

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ РОССИИ¹

© 2021 г. О. В. Чернова^{a, *}, О. М. Голозубов^b, И. О. Алябина^b, Д. Г. Щепашенко^{c, d}

^aИнститут проблем экологии и эволюции им А.Н. Северцова РАН, Ленинский пр-т, 33, Москва, 119071 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^cInternational Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Schlossplatz 1, A-2361 Austria

^dЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

*e-mail: ovcher@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2020 г.

После доработки 17.07.2020 г.

Принята к публикации 24.10.2020 г.

Опробован подход к раздельному картографированию запасов органического углерода в относительно однородных группах почвенных горизонтов (минеральных и органогенных, включая подстилки, торфяные залежи, торфянистые горизонты полугидроморфных почв). Предложены алгоритмы расчета, позволяющие использовать разномасштабные, пространственно- и атрибутивно-разреженные данные различной достоверности, взаимно дополняющие друг друга. Использованный подход позволил создать и совместить несколько карт различной точности, мелкомасштабных на всю территорию страны и более детальных для хорошо обеспеченных фактической информацией регионов. На основе этих карт оценены общие запасы и соотношение основных пулов органического углерода в толще почв 0–30 см для территории страны и трех административных областей Европейской России. Запасы углерода в минеральных горизонтах почв России достигают 101 Гт, что составляет 62% углерода, аккумулированного в 30-сантиметровой почвенной толще; 38% сосредоточено в органогенных горизонтах: на наиболее легкоминерализующийся пул – подстилку – приходится 9% общих запасов углерода, в торфяных залежах вместе с торфянистыми и перегнойными горизонтами полугидроморфных почв сосредоточено 29% запасов углерода. Показано увеличение удельных запасов углерода в слое почв 0–30 см в направлении с севера на юг от 87 т/га в Вологодской области к 91 т/га – в Московской и далее до 109 т/га – в Ростовской области. В этом же направлении снижается вклад органических горизонтов в общие запасы углерода. Сведения о величине и структуре запасов углерода в почвах позволяют увеличить обоснованность оценок устойчивости почвенного покрова к изменению природных условий и антропогенным воздействиям, а также адаптировать стратегии землепользования к условиям конкретных регионов.

Ключевые слова: структура запасов углерода в почвах, плотность горизонтов, раздельное картографирование

DOI: 10.31857/S0032180X21030047

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным оценкам, запасы органического углерода (ЗОУ) в метровом слое почв Земного шара составляют 1417–1824 Гт [25, 38, 41, 42]. На долю России приходится около 20% этих запасов [35]. Уточнение оценок ЗОУ в почвах, важное для разработки стратегий устойчивого развития регионов и прогноза влияния климатических изменений на баланс углерода, являлось целью проекта Глобального почвенного партнерства ФАО ООН – создание Всемирной карты за-

пасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (GSOC17). Координацию работ по созданию карты для территории Российской Федерации (РФ) осуществлял Почвенный дата-центр МГУ им. М.В. Ломоносова. Работа проводилась на основе Информационной системы “Почвенно-географическая база данных Российской Федерации” (ИС ПГБД РФ), которая позволяет аккумулировать, использовать разнообразную почвенную информацию и обмениваться ею в рамках распределенной сети центров обработки почвенных данных (<https://soil-db.ru/ob-informacionnoy-sisteme>). Организации, принявшие участие в работе по проекту, в том числе со стороны России, указаны на сайте ФАО (<http://www.fao.org/global-soil-partner>

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X21030047.

ship/pillars-action/4-information-and-data/global-soil-organic-carbon-gsoc-map/gsocmap-contributors/en/).

Содержание, запасы и баланс углерода в почвах и экосистемах Северной Евразии оценивали многие исследователи, в том числе в картографической форме. Географический анализ проводился, как правило, в рамках целостных природных образований в соответствии с естественными границами: основных типов растительности, зональных и интразональных растительных формаций каждого термического пояса, семейств экосистем, почвенных типов и природно-сельскохозяйственных зон, типов почв и почвенных комплексов с учетом типов почвообразующих пород и т.п. [1, 2, 5, 9, 11–13, 18, 19, 31, 33, 40]. Оценки ЗОУ в метровом слое почв РФ, полученные с применением разных методов усреднения и экстраполяции, различаются на 10–30% (285–364 Гт), при этом использованные в расчетах первичные данные часто сходны, так как количество “типичных” разрезов с полным объемом данных, включая плотность в естественном сложении по горизонтам, ограничено [13, 17, 19, 23, 39, 48].

Неравномерная изученность почвенного покрова и разнообразие биоклиматических и культурно-исторических условий Российской Федерации обуславливают сложность подбора единой методики для расчета запасов органического углерода в почвенном покрове всей территории страны. Разнообразные цели и подходы исследователей-почвоведов к изучаемым объектам – почвам сельскохозяйственных угодий, лесов, антропогенно-измененных ландшафтов, торфяных болот и заболоченных территорий – определяют разнообразие используемых аналитических методов и подходов к обобщению эмпирических данных. Кроме того, большая часть имеющихся в распоряжении результатов исследований почвенных разрезов относится к 60–80-м годам прошлого века, поэтому оценки запасов углерода соответствуют тому времени, следовательно, требуется актуализация информации о ЗОУ в почвах, особенно для районов активного сельскохозяйственного использования.

Основными целями настоящего исследования являлись:

- оценка объема почвенной информации, накопленной в электронном виде в почвенных дата-центрах России;
- разработка и тестирование вычислительных алгоритмов для картографирования ЗОУ почв на основе ИС ПГБД РФ;
- уточнение оценок запасов углерода на территории России за счет данных, переведенных в цифровую форму в последние годы, и опробование возможности актуализации этих оценок с привлечением информации, аккумулированной в региональных почвенных дата-центрах;

– оценка соотношения основных пулов органического углерода в 30-сантиметровом слое почв России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с рекомендациями ФАО ООН карта была создана с пространственным разрешением сетки 1/2 угловой минуты (35–60 га для территории России) [47]; исходными данными для расчетов явились показатели, относящиеся к разрезу или контуру почвенной карты: содержание органического углерода, %; плотность горизонта в естественном сложении, г/см³; степень каменистости, %.

Для максимального вовлечения в расчеты имеющейся информации из различных источников была предпринята попытка создания для всей территории страны серии карт запасов углерода в относительно однородных по характеристикам органического вещества почвенных горизонтах: минеральных (с содержанием органического вещества менее 15%) и органогенных, в том числе подстилочных, торфяных, а также перегнойных и торфянистых горизонтов полугидроморфных почв. При расчете запасов углерода в различных горизонтах использовали индивидуальные пересчетные коэффициенты, отражающие обогащение углеродом их органического вещества.

Карты построены на основе Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2 500 000 [15]. Также использовали опубликованную в 2019 г. Почвенную карту Крыма масштаба 1 : 2 500 000, выполненную в соответствии с легендой Почвенной карты РСФСР и размещенную на врезке к Карте почвенно-экологического районирования Российской Федерации [14]. Наряду с этими картами были созданы более детальные карты ЗОУ в почвах земель сельскохозяйственного использования трех областей Европейской России, обеспеченных большими объемами почвенных данных по сравнению с остальной территорией.

Оценка плотности почвенных горизонтов. Одной из причин невысокой точности оценок запасов почвенного углерода, по мнению некоторых авторов [48, 50], является недостаток данных о плотности почв. Для решения проблемы широко используются педотрансферные функции (ПТФ), позволяющие вычислить значение плотности по другим доступным почвенным характеристикам. ПТФ являются эмпирическими и имеют ограниченную область применения, с особой осторожностью их следует использовать в условиях, значительно отличных от тех, для которых они были получены, поэтому подбор ПТФ, позволяющих с наименьшей ошибкой определить плотность почв конкретных регионов, является важной задачей [26, 27, 32].

Таблица 1. Средние относительные ошибки расчета плотности горизонтов для почв различных групп, %

Почвы	Горизонты			Количество	
	все	органогенные	минеральные	профилей	горизонтов
“Тажные”					
Подзолистые, дерново-подзолистые, серые лесные	15.0	94.7	8.6	62	301
Подзолы	24.5	80.7	10.5	13	55
Бурые лесные	23.2	113.4	12.3	9	37
Подбуры, буро-таежные, дерново-таежные	87.8	315.2	13.2	13	77
“Степные”					
Черноземы, каштановые	9.2			98	427
“Луговые”					
Луговые, пойменные	23.8		14.7	29	102

Аккумулированная в ИС ПГБД фактическая информация по приблизительно 2000-м разрезам включает морфологические описания почвенных профилей по горизонтам, сведения о содержании органического углерода и некоторые другие аналитические характеристики, позволяющие уточнить классификационную принадлежность почв. Лишь около 20% от общего количества разрезов (402) были обеспечены данными о плотности горизонтов. В целях возможно более полного вовлечения аккумулярованных в ИС ПГБД РФ данных в расчеты, была опробована применимость нескольких ПТФ, предложенных разными авторами для прогнозирования плотности [22, 24, 30, 37].

Использование рассмотренных функций для определения плотности органогенных горизонтов дало неудовлетворительные результаты [21]. Для расчета плотности минеральных горизонтов наилучшие результаты были получены на основании предложенной Честных и Замолодчиковым [22] пятипараметрической нелинейной функции, которая позволяет прогнозировать плотность горизонтов в зависимости от содержания гумуса и глубины:

$$BW = a_1 - a_2 / (MID + a_3) + a_4 / (HUM + a_5), \quad (1)$$

где BW – плотность, $г/см^3$; MID – глубина середины горизонта, $см$; HUM – гумус, %; $a_1 - a_5$ – параметры, определяемые типом почв.

Авторами были предложены параметры уравнения, различные для пяти групп почв. В работе использовали параметры уравнения для трех групп почв, условно названных “таежными”, “луговыми” и “степными” (табл. S1).

Для подзолистых и дерново-подзолистых почв, отнесенных к условной группе “таежные”, плотности, вычисленные с использованием указанного уравнения и параметров подзолистых почв, достаточно хорошо совпали с экспериментальными значениями. Проанализирована информация по

301 горизонту из 61 почвенного профиля. Средняя относительная ошибка (МАРЕ) для минеральных горизонтов составляет 8.6% (относительные ошибки изменяются от 0.01 до 50.1%), для органогенных горизонтов (при содержании органического вещества более 15 вес. %) она достигает 95% (относительные ошибки 3.4–410.8%). Расчеты показали, что при определении аналогичным образом плотности минеральных горизонтов других почв, условно отнесенных к группе “таежные”, средняя относительная ошибка также невелика (табл. 1). Перечень почв, отнесенных к группе “таежные”, приводятся в табл. S2 приложения.

Аналогичная работа была проведена для большой группы гумусово-аккумулятивных “степных” почв, в которую были включены все горизонты всех вариантов черноземов и каштановых почв, включая слитые, луговые, солонцеватые и осолоделые. Относительные ошибки по этому массиву данных (427 горизонтов) изменяются от 0.02 до 54.4%, средняя относительная ошибка составляет 9.2%. Несколько худшие результаты получены для минеральных горизонтов группы “луговые”, объединяющей различные луговые и пойменные почвы.

Не исключено, что массив данных, использованный при создании ПТФ [22], частично перекрывается с информацией из ПГБД РФ, на основании которой тестировали применимость уравнения, поскольку количество описанных в литературе разрезов с полным набором аналитических характеристик ограничено. Применимость ПТФ была проверена на заведомо независимых массивах данных, занесенных в информационную систему в 2017 г. Верификация уравнения и коэффициентов для почв группы “таежные” проведена на массиве данных, предоставленном специалистами Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (125 горизонтов из 31 разреза дерново-подзоли-

стых почв, преимущественно глееватых и глеевых). Органогенные горизонты в этом массиве не были представлены, содержание гумуса во всех образцах менее 6.8%. Средняя относительная ошибка определения плотности для этих почв составила 7.5%. Применимость уравнения и коэффициентов для почв группы “степные” проведена на массиве данных, предоставленном специалистами Южного федерального университета (307 горизонтов из 111 разрезов черноземов Ростовской области). Средняя относительная ошибка для этих почв составила 7.6%.

Показано, что для минеральных горизонтов почв, условно объединенных в группы “таежные” и “луговые”, а также для почв, объединенных в группу “степные”, расчет плотности горизонтов по указанной формуле (с использованием специфичных для соответствующих групп почв параметров уравнения) дает удовлетворительные результаты.

Запасы органического углерода в минеральных горизонтах. Абсолютное большинство входящих в ПГБД РФ и использованных нами в расчетах данных о концентрации органического углерода в почвах получено методом мокрого сжигания (различные модификации метода Тюрина). Первоначально при построении карты запасов углерода в минеральной части слоя почвы 0–30 см ориентировались на эти данные, на них основаны первые оценки общих запасов и соотношения пулов органического углерода для территории России [29]. Содержание органического углерода, определенное методом сухого сжигания по количеству выделившегося CO_2 , всегда больше, чем таковое, полученное методом Тюрина (на 10–50% для разных почв и горизонтов). В настоящее время для корректировки данных о содержании углерода в разнообразных почвах России имеющих сведений недостаточно, однако Когутом и Фридом [8] был предложен усредненный корректировочный коэффициент ($K = 1.28 \pm 0.19$), позволяющий приблизить показатели содержания углерода, полученные методом Тюрина, к реальным значениям.

При построении карты запасы углерода вычисляли для толщи 0–30 см. Если рассматриваемый слой почвы состоял из двух или трех горизонтов (например, подстилки, торфянистого и минерального), в расчет включали только часть толщи, приходящуюся на минеральный горизонт. Плотности почвенных горизонтов рассчитывали с использованием ПТФ (в случае отсутствия прямых определений), вычисляли запасы углерода до глубины 30 см для каждого разреза с применением корректировочного коэффициента K , далее усредняли полученные величины для каждого выдела легенды Почвенной карты РСФСР [15].

Более детальные карты ЗОУ в слое почв 0–30 см сельскохозяйственных земель трех областей европейской территории России (Московской, Белгородской, Ростовской) построены с использованием средне- и крупномасштабных почвенных карт и данных почвенного мониторинга, ведущегося областными центрами агрохимической службы. Интеграция информации почвенных дата-центров в распределенную Информационную систему “Почвенно-географическая база данных России” позволила актуализировать оценки ЗОУ в слое почв 0–30 см земель сельскохозяйственного назначения указанных регионов.

На примере ключевой территории (Зерноградского района Ростовской области) опробовано несколько вариантов картографирования ЗОУ в почвах с привлечением разных объемов исходной информации и разных алгоритмов расчетов. На первом этапе применили традиционный экспертный метод с использованием векторизованных крупномасштабных почвенных карт и обобщенной информации о запасах гумуса, полученных на основании обследований опорных разрезов 1970–80-х годов (рис. S1, А). Далее по регулярной сетке с шагом 30" построены карты, которые отражают результаты онлайн-оценки ЗОУ на основе данных агрохимического мониторинга содержания гумуса и показателей плотности почв: рассчитанных на основе ПТФ (рис. S1, В) или экспертных значений для выделов легенд почвенных карт (рис. S1, С).

Средневзвешенные значения запасов органического углерода в сельскохозяйственных почвах района, рассчитанные с использованием указанных алгоритмов, оказались близки (10.05; 10.29 и 10.55 $\text{кг}/\text{м}^2$, полученные способами 1, 2, 3 соответственно). На этом основании для картографирования актуальных ЗОУ в почвах сельскохозяйственных земель из протестированных вариантов выбран наименее требовательный к объему фактической информации метод. Для расчета карт современных запасов углерода в сельскохозяйственных почвах Ростовской, Белгородской и Московской областей применили алгоритм 3 (с использованием результатов последнего агрохимического обследования и экспертных оценок плотности почв для выделов легенд почвенных карт среднего масштаба), поскольку фактических данных для корректного вычисления объемной плотности всех представленных в регионах почв было недостаточно.

Разномасштабные картографические слои объединены путем замещения участков мелкомасштабной карты соответствующими контурами более детальных карт сельскохозяйственных территорий (рис. S2), что позволило актуализировать информацию о запасах органического углерода в почвах для этих регионов. Итоговая карта ЗОУ в

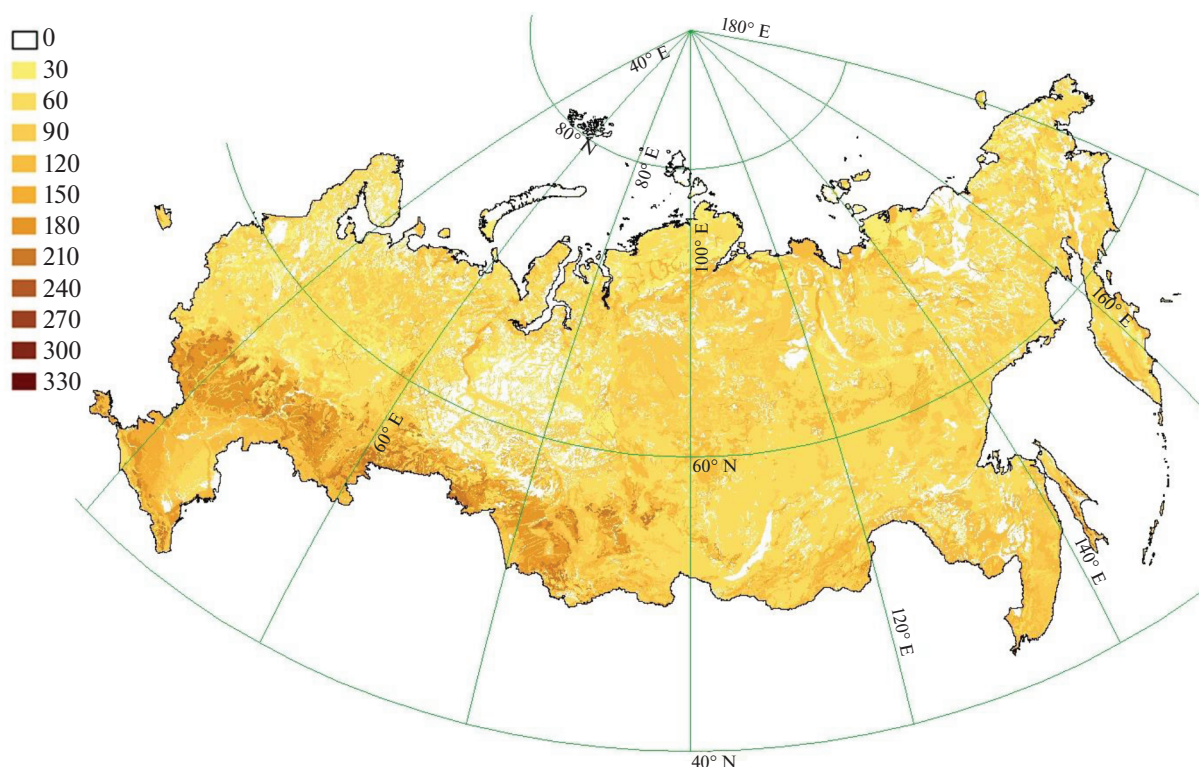


Рис. 1. Запасы органического углерода в минеральных горизонтах 30-сантиметрового слоя почв РФ, т/га.

минеральных горизонтах 30-см слоя почв РФ представлена на рис. 1.

Запасы органического углерода в подстилках. В соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [7] подстилка определяется как напочвенный слой, состоящий из органического материала (с содержанием органического вещества более 35% от массы горизонта). Толщина слоя подстилки не превышает 10 см.

На основе информации из базы данных типичных почвенных профилей [49] к Почвенной карте РФ [15], скорректированной в соответствии с пояснительной запиской к карте [16], и базы данных запасов углерода в подстилках, полученных из литературных источников [44], оценивали запасы органического углерода в подстилке по следующей формуле:

$$C = \frac{H}{100} \frac{K_C}{100} DL \times 10, \quad (2)$$

где C – запасы углерода подстилки, кг/м²; H – содержание ОВ, %; K_C – содержание углерода в ОВ, %; D – плотность подстилки, г/см³; L – мощность подстилки, см; 10 – коэффициент перевода г С/см² в кг С/м².

Среднее содержание углерода в органическом веществе горизонтов подстилки было принято равным 37,9% для всех почв. Это значение коррек-

тировалось для конкретных регионов/зон; также для почв под лесом принимали во внимание доминирующую древесную растительность. Подробно алгоритм расчета карты описан ранее [23].

Важными факторами, оказывающими влияние на запасы органического вещества в подстилках, являются характер землепользования и различные виды нарушений в экосистемах. Сведения о пространственном распределении типов землепользования и нарушениях экосистем получены на основании карты растительности и землепользования России [43]. Принципы использования поправочных коэффициентов для сельскохозяйственных и нарушенных экосистем описаны ранее [23]. Карта запасов углерода в подстилке (рис. 2) подготовлена, уточнена и адаптирована к требованиям ФАО на основе ранее сделанной и опубликованной работы [23].

Запасы углерода в торфяниках и органогенных горизонтах полугидроморфных почв. Значительную часть территории России занимают избыточно увлажненные почвы. В соответствии с Почвенной картой РСФСР [15] и Почвенной картой Крыма [14], торфяные болотные почвы и почвенные комплексы с преобладанием торфяных болотных почв занимают 9,4% территории суши, на полугидроморфные почвы и комплексы приходится 22,7%.



Рис. 2. Запасы органического углерода в подстилках на территории РФ, т/га.

При глобальных оценках запасов органического вещества в болотных торфяных почвах, внимание часто акцентируется на характеристиках торфа мощных залежей [46, 51], реже рассматривается все разнообразие болотных почв [3]. При оценках обычно используют усредненные параметры, поскольку четких закономерностей их изменения пока не выявлено, хотя и имеются сведения о возрастании объемной плотности торфа с юга на север [46]. Мы оценивали запасы углерода в торфяных болотных верховых, переходных и низинных почвах с учетом зольности, плотности и обогащения углеродом соответствующих торфяных отложений на основе усредненных характеристик, приведенных в обзорных работах (табл. 2) [3, 4, 20].

Карта запасов углерода в 30-сантиметровом поверхностном слое торфяных болотных почв и

почвенных комплексов с их преобладанием представлена на рис. 3.

Органогенные горизонты полугидроморфных почв, включая перегнойные, торфянистые и оторфованные, могут значительно различаться по мощности и содержанию органического вещества [7]. При описании почв с дополнительным увлажнением часто ограничиваются только указанием мощности органогенных горизонтов, их объемную плотность определяют редко и изменяется она в широких пределах (от 0.2 до 1.1 г/см³). Данные прямых определений содержания углерода методом сухого сжигания малочисленны, в большинстве случаев в качестве характеристики обогащения горизонта органическим веществом приводятся сведения о потере при прокаливании (ППП). При наличии данных о ППП, содержание углерода в органогенном горизонте прини-

Таблица 2. Характеристики, использованные при расчете запасов органического углерода в торфяных болотных почвах

Показатель	Верховые	Переходные	Низинные
Зольность, %	3.5	7.5	20
Содержание углерода в органическом веществе, %	55.5	56.0	55.3
Плотность, г/см ³	0.07	0.09	0.13

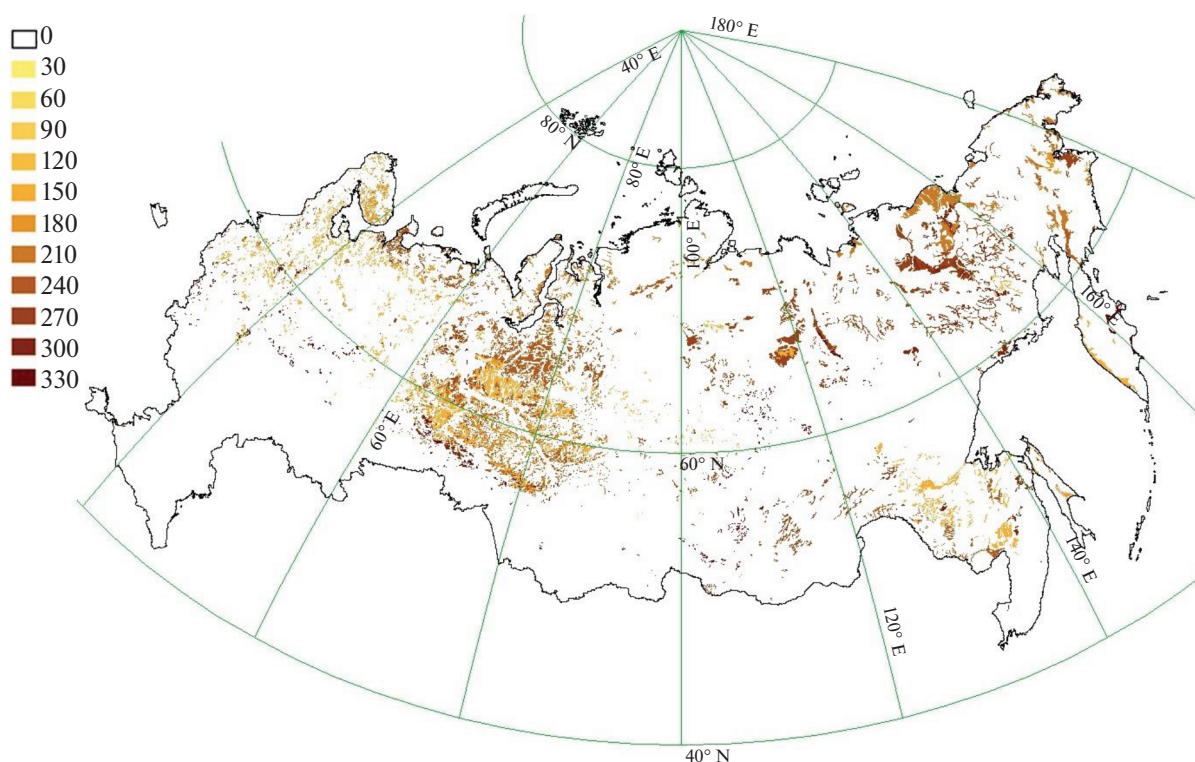


Рис. 3. Запасы органического углерода в торфяных болотных почвах до глубины 30 см, т/га.

мали равным 0.5ППП [20, 28]. Из-за ограниченности эмпирических данных при построении карты запасы углерода в органогенных горизонтах полугидроморфных почв оценивали в соответствии с видом горизонтов и типом экосистем на основе среднестатистических данных или экспертных оценок [3, 20, 23]. Распределение по территории страны запасов углерода в таких горизонтах отражает карта на рис. 4.

Расчет итоговой карты. При построении всех мелкомасштабных картографических слоев на основе Почвенной карты РФ [15] и Почвенной карты Крыма [14] ЗОУ для каждого полигона оценивали по первой почве выдела легенды без учета сопутствующих почв. В почвенных комплексах запасы углерода рассчитывали пропорционально числу почвенных разностей, входящих в комплекс. Для комплексов, включающих 2 почвенных выдела, долю первого округленно принимали равной 60%, второго – 40%; в трехчленных комплексах доли компонентов принимали равными 34, 33 и 33% соответственно. При рассмотрении комплексов почв с участием мерзлотных трещин на сами трещины отводили 25%, исходя из приводимых в литературных источниках размеров полигонов и трещин [6].

Итоговая суммарная карта получена в растровом формате с пространственным разрешением

сетки 1/2 угловой минуты (рис. 5). Именно в таком разрешении созданы все национальные карты ЗОУ в 30-сантиметровом слое почв странами-участниками проекта ФАО. Векторные и растровые слои карты в виде проекта ArcGIS доступны по ссылке: <https://soil-db.ru/nauchnaya-deyatelnost/karta-zapasov-organicheskogo-ugleroda>.

Погрешности оценок запасов углерода в почвах различных регионов страны заметно различны, поскольку слои и фрагменты карты были созданы разными методами на основе различной фактической информации. Для мелкомасштабной карты относительные ошибки запасов углерода в 30-сантиметровом слое почвы (без подстилки), оценивали для каждого выдела легенды Почвенной карты РФ. Максимальная погрешность (200% и более) отмечена для территорий, минимально обеспеченных информацией (единичные, значительно различающиеся по характеристикам профили). Для регионов с высокой плотностью обследований относительная погрешность оценки запасов углерода составляет около 25%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Актуализация и детализация оценок. Как упомянуто выше, большая часть включенных в ПГБД РФ результатов полнопрофильных обследований

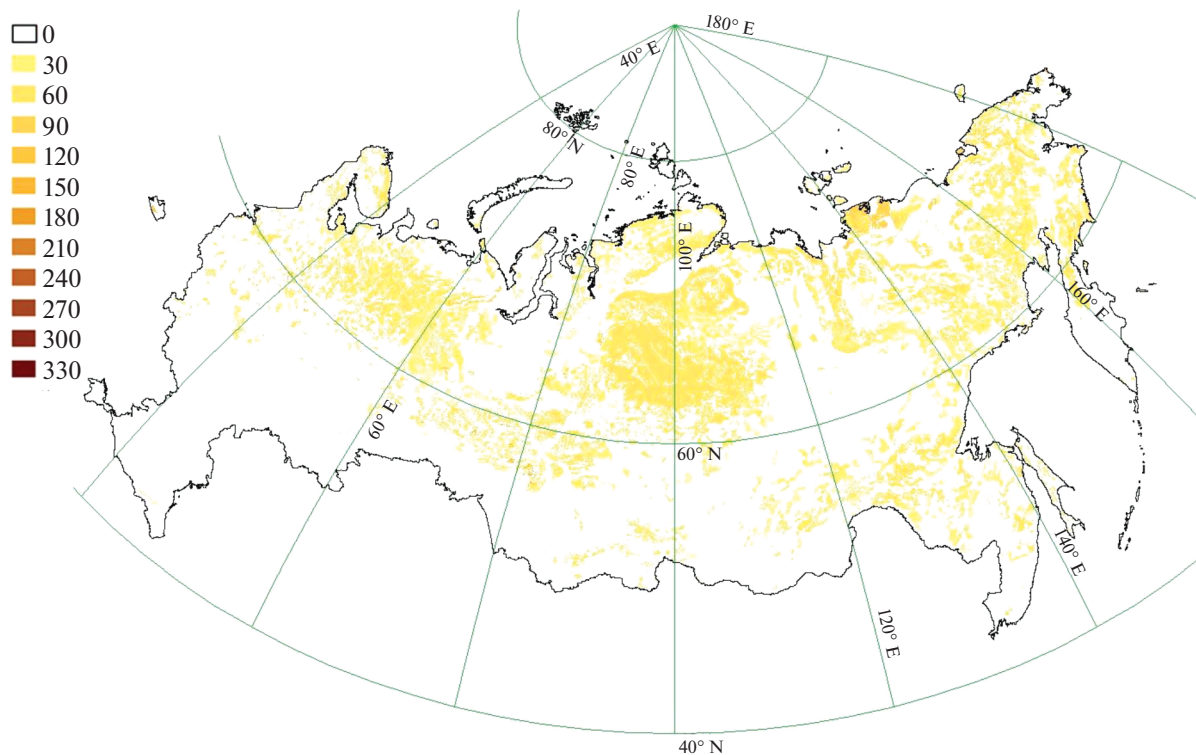


Рис. 4. Запасы органического углерода в торфянистых и перегнойных горизонтах полугидроморфных почв РФ, т/га.

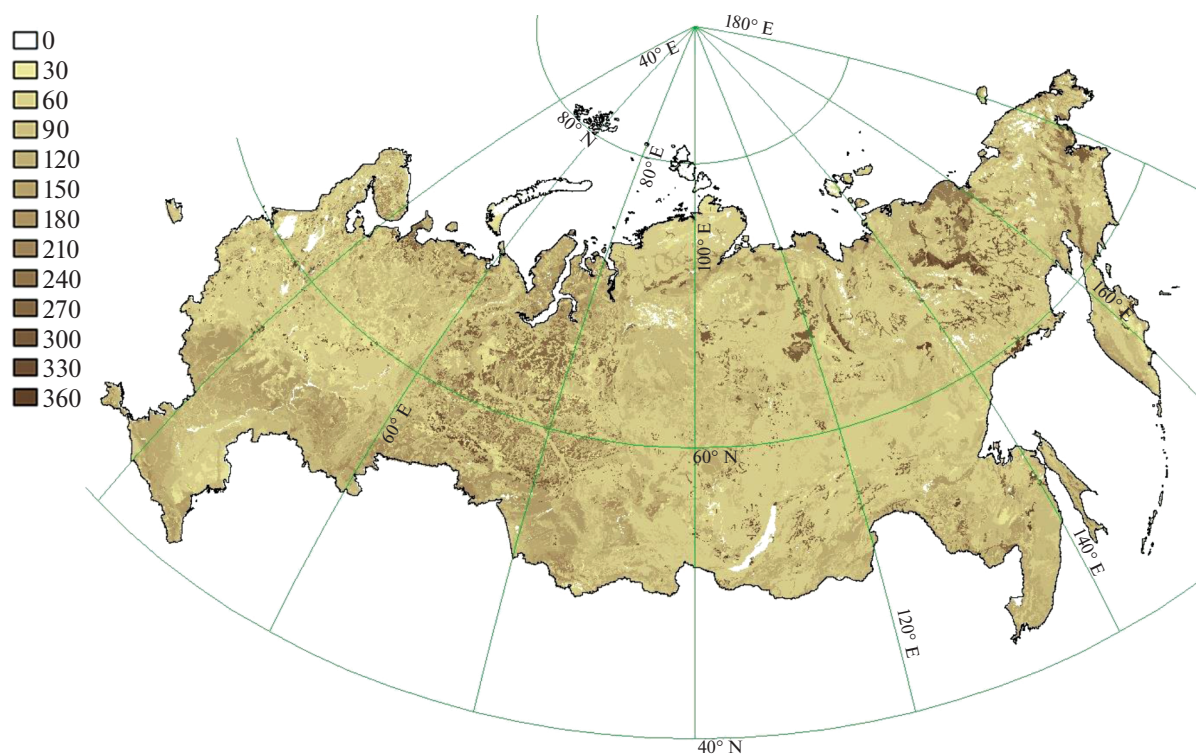


Рис. 5. Общие запасы органического углерода в 30-сантиметровом слое почв РФ, т/га.

Таблица 3. Запасы углерода в почвах сельскохозяйственных регионов

Область	Площадь сельскохозяйственных земель, тыс. га	Запасы органического углерода				Изменение оценок запасов, %
		мелкомасштабная оценка		агрохимический мониторинг		
		общие, ($n \times 10^9$ кг)	удельные, т/га	общие, ($n \times 10^9$ кг)	удельные, т/га	
Ростовская	4611.8	524.1	113.6	393.7	85.4	-24.9
Белгородская	1228.3	179.4	151.7	158.9	129.4	-14.7
Московская	622.2	48.9	76.7	47.8	78.6	+2.4

разрезом относится к 60–80-м гг. XX в., соответственно, оценки углеродных пулов отражают состояние почвенного покрова на тот период. Между тем, органическое вещество 30-сантиметровой толщи почвы активно участвует в современном круговороте углерода и наиболее быстро отвечает на изменение условий окружающей среды и антропогенное воздействие. Анализ природно-антропогенной динамики и прогноз изменения состояния экосистем конкретных регионов на фоне увеличения интенсивности сельскохозяйственного использования и наблюдаемых в последние десятилетия климатических трендов требуют привлечения оперативной информации о запасах углерода. Заметное повышение плотности почвенных обследований для всей территории России в обозримом будущем маловероятно, однако интеграция цифровой почвенной информации в единую систему и картографическое совмещение детальных региональных данных с мелкомасштабными для всей страны будет способствовать не только уточнению и актуализации итоговых оценок, но и, по мере накопления фактической информации, выявлению географических и временных трендов почвенных характеристик.

Сравнение результатов современных крупномасштабных оценок ЗОУ в 30-сантиметровом слое почв сельскохозяйственных земель трех административных областей европейской России с мелкомасштабными для тех же территорий позволило выявить существенные различия. Крупномасштабные оценки ЗОУ в Ростовской и Белгородской областях значительно ниже оценок, полученных по мелкомасштабными материалам. В то же время для Московской области разномасштабные оценки ЗОУ почв сельскохозяйственных земель практически одинаковы (табл. 3).

Заметная разница в показателях мелко- и крупномасштабных оценок для черноземных областей может быть обусловлена как уменьшением гумусированности почв при интенсивном сельскохозяйственном производстве в течение последних 40–60 лет (включая влияние эрозионных процессов), так и общеизвестным фактом подсобного выбора наилучших плакорных почв в

качестве типичных объектов при обзорных оценках. По нашему мнению, в рассматриваемом случае влияние второго фактора, а именно упор мелкомасштабных карт на “репрезентативные” единичные разрезы, более значимо. Сходство разномасштабных оценок ЗОУ в Московской области может объясняться динамикой содержания органического вещества в сельскохозяйственных почвах регионов южной тайги, отличной от динамики почв лесостепи и степи.

Пулы органического углерода почв территории России. Запасы органического углерода в минеральных горизонтах до глубины 30 см изменяются от единиц до 210 т/га (рис. 1). Минимальными значениями (до 10 т/га) характеризуются непочвенные образования с фрагментарным растительным покровом и маломощные слабо развитые почвы. Максимальные запасы углерода (150–180, иногда до 210 т/га) накапливаются в минеральной толще наиболее гумусированных вариантов черноземов, а также в некоторых луговых и перегнойных почвах. Пул органического углерода минеральных горизонтов оценивается в 101 Гт, что составляет 62% от общего количества, аккумулированного в 30-сантиметровом слое почв РФ (табл. 4).

Запасы углерода в подстилке изменяются от 0 до 36 т/га (рис. 2). Максимальные показатели отмечаются в старовозрастных хвойных лесах, часто на почвах с дополнительным увлажнением. В среднем запасы углерода подстилок постепенно увеличиваются с юга на север вплоть до северной тайги. В подстилке сосредоточено несколько менее 15 Гт углерода, около 9% от валовых запасов 30-сантиметрового слоя почвы (табл. 4).

Известно, что максимальными удельными запасами углерода (150–330 т/га) характеризуются торфяные болотные почвы (рис. 3). Вся 30-сантиметровая толща этих почв представлена торфяной залежью с концентрацией углерода 50–60%. Углеродный пул торфяных болотных почв оценивается в 33 Гт, что составляет около 20% общих запасов углерода в 30-сантиметровом слое почв всей территории страны.

Таблица 4. Соотношение основных пулов органического углерода в 30-сантиметровом слое почв на территории России

Углеродные пулы	Запасы органического углерода территории, $n \times 10^9$ Гт	Доля от общих запасов углерода территории, %
Общие запасы	163	100
Минеральные горизонты	101	62
Органогенные горизонты, в том числе:	62	38
торфяные залежи болотных торфяных почв	33	20
торфянистые горизонты полугидроморфных почв	14	9
подстилка	15	9

Таблица 5. Структура запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почв административных областей

Область	Запасы органического углерода		Доля от общих запасов углерода территории, %			
	общие, $(n \times 10^6)$ т	средневзвешенные, т/га	минеральные горизонты	органогенные горизонты		
				торфяные	перегнойные, торфянистые	подстилка
Вологодская	1198	86.8	52	24	10	14
Московская	395	91.0	66	15	9	11
Ростовская	1064	109.1	99	0	0	1

Запасы органического углерода в мощных торфянистых и перегнойных горизонтах полугидроморфных почв в большинстве случаев составляют 20–60 т/га, достигая в отдельных случаях 70–90 т/га (рис. 4). В общем пуле органического вещества полугидроморфных почв доля этих горизонтов составляет 20–80%. ЗОУ перегнойных и торфянистых горизонтов полугидроморфных почв для всей территории РФ оцениваются в 14 Гт, что составляет несколько менее 9% от общего углеродного пула 30-сантиметрового слоя почвы.

Общие ЗОУ в 30-сантиметровом слое почв России мы оцениваем в 163 Гт, включая 0.3 Гт территории Крымского полуострова (табл. 4). Этот результат близок к оценкам, полученным ранее на основе той же Почвенной карты РФ [15] и аналитических характеристик 234 типичных разрезов (164 Гт) без учета органического вещества подстилки [39, 48]. Таким образом, полученные в настоящем исследовании оценки лишь на 9% меньше полученных ранее. Вовлечение в расчеты дополнительной фактической информации (количество разрезов увеличилось приблизительно в 6 раз) и использованный подход раздельного картографирования не изменил кардинально результаты оценки ЗОУ, но позволил рассмотреть и проанализировать соотношение основных поч-

венных органических пулов и закономерности их распределения по территории страны.

Анализ соотношения пулов органического углерода различных территорий с использованием карт. Использование серии полученных карт запасов углерода в относительно однородных группах почвенных горизонтов позволяет оценить общие ЗОУ и соотношение основных углеродных пулов в пределах заданной территории. Так, в качестве примера эти параметры оценены для территорий трех административных областей европейской части РФ с различными природными и хозяйственными особенностями: Вологодской, Московской, Ростовской (табл. 5).

Средневзвешенные общие запасы углерода в 30-сантиметровой толще почв рассмотренных областей возрастают в направлении с севера на юг: от 87 т/га в Вологодской области, 91 т/га в Московской и далее – до 109 т/га в Ростовской области. При этом структура запасов заметно различается. В Вологодской области (граница северной и средней тайги) почти половина запасов углерода сосредоточена в органогенных горизонтах, в Московской области на них приходится около 34%, а в Ростовской области – менее 1%.

В Вологодской области большая часть территории относится к землям лесного фонда (76%), поэтому сохранение наиболее легко минерализу-

ощегося органического вещества – подстилки – обеспечивается поддержанием оптимальной тип-возрастной структуры лесных насаждений. В торфе болотных почв, занимающих 9% площади сосредоточено 24% общих запасов углерода почв области.

В Московской области современные крупномасштабные оценки ЗОУ в сельскохозяйственных почвах (полученные на основе крупномасштабных почвенных карт и данных агрохимического мониторинга) составляют около 49.0×10^9 кг, что практически совпадает с мелкомасштабными оценками (полученными с использованием карты масштаба 1 : 2500000 и характеристик типичных разрезов) для тех же участков (табл. 3). Причем в крупномасштабных расчетах преимущественно учтен углерод минеральных горизонтов почв, вовлеченных в сельскохозяйственное производство. А в соответствии с мелкомасштабными оценками, не учитывающими особенности землепользования, 20% ЗОУ почв приходится на органогенные горизонты.

Реальные современные запасы углерода в почвах всей территории значительно антропогенно-измененной Московской области, по-видимому, ниже полученных нами мелкомасштабных оценок. За последние 2–3 десятилетия были вырублены значительные площади лесов, соответственно уменьшились и запасы подстилки. Летом и осенью 2010 г. в Московской области пожарами было пройдено почти 60 тыс. га, включая значительные площади торфяных массивов, осушенных в предыдущие годы, что привело к потере части аккумулированных в торфе запасов углерода. Очевидно, указанные процессы должны привести к сокращению ЗОУ в почвах области, в первую очередь, за счет органогенных горизонтов.

В Ростовской области крупномасштабные оценки ЗОУ в пахотных почвах области почти на четверть меньше мелкомасштабных для той же территории, что обусловлено более низким содержанием гумуса в почвах, согласно данным агрохимического мониторинга, в сравнении с опорными разрезами мелкомасштабной карты. В сельскохозяйственное производство здесь вовлечено более 87% территории. Поскольку 99% запасов углерода 30-сантиметрового слоя почв региона сосредоточено в минеральных горизонтах, необходимой мерой поддержания углеродного баланса является сокращение интенсивности водной эрозии и дефляции и повышение гумусированности сельскохозяйственных земель всеми доступными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан подход, позволяющий использовать в расчетах и при построении карт разнород-

ные данные (разномасштабные картографические, пространственно- и атрибутивно-разреженные точечные) различной достоверности, взаимно дополняющие друг друга. Наличие значительных массивов экспериментальных данных для трех сельскохозяйственных областей позволило актуализировать оценки запасов углерода для конкретных территорий на основе разработанного алгоритма. Технические решения организации вычислений на распределенной (в Интернет) сети дата-центров дают возможность осуществлять онлайн расчеты с актуализацией результатов по мере поступления дополнительной информации.

Оценены основные углеродные пулы 30-сантиметровой толщи почв и их соотношение для всей России, а также для территорий нескольких модельных административных областей (Вологодской, Московской, Ростовской). Запасы углерода в минеральных горизонтах почв России достигают 101 Гт, что составляет несколько больше половины (62%) всего углерода, аккумулированного в 30-сантиметровой почвенной толще. Остальные 38% сосредоточены в органогенных горизонтах, то есть представлены не связанными или слабо связанными с минеральной частью почвы органическими соединениями. На наиболее легко минерализующийся пул – подстилку – приходится 9% общих запасов углерода; в торфяных залежах вместе с торфянистыми и перегнойными горизонтами полугидроморфных почв сосредоточено 29% запасов углерода.

Предложенный алгоритм отдельного картографирования запасов углерода в относительно однородных группах почвенных горизонтов (минеральных, подстилках, торфяных, торфянистых горизонтах полугидроморфных почв) позволяет генерировать серии карт различной точности и масштаба, на основе которых могут быть оценены общие запасы и соотношение основных пулов органического углерода в пределах заданной территории. Сведения о величине и структуре запасов углерода в почвах позволяют оценить устойчивость почв и экосистем к изменению природных условий и антропогенным воздействиям, адаптировать стратегии землепользования к условиям конкретных регионов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность коллегам из Южного федерального университета, Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, центров Агрохимической службы Ростовский, Белгородский и Московский за предоставленные для расчетов первичные данные и помощь в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работы по крупномасштабному картированию и актуализации оценок запасов органического углерода выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № RFMEFI60719X0298.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Table S1. Equation parameters for soil groups conventionally labeled 'Taiga,' 'Meadow,' and 'Steppe' (Таблица S1. Параметры уравнения для групп почв, условно названных "Тажными", "Луговыми" и "Степными").

2. Table S2. Soils in the 'Taiga' group according to the legend of the Soil Map of the RSFSR and their approximate analogues in the WRB (Таблица S2. Почвы, отнесенные к группе "Тажные" в соответствии с легендой Почвенной карты РСФСР и их приблизительные аналоги по WRB).

3. Fig. S1. Soil organic carbon stocks (t/ha) within a 0–30 cm layer of soils in the Rostov region. Estimation was based on the following data: a – fine-scale soil maps and average data on humus stock of reference soil profiles; b – agrochemical monitoring data and estimated soil bulk density; c – agrochemical monitoring data and expert estimation of soil bulk density. (Рис. S1. Запасы органического углерода в 30-сантиметровом слое почв Зерноградского района Ростовской области, т/га. Используемая для расчета информация: А – крупномасштабные почвенные карты, запасы гумуса в опорных разрезах; В – данные агрохимического мониторинга, расчетные значения плотности почв; С – данные агрохимического мониторинга, экспертные оценки плотности почв).

Fig. S2. Soil organic carbon stock in agricultural regions of Belgorod and Rostov regions, t/ha: a. fine-scale soil maps; b. the final map (Рис. S2. Запасы органического углерода в 30-сантиметровом слое почв Белгородской и Ростовской областей, т С/га: А – крупномасштабные карты; В – итоговая карта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297с.
3. *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.
4. *Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнов О.Н.* Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. 2012. Вып. 7. Естествознание и экология. С. 61–74.
5. *Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Пряжников А.А., Замолотчиков Д.Г.* Оценка запасов годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // Лесоведение. 1993. № 5. С. 3–10.
6. *Караваева Н.А.* Тундровые почвы Северной Якутии. М.: Наука, 1969. 207 с.
7. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. *Козут Б.М., Фрид А.С.* Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 1993. № 9. С. 119–123.
9. *Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А., Кузнецова Т.В., Тимченко А.В.* Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33–42.
10. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
11. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование потоков органического углерода, поступающего в почвы основных биомов России // Почвоведение. 2002. № 6. С. 675–681.
12. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомех России // Известия РАН. Сер. географическая. 2007. № 5. С. 1–12.
13. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
14. Почвенная карта Крыма. Масштаб 1 : 2500000. Авторы: И.С. Урусевская, И.А. Мартыненко, И.О. Алябина. Врезка к Карте почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М 1 : : 8000000. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Факультет почвоведения. М., 2019.
15. Почвенная карта РСФСР / Под ред. В.М. Фридланда. Масштаб 1 : 2500000. М.: ГУГК, 1988 (Скорректированная цифровая версия, 2007).
16. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации / Ред.: Л.Л. Шишов, Н.В. Комов, А.З. Родин, В.М. Фридланд. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2001. 400 с.
17. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
18. *Родин Л.Е., Базилевич Н.И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. М.–Л.: Наука, 1965. 253 с.
19. *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. М.: Наука, 1997. С. 5–58.
20. Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. Красноярск, 1994. 224 с.
21. *Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Проблема оценки запасов органического углерода

- лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.
22. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г. Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 937–944.
 23. Щенащенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
 24. Abdelbaki A.M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils // Ain Shams Engineering J. 2016. Dec 25. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>
 25. Batjes N.H. Harmonised soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks // Geoderma. 2016. V. 269. P. 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>
 26. 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. P. 90–97.
 27. Boschi R.S., Bocca F.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. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0357>
 28. Chaikaew P., Chavanich S. Spatial Variability and Relationship of Mangrove Soil Organic Matter to Organic Carbon // Applied and Environmental Soil Science. 2017. Jan. <https://doi.org/10.1155/2017/4010381>
 29. Chernova O.V., Golozubov O.M. Soil Organic Carbon Stock Estimation Based on Digital Map of Organic Carbon Stock in 30-cm Soil Layer of Russia // Proceeding of international workshop and seminar “Innovation of Environmental-Friendly Agricultural Technology Supporting Sustainable Food Self-Sufficiency” // Zenodo. 2019. July 8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3271555>
 30. Hollis J.M., Hannam J., Bellamy P.H. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils // European J. Soil Science. February 2012. V. 63(1). P. 96–109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01412.x>
 31. Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J.W., Schuur E.A.G., Ping C.L., Schirmermeister L., Grosse G., Michaelson G.J., Koven C.D., O'Donnell J.A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. V. 11. P. 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
 32. 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. <https://doi.org/10.1111/J.1475-2743.2010.00305.X>
 33. Kolchugina T.P., Vinson T.S., Shvidenko A.Z., Dixon R.K., Kobak K.I., Botch M.S. Carbon Balance of Forest Biomes (Undisturbed Ecosystems) in the Former Soviet Union // Carbon Balance of World's Forested Ecosystems: Towards a Global Assessment. Helsinki, 1994. P. 52–62.
 34. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. V. 133. P. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.06.002>
 35. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // Glob. Change Biol. 2014. V. 20. P. 938–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
 36. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlik P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // Sci. Data. 2018. V. 5. 180056. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>
 37. Manrique L.A., Jones C.A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties // Soil Science Society of America J. 1991. V. 55. P. 476–481.
 38. Milne E., Al-Adamat R., Batjes N., Bernoux M., Bhattacharyya T., Cerri C.C., Cerri C.E.P., Coleman K., Easter M.J., Falloon P., Feller C., Gicheru P., Kamoni P., Killian K., Pal D.K., Paustian K., Powlson D.S., Rawajfih Z., Sessay M., William S., Wokabi S.M. National and sub national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system // Agric. Ecosyst. Environ. 2007. V. 122(1). P. 3–12.
 39. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., José Padarian, Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulae-man Y., Tsui C.-C., Văgent T.-G., Van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille // Geoderma. 2017. V. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.026>
 40. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M. and Obersteiner M. Full Carbon Account for Russia. Interim Report, IR-00-021, IIASA, 2000. Online: <http://www.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-00-021.pdf>
 41. Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // Proc. Natl. Acad. Sci. 2017. V. 114(36). P. 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
 42. Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool // Carbon Manag. 2014. V. 5(1). P. 81–91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
 43. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // J. Land Use Sci. 2011. V. 6. P. 245–259. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2010.511681>

44. Schepaschenko D., Shvidenko A., Usoltsev V., Lakyda P., Luo Y., Vasylyshyn R., Lakyda I., Myklush Y., See L., McCallum I., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A dataset of forest biomass structure for Eurasia // *Sci. Data*. 2017. V. 4. Article number 170070. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.70>
45. Schepaschenko D., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Y., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V., Kraxner F. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products // *Contemp. Probl. Ecol*. 2015. V. 8. P. 811–817. <https://doi.org/10.1134/S1995425515070136>
46. Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochem. Cycl.* 2004. V. 18(3), GB3004. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>
47. Soil Organic Carbon Mapping. GSOC Map. Cookbook Manual / Edit. Yigini Y., Baritz R., Vargas R.R. Rome, 2017. 167 p.
48. Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // *Climatic Change*. 2002. V. 55. P. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:102028940383>
49. Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia. International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science. Laxenburg, Austria, 2002. (CD-ROM)
50. 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 // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2015. V. 120(8). P. 1567–1575. <https://doi.org/10.1002/2015JG002929>
51. Yu Z.C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // *Biogeosciences*. 2012. V. 9(10). P. 4071–4085. <https://doi.org/10.5194/bg-9-4071-2012>
52. Zdruli P., Lal R., Cherlet M., Kapur S. New world atlas of desertification and issues of carbon sequestration, organic carbon stocks, nutrient depletion and implications for food security // *Carbon management, technologies, and trends in mediterranean ecosystems*. V. 15 of the series the Anthropocene: Politik–Economics–Society–Science. 2017. P. 13–25. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45035-3_2

Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in Russian Federation

O. V. Chernova^{1,*}, O. M. Golozubov², I. O. Alyabina², and D. G. Schepaschenko^{3,4}

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg A-2361 Austria*

⁴*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS), Moscow, 117997 Russia*

*e-mail: ovcher@mail.ru

An approach was developed and tested to spatial assessment of soil organic carbon stock in uniform groups of soil horizons i.e. mineral and organogenic (including litter, peat deposits, and peaty horizons of semihydromorphic soils). Estimation algorithm allowed us to utilize various datasets with different scales, both spatially and attributive sparse data of different veracity, which complemented each other. The approach allowed to create and combine a series of maps of different accuracy and scale, including coarse scale, covering the entire country and more detailed for regions well covered with field measurements. Using these maps, the total organic carbon amount and its distribution over different pools in the 30 cm topsoil layer for the country and (more detailed) three administrative regions of European Russia were estimated. The soil organic carbon pool of mineral soil horizons was estimated at 101 Gt C, which corresponded to 62% of the total organic carbon stock within the 0–30 cm layer, 38% is allocated in organogenic horizons, the litter – rapidly decomposing organic pool – accounts for 9% of the total carbon reserves, 29% is allocated in peat deposit and peaty horizons of semihydromorphic soils. The specific carbon reserves in the 30 cm soil layer gradually increase from the north to the south, from 87 t ha⁻¹ in the Vologda region to 91 t ha⁻¹ in the Moscow region and further to 109 t ha⁻¹ in the Rostov region. The share of organic horizons in the total carbon stock decreases from North to South. Information on the size and structure of organic carbon stock may facilitate more reliable assessments of soil resistance to natural and anthropogenic changes and the development of regionally specific land use strategies.

Keywords: structure of soil carbon stock, bulk density, soil mapping