

ЗЕМЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 631.4

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ПОЧВАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ
ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

© 2023 г. В. С. Столбовой^a, *, П. П. Филь^a

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Почвы и их органическое вещество (ПОВ) признаны главным регулятором глобального цикла углерода. Вместе с тем, результаты расчетов содержания ПОВ не учитываются в формировании задач климатических проектов и остаются невостребованными. Цель исследования — продемонстрировать перспективу анализа содержания ПОВ для планирования и принятия решений в рамках программ, реализуемых в секторе землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства. В исследовании использованы современные цифровые базы почвенных данных, обработанные средствами QGIS. На примере сельскохозяйственных почв Европейской территории России показано, что запасы ПОВ в 0.3-метровом слое базового 1990 г. составляли 7.0 Гт С на пахотных угодьях и 3.1 Гт С на пастбищных землях. Выявлено, что за весь период времени сельскохозяйственного использования содержание ПОВ снизилось на 1.8 Гт С (21% от исходного содержания) на пашнях и на 0.3 Гт С (9% от исходного содержания) на пастбищах. Суммарная потеря ПОВ из 0.3-метрового слоя составила около 2.1 Гт С (около 7.7 Гт CO₂-экв.), что в пять раз превышает совокупный выброс парниковых газов РФ в 2020 г. Суммарно потери ПОВ из 0.3–1.0 м слоя пашен и пастбищ составили около 1.4 Гт С или 5.2 Гт CO₂-экв., что достигает почти 70% от потерь поверхностного 0.3-метрового слоя. Предлагается включить более глубокие горизонты сельскохозяйственных почв в национальный стандарт по учету выбросов и поглощения парниковых газов. Показан подход к использованию пространственного распределения ПОВ для предварительного планирования климатических проектов в рамках сектора землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства. Для практической организации проектов поглощения парниковых газов требуются детальные обоснования. Выполненные исследования гармонизированы с требованиями Межправительственной группы экспертов по изменению климата, что подтверждает потенциал использования почв в климатических проектах РФ.

Ключевые слова: секвестрация углерода, запасы углерода, управление углеродом, землепользование, изменение землепользования

DOI: 10.31857/S2587556623040143, **EDN:** TINGKW

ВВЕДЕНИЕ

Киотский протокол¹ (Watson et al., 2000) признал квоты² на выбросы парниковых газов (ПГ) в качестве нового товара, который может продаваться и покупаться на внутреннем и внешнем

рынках. Протокол сделал легитимными рыночные механизмы для обеспечения наиболее эффективного выполнения взятых государствами обязательств по сокращению выбросов ПГ. В качестве одного из инструментов снижения концентрации ПГ в атмосфере Киотский протокол предусматривает использование землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) (Watson et al., 2000, Статьи 3.3 и 3.4). В разделе Землепользование³ имеются в виду варианты модификации производства в направ-

¹ UNFCCC: 1998. Report of the Conference of the Parties on its Third Session, held in Kyoto from 1 to 11 December 1997 / Addendum, Document FCCC/CP.1998/16/Add.1. <http://www.unfccc.de/> (дата обращения 22.03.2023).

² Углеродная квота — норма допустимой эмиссии парниковых газов, которая устанавливается государством для предприятий. Измеряется в тоннах CO₂-экв. В случае превышения квоты эмитент должен купить, недостающую часть (рынок) или заплатить углеродный налог. https://nesra-konk.ru/carbon_credit/ (дата обращения 26.03.2023).

³ Соответствует понятию МГЭИК cropland management — система технологий выращивания сельскохозяйственных культур на землях, отведенных для растениеводства.

лении внедрения углерод-накопительных технологий природоохранного, органического и восстановительного сельского хозяйства, таких как минимальная обработка, сохранение растительных остатков, применение севооборотов, сидерации и др. В разделе об Изменениях землепользования⁴ предполагается трансформация видов землепользования с относительно низким содержанием углерода в землепользования с относительно большим содержанием, например, посадка лесных насаждений на безлесных землях сельскохозяйственного назначения (пашня → лес), залужение пахотных земель (пашня → луг) и, наоборот, распашка пастбищ (пашня ↔ пастбище), осушение (луг → пашня), обводнение (луг → торфяник) и пр. Главным условием продвижения трансформации землепользования выступает наличие свободных земельных ресурсов. Этому условию отвечает РФ, которая обладает значительным резервом свободных залежных земель. Вместе с тем Изменение землепользования в рамках ЗИЗЛХ на сельскохозяйственных угодьях означает переориентацию использования конкретного земельного участка с производства продовольствия на создание углеродных квот/единиц. Выбор в пользу производства первого или второго в условиях рыночных отношений будет определяться функциональной конкуренцией цен, которые отвечают за экономическую эффективность/привлекательность для сельскохозяйственных производителей. Вместе с тем необходимо отметить, что массовая переориентация землепользования на создание углеродных квот/единиц может поставить под угрозу производство продовольствия.

Перечисленные выше мероприятия в контексте Киотского протокола рассматривают растительность и подстилающую почву сопряженно, как экосистему, в которой функционируют потоки и осуществляются взаимодействия резервуаров углерода. В сельскохозяйственном землепользовании нативная экосистема трансформируется в агроэкосистему — природно-техногенный комплекс для производства сельскохозяйственной продукции. Отметим, что важную роль в углеродном цикле агроэкосистемы играют агротехнологии, которые тесно связывают задачу регулирования углеродного цикла для устойчивого получения/увеличения продукции сельскохозяйственного производства и снижения концентрации ПГ в атмосфере. Таким образом, практика ЗИЗЛХ имеет очевидную взаимную (win-to-win) выгоду (Lal, 2020).

⁴ Соответствует понятию целевого вида сельскохозяйственных угодий. Согласно действующему Земельному кодексу РФ (ред. от 14.07.2022 г.), включает: пашни, залежи, сенокосы, пастбища.

Выделяют два механизма связывания углерода в почвах: абиотический и биотический⁵ (Six et al., 2002). Абиотическое связывание осуществляется в результате химических реакций, которые превращают диоксид углерода (CO_2) в почвенные углеродные соединения, такие как карбонаты кальция и магния. Биотический процесс связывания осуществляется через фиксацию CO_2 из атмосферы с помощью фотосинтеза растений и накопления в почве органических растительных остатков. В процессе разложения и микробной трансформации последних выделяется газообразная фаза CO_2 , которая возвращается в атмосферу (гетеротрофная респирация), а оставшаяся твердая масса формирует ПОВ. Содержание ПОВ отражает долгосрочный баланс между высвобождением/эмиссией и поглощением/накоплением CO_2 . Этот баланс выступает объектом управления углеродным циклом в рамках мероприятий ЗИЗЛХ. При этом баланс эмиссия ↔ поглощение определяется как среднее изменение содержания ПОВ за 20-летний период в верхнем 30-сантиметровом слое почв (IPCC, 2000, 2003).

Определение изменения запасов ПОВ в категориях землепользования при выполнении климатических проектов выступает основой для принятия решений РФ в области формирования/производства углеродных квот/единиц⁶. Очевидно, что признание последних на международных площадках торговли углеродными квотами (Emission trading, ETS) может быть достигнуто в случае, если подсчеты будут гармонизированы с общепринятыми международными подходами, которые включают три составляющие: измерение (Measure), отчетность (Reporting), верификация (Verification) (MRV). Рекомендуемые международным сообществом принципы и подходы к учету запасов ПОВ изложены в руководствах по учету парниковых газов⁷ (IPCC, 2006) и детализированы в последующих изданиях по надлежащей практике (IPCC, 2003). Под гармонизацией понимается соблюдение общих правил MRV. Кроме научно-познавательного значения, следование такому подходу позволяет оценить качество данных с позиций сопоставимости результатов учета ПГ в

⁵ Kane D. Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices By Daniel Kane November 2015. In association with: National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions, LLC. <http://sustainableagriculture.net/publications> (дата обращения 22.03.2023).

⁶ Углеродная единица — объем выбросов парниковых газов, измеряемый в тоннах CO_2 -экв., образовавшийся в результате реализации климатического проекта (углеродная квота на выброс, англ. Carbon credit). https://nesrakovn.ru/carbon_credit/ (дата обращения 26.03.2023).

⁷ Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html> (дата обращения 22.03.2023).

разных странах. Важным также является выбор специализации и национальной стратегии регулирования выброса и поглощения ПГ.

В последние годы группа ученых, входящих в международную общественную организацию Глобальное почвенное партнерство, инициировала создание регламента MRV и проверки содержания органического углерода в почвах сельскохозяйственных ландшафтов^{8,9}. Необходимо отметить, что регламент не является нормативным, поскольку не прошел техническую экспертизу и не утвержден Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК).

В дополнение подчеркнем, что отмеченные выше международные MRV правила (IPCC, 2000, 2003) носят не обязательный для исполнения, а рекомендательный характер. В отношении РФ, как страны, входящей в Приложение I Киотского протокола, требования МГЭИК включают необходимость “постоянно развивать и использовать национальные системы учета антропогенных эмиссий и абсорбции парниковых газов”¹⁰. Это требование позиционирует РФ в группе стран третьего уровня (Tier 3) глобальных правил учета (IPCC, 2006), которым предоставляется право использовать национальные статистические данные с детализацией на региональном уровне, собственные базы данных по запасам и потокам углерода, модели углеродного цикла и пр. Игнорирование опции третьего уровня влечет понижение статуса РФ до Уровня 1 и Уровня 1-2 и обязывает следовать международным нормам учета антропогенных эмиссий и абсорбции ПГ по умолчанию. Следствием может быть искажение реальных данных национального учета. Примером негативного искажения выступают публикации фактографически необоснованных интерпретаций почв РФ, как эмитента CO₂ при потеплении климата (Zimov et al., 2006). Неправомомерность этого мнения состоит в том, что выводы основываются на локальных наблюдениях, которым, при отсутствии анализа географической представительности, придается преувеличенное глобальное значение. В действительности картина баланса потоков углерода в почвах страны исключительно мозаична, что делает невозможным определение типичных участков для географических экстра-

поляций. В этой ситуации глобальные оценки могут проводиться на основе суммарного сплошного учета баланса углерода. Исследования методом сплошного учета показывают, что почвы РФ являются поглотителями CO₂ (Национальный..., 2018; Stolbovoy et al., 2014).

Необходимость использования национальных почвенных баз данных также подтверждается специфическими особенностями почв РФ, которые, в силу доминирующего холодного гумидного климата, накапливают в два раза больше ПОВ, чем принято при осреднении в глобальном масштабе (Национальный ..., 2018; Stolbovoy, 2002). Добровольный отказ от возможностей третьего уровня учета противоречит имеющимся национальным данным и создает дополнительные риски. К последним можно отнести перспективу внедрения невыгодных для РФ изменений международных правил и норм учета выбросов и поглощения парниковых газов, которые принимаются не всегда объективным голосованием стран на международных форумах.

Несмотря на признание огромного значения почв в углеродном цикле, климатические проекты по использованию почв для секвестрации углерода не получили развития. Среди причин сложившейся ситуации можно отметить разнообразие почв, сложность процессов и механизмов поглощения, огромное число почвенных свойств и природных факторов, контролирующих накопление углерода и продолжительность времени его пребывания в почве, дискуссионность теорий образования ПОВ.

Различают три механизма закрепления углерода в почве: физический, химический и биологический¹¹ (Six et al., 2002).

Физически ПОВ может быть стабилизировано путем его капсулирования внутри почвенных микро- и макроагрегатов, где он становится труднодоступным для почвенных организмов. Химически ПОВ может быть адсорбирован в глинистых минералах посредством химических связей, что предотвращает его потребление организмами. Биохимически ПОВ может быть повторно синтезировано в сложные молекулярные структуры, которые могут препятствовать разложению (Baldock, 2000; Paustian et al., 2019; Six et al., 2006).

Рассмотренные механизмы контролируют процесс поглощения ПОВ или его секвестрацию (IPCC, 2021). При этом дискуссионными остаются вопросы о потенциале поглощения ПОВ и продолжительности времени, в течение которого накопленный ПОВ может храниться в почве.

Потенциал поглощения ПОВ достаточно подробно рассмотрен в ряде отечественных (Когут и

⁸ Использование Протоколом GSOC MRV термина “сельскохозяйственный ландшафт” противоречит принятому МГЭИК понятию “категория землепользования” и вносит неопределенность в определение агроэкосистемы как объекта учета.

⁹ FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes — GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en> (дата обращения 22.03.2023).

¹⁰ COP and/or COP/MOP-FCCC/CP/2001/13/Add13. Decision 20.CP.7 Annex 1 Art 9. <https://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a01.pdf> (дата обращения 22.03.2023).

¹¹ OurWorldinData.org. <https://ourworldindata.org/statscrop.com> (дата обращения 22.03.2022).

др., 2020) и зарубежных обзоров (Stewart et al., 2007). Приводятся предварительные оценки степени насыщенности основных типов почв ПОВ сельскохозяйственных угодий ЕТР (Когут и др., 2020). Вместе с тем представленный подход не поддерживается другими исследованиями (Stewart et al., 2007), которые отмечают наличие четких кривых, описывающих стабилизирующую способность почв, но констатируют отсутствие абсолютного предела насыщения ПОВ. Авторы также подчеркивают, что наибольшая эффективность насыщения почв ПОВ проявляется в почвах, подверженных большей дегумификации.

Относительно ограниченное внимание исследователей уделяется вопросу углеродного рынка, в частности, отмеченному выше времени пребывания, поглощенного ПОВ, которое определяет продолжительность получения выгоды углеродного кредита (Schmid et al., 2011). Постоянство устанавливает различия между высококачественными и низкокачественными климатическими проектами и является минимальным требованием для достоверной компенсации выбросов углерода с течением времени. Секвестрация ПОВ, восстановление водно-болотных угодий относятся к проектам с кратковременным хранением углерода (менее 100 лет). Проекты с длительным хранением углерода (более 100 лет) включают трансформацию ПОВ в биоуголь, улучшение устойчивости в результате оглинивания, перемещение углерода в глубокие горизонты почв¹².

Все современные подходы секвестрации ПОВ, так или иначе, базируются на теории гумусообразования (Орлов, 1990; Тюрин, 1937; Stevenson, 1995). Считается, что гумус на 85–90% состоит из гуминовых веществ, содержащих высокомолекулярные, не встречающиеся в других средах соединения. Гумус представляет собой гетерогенную систему полимеров разной степени конденсации, имеющих общие черты строения и варьирующие свойства (относительную молекулярную массу, различный химический состав и степень растворимости). В последние годы предложена концептуально новая континуальная модель, которая представляет ПОВ в качестве непрерывно работающего механизма (конвейера) по переработке и повторному использованию органики, от крупных биополимеров до продуктов их деградации, мономеров, и, наконец, CO₂ (Lehmann, 2015). Иными словами, новая теория подвергает сомнению процесс гумификации, вторичный синтез и

существование специфических гумусовых веществ в почве. Очевидно, что новая модель требует дальнейшего изучения. Однако необходимо иметь в виду, что продвижение новой теории неизбежно приведет к ревизии изложенных выше взглядов на управление поглощением ПОВ. Последствия этих изменений для использования почв на рынке углеродных квот могут оказаться критическими.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы продемонстрировать перспективу применения существующих баз почвенных данных как основы для разработки национальных стандартов содержания, изменения содержания, потенциала секвестрации и глубины учета ПОВ, а также трансформации землепользования для целей климатических проектов в РФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в административных границах субъектов, расположенных на Европейской территории России (ЕТР). В работе использована новейшая ГИС платформа Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ (ГИС ПРСХ) (Столбовой и др., 2021а, б). Слой Почвы ГИС ПРСХ включает национальный почвенный информационный стандарт — Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (Единый ..., 2014), принятый Министерством сельского хозяйства РФ и Министерством природных ресурсов и Экологии РФ. Атрибутивная база данных ГИС ПРСХ содержит необходимые для подсчета запасов ПОВ параметры, включая содержание органического углерода в пахотном горизонте (%), мощность пахотного горизонта (см), мощность гумусового горизонта (см) (Столбовой и др., 2021а, б). Географическая привязка данных связана с координатами точек заложения типичных разрезов, отобранных методом простого случайного отбора¹³ (Единый ..., 2014). В этом методе вероятность включения почвенного разреза в выборку одинакова при условии равенства комбинации свойств почв. Вторая группа данных связана со средними показателями почв полигона типологических единиц качества почв (ТЕКП), распределенных по фаціальным подтипам почв сельскохозяйственных угодий (Физико-химические ..., 1996).

В случаях отсутствия прямых определений объемного веса почв последний определялся на основе нелинейной модели парной регрессии

¹²Whiting T. Content Marketing Permanence in carbon offsetting, explained // Carbon markets. 2022. <https://lune.co/blog/permanence-in-carbon-offsetting-explained/> (дата обращения 22.03.2022).

¹³Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia // CD-ROM, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2002. https://iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/guide.htm (дата обращения 02.06.2022).

между удельным весом и содержанием органического углерода в минеральных и органических почвах РФ (Единый ..., 2014). Аналогичный метод практикуется и в других странах (Hiederer et al., 2009). В анализе использовано 407 параллельных определений объемного веса почв и содержания ПОВ. Тесная связь между этими показателями ($R^2 = 0.89$) описывается уравнением $y = 25.122X^2 - 72.34X + 52.668$ и обнаруживает увеличение объемного веса при уменьшении содержания ПОВ (Национальный ..., 2018). Это объясняется тем, что потеря ПОВ (дегумификация) приводит к разрушению структуры и уплотнению почвы. Описанный факт имеет большое значение для мониторинга, который должен основываться на расчете запасов ПОВ по слоям (кг С/м², т С/га). Использование данных содержания ПОВ в % приводит к ошибкам, поскольку не учитывает, что даже при низком содержании ПОВ, но высокой плотности почвы его запасы будут высокими, тогда как при высоком содержании ПОВ, но менее плотной почве, запасы будут невелики.

Характеристики изменения содержания ПОВ в результате сельскохозяйственной деятельности определены на основе опубликованных данных, полученных сопоставлением близких по условиям почвообразования пар нативных и используемых почв (83 наблюдений) (Stolbovoi et al., 2002).

Разнообразие почв сельскохозяйственных угодий представлено слоем Качество почв ГИС ПРСХ. ТЕКП представляют повторяющиеся по набору атрибутов и функций, относительно однородные по качеству (бонитет, нормативная урожайность зерновых культур) и природно-технологическим (агроклиматический потенциал, сельскохозяйственные культуры, гранулометрический состав и др.) особенностям почв. Картографические единицы качества почв (КЕКП) включают контура/полигоны ТЕКП, выделенные на карте качества почв сельскохозяйственных угодий. Карта качества почв РФ содержит 10107 ТЕКП и 54695 КЕКП, что соответствует детальности географического масштаба 1 : 300000–1 : 500000 (Столбовой и др., 2021а, б). В исследовании использована часть карты качества почв, покрывающая ЕТР, которая включает 3607 ТЕКП и 7071 КЕКП.

Виды землепользования ЕТР сформированы на основе базы данных наземного покрова, разработанной для анализа Полного бюджета углерода России¹⁴.

Подсчеты и цифровые карты выполнены в среде QGIS и характеризуют базовый (1990 г.) период времени. Этот период соответствует дате от-

счета обязательств РФ по сокращению выбросов парниковых газов^{15,16}.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рекомендации МГЭИК по учету выбросов и поглощения парниковых газов рассматривают общие подходы, которые должны применяться в масштабе страны для определения национальной стратегии на международных площадках торговли углеродными квотами. В контексте внутреннего рынка углеродных квот/единиц результаты учета должны быть оценены с точки зрения количественных и качественных характеристик ПОВ на конкретных полях, участках лесопользования и др. В этих целях необходимо создавать более точные, экономически эффективные специальные методы.

Запасы углерода в сельскохозяйственных почвах. Разнообразие сельскохозяйственных почв ЕТР сгруппировано по видам землепользования, включая пашни и пастбища, которые входят в число обязательных по стандарту ЗИЗЛХ (IPCC, 2006). Виды сенокосы, многолетние насаждения и залежи детально не исследовались в связи с отсутствием точных границ (например, сенокосы на лесных полянах, участках речных пойм или огромное число отдельных залежных полей и др.).

На рис. 1 показана агрегированная почвенная карта территории исследований. Представленная карта и характеристики ТЕКП являются основой подсчета ПОВ. Карта демонстрирует фрагментированное распространение сельскохозяйственных почв без учета осушенных торфяно-глеевых почв, почв лесного фонда и др. Легенда почвенной карты включает преобладающие типы сельскохозяйственных почв, которые представляют главные агроклиматические зоны РФ: лесолуговую (дерново-подзолистые), лесостепную (серые лесные), степную (черноземы типичные и южные), сухостепную (каштановые) и субтропическую (коричневые).

Несмотря на фрагментарность (см. рис. 1), на почвенной карте четко прослеживается зональность почв, что характерно для почвенного покрова ЕТР. Наибольшая интенсивность сельскохозяйственного землепользования (достигающая 60–80% территории) отмечается в лесостепной и

¹⁴Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V.S. et al. Full carbon account for Russia. Interim Report IR-00-021. Laxenburg: IIASA, 2000. 201 p. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/6224/1/IR-00-021.pdf> (дата обращения 22.03.2022).

¹⁵Указ Президента РФ № 666 от 04.11.2020 “О сокращении выбросов парниковых газов”. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (дата обращения 22.03.2022).

¹⁶Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов”. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/00012021070200031> (дата обращения 22.03.2022).

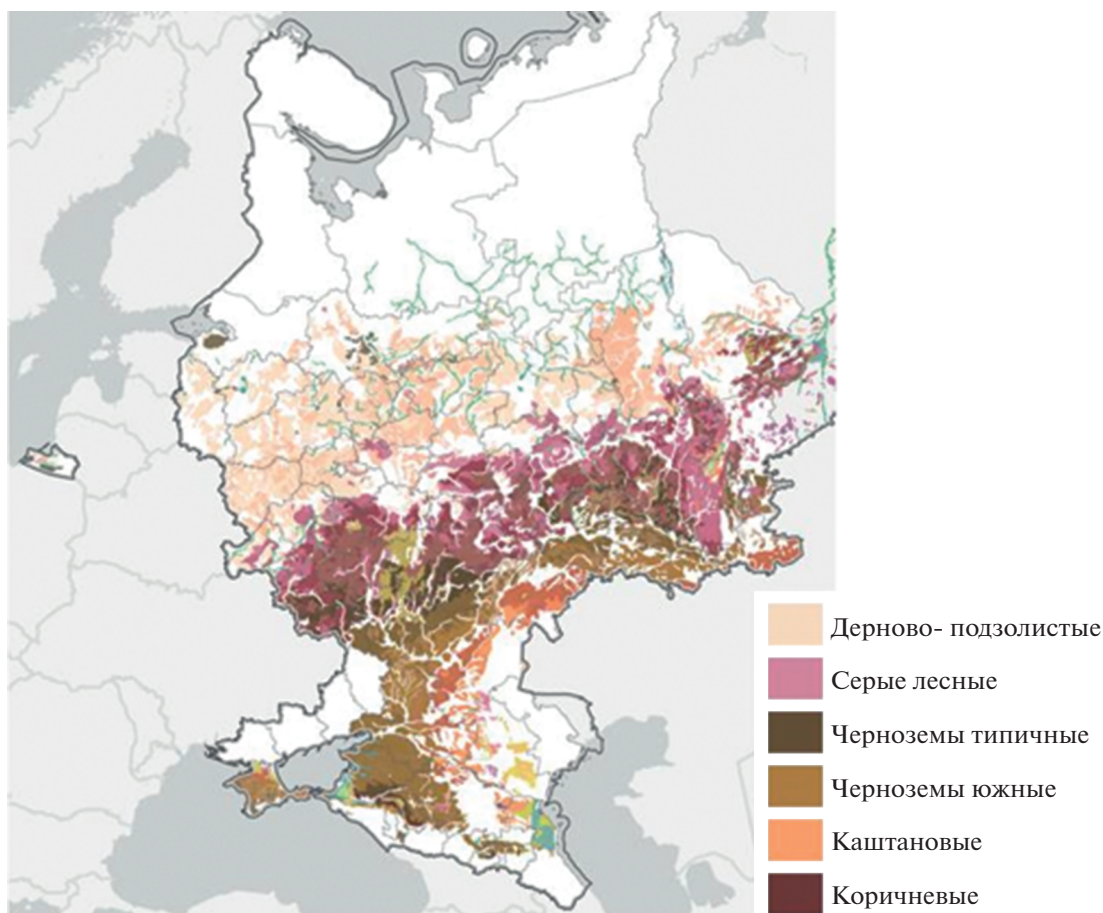


Рис. 1. Почвы сельскохозяйственных угодий Европейской территории России.

Источник: слой Качество почв ГИС платформа “Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ” (Столбовой и др., 2021a).

степной агроклиматических зонах. В масштабе карты не выделяются пашни и пастбища северных регионов, в которых сельскохозяйственная деятельность носит очаговый характер.

Пространственный рисунок содержания POV до распахки (рис. 2-1a) следует зональной картине почв (см. рис. 1). Это связано с тем, что в равнинных условиях ЕТР с массивами относительно однородных покровных отложений и близкими характеристиками гранулометрического и минералогического составов содержание POV в значительной степени контролируется зональными биоклиматическими условиями, определяющими продукцию/поступление фитомассы в почвы и ее педогенетическую трансформацию.

В процессе распахки естественных экосистем содержание POV изменяется, что обнаруживается по снижению цветовой контрастности карты (см. рис. 2-1б) по сравнению с картой исходного содержания POV (см. рис. 2-1a). Вместе с тем это изменение лишь частично повторяет зональный рисунок, что можно объяснить относительно

ограниченной долей физически и биологически поглощенного POV в пахотных почвах. Регулярная механическая обработка приводит к разрушению структуры и интенсифицирует потерю физически связанного POV. В дополнение химический состав сельскохозяйственных культур менее разнообразен по сравнению с нативными фитоценозами. В результате относительная доля химически закрепленного POV возрастает.

Изменение содержания POV зависит от его исходного содержания (рис. 3). При этом статистически значимые потери POV ($r = -0.7$, $p = 0.03$) проявляются более выражено в почвах с большим содержанием углерода. В определенной степени этот вывод созвучен с отмеченной выше закономерностью более интенсивного накопления в почвах, потерявших больше POV (Stewart et al., 2007; Stolbovoy, 2002a). Вместе с тем необходимо отметить, что точность аппроксимации недостаточна ($R^2 < 0.55$) и модель требует улучшения в части более детального учета факторов закрепления углерода в почвах.

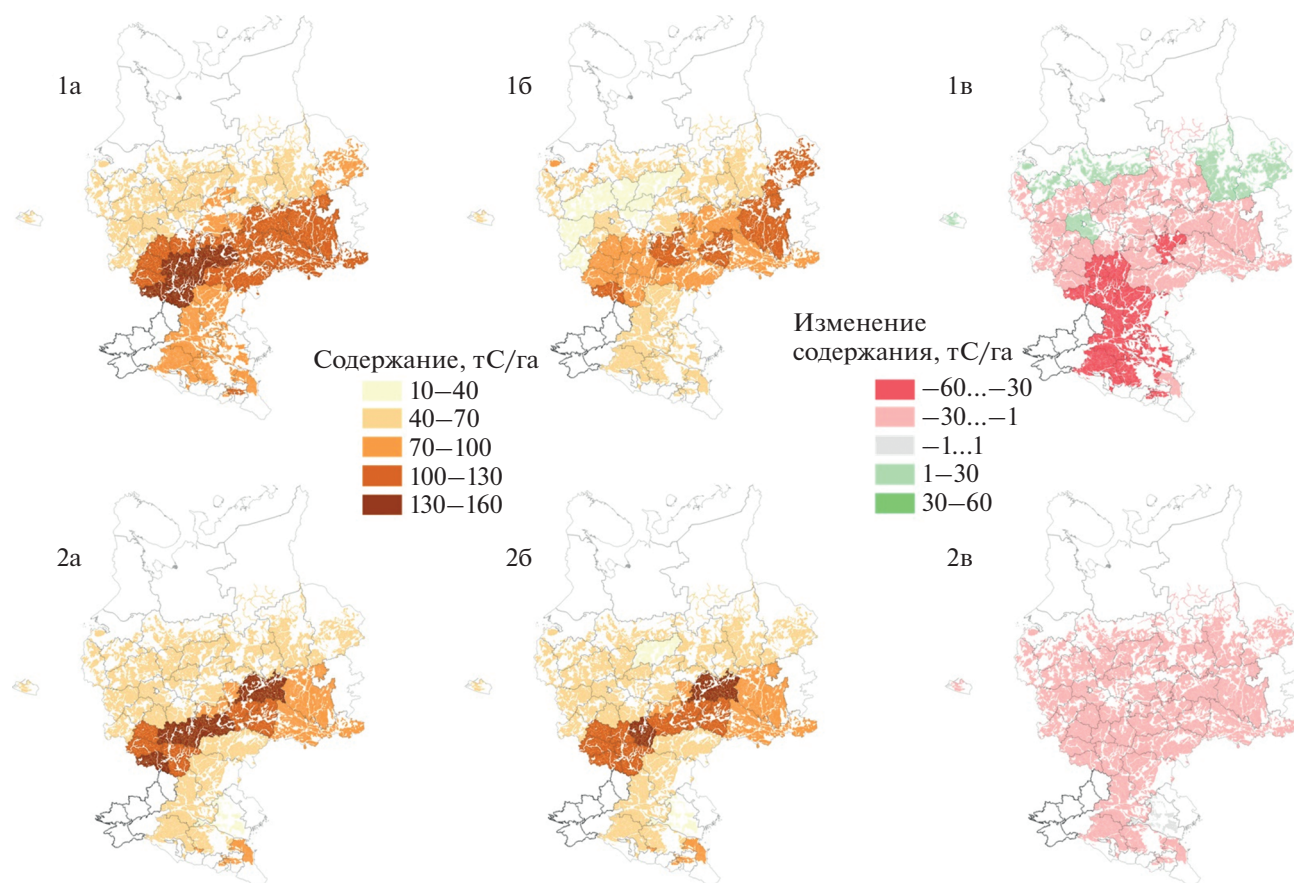


Рис. 2. Содержание углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России: пашни (1а – нативные почвы до сельскохозяйственного освоения, 1б – актуальное, современное содержание в базовый (1990 г.) период времени, 1в – накопленное изменение содержания в результате сельскохозяйственного использования); пастбища (2а – нативные почвы до сельскохозяйственного освоения, 2б – актуальное, современное содержание в базовый (1990 г.) период времени, 2в – накопленное изменение содержания в результате сельскохозяйственного использования).

Вовлечение в сельскохозяйственное использование почв лесолуговой зоны (дерново-подзолистые, см. рис. 1), которые в исходном состоянии имеют маломощный органо-аккумулятивный горизонт, приводит к обогащению ПОВ пахотного слоя (см. рис. 2-1в). Это происходит в результате формирования гумусированного пахотного слоя после дополнительного поступления корневых остатков, применения органических удобрений, известкования и др. (Stolbovoy, 2002b). Аналогичные данные приводятся и для почв других стран (Batjes, 1996).

Пространственный рисунок содержания ПОВ до выпаса животных (см. рис. 2-2а) и после освоения (см. рис. 2-2б) в целом повторяет рассмотренную выше зональную картину в пахотных почвах. Вместе с тем выпас, как и распашка, меняет картину содержания ПОВ, что отражается в сглаживании цветовой контрастности карты (см. рис. 2-2б) по сравнению с картой исходного содержания ПОВ (см. рис. 2-2а). Картина измене-

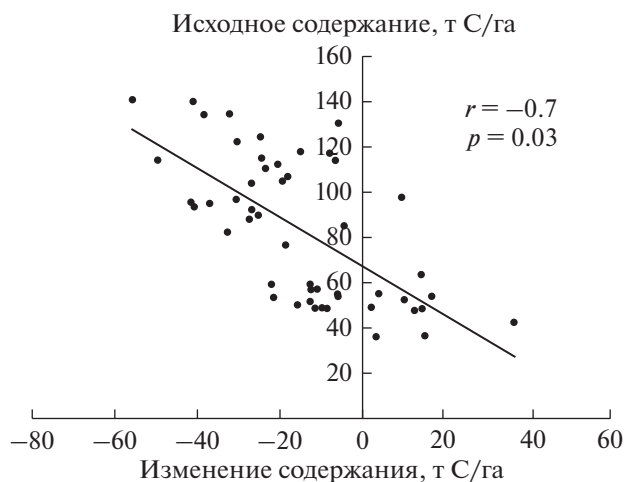


Рис. 3. Зависимость изменения содержания ПОВ в результате распашки от его исходного содержания в нативных почвах Европейской территории России.

Таблица 1. Запасы, потери и потенциал поглощения ПОВ (Гт С/га) по слоям в видах сельскохозяйственного землепользования ЕТР

Вид землепользования	0.3 м					0.3–1.0 м				
	исходное	актуальное	потери углерода	доля потерь, % от исходного	потенциал поглощения, Гт CO ₂ -экв.	исходное	актуальное	потери углерода	доля потерь, % от исходного	потенциал поглощения, Гт CO ₂ -экв.
Пашни	8.9	7.0	1.8	21	6.6	5.3	4.0	1.3	25	4.8
Пастбища	3.1	2.9	0.3	9	1.1	2.0	1.9	0.1	5	0.4
Сумма	12.0	9.9	2.1	18	7.7	7.3	5.9	1.4	20	5.2

ний содержания ПОВ в результате выпаса (см. рис. 2–2в) демонстрирует относительно одинаковое уменьшение содержания ПОВ в разных ТЕКП. Можно предполагать, что это связано с достаточно ограниченным воздействием выпаса животных, небольшим поголовьем скота и неинтенсивным потреблением фитомассы.

Запасы ПОВ в 0.3-метровом слое нативных почв ЕТР до распашки составляли 8.9 Гт С (табл. 1). В почвах пастбищ запасы ПОВ в нативных почвах были 3.1 Гт С. Запасы ПОВ в 0.3–1.0 м слое нативных почв до распашки были 5.3 Гт С, а пастбищ – 2.0 Гт С, что составляет для пашни и пастбищ 60 и 65% от запасов в поверхностном слое.

Сельскохозяйственное использование привело к потере углерода (дегумификации почв). За все время использования пахотных почв ЕТР совокупные потери ПОВ составили 1.8 Гт С (около 21% от исходного) на пашне и 0.3 Гт С (почти 9% от исходного) на пастбищах. Подчеркнем, что отмеченные потери в 2–3 раза меньше, чем аналогичные в зарубежных развитых странах, которые колеблются в диапазоне 25–75% от исходного содержания углерода в нативных почвах¹⁷. Относительно невысокие потери ПОВ в результате сельскохозяйственного производства в РФ связаны с планированием землепользования, проводившемся институтами РосНИИземпроекта до 1990 г., направленном на землеустройство, внедрение противоэрозионных и углерод сберегающих технологий производства и др.

Наряду с поверхностным 0.3-метровым слоем, сельскохозяйственное землепользование изменило содержание ПОВ и в более глубоких горизонтах (см. табл. 1). Так, потеря ПОВ на пашне в слое 0.3–1.0 м достигает 1.3 Гт С, что составляет 25% от исходного содержания. Относительно большие потери глубоких горизонтов по сравне-

нию поверхностным 0.3-метровым слоем (25% по сравнению с 21%, соответственно) согласуются с существенной долей (более 60%) черноземных почв в пахотном фонде ЕТР, которые имеют мощный (0.8–1.2 м) гумусовый горизонт.

Потеря ПОВ в слое 0.3–1.0 м на пастбищах составляет 0.1 Гт С или 5% от исходного содержания. Меньшие потери ПОВ на пастбищах по сравнению с пашней объясняются отсутствием механического воздействия пахоты, сохранением естественных фитоценозов в условиях ограниченного поголовья скота и пр.

Суммарная потеря ПОВ в результате сельскохозяйственной деятельности из 0.3-метрового слоя составила около 2.1 Гт С (см. табл. 1). Эта величина соответствует теоретическому (расчетному) потенциалу поглощения равному 7.7 Гт CO₂-экв. Суммарная потеря ПОВ из 0.3–1.0 слоя почв составила 1.4 Гт С, что соответствует расчетному потенциалу поглощения около 5.2 Гт CO₂-экв. Суммарный потенциал поглощения метровой толщей сельскохозяйственных почв ЕТР равен 12.9 Гт CO₂-экв., что составляет почти 8.6 годовых выбросов парниковых газов в РФ¹⁸.

Отметим, что приведенные выше значения потенциала поглощения отражают теоретическую величину для случая возвращения всех почв РФ в нативное состояние. Естественно, что такой сценарий практически трудно осуществим. Вместе с тем такое развитие может оказаться перспективным для территорий деградированных почв залежных земель¹⁹.

Приведенные данные (см. табл. 1) показывают, что учет запасов и потерь ПОВ, ограниченный исключительно поверхностным 0.3-метровым слоем, существенно занижает фактическое

¹⁷ Kane D. Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices by Daniel Kane, November 2015. In association with: National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions, LLC. <http://sustainableagriculture.net/publications> (дата обращения 22.03.2023).

¹⁸ Суммарный выброс ПГ в 2020 г., по данным Национального кадастра антропогенных выбросов, составил около 1.5 Гт С (Романовская и др., 2022).

¹⁹ По данным МСХ РФ, площадь залежных земель составляет 44 млн га, из которых к возвращению в сельскохозяйственный оборот планируется 12 млн га. <https://asm-agro.ru/articles/nepahanoe-pole-kak-vernut-v-оборот-zaleznyh-zemli/> (дата обращения 26.03.2023).

содержание ПОВ в сельскохозяйственных почвах РФ, его изменение в результате сельскохозяйственного использования и оценку поглощающего потенциала почв. Очевидно, что неполный учет потерь приведет к существенно искаженной, неоправданно заниженной величине накопления ПОВ и почти двукратному снижению экономической эффективности климатических проектов в РФ. Полученные нами данные могут служить основанием для предложения о включении более глубоких горизонтов почв в Национальный стандарт по учету поглощения ПГ. Отметим, что это предложение не является излишне академичным. Действительно, как показано выше, перемещение и закрепление углерода в глубоких горизонтах почв считается одним из перспективных инструментов повышения качества климатических проектов²⁰. Сообщается также об интенсификации селекции в США, направленной на увеличение глубины корневой системы сельскохозяйственных культур для закрепления ПОВ в глубоких слоях почв (Lal, 2020). Таким образом, высказанное предложение об увеличении глубины учета ПОВ в РФ вполне практично и соответствует мировому тренду.

Содержание углерода в стратегии изменения землепользования

Традиционно практика землепользования в России строилась на гумус сберегающих технологиях, которые достаточно полно рассмотрены в научной литературе и приложениях к задачам климатических проектов (Иванов и др., 2019). В настоящем сообщении акцент сделан на исполь-

зовании трансформации видов землепользования в целях климатических проектов.

На рис. 4 показано распределение содержания ПОВ в видах сельскохозяйственного землепользования во Владимирской и Рязанской областях. Выбор областей делался с целью продемонстрировать различия в содержании ПОВ для отдельных видов землепользования. Во Владимирской области (см. рис. 4а) отмечается увеличение содержания ПОВ в ряду видов землепользования пашня–пастбище–сенокос. Можно предполагать, что в случае относительно одинаковых почвенно-экологических условий, трансформация пашни в пастбище (залужение) приведет к накоплению более 19 т С/га, а при трансформации пастбища в сенокос – составит более 47 т С/га. Перевод пашни в сенокос может привести к накоплению 67 т С/га. Согласно правилам (IPCC, 2006), отмеченное накопление реализуется в течение 20 лет, т.е. рассчитанное ежегодное поглощение ПОВ будет около 1.0, 2.3 и 3.3 т С/га соответственно. Перевод видов землепользования в ряду сенокос–пастбище–пашня приведет к потерям ПОВ в обратном отмеченному выше порядке, т.е. будет стимулировать дегумификацию и сопутствующую эмиссию CO₂.

Распределение содержания ПОВ по видам землепользования Рязанской области обнаруживает наименьшее значение на пастбищах по сравнению с пашней и сенокосами (см. рис. 4б). Можно ожидать, что трансформация пашни в пастбище в случае Рязанской области не будет сопровождаться накоплением ПОВ и этот вариант не может рассматриваться в рамках задач климатических проектов. Перевод пашни в сенокос стимулирует накопление около 77 т С/га, а трансформация пастбищ в пашню почти 30 т С/га. Перевод пастбищ в сенокосы может привести к накоплению более 106 т С/га. Можно рассчитать, что в годовом выражении рассмотренные изменения

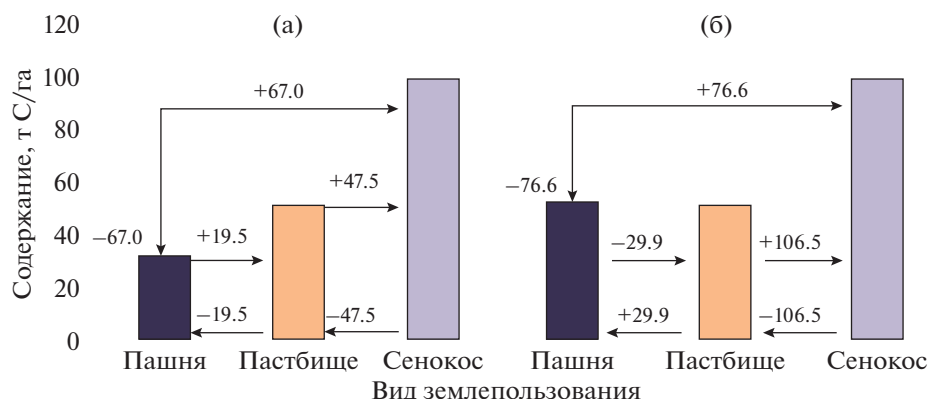


Рис. 4. Влияние изменения (трансформации) видов сельскохозяйственного землепользования на содержание ПОВ в слое 0.3 м: (а) Владимирская область, (б) Рязанская область.

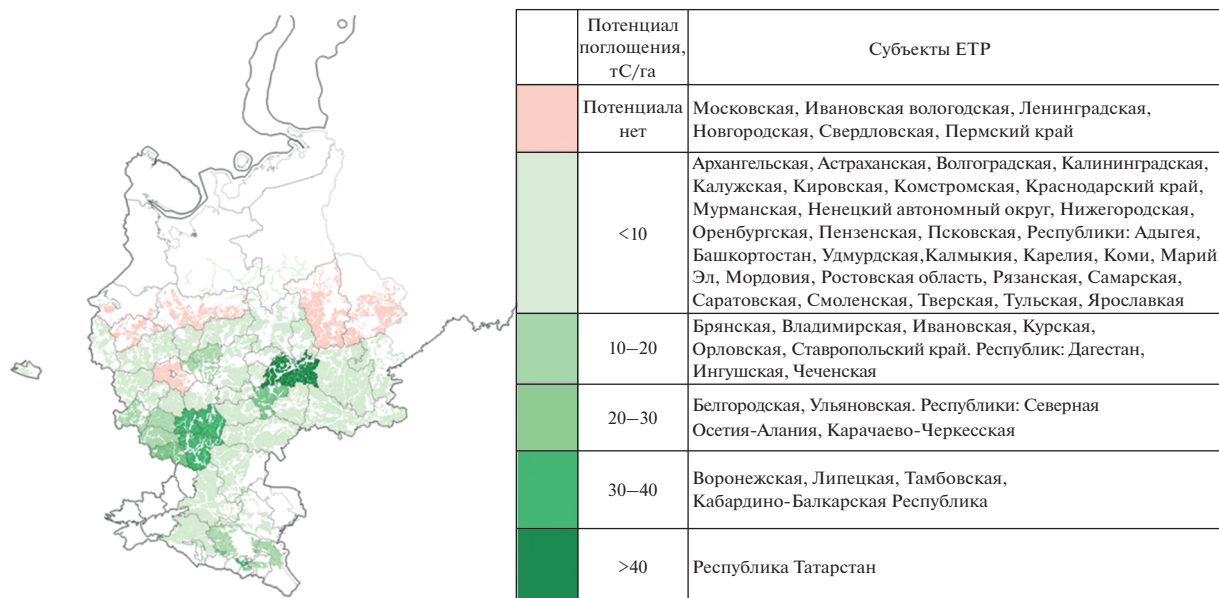


Рис. 5. Ранжирование субъектов Европейской территории России по потенциалу поглощения ПОВ в секторе “Изменение сельскохозяйственного землепользования” ЗИСЛХ (пашня → пастбище).

содержания ПОВ составят 3.8, 1.5 и 5.3 т С/га соответственно.

Заметим, что рассчитанные варианты ежегодных изменений содержания ПОВ в результате трансформации видов сельскохозяйственного землепользования гораздо выше прогнозируемых оценок накопления ПОВ в результате применения модификаций землепользования, которые, как правило, меньше 1.0 т С/га (Когут и др., 2020; Lal, 2020). Это делает трансформацию видов землепользования в рамках ЗИСЛХ экономически более привлекательной с точки зрения производства углеродных квот/единиц.

Приведенный анализ на данных (см. рис. 4) перспективен для оценки потенциала изменения землепользования в целях накопления ПОВ. Следует подчеркнуть, что мероприятия в секторе ЗИСЛХ, направленные на стабилизацию баланса углерода, в климатических проектах не имеют смысла, поскольку не создают дополнительных углеродных квот/единиц.

На рис. 5 представлена карта, на которой демонстрируется ранжирование субъектов ЕТР по потенциалу поглощения ПОВ в случае использования трансформации видов сельскохозяйственного землепользования. На карте (см. рис. 5) показано, что перевод пашни в пастбища в 47 из 54 субъектов ЕТР приведет к накоплению ПОВ в количестве от 10 до более чем 40 т С/га, для оставшихся 7 субъектов, в которых лесохозяйственная деятельность привела к накоплению ПОВ потенциал поглощения не выявляется. Очевидно, что использование

опций трансформации видов землепользования не является рекомендацией и должно основываться на детальных социально-экономических, экологических и других критериях. Вместе с тем целесообразность выбора этой опции с экономической точки зрения будет определяться величиной потенциала секвестрации ПОВ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основным аспектом анализа выступает главный вопрос, заключающийся в том, соответствуют ли имеющиеся национальные данные содержания ПОВ в сельскохозяйственных почвах РФ международному стандарту MRV. Если да, то могут ли подходы и результаты проведенного нами исследования использоваться: а) для планирования климатических проектов и б) для обоснования производства углеродных квот/единиц на международных площадках торговли (ETS)?

Для ответа на главный вопрос необходимо проанализировать существующую в РФ практику измерений, отчетности и верификации (MRV) содержания ПОВ в сельскохозяйственных почвах.

Измерение. Россия обладает огромной базой данных многолетних измерений содержания ПОВ в сельскохозяйственных почвах, которые получены в результате сплошных почвенных съемок и анализов образцов в профессиональных лабораториях. Так, до 1990 г. основные работы проводились институтами РосНИИземпроекта, которыми было выполнено два полных тура об-

следования сельскохозяйственных почв страны и ее отдельных областей. В середине 90-х годов завершился четвертый тур обследований. В настоящее время обследования сельскохозяйственных почв проводятся сетью Агрохимцентров МСХ РФ в рамках государственных программ^{21,22}. В обследовании применяется комплекс современных методов, включая дистанционное зондирование, наземные обследования, гидрометеорологические, сбор образцов почв, лабораторные исследования, статистический анализ данных и др.

Сложившаяся практика мониторинга состояния почв сельскохозяйственного назначения РФ включает определение содержания органического вещества и объемного веса почв. Сбор данных проводится по фиксированной сети мониторинговых участков с унифицированным методом отбора смешанных почвенных образцов пахотного горизонта. Отобранные образцы исследуются в лаборатории методом мокрого окисления бихроматом калия (метод Тюрина). В настоящее время периодичность опробования почв составляет 10 лет. Результаты представляются в форме среднего содержания гумуса в пахотном горизонте почв сельскохозяйственных угодий муниципального (административного) района и субъекта РФ. Рассмотренная система государственного мониторинга содержания ПОВ земель сельскохозяйственного назначения может быть адаптирована к требованиям МГЭИК и использоваться в национальных сообщениях, а также применяться для планирования климатических проектов.

Приведенные в исследовании данные пересчитаны на стандартную глубину (0.3 м) и дополнены данными содержания органического углерода на глубине 0.3–1.0 м. В настоящее время эти данные входят в базу данных ГИС ПРСХ и проходят государственную регистрацию. В дальнейшем эти данные следует адаптировать к требованиям МГЭИК для создания национальной базы почвенных данных климатических проектов.

В части точности оценок запасов углерода на национальном уровне, а также в масштабе крупных регионов (например, ЕТР) максимально достижимым уровнем ошибки можно считать 10% (средняя точность определения гумуса в почвах методом Тюрина). Необходимо отметить, что, используемые для национальных расчетов содержа-

ния ПОВ коллекции почвенных разрезов²³ (Stolbovoi, 2002) создавались по принципу доступности данных без их статистически обоснованной представительности, например отбора средних, площадь взвешенных значений для почв и др. Подход по принципу доступности используется и при создании глобальных коллекций (Batjes, 1996). В итоге варьирование содержания углерода для отдельных почв, например Gleisoil в глобальной коллекции превышает 150% (Batjes, 1996). Очевидно, что расчеты, основанные на таких неопределенных данных, носят оценочный характер и рассуждения об их статистической достоверности весьма условны.

Определение изменений содержания ПОВ для конкретного климатического проекта требует значительной точности, поскольку результатом проекта выступает вес товара — вес произведенной квоты/углеродной единицы. В настоящее время на фоне общего понимания подходов измерений изменений содержания ПОВ международный консенсус на нормы производства последних отсутствует. При этом в числе главных проблем выступают: 1) экономическая целесообразность определения изменений содержания ПОВ и 2) достоверная воспроизводимость результатов определения.

Рекомендуемый МГЭИК (IPCC, 2003; 2006) статистический подход достоверного определения небольших изменений в больших объемах содержания ПОВ требует огромного числа определений, что делает стоимость идентификации квоты/углеродной единицы запретительно большой. Так стоимость определения 1 т С в 0.3-метровом слое пахотных почв ЕС варьирует в интервале 241–643 Евро²⁴. Высокая стоимость, при цене квоты/углеродной единицы на рыночных площадках ETS равной 30–50 Евро/т С, делает ее производство экономически не выгодным. Проблема достоверной воспроизводимости определения изменений ПОВ связана со значительным пространственным варьированием почвенных свойств на небольших расстояниях в пределах поля. В этих условиях изменение содержания ПОВ может быть следствием смещения точек отбора проб почв при повторном опробовании. К сожа-

²³Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia // CD-ROM, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2002. https://iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/guide.htm (дата обращения 02.06.2022).

²⁴Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Ver. 2. EUR 21576 EN/2. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2007. 56 p. ISBN: 978-92-79-05379-5. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eu-soils_docs/other/EUR21576_2.pdf (дата обращения 26.04.2023).

²¹Приказ Минсельхоза России от 24.12.2015 № 664 “Об утверждении Порядка осуществления государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения” (Зарегистрировано в Минюсте России 21.03.2016 № 41470). <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minselkhoza-rossii-ot-24122015-n-664/> (дата обращения 22.03.2022).

²²Федеральный закон от 30.12.2021 г. № 475-ФЗ О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47493> (дата обращения 22.03.2023).

лению, достоверная воспроизводимость определения изменений ПОВ руководствами МГЭИК не обсуждаются. Таким образом, предлагаемый МГЭИК статистический подход определения изменений содержания ПОВ нельзя признать полностью достаточным, и он требует существенной доработки.

В настоящее время предлагается комплексный подход определения изменений содержания ПОВ, который включает площадную рандомизацию и координатную географическую фиксацию площадок опробования, соблюдение стандартных глубин и процедур рандомизированного отбора смешанных образцов почв, методов лабораторных исследований²⁵. Метод прошел проверку в Италии и предлагается для стран ЕС. Рассматривается перспектива адаптации метода в РФ.

Отчетность. Результаты обследований, выполненных в процессе проведения туров обследования до 1990 г., архивированы и документированы в ряде обобщающих публикаций (Крылатов, 1998; Физико-химические ..., 1996). Данные измерений, получаемые сетью (102 организации) Агрохимцентров, передаются в МСХ РФ (Единая ..., 2020) и распространяются заинтересованным организациям Министерства природных ресурсов и Экологии РФ, Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии РФ, Росприроднадзору для формирования и обновления государственных информационных ресурсов.

Верификация. Под верификацией понимают “проверку”, при которой текущее измерение сравнивается с ранее сохраненным.

Опубликованные данные (Крылатов, 1998; Физико-химические ..., 1996) содержат анализ динамики ПОВ за 1970–1990 гг. Начиная с 1993 г. в РФ ежегодно издается Национальный доклад об использовании и состоянии земель сельскохозяйственного назначения (Доклад ..., 2022). Доклад периодически публикует данные по содержанию ПОВ. Национальный доклад размещается в Интернете и находится в свободном доступе, что позволяет верифицировать динамику содержания ПОВ.

Приведенные в статье данные по содержанию ПОВ в сельскохозяйственных почвах РФ верифицировались с ранее опубликованными данными РосНИИземпроекта (Крылатов и др., 1998; Физико-химические ..., 1996). Для сопоставимости

данные РосНИИземпроекта были приведены к стандартному слою 0.3 м. Обсуждение методов и детали пересчета опубликованы ранее (Национальный ..., 2018; Stolbovoy, 2002). Различия результатов в содержании ПОВ составили 5%.

Таким образом, использованные выше национальные базы данных содержания ПОВ соответствуют требованиям международного стандарта MRV. В части соблюдения подходов учета антропогенных эмиссий и абсорбции ПГ, выполненное нами исследование соответствует рекомендациям МГЭИК (IPCC, 2000, 2006).

Предложение о включении подповерхностного слоя 0.3–1.0 м в Национальный стандарт учета поглощения ПГ отвечает рекомендации МГЭИК о необходимости “постоянно развивать и использовать национальные системы учета”. Таким образом, полученные результаты могут быть представлены на международных площадках торговли углеродными квотами/единицами (ETS).

ВЫВОДЫ

Анализ запасов ПОВ в сельскохозяйственных почвах в рамках мероприятий, проводимых в секторе ЗИЗЛХ, выступает главным для принятия решений в области организации климатических проектов. При этом общие запасы ПОВ определяют национальную стратегию планирования снижения эмиссии и увеличения поглощения ПГ почвами.

Показано, что сельскохозяйственные почвы ЕТР содержали в 0.3-метровом слое базового 1990 г. 7.0 Гт С на пахотных угодьях и 3.1 Гт С на пастбищных землях. За весь период сельскохозяйственного использования содержание ПОВ снизилось на 1.8 Гт С (21% от исходного содержания) и 0.3 Гт С (9% от исходного содержания), соответственно. Суммарная потеря ПОВ из 0.3-метрового слоя почв в результате сельскохозяйственной деятельности составила около 2.1 Гт С. Эта величина соответствует теоретическому (расчетному) потенциалу поглощения ПГ равному 7.7 Гт CO₂-экв., что в пять раз превышает совокупный выброс парниковых газов РФ в 2020 г. Суммарная потеря ПОВ из 0.3–1.0 слоя почв составила 1.4 Гт С, что соответствует потенциалу поглощения около 5.2 Гт CO₂-экв. Суммарный потенциал поглощения 1.0 м поверхностной толщей почв ЕТР равен 12.9 Гт CO₂-экв., что составляет почти 8.6 суммарных выбросов ПГ в РФ в 2020 г. Очевидно, что даже частичное возвращение этого углерода в ПОВ может способствовать выполнению обязательств РФ по сокращению выбросов ПГ.

Приведенные данные демонстрируют, что учет запасов и потерь ПОВ, ограниченный поверхностным 0.3-метровым слоем, существенно занижает фактическое содержание ПОВ в сель-

²⁵Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Ver. 2. EUR 21576 EN/2. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2007. 56 p. ISBN: 978-92-79-05379-5. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eu-soils_docs/other/EUR21576_2.pdf (дата обращения 26.04.2023).

скохозяйственных почвах РФ, его изменение в результате сельскохозяйственного использования и величину поглощающего потенциала почв. Очевидно, что неполный по глубине учет потерь приведет к существенно искаженной, неоправданно заниженной оценке поглощения ПОВ и почти двукратному снижению экономической эффективности климатических проектов в РФ. Полученные нами данные служат основанием для предложения о включении более глубоких горизонтов почв в Национальный стандарт по учету поглощения парниковых газов.

Различия в содержании ПОВ в видах землепользования являются значимыми для ранжирования субъектов РФ, перспективных для применения опции ЗИЗЛХ Изменения землепользования для поглощения ПГ.

Проведенные исследования гармонизированы с международными принципами и подходами учета запасов ПОВ, изложенными в руководствах по учету выбросов и адсорбции ПГ, а также изданиях по надлежащей практике. Используемые данные отвечают требованиям международных правил MRV, что в целом подтверждает перспективу использования сельскохозяйственных почв РФ в климатических проектах в секторе ЗИЗЛХ.

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 бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

FUNDING

The study was carried out as a part of the implementation of the most important innovative project of national significance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system for recording data on flows of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. РАН. Комиссия по сохранению и разработке научного наследия академика В.И. Вернадского / ред. А.Л. Яншин. Институт геохимии и аналитической химии. М.: Наука, 1994. 669 с.

Глазовская М.А. Роль и функции педосферы в геохимических углеродных циклах // Почвоведение. М.: Наука, 1996. № 2. С. 174–186.

Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2020 году. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2022. 384 с.

Докучаев В.В. Учение о зонах природы и классификация почв. Собрание сочинений. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1951. Т. 6. С. 375–535.

Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0 / ред. А.Л. Иванов, С.А. Шоба. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.

Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения и землях, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий. Руководство пользователя. 2020. 117 с.

Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива “4 Промилле” — новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 185–202.

<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-20>

Козут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 103–124.

Крылатов А.К. и др. Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. М.: Госкомзем России, 1998. 60 с.

Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель, адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. А.И. Бедрицкого. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, ГЕОС. 2018. 286 с. ISBN 978-5-89118-762-2

Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество в почвах России. М.: Наука, 1996. 256 с.

Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.

Романовская А.А., Нахутин А.И., Гинзбург В.А. и др. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. М., 2022. Ч. 1. 468 с.

Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К. и др. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Версия 1.0 / Коллективная монография. Иваново: ПресСто, 2021а. 260 с. ISBN 978-5-6046374-0-1

Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Шилов П.М., Филь П.П. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621903 “Информационно-справочная база данных индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий РФ”. 2021б.

Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Л.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.

Крылатов А.К., Родин А.З., Носов С.И. Физико-химические свойства почв сельскохозяйственных угодий

- и баланс гумуса в пашне Российской Федерации. М.: Русслит, 1996. 392 с. ISBN 5-86508-049-0
- Baldock J.A., Skjemstad J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // *Organic Geochem.* 2000. Vol. 31. № 7–8. P. 697–710.
- Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European J. of Soil Sci.* 1996. Vol. 47. № 2. C. 151–163.
- Bolin B. et al. Global carbon cycle: SCOPE 13. NY: John Wiley & Sons, 1979. № CONF-7703140.
- IPCC, 2000. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2000) / J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanuel, L. Buendia, R. Hoppaus, T. Martinsen, J. Meijer, K. Miwa, K. Tanabe (Eds.). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC, 2003. Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme UNEP / J. Penman, M. Guitarsky, T. Hiraishi (Eds.). Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2003.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme / H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (Eds.). Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Annex VII: Glossary / J.B.R. Matthews, V. Möller, van Diemen R., J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (Eds.). Cambridge; NY: Cambridge Univ. Press, 2021. P. 2215–2256.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- Hiederer R., Jones R.J.A. Development of a Spatial European Soil Property Data Set. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 30 p. ISBN 978-92-79-12535-5, ISSN 1018-5593.
<https://doi.org/10.2788/19220>
- Lal R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security // *Soil Sci. and Plant Nutrition.* 2020. Vol. 66. № 1. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature.* 2015. Vol. 528. № 7580. P. 60–68.
- 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., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy // *Front. Clim.* 2019. P. 1–8.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Poultou P. et al. Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom // *Global Change Biology.* 2018. Vol. 24. № 6. P. 2563–2584.
- Schmid M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature.* 2011. Vol. 478. P. 49–56.
<https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Six J., Frey S.D., Thiet R.K., Batten K.M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems // *Soil Sci. Society of America J.* 2006. Vol. 70. P. 555–569.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil.* 2002. Vol. 241. P. 155–176.
<https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Stevenson F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons, 1995. 512 p.
- Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T. et al. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation // *Biogeochemistry.* 2007. Vol. 86. P. 19–31.
- Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // *Climatic Change.* 2002. Vol. 55. № 1–2. P. 131–156.
- Stolbovoy V. Carbon in agricultural soils of Russia. In: *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada / C.A.S. Smith (Ed.). Ottawa: Agricult. Agri-Food; Paris: OECD,* 2002. P. 301–306.
- Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia // *Soil Carbon. Progress in Soil Science / A.E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.).* 2014. P. 381–391.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38
- 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.
- Zimov S.A., Schuur E.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // *Science.* 2006. Vol. 312. № 5780. P. 1612–1613.

Assessment of the Carbon Content in Agricultural Soils of the European Russia for Climate Projects

V. S. Stolbovoy¹, * and P. P. Fil¹

¹Dokuchaev Soil Institute, Moscow, Russia

*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com

Soils and their organic carbon (SOC) are recognized as the main regulators of the global carbon cycle. At the same time, the calculations of SOC stock are not considered for climate projects and remain unclaimed. The

aim of the study is to demonstrate the perspective of SOC stock analysis for planning and decision-making within the framework of Land Use, Land-Use Change and Forestry Programs. The study exploits modern available digital soil databases processed by QGIS tools. Using the example of agricultural soils in European Russia, it has been shown that SOC reserves in the 0.3 m layer of the base year 1990 were 7.0 Gt C in arable and 3.1 Gt C in pasture lands. It was found that during the period of agricultural use, the stock of SOC decreased by 1.8 Gt C (21% of the original content) on arable land and 0.3 Gt C (9% of the original content) on pastures. The loss of SOC stock from 0.3 m layer amounted to about 2.1 Gt C (some 7.7 Gt CO₂-eq.). The decline of SOC stock from the 0.3–1.0 m layer of arable and pasture lands amounted to about 1.4 Gt C or 5.2 Gt CO₂-eq., which reaches almost 70% of the loss of the surface 0.3 m layer. The total loss of SOC stock from agricultural soils from a 1.0 m layer is about 12.9 Gt CO₂-eq., which is almost 9 times higher than the total greenhouse gas emission of the Russian Federation in 2020. It is proposed to include deeper layers of agricultural soils in the national standard for emissions and removals of greenhouse gas accounting. An approach is shown to use the spatial distribution of SOC stock for preliminary planning of climate projects within the framework of Land Use, Land-Use Change and Forestry Programs. For the practical establishment of greenhouse gas absorption projects, detailed justifications are required. The performed studies are harmonized with the requirements of the Intergovernmental Panel on Climate Change, which confirms the potential of soils use in climate projects of the Russian Federation.

Keywords: organic carbon, carbon sequestration, carbon stocks, carbon management, land use, land use change

REFERENCES

- Baldock J.A., Skjemstad J.O. The role of soil matrix and minerals in the protection of natural organic materials from biological effects. *Org. Geochem.*, 2000, vol. 31, iss. 7–8, pp. 697–710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8)
- Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.*, 1996, vol. 47, no. 2, pp. 151–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Bolin B. et al. *The Global Carbon Cycle: SCOPE 13*. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu* [Report on the State and Use of Agricultural Lands of the Russian Federation in 2020]. Moscow: FSBI "Rosinformagrotekh", 2022. 384 p.
- Dokuchaev V.V. The doctrine of nature zones and soil classification. *Sobr. Soch.*, 1951, vol. 6, pp. 375–535. (In Russ.).
- Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0]. Ivanov A.L., Shoba S.A., Eds. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Sci. Inst., 2014. 768 p.
- Edinaya federal'naya informatsionnaya sistema o zemlyakh sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya i zemlyakh, ispol'zuemykh ili predostavlennykh dlya vedeniya sel'skogo khozyaystva v sostave zemel' inykh kategorii. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Unified Federal Information System on Agricultural Lands and Lands Used or Provided for Agriculture as Part of Lands of Other Categories. User's Guide]. 2020. 117 p.
- Glazovskaya M.A. The role and functions of the pedosphere in geochemical carbon cycles. *Pochvoved.*, 1996, no. 2, pp. 174–186. (In Russ.).
- Hiederer R., Jones R.J.A. *Development of a Spatial European Soil Property Data Set*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 30 p.
- IPCC, 2000. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2000). A guide to good practice and uncertainty management in National Greenhouse Gas Inventories*. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nienzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meyer J., Miwa K., Tanabe K., Eds.). Hayama, 2000.
- 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.
- IPCC, 2003. *The Intergovernmental Panel on Climate Change's Guide to Good Practices in Land Use, Land-use Change and Forestry, the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Program of UNEP*. Penman J., Guitarsky M., Hiraishi T. et. al., Eds. Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2003.
- IPCC 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Eds. Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Annex VII: Glossary*. Matthews J.B.R., Möller V., van Diemen R., Fuglestedt J.S., Masson-Delmotte V., Méndez C., Semenov S., Reisinger A., Eds. Cambridge; New York: CUP, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- Ivanov A.L., Stolbovoi V.S. The Initiative “4 per mile” – a new global challenge for the soils of Russia. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2019, no. 98, pp. 185–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
- Kogut B.M., Semenov V.M. Assessment of soil saturation with organic carbon. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2020, no. 102, pp. 103–124. (In Russ.).
- Krylatov A.K., Nosov S.I., Yuditskii B.A., Bondarev B.E., Pervushina V.N. *Dinamika balansa gumusa na pakhotnykh zemlyakh Rossiiskoi Federatsii* [Dynamics of Humus Balance on Arable Lands of the Russian Federation]. Moscow: Agropress Publ., 1998. 60 p.
- Krylatov A.K., Rodin A.Z., Nosov S.I. *Fiziko-khimicheskie svoistva pochv sel'skokhozyaystvennykh ugodii i balans*

- gumusa v pashne Rossiiskoi Federatsii* [Physical and Chemical Properties of Agricultural Soils and Humus Balance in Arable Lands of the Russian Federation]. Moscow: Russlit Publ., 1996. 392 p.
- Lal R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2020, vol. 66, iss. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, vol. 528, no. 7580, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- 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., Vagen 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>
- Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstviy degradatsii zemel', adaptivnye sistemy i tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)" [National Report "Global Climate and Soil Cover of Russia: Assessment of Risks and Ecological and Economic Consequences of Land Degradation, Adaptive Systems and Technologies of Rational Nature Management (Agriculture and Forestry)"]. Bedritsky A.I., Ed. Moscow: GEOS Publ., 2018. 286 p.
- Natsional'nyi doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom, za 1990–2020 gg. Tom 1 [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Vol. 1]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022. 468 p.
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. *Organicheskoe veshchestvo v pochvakh Rossii* [Organic Matter in the Soils of Russia]. Moscow: Nauka Publ., 1996. 256 p.
- Orlov D.S. *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* [Humic Acids of Soils and the General Theory of Humification]. Moscow: MSU Publ., 1990. 325 p.
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Front. Clim.*, 2019, pp. 1–8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powlson D. Major limitations to achieving "4 per 1000" increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Glob. Change Biol.*, 2018, vol. 24, no. 6, pp. 2563–2584. <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>
- Schmid M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Manning D.A.C., Nan-nipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, vol. 478, pp. 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Six J., Frey S.D., Thiet R.K., Batten K.M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, vol. 70, pp. 555–569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 2002, vol. 241, pp. 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Stevenson F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1995. 512 p.
- Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 2007, vol. 86, pp. 19–31.
- Stolbovoi V. Carbon in Russian soils. *Clim. Change*, 2002, vol. 55, iss. 1–2, pp. 131–156.
- Stolbovoi V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Ivanov A.L., Il'in L.I., Kolesnikova L.G., Petrosyan R.D., Shilov P.M., Fil' P.P., Korchagin A.A. *Reestr indikatorov kachestva pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossiiskoi Federatsii. Versiya 1.0* [Register of Indicators of Soil Quality of Agricultural Lands of the Russian Federation. Version 1.0]. Kozlov D.N., Sapozhnikov P.M., Eds. Moscow; Suzdal': Verkhnevolzh. Fed. Agrar. Nauch. Tsentr, 2021a. 260 p.
- Stolbovoi V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Shilov P.M., Fil' P.P. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2021621903 v "Informatsionno-spravochnoi baze dannykh indikatorov kachestva pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii RF"* [Certificate of State Registration of the Database no. 2021621903 in "Information and Reference Database of Indicators of Soil Quality of Agricultural Lands of the Russian Federation"]. 2021b.
- Stolbovoy V. Carbon in agricultural soils of Russia. In *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada*. Smith C.A.S., Ed. Ottawa: Agriculture. Agri-Food; Paris: OECD, 2002, pp. 301–306.
- Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia. In *Soil Carbon. Progress in Soil Science*. Hartemink A.E., McSweeney K., Eds. Cham: Springer, 2014, pp. 381–391. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38
- Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*. Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Tyurin I.V. *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v pochvoobrazovanii i plodorodii* [Organic Matter of Soils and Its Role in Soil Formation and Fertility]. Leningr.: Selkhozgiz, 1937. 287 p.
- Vernadskii V.I. *Zhivoe veshchestvo i biosfera* [Living Matter and the Biosphere]. Yanshin A.L., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1994. 669 p.
- Zimov S.A., Schuur E.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget. *Science*, 2006, vol. 312, iss. 5780, pp. 1612–1613. <https://doi.org/10.1126/science.1128908>