифровыми ресурсами открытого доступа, нормативно-справочными материалами и литературными источниками, разработав косвенный метод оценки. Заметим, что оценки запасов углерода почв России и регионов, выполненные авторитетными научными коллективами, включая МГУ им. М.В. Ломоносова, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, ПАСА, получены моделированием с опорой на почвенные карты. Используя базу данных эталонов, созданную по типичным почвенным разрезам и имеющим координатную привязку, экстраполируют локальные измерения и описания в границах ареалов типов почв. Основная проблема применения такого подхода – недостаточное количество полевых наблюдений и лабораторных измерений органического углерода почв. Выборка типичных почвенных профилей, неравномерно представленных по территории страны, как правило, невелика. Например, О.В. Честных с соавт. [23] приводит размер выборки из 883 почвенных профилей, включая 538 описаний для Европейской части России. В публикации [22] этого научного коллектива объем выборки для Европейско-Уральской части России – 675 почвенных разрезов. База данных почвенных профилей в работах ПАСА и Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН [24, 25] содержит 1 068 записей с эталонными значениями по [33] и другим источникам.

Цель исследования – разработать методику количественной оценки запасов углерода в пуле лесных почв, основанную на сочетании материалов ГИЛ 1-го цикла и цифровых ресурсов открытого доступа, с ее экспериментальной апробацией на примере Республики Карелии.

Объекты и методы исследования

При ведении ГИЛ выполняют методически однотипные обследования почв на ППП. Почвенную прикопку глубиной 30–50 см размещают за границей ППП на расстоянии не более 5 м. Заметим, что рекомендуемая МГЭИК мощность (глубина) почвенного слоя для измерения углеродных параметров пула почвы сходная – не менее 30 см [15]. Описание почв включает диагностику типа, механического состава и влажности, а также толщины (мощности) гумусового горизонта, наличия, типа и степени эрозии. При последующей статистической обработке результатов обследований ППП получают итоговые данные о распределении площади лесных земель: по типам почв, типам и степени эрозии, механическому составу и влажности. Сводные результаты обследования представляют в типовой форме по субъектам и лесным районам.

Объект исследования – почвы Республики Карелии. Источник исходных данных – результаты статистической обработки данных 1-го цикла ГИЛ, опубликованные в Аналитическом обзоре 2020 г. [1]. Общий объем выборки по модельному объекту – 667 ППП. Лесные земли республики в соответствии с современным отраслевым лесорастительным районированием отнесены к 2 лесорастительным подзонам и соответственно лесным районам: северной

(Карельский северо-таежный лесной район – 50,4 % территории) и средней (Карельский таежный – 49,6 %) тайги [1].

По результатам обследований ГИЛ, на территории модельного объекта преобладают среднеподзолистые (38,1 %) и слабоподзолистые (18,7 %) почвы. Почвы с промывным типом водного режима (автоморфные) занимают 76 % площади, с застойным типом (гидроморфные) – 2 %. Почвы легкого механического состава (песчаные и супесчаные) представлены на 70 % территории, тяжелого механического состава (глины легкие, средние, тяжелые) – на 5 % [1].

В основе методологии исследования лежит оперирование комплексом источников данных (в англоязычной литературе, multi-source approach [32]) в программной среде геоинформационных систем (ГИС): материалами ГИЛ с описанием почв на ППП и распределением площади лесных земель по типам почв; картографическими ресурсами и базами почвенных данных открытого доступа. ГИС со стандартным набором инструментов пространственного анализа и возможностью работы с данными, имеющими пространственную привязку, позволяют оперировать комплексом показателей. Методика работ включает следующие этапы:

1. Геокодирование. В силу режимных ограничений координаты ППП ГИЛ недоступны пользователям. Обладая информацией о принадлежности ППП к лесничеству и его кварталу, можно определить пространственное положение ППП. Геокодирование состоит в координатной привязке ППП ГИЛ, расположение которых задается адресными сведениями из таблиц, к картографической основе. Геокодирование – стандартная операция в профессиональных ГИС-пакетах.

2. Приведение таксонов почв в материалах ГИЛ к стандартной классификации типов / комплекса типов почв. Описания почв на ППП ГИЛ имеют существенный недостаток. Типы почв, которые заносят в базу данных ГИЛ, отличны от стандартной классификации, разнородны, названия наследуют классификацию типов / комплекса типов лесных почв разного времени. Оверлейные процедуры ГИС позволяют сопоставить типы почв в материалах ГИЛ с типами почв в стандартной классификации 2004 г. [7].

3. Использование базы данных о мировых почвенных ресурсах для получения средних значений запасов углерода на ППП ГИЛ. Координатная привязка ППП методом геокодирования в среде ГИС дает возможность совместить данные ГИЛ с любыми картографическими ресурсами открытого доступа в сети Интернет. Международный почвенный справочно-информационный центр (ISRIC) – Мировой центр данных о почвах – поддерживает базы данных о почвенных ресурсах с географической привязкой (<https://library.wur.nl/WebQuery/isric/start>). Свободно доступные продукты ISRIC содержат данные о почвах и обновляемые цифровые карты с характеристиками почв мира, включая распределение запасов углерода в пуле почв по типам с пространственным разрешением 1 км и 250 м (SoilGrids). Карты составлены на основе эталонов – почвенных профилей, приведенных к единым стандартам, и пространственной экстраполяции эталонных значений по типам почв в классификации Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО). Доступ к цифровым данным открыт и предоставляется через веб-карту, размещенную на портале SoilGrids.org (<https://soilgrids.org>).

4. Расчет итоговых значений запаса углерода в почвенном пуле для всех лесных земель тестового объекта.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная методика экспериментально опробована на примере Республики Карелии.

1. По номеру квартала и названию лесничества, заданных в текстовом формате, осуществлена координатная привязка ППП ГИЛ. Выборка ППП не-систематическая, расположение точек в пространстве нерегулярное, поэтому для преобразования локальных значений точечного покрытия в площадное использован специальный инструмент ГИС. Полнофункциональные ГИС-пакеты содержат модуль экстраполяции локальных значений на площадь, с помощью которого из слоя точек получают слой полигонов (площадных объектов). Преобразование имеет такие преимущества, как пространственная визуализация распределения типов почв ареалами по данным измерений на ППП, локализованным в точках (рис. 1).

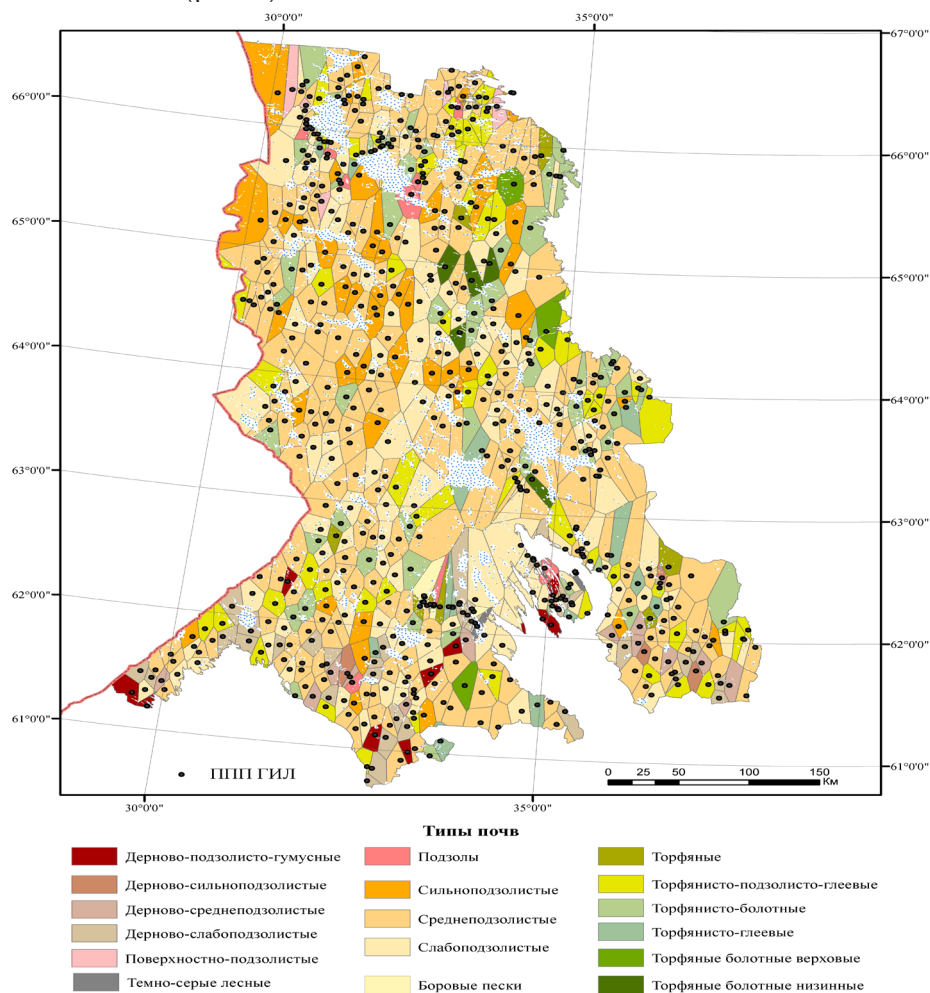


Рис. 1. Ареалы типов почв, построенных по описаниям почв на ППП ГИЛ с координатной привязкой. Республика Карелия

Fig. 1. The dissemination of soil types plotted according to the descriptions of soils on the permanent sample plots of the State Forest Inventory with a coordinate reference. The Republic of Karelia

2. Для приведения разнородных описаний типов почв на ППП к стандартной классификации использована цифровая почвенная карта России масштаба 1:2 500 000, созданная Почвенным институтом им. В.В. Докучаева на базе аналоговой [12] и обновленная [13]. С 2014 г. данным институтом поддерживается единый государственный реестр почвенных ресурсов, содержащий почвенно-географическую базу данных и пакет файлов почвенной карты России в формате .shp [6]. Совмещение ППП с почвенной картой и почвенно-географической базой данных (оверлей) дает соответствие типов почв на ППП стандартной классификации и пространственную картину принадлежности ППП к ареалам стандартных типов почв, что позволяет оценить площадь, занимаемую типами почв всех лесных земель модельного объекта.

3. Для получения средних запасов углерода координатно привязанные ППП совмещены с цифровой картой мировых почвенных ресурсов SoilGrids250m и базой данных о средних запасах углерода в почвенном слое 0–30 см, размещенных на платформе SoilGrids.org (рис. 2). Геоestatистическое моделирование дает возможность провести интерполяцию запасов углерода, соотнесенных с местоположением ППП, использовать рассчитанный на основе автокорреляции средневзвешенный показатель (рис. 3) и создать непрерывную поверхность значений.

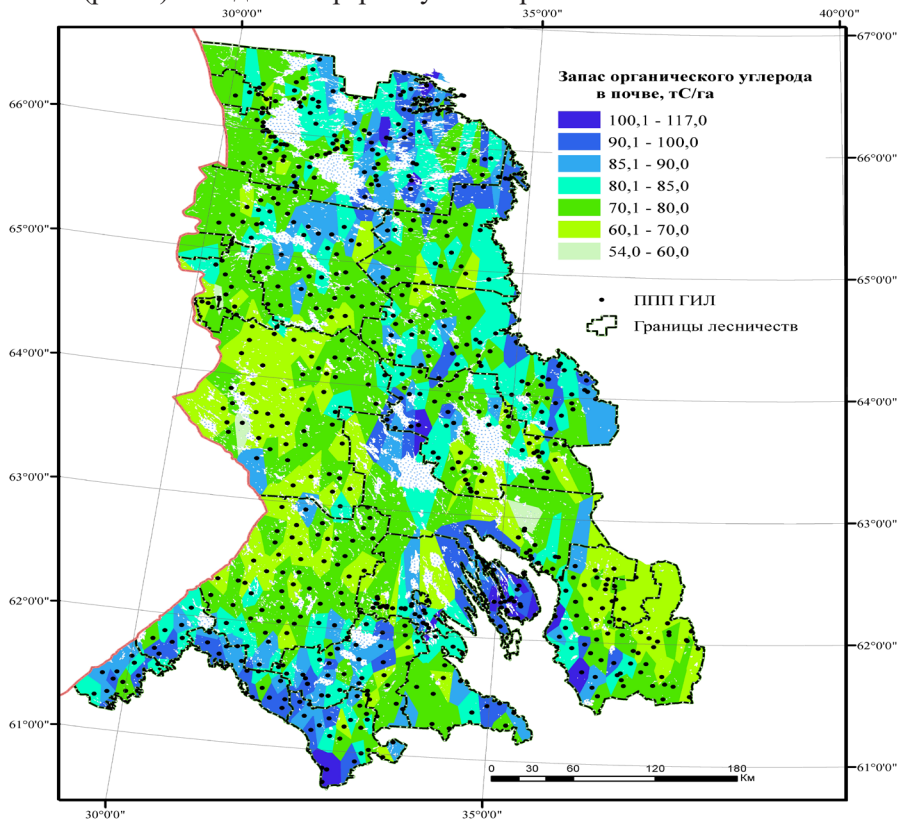


Рис. 2. Средние запасы органического углерода в слое почв 0–30 см по данным ресурса SoilGrids в границах ареалов, построенных по ППП ГИЛ. Республика Карелия

Fig. 2. The average organic carbon stocks in the 0–30 cm soil layer according to the SoilGrids data within the boundaries of the areas plotted according to the permanent sample plots of the State Forest Inventory. The Republic of Karelia

Таблица 2

**Площадь по типам почв и запасы углерода (Республика Карелия)
The area by soil types and carbon stocks (The Republic of Karelia)**

Тип почв / комплекс типов [7]	Площадь, тыс. га	Средний запас углерода в слое 0–30 см, т С/га	Общий запас угле- рода в пуле лесных почв, Мт С
Подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые (без разделения), иллювиально мало- и много-гумусовые	7 280,7	76,60	557,7
Подзолы иллювиально-железистые/-гумусовые (много-гумусовые)	453,3	82,36	37,3
Подзолистые	925,7	94,25	87,2
Подзолы иллювиально-гумусовые/железистые/глеевые торфянистые	101,1	81,33	8,2
Подзолы глеевые торфянистые и торфяные, преимущественно иллювиально-гумусовые	989,9	81,55	80,7
Торфяные болотные верховые/переходные	34,2	77,08	2,6
<i>Всего</i>	9 785,0	79,10	773,9

Использована информация о площади, занимаемой древесными породами, с распределением по группам возраста и о принадлежности пород к таксонам лесорастительного районирования, содержащиеся в материалах ГИЛ. Общие запасы углерода в слое почв 0–30 см составляют 709,3–710,6 Мт С (табл. 3). Небольшие различия в итоговых оценках обусловлены разницей коэффициентов средних запасов углерода почв по данным [23] и нормативно-справочным материалам Минприроды. Сопоставимость результатов свидетельствует о правомерности разработанной методики.

Таблица 3

**Сравнение запасов углерода в пуле лесных почв для слоя 0–30 см по данным
ГИЛ и Национального кадастра ПГ (Республика Карелия)
The comparison of carbon stocks in the forest soil pool for the 0–30 cm layer according
to the State Forest Inventory and the National Greenhouse Gas Inventory
(The Republic of Karelia)**

Запас углерода	Расчет по данным ГИЛ и карте почв мира ресурса SoilGrids	Расчет с данными ГИЛ по площадям древесных пород и справочным материалам [23]	Расчет с данными ГИЛ по площадям древесных пород и нормативно-справочным материалам Минприроды	Национальный кадастр ПГ
Всего, Мт С	773,9	710,6	709,3	499,4
Среднее, т С/га	79,1	72,6	72,5	52,6

При подготовке Национального доклада о кадастре выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (далее – Национальный кадастр ПГ) расчет запасов углерода почвенного пула проводился путем умножения площади, занимаемой группами древесных пород, с делением на группы возраста на коэффициент средних запасов углерода, приведенный в нормативно-справочных материалах Минприроды. В Национальном кадастре ПГ по состоянию на 2020 г. [11] общие запасы углерода в слое лесных почв Карелии 0–30 см оценены в 499,4 Мт С при средних значениях 52,6 т С/га.

Итоговая величина, полученная нами, соответствует данным расчетов, в которых использованы коэффициенты средних запасов углерода почв по [23] и нормативно-справочным материалам Минприроды, но существенно отличается от приведенной в [11] – 499,5 Мт С. Наше значение на $\approx 54,9$ % больше в сравнении с [11], при расхождении средних показателей >50 %. Заметим, что количественные показатели запаса органического углерода в почвенном слое 0–30 см для Республики Карелии в [11] практически не меняются в хронологическом ряду с 2009 г. и, вероятно, недооценены.

Заключение

Разработана методика комплексного использования материалов государственной инвентаризации лесов с описаниями почв и информацией об их площади и цифровых ресурсов открытого доступа Мирового центра данных о почвах (SoilGrids) в программной среде геоинформационных систем для оценки запасов органического углерода почвенного пула. Экспериментальная проверка методики на примере Республики Карелии подтвердила работоспособность предложенного способа и непротиворечивость результатов данным, полученным расчетным путем и модельными методами. Рассмотренный метод, наряду с уже применяемыми, может быть рекомендован для количественной характеристики запасов углерода почв лесных земель по регионам, таксонам лесорастительного зонирования и России в целом, что будет способствовать совершенствованию оценивания и согласованности результатов. В настоящее время он предложен для апробации производственным подразделениям, осуществляющим работы по государственной инвентаризации лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аналитический обзор о состоянии лесов, их количественных и качественных характеристиках по Республике Карелия. М.: Рослесинфорг, 2020. 78 с.
Analytical Review of the State of Forests, Their Quantitative and Qualitative Characteristics in the Republic of Karelia. Moscow, Roslesinfor, 2020. 78 p. (In Russ.).
2. Атлас почв Российской Федерации. Информационная система «Почвенно-географическая база данных России». М.: Почвенный дата-центр МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022. Режим доступа: <https://soil-db.ru/map> (дата обращения: 11.12.24).
Atlas of Soils of the Russian Federation. Information System "Soil and Geographical Database of Russia". Moscow, the Moscow State University named after M.V. Lomonosov Soil Data Center, 2022. (In Russ.).
3. Бахмет О.Н. Особенности органического вещества почв в лесных ландшафтах Карелии // Лесоведение. 2012. № 2. С. 19–27.

Bakhmet O.N. Specific Features of Soil Organic Matter in Forest Landscapes of Karelia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 2, pp. 19–27. (In Russ.).

4. Бахмет О.Н. Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии // Лесоведение. 2018. № 1. С. 48–55.

Bakhmet O.N. Carbon Storages in Soils of Pine and Spruce Forests in Karelia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 1, pp. 48–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0024114818010047>

5. Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. журн. 2005. № 4. С. 631–649.

Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and Swamps of Siberia in the Global Carbon Cycle. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2005, vol. 1, pp. 168–182. <https://doi.org/10.1134/S1995425508020021>

6. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 2014. Режим доступа: <https://egrpr.esoil.ru/content/1DB.html> (дата обращения: 11.12.24).

Unified State Register of Soil Resources of Russia. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute, 2014. (In Russ.).

7. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с. *Classification and Diagnosis of Soils in Russia*. Smolensk, Ojkuмена Publ., 2004. 343 p. (In Russ.).

8. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060.

Kudeyarov V.N. Current State of the Carbon Budget and the Capacity of Russian Soils for Carbon Sequestration. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2015, no. 9, pp. 1049–1060. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>

9. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России: моногр. М.: Наука, 2007. 315 с.

Kudeyarov V.N., Zavarzin G.A., Blagodatskij S.A., Borisov A.V., Voronin P.Yu., Demkin V.A., Demkina T.S., Evdokimov I.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Komarov A.S., Kurganova I.N., Larionova A.A., Lopez de Gerenu V.O., Utkin A.I., Chertov O.G. *Carbon Pools and Flows in Russian Terrestrial Ecosystems*: Monograph. Moscow, Nauka Publ., 2007. 315 p. (In Russ.).

10. Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59.

Nakvasina E.N., Shumilova Yu.N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 46–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59>

11. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 2. Приложения. М.: ИГКЭ Росгидромет, 2022. 111 с.

National Inventory Report on Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Part 2. Annexes. Moscow, Institute of Global Climate and Ecology Roshydromet Publ., 2022. 111 p. (In Russ.).

12. Почвенная карта РСФСР масштаба 1:2 500 000 / под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988.

Soil Map of the Russian Soviet Federative Socialistic Republic at a Scale of 1 : 2 500 000. Ed. by V.M. Friedland. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography, 1988. (In Russ.).

13. Почвенная карта России (скорректированная цифровая версия Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2500000) / под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 2007.

Soil Map of Russia (Corrected Digital Version of the Soil Map of the RSFSR in at a Scale of 1 : 2500 000). Ed. by V.M. Friedland. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography, 2007. (In Russ.).

14. Рожков В.А., Алябина И.О., Колесникова В.М., Молчанов Э.Н., Столбовой В.С., Шоба С.А. Почвенно-географическая база данных России // Почвоведение. 2010. № 1. С. 3–6.

Rozhkov V.A., Alyabina I.O., Kolesnikova V.M., Molchanov E.N., Stolbovoi V.S., Shoba S.A. Soil-Geographical Database of Russia. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2010, vol. 43, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1134/S1064229310010011>

15. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г.: в 5 т. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Япония: Институт глобальных стратегий окружающей среды, 2007. 83 с.

2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: in 5 Volumes. Vol. 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Japan, Institute of Global Environmental Strategies, 2007. 83 p. (In Russ.).

16. Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексева, Р.А. Бердси. Красноярск: ЭКОС, 1994. 210 с.

Carbon in Forest and Swamp Ecosystems of Russia. Ed. by V.A. Alexeyev, R.A. Birdsey. Krasnoyarsk, EKOS Publ., 1994. 210 p. (In Russ.).

17. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНИЦ РАН, 2003. 260 с.

Fedorets N.G., Bakhmet O.N. *Ecological Features of Transformation of Carbohydrate and Nitrogen Compounds in Forest Soils*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 260 p. (In Russ.).

18. Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Федоров С.В., Бердов А.М., Косицын В.Н., Югов А.Н., Кинигопуло П.С. Аналитический обзор количественных и качественных характеристик лесов Российской Федерации: итоги первого цикла государственной инвентаризации лесов // Лесохоз. информ. 2022. № 1. С. 5–34.

Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A., Fedorov S.V., Berdov A.M., Kositsyn V.N., Yugov A.N., Kinigopulo P.S. Analytical Review of the Quantitative and Qualitative Characteristics of Forests in the Russian Federation: Results of the First Cycle of the State Forest Inventory. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2022, no. 1, pp. 5–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01>

19. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепасченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2021, vol. 54, pp. 325–336. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>

20. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.

Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of Organic Carbon Stocks in Forests Soils on a Regional Scale. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2020, vol. 53, pp. 339–348. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030023>

21. Чертов О.Г. Экология лесных земель (почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний). Л.: Наука, 1981. 192 с.

Chertov O.G. *Ecology of Forest Lands (Soil and Ecological Study of Forest Habitats)*. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 192 p. (In Russ.).

22. Честных О.В., Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г. Углерод почв лесных районов Европейско-Уральской части России // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 2. 15 с. Chestnykh O.V., Grabovsky V.I., Zamolodchikov D.G. Soil Carbon in Forest Regions of the European-Ural Part of Russia. *Voprosy lesnoj nauki* = Forest Science Issues, 2020, vol. 3, no. 2. 15 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-2-1-15>

23. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. Reserves of Biological Carbon and Nitrogen in Soils of Russian Forest Fund. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2004, no. 4, pp. 30–42. (In Russ.).
24. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Carbon Budget of Russian Forests. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.).
25. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
Schepaschenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. Organic Carbon Stocks in Soils of Russia. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 2013, no. 2, pp. 123–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>
26. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Japan, Institute of Global Environmental Strategies, 2019. Available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html> (accessed 19.12.24).
27. Carbon Storage in Forests and Peatlands of Russia. Ed. by V.A. Alexeyev, R.A. Birdsey. General Technical Report NE-244. Radnor, PA, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1998. 137 p.
28. Forest Ecosystem Health Indicators. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, FS-1151, 2020. 28 p.
29. Högberg P., Arnesson Ceder L., Astrup R., Binkley D., Bright R., Dalsgaard L., Egnell G., Filipchuk A., Genet H., Ilintsev A., Kurz W.A., Laganière J., Lemprière T., Lundblad M., Lundmark T., Mäkipää R., Malysheva N., Mohr C.W., Nordin A., Petersson H., Repo A., Schepaschenko D., Shvidenko A., Soegaard G., Kraxner F. *Sustainable Boreal Forest Management – Challenges and Opportunities for Climate Change Mitigation: Report from an Insight Process Conducted by a Team Appointed by the International Boreal Forest Research Association (IBFRA)*. Swedish Forest Agency, 2021. 57 p.
30. Luke Statistics Database. Available at: <https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/en/LUKE/> (accessed 19.12.24).
31. Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F. Soil Contribution to Carbon Budget of Russian Forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, vol. 200, pp. 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.017>
32. Multi-Source Inventory Methods for Quantifying Carbon Stocks and Stock Changes in European Forests. CarboInvent (Contract no. EVK2-2002-00157). Executive Summary, 2006. 53 p.
33. Stolbovoi V. Carbon in Russian Soils. *Climatic Change*, 2002, vol. 55, pp. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>
34. Tomppo E., Gschwantner T., Lawrence M., McRoberts R.E. *National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting*. Heidelberg, Springer Science+Business Media B.V., 2010. 612 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3233-1>
35. Tomppo E., Heikkinen J., Henttonen H.M., Ihalainen A., Katila M., Mäkelä H., Tuomainen T., Vainikainen N. *Designing and Conducting a Forest Inventory – Case: 9th National Forest Inventory of Finland*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer Science+Business Media B.V., 2011. 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1652-0>
36. Xu L., He N.P., Yu G.R., Wen D., Gao Y., He H.L. Differences in Pedotransfer Functions of Bulk Density Lead to High Uncertainty in Soil Organic Carbon Estimation at Regional Scales: Evidence from Chinese Terrestrial Ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, vol. 120, iss. 8, pp. 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/2015JG002929>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article