

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ВОЗДЕЛЫВАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ В КОНТЕКСТЕ СТРАТЕГИИ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ

© 2023 г. В. А. Романенков^{a, b}, Ю. Л. Мешалкина^{a, c, *}, А. Ю. Горбачева^a,
В. А. Добровольская^a, А. Н. Кренке^d

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

^cРГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

^dИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: jlmesh@list.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 09.04.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Потенциал секвестрации органического углерода в верхнем 30-сантиметровом слое почв возделываемых земель для Европейской территории России оценен на основе почвенно-экологического районирования с использованием Ротамстедской углеродной динамической модели RothC и общедоступных глобальных баз данных, таких как массив климатических данных Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020, коллекция карт SoilGrids250m версия 2.0, а также временной ряд вегетационных индексов NDVI и EVI, полученных со спутника MODIS (MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices). Для оценки современных запасов углерода использованы данные национальной карты запасов почвенного органического углерода на глубине 0–30 см. Методика работы соответствовала унифицированной методологии ФАО по составлению Глобальной карты секвестрации почвенного углерода. Средняя скорость секвестрации углерода по природным зонам при неизменном хозяйствовании изменялась от 0.076 до –0.002 т/га в год, убывая от зоны северной тайги к полупустыне. Увеличение поступления углерода на 5% при внедрении углеродосберегающих технологий может обусловить рост секвестрации углерода в два раза, а увеличение на 20% – в пять раз. При росте поступления углерода в почву отмечено двукратное возрастание скорости секвестрации углерода от южной тайги с максимумом в зоне лесостепи, с последующим снижением в 1.5 раза и более в степной и сухостепной зоне. Используемая методика позволяет с пространственным разрешением 1 км выделить контуры, обладающие наибольшим и наименьшим потенциалом изменения запасов углерода при внедрении углеродосберегающих технологий.

Ключевые слова: секвестрация углерода, углеродосберегающие технологии в сельском хозяйстве, изменение климата, модель RothC, сельскохозяйственные земли, баланс углерода, инициатива “4 per 1000”

DOI: 10.31857/S2587556623040106, **EDN:** ZPYRTE

ВВЕДЕНИЕ

При переходе России на траекторию низкоуглеродного развития оценка запасов и мониторинг изменений содержания углерода в почве является важным шагом к принятию обоснованных решений, способствующих повышению плодородия почв, сокращению деградации земель, и тем самым позволяющих обеспечить продовольственную безопасность страны.

Одной из перспективных стратегий низкоуглеродного развития является компенсация выброса парниковых газов путем секвестрации углерода почвами. Привлекательность секвестрации почвенного углерода заключается в том, что запас

углерода в возделываемых землях снижен по сравнению с естественными экосистемами (Paustian et al., 2019a). Различные авторы оценивают обычно потери в 20–40% от первоначального запаса за 50–200 лет использования пашни (Романенков, 2011; Masson-Delmotte et al., 2021). В недавнем исследовании (Иванов и др., 2021a) приведены оценки средних потерь в 20% по сравнению с нативными пахотными почвами России в слое 0–30 см. Запасы органического углерода в почвах сельскохозяйственных земель России оцениваются как 16.8 Гт С в верхних 0.3 м и 28.0 Гт С в верхнем метровом слое (Minasny et al., 2017).

При внедрении технологических приемов, обеспечивающих накопление углерода в органическом веществе растений с последующей трансформацией в почвенное органическое вещество возможно ожидать длительного периода увеличения запасов почвенного углерода – от 10 до нескольких сотен лет (Когут, Семенов, 2020). Другим важным обстоятельством является сохранение структуры землепользования, поскольку удаление CO_2 из атмосферы не требует, например, залесения сельхозземель, что актуально при конкуренции за земельные ресурсы. Увеличение запасов углерода также обеспечивает дополнительные преимущества, поскольку изменяет целый ряд почвенных процессов, связанных с трансформацией органического вещества – ведущего макропроцесса в почве по количеству перерабатываемого вещества и выделяемой энергии, что обуславливает рост почвенного плодородия.

Количественная оценка эффективности данного процесса получила развитие после Парижской конференции по климату 2015 г. и известна как глобальная инициатива “4 промилле” или “4 на 1000”. Она предполагает возможность компенсации антропогенных выбросов углерода в атмосферу за счет прироста запасов почвенного углерода в верхних 40 см почвы в среднем на 0.4% в год, что глобально соответствует примерно 12.6 Гт CO_2 /год и компенсирует большую часть годового прироста CO_2 в атмосфере (15.8 Гт CO_2 /год) (Paustian et al., 2019a). Сразу после появления инициативы возникли бурные обсуждения относительно достижимости данной цели различными почвами, в том числе почвами пахотного фонда, однако она привлекла внимание к ключевой роли почв в секвестрации углерода как потенциальной стратегии смягчения последствий изменения климата. В публикации (Иванов, Столбовой, 2019) приводятся оценочные расчеты, показывающие, что цель инициативы “4 промилле” не может быть достигнута в России полностью и предлагается трансформировать ее в национальную цель “2 промилле” с периодом реализации в течение 12–15 лет, после чего прогнозируется насыщение пахотных почв углеродом.

Наиболее распространенным в настоящее время способом оценки и мониторинга баланса углерода и парниковых газов на национальном уровне является эмпирическое моделирование для прогноза изменений запасов органического вещества почвы. В качестве *первого* уровня таких расчетов используются предложенные экспертно МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, IPCC) (Watson et al., 2000) данные о запасах углерода в эталонных естественных экосистемах и коэффициенты изменения запасов для возделываемых земель, стратифицированные по климату и типам почв,

оценивающие изменение запасов во времени при смене способов землепользования и технологий (Paustian et al., 2019a).

Корректировка на основе имеющейся внутри страны информации позволяет перейти на *второй* уровень оценки с “использованием более точной информации о почвах, климате и наземном покрове, чем рекомендовано экспертами МГЭИК для уровня 1” (Иванов и др., 2021a). В качестве источника такой информации в России предложено использовать, например, почвенную карту РФСФР масштаба 1 : 2500000.

Хотя динамические углеродные модели используются в основном как инструмент для фундаментальных исследований, они все чаще применяются и в национальных масштабах для целей инвентаризации почвенного углерода и парниковых газов в почве. Подобный подход позволяет перейти к *третьему* уровню анализа как составной части схемы организации работы по созданию Национальной системы наблюдения и учета баланса углерода на сельскохозяйственных и лесохозяйственных землях России (Иванов и др., 2021a, б). Возможность использования моделей основана на их настройке по данным наземных мониторинговых и полевых исследований, использующих пространственно распределенные данные о почве, климате и управляющих воздействиях, в том числе дистанционные и данных длительных полевых опытов (Иванов и др., 2021a; Harden et al., 2018; Paustian et al., 2019b). Такие модели могут обеспечить надежную и недорогую количественную оценку изменений запасов углерода в почве и потоков парниковых газов для анализа на национальном уровне, поддержке национальных программ и международных соглашений. Одной из наиболее используемых моделей является Ротамстедская углеродная модель RothC, в связи с чем пространственная версия данной модели предложена ФАО для составления Глобальной карты секвестрации почвенного углерода (Technical ..., 2020).

Успешное использование модели RothC для описания динамики углерода в длительных полевых опытах с удобрениями, проводящихся на территории России, дало основание для ее идентификации на более обширных региональных данных в системе мониторинга состояния пахотных земель Европейской территории России (ЕТР) (Романенков и др., 2009; Романовская, 2006; Романовская, 2007). Модель использовалась для оценки баланса углерода пахотных земель России, в том числе выбывших из сельскохозяйственного оборота. В материалах “Второго оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях для территории Российской Федерации” (Второй ..., 2014) баланс углерода пахотных почв ЕТР в XXI в.

(раздел 4.5.4.2) также был рассчитан на основе модели RothC.

Мониторинг и прогнозирование запасов почвенного органического углерода актуальны для ЕТР в условиях изменения климата. Согласно Третьему оценочному докладу об изменениях климата и их последствий на территории Российской Федерации (2022), “сельскохозяйственные районы ЕТР, и особенно ее южные области, более чувствительны к современному потеплению, чем районы Урала, Сибири и Дальнего Востока”. Европейская часть России занимает около 390 млн га: 23% территории страны и 35% территории всей Европы (Россия ..., 2020). На ней находятся наиболее плодородные и ценные земли. По нашим оценкам 74.6% (82.8 млн га) пахотных (активно обрабатываемых) земель страны находятся на ее Европейской части и занимают 24% от общей площади ЕТР. Учитывая большую площадь пахотных земель, усовершенствованные методы управления, позволяющие сохранять и увеличивать содержание углерода в почве, могут оказать значительное влияние на национальный углеродный бюджет.

При внедрении агротехнологических приемов, направленных на связывание органического углерода в почве, таких как прямой посев для минимизации воздействия на почвы, мульчирование поверхности почвы, возделывание покровных культур, широкое применение различных биологических методов, смешанные (уплотненные) посевы, применение навоза или компоста — две трети потерь могут быть компенсированы. Поскольку накопление углерода в почве происходит нелинейно, содержание углерода в почве достигает нового равновесного состояния в течение нескольких десятилетий, в связи с чем влияние устойчивых методов управления почвой может быть заметно только в среднесрочной или долгосрочной перспективе (Herzfeld et al., 2021). В исследованиях, проведенных на различных пахотных почвах мира, было показано, что скорости поглощения органического углерода почвой могут достигать от 0.2 до 0.5 т С/га в год (Chernova et al., 2020). Однако реальный потенциал для секвестрации углерода почвами Европейской территории России пока еще недостаточно изучен.

Задачей данной работы была оценка потенциала секвестрации органического углерода в верхнем 30-сантиметровом слое пахотных почв для территории ЕТР на основе моделирования в соответствии с методикой ФАО по составлению Глобальной карты секвестрации почвенного углерода¹. Карта может быть использована для первичной оценки достижимости задач по секвестрации

углерода и выделения приоритетных областей с высоким потенциалом накопления углерода почвы при внедрении углеродосберегающих технологий (Technical ..., 2020). В этой связи исследование соответствует выполнению задачи 6.5 “Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.” — “моделирование процессов, происходящих в климатической системе, включая моделирование последствий различных форм активного воздействия на эти процессы в глобальном, региональном и локальном масштабах”². Согласно интенсивному сценарию низкоуглеродного развития Стратегии предполагается рост поглощающей способности управляемых экосистем, в том числе за счет внедрения климато-ориентированных технологий и практик, позволяющих обеспечить дополнительное депонирование углерода в почвах сельскохозяйственных земель и сокращение его потерь (Виноградова и др., 2022).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Расчеты проводились для отдельных зон почвенно-экологического районирования России (Урусевская и др., 2020), для субъектов и федеральных округов РФ ЕТР с разрешением в 1 км. Прогноз проводился на 20-летний период.

Создание маски пахотных земель

На первом этапе работы была получена карта пахотных земель России, включающую поля интенсивного сельскохозяйственного использования и исключая заброшенные сельскохозяйственные угодья. Она была разработана на основе вероятностной карты доли пашни в каждом километровом пикселе и сформирована путем синтеза двух масок на основе оригинальной методики (Кренке, 2020). Первая маска данных была сделана для проекта глобальной продовольственной безопасности (Global Food Security-Support Analysis Data at 30 m, GFSAD30)³. Карта содержит данные о пахотных землях и водопользовании с разрешением 30 м для всего земного шара. Вторая маска является слоем “используемые и зарастающие сельскохозяйственные земли” Карты неиспользуемых сельхозземель, потенциально пригодных для выращивания леса (Глушков и др., 2019).

² Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р. <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3f-WO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения 04.05.2023).

³ <https://www.usgs.gov/centers/western-geographic-science-center/science/global-food-security-support-analysis-data-30-m> (дата обращения 21.11.2022).

¹ <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-soil-organic-carbon-sequestration-potential-map-gsocseq/en/> (дата обращения 24.11.2022).

Входные данные

Источником *климатических данных* послужил массив Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020 Отдела исследования климата Университета Восточной Англии⁴ (Harris et al., 2020). Ежедневные данные имеют пространственное разрешение около 5 тыс. га (0.5/0.5 градуса). По ним были рассчитаны среднемесячные значения температуры (°C), осадков (мм) и эвапотранспирации (мм) по Пенманну–Монтейну за период с 1980 по 2020 г.

Данные по *содержанию фракции ила* (частицы размером менее 0.002 мм) были получены из коллекции карт свойств почв мира SoilGrids250m версия 2.0 (Poggio et al., 2021).

Расчеты поступающего в систему органического вещества были основаны на модели MIAMI, предложенной для оценки поступающего органического вещества при моделировании изменений климата (Gottschalk et al., 2012; Lieth et al., 1975). Модель рассчитывает чистую первичную продукцию (Net Primary Production – *NPP*) как минимальное значение из уравнений зависимости *NPP* от среднегодовой температуры и среднегодовой суммы осадков:

$$NPP = \min(NPP_T, NPP_P), \quad (1)$$

$$NPP_T = \frac{3000}{1 + e^{1.315 - 0.119T}}, \quad (2)$$

$$NPP_P = 3000 \times 1 - e^{-0.000664P}. \quad (3)$$

Величина *NPP* используется для расчета количества растительных остатков, исходя из предположения о пропорциональной связи количества органических остатков и чистой первичной продукции (Smith et al., 2005; Technical ..., 2020):

$$C_t = \frac{C_{t-1}NPP_t}{NPP_{t-1}}, \quad (4)$$

где *C* – поступление углерода в год, т С/га, *t* – моделируемый период.

Сценарии поступления органических остатков в почву

Моделирование секвестрации углерода проводилось по 4 гипотетическим сценариям, что дало возможности сопоставить прогнозные результаты при применении углеродсберегающих технологий различной интенсивности. Описанным выше способом расчет поступившего углерода растительных остатков проводился для сценария неизменного хозяйствования (Business As Usual – BAU)). Применение углеродсберегающих технологий учитывалось в остальных трех сценариях SSM1-SSM3 (SSM – Soil Sustainable Manage-

ment), предполагающих увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%, соответственно.

Этапы моделирования

В качестве начальной точки для моделирования запасов углерода на 2000 г. была использована национальная карта *запасов почвенного органического углерода* в т С/га на глубине 0–30 см (Чернова и др., 2021).

Моделирование динамики запасов углерода подразумевает три этапа.

1. Фаза “инициализации” (SPIN UP). Моделирование до состояния равновесия. Запас углерода брался равным величине, отображаемой на Глобальной карте запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (GSOC17) (Technical ..., 2020). В качестве неизменных почвенных, растительных, сельскохозяйственных и климатических условий брались среднееголетние величины за каждый месяц года за период 1980–2000 гг. Изначальное поступление углерода с растительными остатками считается равным 1 т С га/год и для него рассчитывалось равновесное соотношение пулов углерода в почве (Smith et al., 2005).

2. “Временная гармонизация” (WARM UP). Гармонизация данных проводилась на основе фактических погодных условий 2000–2020 гг. и реального ежегодного поступления растительных остатков в почву. На выходе было получен запас почвенного органического углерода, соответствующий настоящему времени (2020 г.).

3. Фаза “прогноза” (FORWARD). Прогноз изменения запасов почвенного углерода, а также его скорости в 2020–2040 гг. был рассчитан согласно четырем ранее описанным сценариям.

Создание пакета карт секвестрации углерода

Построение карт потенциала секвестрации почвенного органического углерода проводилось согласно единой методике, разработанной ФАО и изложенной в Техническом руководстве (Technical ..., 2020).

В результате работы получен пакет карт, состоящий из карты запаса углерода в, так называемый, нулевой период, за который условно принят 2020 г., 18 карт прогноза запаса углерода, исходя из различных стратегий землепользования, и 10 карт, оценивающих неопределенности прогнозирования.

Основными картами были карты о величине **скорости секвестрации почвенного углерода** (т С/га в год), которая рассчитывалась как разница между запасами почвенного углерода в 2040 г. и в нулевой период (в 2020 г.), а затем делилась на период в 20 лет.

⁴ <https://crudata.uea.ac.uk> (дата обращения 22.11.2022).

Таблица 1. Суммарные по площади показатели скорости секвестрации почвенного углерода Мт С/год по федеральным округам при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате принятия реализации технологий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), предполагающих увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%, соответственно

Федеральный округ	Площадь пашни, 2020 г., тыс. га	Сценарии хозяйствования			
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3
Приволжский	34.75	1.63	2.86	4.03	6.37
Северо-Западный	0.96	0.03	0.09	0.11	0.17
Северо-Кавказский	5.91	0.09	0.31	0.54	1.00
Центральный	22.56	1.23	2.15	3.00	4.68
Южный	18.60	-0.16	0.64	1.31	2.66

Три карты содержали данные относительной скорости секвестрации почвенного углерода (т С/га в год) как разницы запасов почвенного углерода в 2040 г. по соответствующему сценарию SSM и по сценарию BAU, деленная на период в 20 лет. К вспомогательным картам также отнесены: 4 карты запасов почвенного углерода (т/га) в 2040 г. для каждого сценария; 4 карты абсолютных различий в запасах почвенного углерода (т/га) в 2040 г. для каждого сценария и 3 карты относительных различий в запасах почвенного углерода (т/га) для сценариев SSM.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тенденции накопления почвенного углерода в пахотных почвах ЕТР

Суммарная абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода пахотных почв ЕТР составила 2.827 Мт С/год для сценария неизменного хозяйствования, а для трех других сценариев (SSM1–SSM3), может достигать 6.052, 8.991, 14.863 Мт С/год, соответственно. При этом увеличение на 5% поступления в почву органического углерода приведет к увеличению секвестрации углерода в два раза, а на 20% – в пять раз. Таким образом, в целом применение углеродосберегающих технологий на территории ЕТР более чем оправдано. В табл. 1 приведены абсолютные показатели скорости секвестрации почвенного углерода по федеральным округам. Всего пахотные почвы ЕТР за 20 лет потенциально могут накопить от 56.530 Мт при сценарии BAU, при SSM1 – до 121.048 Мт, при SSM2 – до 179.814 Мт и при SSM3 – до 297.258 Мт.

Детализация секвестрации углерода по округам и областям

Видно, что при реализации сценария неизменного хозяйствования потери запасов углерода почвы наблюдаются только в Южном федеральном округе.

В этом округе применение и внедрение различных углеродосберегающих агротехнологий крайне необходимо. Во всех остальных случаях происходит накопление углерода. Наибольший интерес для реализации потенциала секвестрации углерода представляют Приволжский и Центральный федеральные округа. Небольшие значения для Северо-Западного и Северо-Кавказского федеральных округов связаны с относительно небольшой площадью пашни в этих округах.

При детализации по областям (рис. 1 и 2) видно, что секвестрация углерода в пахотных почвах ЕТР носит зональный характер. При сценарии неизменного хозяйствования в ряде областей преобладают процессы его потерь в пахотных почвах. Это – Воронежская область, Ростовская область, Республика Калмыкия, Астраханская область, Калининградская область, Краснодарский край, Республика Крым и Республика Адыгея.

Тульская, Орловская и Тверская области обладают наибольшим потенциалом секвестрации углерода при неизменном хозяйствовании. На рис. 1 и 2 видно, что любая технология SSM приведет к увеличению запасов почвенного органического углерода по сравнению со сценарием BAU. Наибольшим потенциалом секвестрации углерода при увеличении поступления растительных остатков в почвы обладают следующие области: Волгоградская область, Самарская область, Краснодарский край, Ставропольский край, Республика Башкортостан, Республика Татарстан, Ростовская область, Саратовская область, Оренбургская область.

Потенциал секвестрации углерода возрастает от южной тайги к зоне широколиственных лесов (табл. 2), достигая там максимума, а затем вновь снижается в степной и сухостепной зоне.

Секвестрация углерода пахотными почвами по почвенно-экологическим зонам

По отклику на применение углеродосберегающих технологий различной интенсивности все

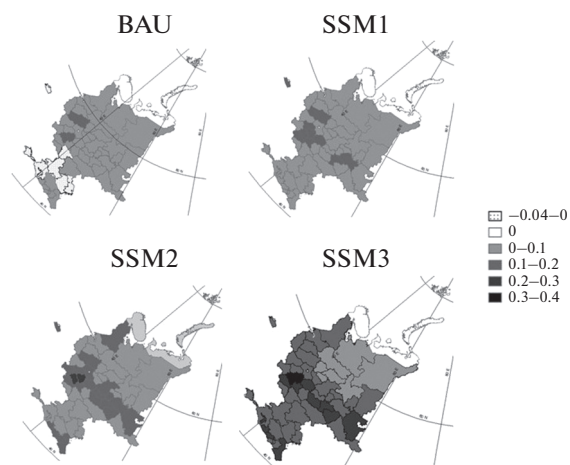


Рис. 1. Средние показатели скорости секвестрации почвенного углерода т С га/год по областям ЕТР при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%, соответственно.

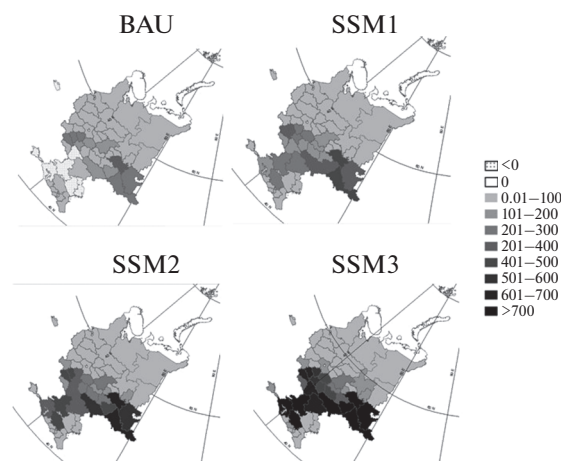


Рис. 2. Суммарные по контуру показатели по областям ЕТР скорости секвестрации почвенного углерода Кт С га/год при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%, соответственно.

почвенно-экологические зоны можно условно разделить на 3 группы. Зоны обыкновенных и южных черноземов степи, темно-каштановых и каштановых почв сухой степи и светло-каштановых и бурых почв полупустыни демонстрируют высокую “отзывчивость” на применение сценариев, где увеличивается поступление углерода растительных остатков в почву. Подзона подзолистых почв средней тайги и зона дерново-подзолистых почв южной тайги показывают наименьшие изменения при внедрении углеродосберега-

ющих технологий. Остальные зоны проявляют промежуточную тенденцию.

Для всех карт была оценена неопределенность картографирования согласно методике ФАО (Technical ..., 2020). Она представлена в виде половины 95% доверительного интервала, деленной на среднее значение показателя. Карты, созданные по описанной процедуре, дают неопределенность прогноза модели от 9 до 25–26%. Среднее значение неопределенности лежит в интервале 14–17% (рис. 3).

Таблица 2. Средние показатели скорости секвестрации почвенного углерода т С га/год по почвенно-экологическим зонам ЕТР при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате принятия реализации технологий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), предполагающих увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%, соответственно

Зона или подзона		Сценарии хозяйствования			
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3
Г	Подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги	0.076	0.094	0.120	0.171
Д	Подзона подзолистых почв средней тайги	0.057	0.062	0.074	0.098
Е	Зона дерново-подзолистых почв южной тайги	0.043	0.068	0.083	0.115
Л	Зона серых лесных почв лиственных лесов	0.069	0.098	0.124	0.175
М	Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	0.055	0.099	0.140	0.225
Н	Зона обыкновенных и южных черноземов степи	0.006	0.041	0.080	0.154
О	Зона темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	0.013	0.046	0.076	0.132
Р	Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	-0.002	0.042	0.073	0.139

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты можно рассматривать как более детальную информацию о потенциале секвестрации углерода пахотными почвами ЕТР с учетом зональных особенностей почв, что показывают региональные оценки. Первоначально оценки, включающие территорию ЕТР на вторую половину XXI в. даны в работе (Dankers et al., 2010). В ней обсуждается возможное снижение запасов углерода пахотными почвами России. Основными факторами длительного тренда снижения запасов углерода почвами, даже на фоне среднесрочного его повышения, являются возможное снижение урожайности при увеличении вероятности засух в 2020–2070 гг., прогнозируемых с использованием глобальной климатической модели HadCM3 (Alcamo et al., 2007; Falloon et al., 2009), а также увеличение потерь углерода почвы за счет интенсификации респирации при потеплении. Более детальное исследование (Herzfeld et al., 2021) по 4 глобальным климатическим моделям HadGEM2_ES, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MIROC5 и 2 эмиссионным сценариям RCP2.6 и RCP8.5 также прогнозируют потерю органического углерода большинством пахотных почв ЕТР к концу XXI в. со скоростью 0.1–0.5 т/га в год, за исключением технологий с оставлением растительных остатков в Центрально-Черноземном районе, а также части Северного Кавказа, где поддерживается запас углерода, близкий к состоянию на начало моделирования – 2005 г. В то же время для стран Западной Европы и отдельных территорий Восточной Европы при реализации тех же технологий прогнозируется обеспечение накопления углерода за тот же период со скоростью 0.1–0.5 т/га в год. Региональные подходы базируются на оценках урожайности сельскохозяйственных культур. За 2013–2017 гг. рост урожайности озимой пшеницы и кукурузы в России составил 37 и 35%, соответственно, по сравнению с 2003–2007 гг. (Pinke et al., 2022), что значительно повышает возможности управления органическим углеродом почвы даже при сохранении современных технологий хозяйствования.

Использованный в настоящем исследовании подход дает возможность рассмотреть зональные особенности управления запасами углерода пахотных почв. Согласно прогнозам, полученным по глобальной климатической модели HadCM3 и модели RothC (Romanenkov et al., 2007), для почв при неизменном хозяйствовании северо-западная часть ЕТР способна накопить за 35 лет 4–8 т/га С, то есть около 0.11–0.23 т/га в год, при практически постоянной скорости секвестрации углерода до 2030-х гг., после чего происходит замедление или снижение темпов накопления органического вещества. Для значительной части контуров Московской, Калужской, Брянской, Костромской,

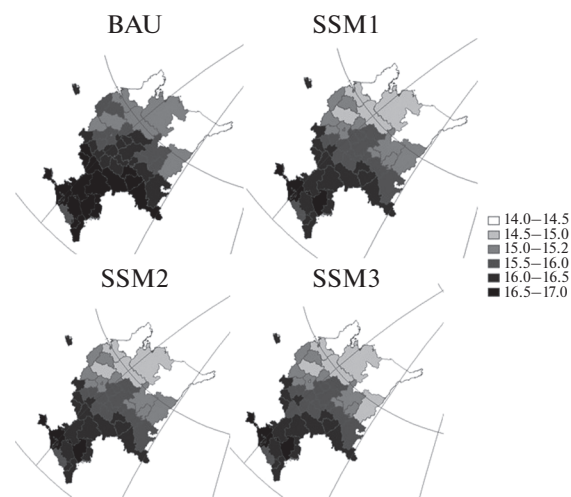


Рис. 3. Средняя неопределенность скорости секвестрации почвенного углерода по областям ЕТР при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20%, соответственно. Неопределенность была представлена в виде половины 95% доверительного интервала, деленной на среднее значение показателя.

Кировской, Ивановской и Владимирской областей ожидается поддержание запасов углерода. Полученные в настоящем исследовании данные о возможности накопления в среднем около 1 т/га С агродерново-подзолистыми почвами зоны средней и южной тайги за 20-летний период соответствуют накоплению примерно 3–5% запасов углерода средне- и тяжелосуглинистыми разностями в типичных агроценозах. Такое изменение находится на уровне точности мониторинговых исследований.

Необходимо отметить, что прямое сопоставление результатов, полученных в данном исследовании и расчетов, выполненных ранее для пахотных почв ЕТР для прогноза изменения запасов почвенного органического углерода до 2070 г. (Романенков и др., 2009), вряд ли возможно, несмотря на использование одной и той же динамической модели RothC. Основными отличиями ранее проведенного исследования при работе модели являлся расчет поступления углерода: он оценен по разным эмиссионным сценариям на основе расчетов урожайности динамической моделью Климат–Почва–Урожай с учетом влияния изменения климата и оптимизации условий минерального питания. Адаптационные сценарии были рассчитаны с помощью экономической региональной модели.

Для черноземной зоны (обыкновенные и южные подтипы) прогнозируемое накопление не превысит 0.15 т/га или примерно 0.2–0.3% от об-

щих запасов почвенного углерода за 20 лет (см. табл. 2). Это означает, что понижения урожайности одной культуры в севообороте ниже планируемой (при неблагоприятном вегетационном периоде, поражении вредителями или болезнями) будет достаточно для снижения накопленных ранее запасов углерода. Из анализа региональных прогнозных оценок скорости секвестрации углерода, приводимых (Herzfeld et al., 2021) до конца XXI в. видно, что при неизменных запасах углерода разброс значений скорости секвестрации углерода составляет ± 0.1 – 0.15 т/га. Прогноз для черноземной зоны, полученный в работе (Romanenkov et al., 2007), оценивает данную область как территорию с потенциальными потерями углерода, составляющую до 0.06 – 0.17 т С/га в год и выше для Центральной Черноземной зоны ЕТР. Тем не менее, прогнозируемое в работе (Romanenkov et al., 2007) снижение наблюдается главным образом после 2040 г., что частично может объясняться динамикой биоклиматического потенциала, достигающего максимальных значений в этот период, что влияет на количество поступающего в почву углерода с растительными остатками, а также изменением условий для минерализации органического вещества. Можно предполагать, что в период 2020–2040 гг. абсолютные потери будут существенно меньше.

Прогнозные оценки скорости секвестрации углерода для неизменного хозяйствования (см. рис. 1) показывают, что только Тверская область может отвечать критерию 4 промилле (Minasny et al., 2017) в 2020–2040 гг., при условии начального запаса углерода 25 т/га и ниже, что может соответствовать легким агродерново-подзолистым почвам типичных агроценозов.

Секвестрация углерода при альтернативных сценариях хозяйствования SSM2 и SSM3 может возрасти в 2.5–2.7 раз для агродерново-подзолистых и агросерых почв и более чем в 4 раза для агрочерноземов лесостепи. Эти результаты частично совпадают с прогнозами в работе (Romanenkov et al., 2007), где скорость депонирования для восточной части Центрального федерального округа (Ярославская, Костромская, Ивановская, Владимирская, Рязанская области), а также в таких приволжских регионах, как Ульяновская область и Мордовская республика может возрасти до 0.14 т/га в год до 2035 г. В случае реализации сценариев SSM2 и SSM3 расширяется территория, на которой возможна дополнительная секвестрация углерода, но условие 4 промилле обеспечивается в основном при сценарии SSM3 для ряда территорий Восточной части Центрального и Приволжского ЦО, находящихся в зоне лесостепи (см. рис. 1). Начальный запас углерода в выщелоченных и оподзоленных черноземах должен составлять около 60 т/га. На Северном Кавказе увеличение секвестрации углерода прогнозируется в

республиках Дагестан, Карачаево-Черкессия и Адыгея, но, вероятно, оно составит ниже 4 промилле, поскольку скорость секвестрации углерода даже при сценарии SSM3 агрокаштановыми и агрочерноземными почвами данных территорий ниже, чем требуется при ожидаемых запасах углерода в них.

Полученные результаты согласуются с оценками скорости секвестрации углерода при внедрении различных углеродсберегающих приемов в агротехнологиях, приводимыми в работе (Lugato et al., 2014) для территории Европы. Оценки составляли 0.1 – 0.25 т/га в год в 2020 г., снижаясь к 2050 г. до 0.05 – 0.15 т/га.

Важным фактором является доля углерода почвы, потерянная в результате распашки, поскольку почвы, сравнительно более бедные органическим веществом, будут накапливать его быстрее в сходных природно-климатических условиях при увеличении количества поступающего органического материала. В исследовании (Chernova et al., 2020) потери углерода из естественных почв при распашке для различных территорий ЕТР оценены в 24% для южной тайги и степной зоны и 37% для лесостепи. Данное обстоятельство может также влиять на наибольшее увеличение скорости секвестрации углерода, прогнозируемое при внедрении сценария SSM3 по сравнению с BAU в зоне лесостепи.

Методика, предложенная для расчетов потенциала секвестрации органического углерода верхним 30-сантиметровым слоем пахотных почв ФАО и использованная в настоящей статье, не может считаться исчерпывающей для национальных расчетов, поскольку методика ставит задачей унифицированный расчет Глобальной карты секвестрации почвенного углерода. В частности, проблемными моментами моделирования является отсутствие связи прогнозной урожайности культур с агроклиматическими условиями, задаваемыми обычно взаимосвязью данных эмиссионных сценариев и динамическими моделями роста и развития культур, а также невозможность проверки эффективности адаптационных углеродсберегающих приемов в агротехнологиях и оценка длительности такого процесса (Lugato et al., 2014; Pinke et al., 2022; Romanenkov et al., 2007; Romanenkov et al., 2019). Для учета таких факторов необходимо получить зависимости прироста урожайности в ответ на воздействие, учитывающие зональные почвенно-климатические особенности и специфику отклика отдельных групп культур, а затем скорректировать оценки поступления углерода с растительными остатками в почву. При использовании любой динамической углеродной модели это требует проведения отдельных исследований, уточняющих имеющиеся региональные оценки (Paus-tian et al., 2019b).

Высокий потенциал накопления органических веществ пахотными почвами может быть достигнут только при применении комплекса агротехнологических решений, включающих не только управление пожнивными остатками, но и применение органических удобрений и мелиорантов, включая биоуголь, осадки сточных вод, компост, а также внедрение приемов почвозащитной обработки, что позволяет приблизиться к обеспечению цели 4 промилле (Amelung et al., 2020; Herzfeld et al., 2021).

Тем не менее, при наличии ранее полученных оценок потенциала секвестрации, базирующихся на наземных наблюдениях, показавших, что возможность управления запасами органического углерода почв в сельскохозяйственном секторе производства географически зависима (Romanenko et al., 2007), реализована возможность сравнения их с новыми данными.

Проведенное исследование может явиться основой для расширенного прогноза при включении дополнительной информации, способной уточнить локальный потенциал секвестрации углерода. Выделение регионов, где стратегия устойчивого управления почвенными ресурсами обеспечит наибольшее накопление углерода в почве, должно базироваться на анализе почвенных ареалов как основных картографических единиц, уточняясь при учете местных условий, в том числе возможностей управления поступлением растительных остатков в используемых агротехнологиях, устойчивостью урожайности, а также экономической обоснованности адаптационных решений (Amelung et al., 2020).

ВЫВОДЫ

Для ЕТР оценена потенциальная возможность секвестрации углерода пахотными почвами в слое 0–30 см в 2020–2040 гг. Прогноз и полученная на его основе серия карт базируется на анализе почвенных ареалов как основных картографических единиц. Перспективной для секвестрации почвенного углерода территорией, на которой целесообразно в первую очередь планировать увеличивать урожайность, либо соотношение побочной к основной продукции является зона лесостепи, где возможно обеспечение устойчивой секвестрации углерода в рассматриваемый 20-летний период. Тем не менее, при стратегии неизменного хозяйствования невозможно достичь показателя 4 промилле, обеспечивается накопление примерно 3–5% запасов почвенного углерода средне- и тяжелосуглинистыми разностями агроденуподзолистых почв в типичных агроценозах таежной зоны. Увеличение поступления углерода на 5% может обусловить рост секвестрации углерода в два раза, а увеличение на 20% – в пять раз.

Южнее, в зоне распространения агрочерноземов, можно ожидать поддержания текущих запасов углерода при условии сохранения современного уровня продуктивности агроценозов до 2040 г. В последнем случае возможно обеспечение условия 4 промилле для ряда территорий восточной части Центрального и Приволжского федеральных округов. Данная стратегия увеличения поступления растительных остатков оказывается также благоприятной для накопления органического углерода в зоне степи и сухой степи, в количестве 2.5–3 т С/га в течение 20 лет. Тем не менее, полученные оценки можно рассматривать как потенциальные, поскольку проанализированные сценарии хозяйствования не могут обеспечить достижение цели 4 промилле для большинства пахотных территорий ЕТР, то есть рассматриваться как агротехнологии с негативной эмиссией парниковых газов в соответствии с целями по снижению климатических изменений в соответствии с Парижским соглашением 2015 г. Полученные результаты можно рассматривать как оценку потенциальной возможности секвестрации, которая может быть уточнена на основе областных и региональных прогнозов накопления углерода почвами при применении стратегии устойчивого управления почвенными ресурсами. Оценка эффективности дополнительного комплекса агротехнологических приемов, обеспечивающих усиление накопления углерода почвами, должна отрабатываться при учете местных условий в используемых агротехнологиях. Одним из перспективных показателей в подобных оценках может стать учет доли потерянного за время распада почвенного углерода как показателя, влияющего на изменение скорости секвестрации углерода при адаптационных решениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

FUNDING

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and

the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration number: 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова В.В., Глезер О.Б., Грачева Р.Г. и др.* Воздействие изменения климата на человеческий потенциал, экономику и экосистемы: Докл. к XXIII Ясинской (Апрельской) междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 2022 г. Нац. исслед. ун-т “Высшая школа экономики”. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 76 с.
- Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
- Глушков И.В., Лупачик В., Прищепов А.В., Потапов П.В., Пукинская М.Ю., Ярошенко А.Ю., Журавлева И.В.* Картирование заброшенных земель в восточной Европе с помощью спутниковых снимков Landsat и Google Earth Engine // Современная наука о растительности: Материалы науч. конф. (Москва, октябрь 2019). М., 2019. С. 35–37.
- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 108. С. 175–218. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М.* Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 5–32. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
- Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Инициатива “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
- Когут Б.М., Семенов В.М.* Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103–124. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
- Кренке А.Н.* Выявление инвариантных состояний агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации // Принципы экологии. 2020. № 3. С. 16–27. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2020.10942>
- Романенков В.А.* Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах Европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов): Дисс. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. 403 с.
- Романенков В.А., Романенко И.А., Рухович Д.И., Королева П.В., Сиротенко О.Д., Шевцова Л.К.* Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России / ред. В.Г. Сычев. М.: ВНИИА, 2009. 95 с.
- Романовская А.А.* Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
- Романовская А.А.* Оценка неопределенности инвентаризации выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2007. Т. XXI. С. 44–57.
- Россия в цифрах. 2020: Краткий стат. сб. / под ред. П.В. Малкова. М.: Росстат, 2020. 550 с.
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / общ. ред. И.А. Шумаков. СПб.: Научное издание технологии, 2022. 124 с.
- Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А.* Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М-6 1 : 8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте: Учеб. пособие / отв. ред. И.С. Урусевская. М.: МАКС Пресс, 2020. 100 с.
- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко 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>
- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A.* A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia // Global Environ. Change. 2007. Vol. 17. P. 429–444. : <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006>
- Amelung W., Bossio D., de Vries W., Kögel-Knabner I. et al.* Towards a global-scale soil climate mitigation strategy // Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 5427. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A.* Historical trends in the amount and structure of organic carbon stocks in natural and managed ecosystems in European Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 438. № 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012005>
- Dankers R., Anisimov O., Falloon P., Gornall J., Reneva S., Wiltshire A.* Climate impacts in Russia: changes in carbon storage and exchange. UK: Met Office Hadley Centre, 2010. 112 p.
- Falloon P., Smith P., Betts R., Jones C.D., Smith J., Hemming D., Challinor A.* Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in cropland soils – climate opportunities and threats // Climate Change and Crops / Singh S.N.(Ed.). Berlin: Springer, 2009. Chapter 5. P. 81–111.
- Gottschalk P., Smith J.U., Wattenbach M. et al.* How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios // Biogeosciences. 2012. Vol. 9. № 8. P. 3151–3171. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>
- Harden J.W., Hugelius G., Ahlstrom A. et al.* Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter // Global Change Biology. 2018. Vol. 24. P. e705–e718. <https://doi.org/10.1111/gcb.13896>
- Harris I., Osborn T.J., Jones Ph., Lister D.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate

- climate dataset // Scientific Data. 2020. № 7. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Herzfeld T., Heinke J., Rolinski S., Müller C.* Soil organic carbon dynamics from agricultural management practices under climate change // *Earth System Dynamics*. 2021. Vol. 12. № 4. P. 1037–1055.
<https://doi.org/10.5194/esd-12-1037-2021>
- Lieth H.* Modeling the Primary Productivity of the World // *Primary productivity of the biosphere. Ecological studies, analysis and synthesis / H. Lieth, R.H. Whittaker (Eds.)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975. P. 237–263.
- Lugato E., Bampa F., Panagos P., Montanarella L., Jones A.* Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. № 11. P. 3557–3567.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12551>
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al.* Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. 2338 p.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J. et al.* Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // *Carbon Management*. 2019. Vol. 10. № 6. P. 567–587.
<https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231>
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A.* Soil C sequestration as a biological negative emission strategy // *Front. Clim.* 2019. Vol. 1. № 8.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Pinke Z., Decsi B., Jámbo A., Kardos M.K., Kern Z., Kozma Z., Ács T.* Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 7374.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10670-6>
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H. et al.* SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // *Soil*. 2021. Vol. 7. № 1. P. 217–240.
<https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P.* Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia // *Geoderma Regional*. 2019. Vol. 17. № e00221. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221>
- Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A.* Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance” // *Reg. Environ. Change*. 2007. Vol. 7. P. 93–104.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
- Smith J.O., Smith P., Wattenbach M. et al.* Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080 // *Global Change Biology*. 2005. Vol. 11. № 12. P. 2141–2152.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x>
- Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Watson R.T., Noble I.R., Bolin B. et al.* Land use, land use change, and forestry. IPCC special report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 375 p.

Forecasting the Carbon Stock Dynamics in the Soils of Cultivated Croplands in European Russia in the Context of the Low-Carbon Development

V. A. Romanenkov¹, J. L. Meshalkina^{1,2,*}, A. Yu. Gorbacheva¹, V. A. Dobrovolskaya¹, and A. N. Krenke³

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,*

²*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia*

³*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: jlmesh@list.ru

Soil organic carbon sequestration potential in the cropland top soil layer (0–30 cm) of European Russia was assessed based on soil-ecological zoning using one of the most common global models of soil organic matter the Rothamsted dynamic carbon model (RothC) and open-access global databases such as Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020, SoilGrids250m 2.0 and time-series MODIS (MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices) NDVI and EVI. Data from the national Soil Organic Carbon Map at 0–30 cm depth were used to estimate the current carbon stocks. FAO unified technical specifications and guidance for the generation of national Soil Carbon Sequestration Map was used as the current study mapping approach. The average rate of carbon sequestration by natural zones under the business-as-usual scenario ranged from 0.076 to –0.002 t/ha per year, decreasing from northern taiga zone to semidesert. A 5% increase in carbon input due to carbon-conservation technologies adoption can result in a twofold increase in carbon capture, and a 20% increase in carbon capture can result in a fivefold increase. A two-fold increase in the rate of C sequestration from the southern taiga with a maximum in the broad-leaved forests zone, followed by 1.5 times decrease or more in the steppe and dry-steppe zone was found with increasing carbon input to the soil. The FAO methodology determines, with a spatial resolution of 1 km, contour lines that have the highest and lowest potential for carbon stock changes when adopting sustainable soil management.

Keywords: carbon sequestration, carbon-conservation technologies in agriculture, climate change, RothC model, agricultural land, carbon balance, “4 per 1000” initiative

REFERENCES

- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Glob. Environ. Change*, 2007, vol. 17, pp. 429–444. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006>
- Amelung W., Bossio D., de Vries W., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Amundson R., Bol R., Collins C., Lal R., Leifeld J., Minasny B., Pan G., Paustian K., Rumpel C., Sanderman J., van Groenigen J.W., Mooney S., van Wesemael B., Wander M., Chabbi A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, no. 5427, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- 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. *Pochvoved.*, 2021, no. 3, pp. 273–286. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>
- Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Historical trends in the amount and structure of organic carbon stocks in natural and managed ecosystems in European Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 438, no. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012005>
- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. Cambridge; New York: CUP, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Dankers R., Anisimov O., Falloon P., Gornall J., Reneva S., Wiltshire A. *Climate Impacts in Russia: Changes in Carbon Storage and Exchange*. UK: Met Office Hadley Centre, 2010. 112 p.
- Falloon P., Smith P., Betts R., Jones C.D., Smith J., Hemming D., Challinor A. Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in cropland soils – climate opportunities and threats. Chapter 5. In *Climate Change and Crops*. Singh S.N., Ed. Berlin: Springer, 2009, pp. 81–111.
- Glushkov I.V., Lupachik V., Prishchepov A.V., Potapov P.V., Pukinskaya M.Yu., Yaroshenko A.Yu., Zhuravleva I.V. Mapping of abandoned lands in Eastern Europe using Landsat and Google Earth Engine satellite images. In *Materialy nauchnoi konferentsii “Sovremennaya nauka o rastitel’nosti”* [Materials of the Sci. Conf. “Modern Science of Vegetation”]. Moscow, 2019, pp. 35–37. (In Russ.).
- Gottschalk P., Smith J.U., Wattenbach M., Bellarby J., Stehfest E., Arnell N., Osborn T.J., Jones C., Smith P. How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosci.*, 2012, vol. 9, iss. 8, pp. 3151–3171. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>
- Harden J.W., Hugelius G., Ahlström A., Blankinship J.C., Bond-Lamberty B., Lawrence C.R., Loisel J., Malhotra A., Jackson R.B., Ogle S., Phillips C., Ryals R., Todd-Brown K., Vargas R., Vergara S.E., Cotrufo M.F., Keiluweit M., Heckman K.A., Crow S.E., Silver W.L., DeLange M., Nave L.E. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. *Glob. Change Biol.*, 2018, vol. 24, iss. 2, pp. e705–e718. <https://doi.org/10.1111/gcb.13896>
- Harris I., Osborn T.J., Jones Ph., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data*, 2020, no. 7, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Herzfeld T., Heinke J., Rolinski S., Müller C. Soil organic carbon dynamics from agricultural management practices under climate change. *Earth Syst. Dyn.*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 1037–1055. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1037-2021>
- IPCC, 2000. *Land Use, Land Use Change, and Forestry. IPCC Special Report*. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D.J., Eds. Cambridge: CUP, 2000. 375 p.
- Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N. Methodological approaches to the formation of a unified national system of monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation. *Byull. Pochv. Inst. Imeni V.V. Dokuchaeva*, 2021, vol. 108, pp. 175–218. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
- Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M. Global climate and soil cover – implications for land use in Russia. *Byull. Pochv. Inst. Imeni V.V. Dokuchaeva*, 2021, vol. 107, pp. 5–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
- Ivanov A.L., Stolbovoi V.S. The initiative “4 per 1000” – a new global challenge for the soils of Russia. *Byull. Pochv. Inst. Imeni V.V. Dokuchaeva*, 2019, vol. 98, pp. 185–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
- Kogut B.M., Semenov V.M. Estimation of soil saturation with organic carbon. *Byulleten’ Pochv. Inst. Imeni V.V. Dokuchaeva*, 2020, vol. 102, pp. 103–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
- Krenke A.N. Identification of invariant states of agricultural landscapes based on hierarchical factor analysis of remote sensing information. *Printsipy Ecolog.*, 2020, no. 3, pp. 16–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2020.10942>
- Lieth H. Modeling the Primary Productivity of the World. In *Primary productivity of the biosphere. Ecological studies, analysis and synthesis*. Lieth H., Whittaker R.H., Eds. Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975, pp. 237–263.
- Lugato E., Vampa F., Panagos P., Montanarella L., Jones A. Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Glob. Change Biol.*, 2014,

- vol. 20, iss. 11, pp. 3557–3567.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12551>
- 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 Sh., Richerde-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui Ch.-Ch., Vågen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 2017, vol. 292, pp. 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J., DeLonge M., Dungait J., Ellert B., Frank S., Goddard T., Govaerts B., Grundy M., Henning M., Izaurralde R.C., Madaras M., McConkey B., Porzig E., Rice Ch., Searle R., Seavy N., Skalsky R., Mulhern W., Jahn M. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system. *Carbon Manag.*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 567–587.
<https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231>
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Front. Clim.*, 2019, vol. 1, no. 8.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Pinke Z., Decsi B., Jámboor A., Kardos M.K., Kern Z., Kozma Z., Ács T. Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, no. 7374.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10670-6>
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 2021, vol. 7, iss. 1, pp. 217–240.
<https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Romanenkov V.A. Dynamics of Soil Carbon Reserves in Agroecosystems of the European Territory of Russia (According to Long-Term Agrochemical Experiments. *Doc. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Lomonosov MSU, 2011. 403 p.
- Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. *Geoderma Reg.*, 2019, vol. 17, no. e00221, pp. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221>
- Romanenkov V.A., Romanenko I.A., Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Sirotenko O.D., Shevtsova L.K. *Prognoz dinamiki zapasov organicheskogo ugleroda pakhotnykh zemel' Evropeiskoi territorii Rossii* [Forecast of the Organic Carbon Dynamics of Arable Soil of the European Territory of Russia]. Moscow: VNIIA Publ., 2009. 95 p.
- Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A. Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance”. *Reg. Environ. Change*, 2007, vol. 7, pp. 93–104.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
- Romanovskaya A.A. Organic carbon in the soils of the fallow lands of Russia. *Pochvoved.*, 2006, no. 1, pp. 52–61. (In Russ.).
- Romanovskaya A.A. Uncertainty assessment of greenhouse gas inventory in agriculture of Russia. *Probl. Ecol. Monitor. Model. Ecosystem*, 2007, vol. 21, pp. 44–57. (In Russ.).
- Rossiia v tsifrakh, 2020: *Kratkii statisticheskii sbornik* [Russia in Numbers, 2020: a Short Statistical Collection]. Malkov P.V., Ed. Moscow: Rosstat, 2020. 550 p.
- Smith J.O., Smith P., Wattenbach M., Zaehle S., Hiederer R., Jones R.J.A., Montanarella L., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Ewert F. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Glob. Change Biol.*, 2005, vol. 11, iss. 12, pp. 2141–2152.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x>
- Technical Specifications and Country Guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*. Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee rezyume* [The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General summary]. Shumakov I.A., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2022. 124 p.
- Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. *Karta pochvenno-ekologicheskogo raionirovaniya Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 8000000. Poyasnitel'nyi tekst i legenda k karte: Uchebnoe posobie* [Map of Soil and Ecological Zoning of the Russian Federation. Scale 1 : 8000000. Explanatory Text and Legend to the Map: Training Manual]. Urusevskaya I.S., Ed. Moscow: MAKSS Press Publ., 2020. 100 p.
- Vinogradova V.V., Glezer O.B., Gracheva R.G., Dorina A.L., Zolotokrylin A.N., Kotov A.V., Kurichev N.K., Morgunov B.A., Potashnikov V.Yu., Ptichnikov A.V., Proskuryakova L.N., Safonov G.V., Safonova Yu.A., Semakina A.A., Semiletov I.P., Sizonov A.G., Stetsenko A.V., Titkova T.B., Shakhova N.E., Sheludkov A.V. *Vozdeistvie izmeneniya klimata na chelovecheskii potentsial, ekonomiku i ekosistemy: doklad k 23 Yasinskoi (Aprel'skoi) mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva* [The Impact of Climate Change on Human Potential, Economy and Ecosystems: a Report for the 23rd Yasin (April) International Scientific Conference on the Problems of Economic and Social Development]. Proskuryakova L.N., Ed. Moscow: Vyssh. Shk. Econ. Publ., 2022. 76 p.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Rosgidromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 60 p.