

УДК 631.417.2

ДЕГУМУСИРОВАНИЕ И ПОЧВЕННАЯ СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕРОДА

© 2021 г. Б. М. Когут^{1,*}, В. М. Семенов^{2,3}, З. С. Артемьева¹, Н. Н. Данченко¹

¹ Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В. В. Докучаева
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Россия

² Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
– обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН
142290 Пушкино Московской обл., Институтская ул., 2, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московской обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы ул. Институт, влад. 5, Россия

*E-mail: kogutb@mail.ru

Поступила в редакцию 18.09.2020 г.

После доработки 19.10.2020 г.

Принята к публикации 11.02.2021 г.

Рассмотрены понятия потерь (дегумусирование), сохранения и накопления (секвестрация, депонирование) органического вещества в почвах и предложены новые формулировки отдельных терминов. Обосновано положение о доминирующей роли верхнего слоя 0–40 (50) см почв в дегумусировании и секвестрации углерода. Представлены материалы о реальных размерах потерь и секвестрации органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в почвах. Проведен критический анализ положений инициативы “4‰”. Указано на принципиальную ошибочность изложенного в ней подхода оценивать углерод-секвестрирующий потенциал почв по содержанию и запасам $C_{\text{орг}}$ в 2-метровом слое. Обоснована необходимость проведения долгосрочного национального мониторинга органического углерода в почвах России.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, потери гумуса, накопление гумуса, инициатива “4‰”.

DOI: 10.31857/S0002188121050070

ВВЕДЕНИЕ

Текущее столетие – это проблемы глобальных изменений природной среды и климата, дефицита продовольствия и энергии, утраты биоразнообразия и устойчивости экосистем, дефорестизации и деградации почв. В этом же ряду стоит проблема превышения “углеродного бюджета человечества”, тесно связанная с дегумусированием почв и разбалансированием биогеохимических циклов углерода и азота. Научное объяснение причин этих проблем и выработка стратегии смягчения последствий их проявления – одна из ключевых задач современного почвоведения и исследований почвенного органического вещества (ПОВ) [1].

ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

Исследователи, изучающие вопросы потерь и накопления органического вещества почвами, – проблему, имеющую давнюю историю, все еще до настоящего времени сталкиваются с разночтениями и недостаточной смысловой точностью понятийного аппарата в этой области. По мне-

нию Д.С. Орлова с соавт. [2], для широко употребляемых понятий и терминов в области изучения ПОВ необходимы однозначные определения, способные обеспечить единое понимание публикуемых текстов и теоретических выводов.

Рассмотрим основные понятия, которые нами вынесены, в т.ч. и для обсуждения в профессиональной среде, с целью выработки для них унифицированных, а в будущем – и стандартизированных формулировок и символов.

Почвенное органическое вещество. К нему относится вся совокупность органических соединений и материалов растительного, животного и бактериального происхождения, независимо от того, являются ли эти соединения и материалы природными или синтетическими [2]. Вероятно, в это определение следует внести поправку: заменить “бактериального” на “микробного”. Включение синтетических органических соединений и органических поллютантов природного происхождения (нефть и нефтепродукты, уголь и т.п.) в ПОВ спорно, однако в современных условиях

бурного развития техногенеза окружающей среды оно может оказаться правильным. В зависимости от целей, подходов и методов познания допустимы альтернативные определения почвенного органического вещества. В англоязычной литературе ПОВ – это все природные и термически измененные органические материалы биологического происхождения, находящиеся в почве или на почвенной поверхности независимо от источника, будь он живой или мертвый, или стадии разложения, но за исключением надземной части живых растений [3]. Эти и другие известные [4] определения передают в основном концептуальное представление о ПОВ. В нашем определении ПОВ акцент сделан на номенклатуру формирующих его компонентов, взаимодействие органической части почвы с минеральной матрицей, подверженность органических соединений стабилизации и количественное фракционирование. Под ПОВ понимают “систему разноразмерных органических частиц и биомолекул растительно-го, животного и микробного происхождения, находящихся в свободном, агрегированном и связанном почвенными минералами состоянии”. В рамках этого определения ПОВ слагают растительные остатки (10–2 мм), твердые дискретные частицы полуразложившегося органического материала (2–0.053 мм), гумус (<0.053 мм) в виде химически связанных минеральными частицами биомолекул и гуминовых веществ, растворенные вещества (<0.45 мкм), угли и обугленные материалы. Указанные размеры частиц являются стандартными для основных компонентов ПОВ и используются в качестве основного признака при фракционировании [3]. Растительные остатки локализованы в мегаагрегатах, полуразложившиеся остатки в виде твердых дискретных частиц (Particulate Organic Matter, *ПОМ*) – в макро- и микроагрегатах, растворенное органическое вещество – в поросфере почвы, а гумус представляет собой часть ПОВ, которую в современной литературе называют “минерально-ассоциированным органическим веществом” (Mineral Associated Organic Matter, *МАОМ*), присутствующим во фракциях пыли и глины. Присутствие растительных остатков, твердых дискретных частиц и растворенного органического вещества отличает ПОВ от гумуса.

Гумус. Представляет собой подсистему почвенного органического вещества, сформированную из органических материалов и соединений растительного, животного и микробного происхождения, прошедших гумификационные и негумификационные стадии стабилизации, со временем полного разложения составляющих компо-

нентов >10 лет [5]. Гумусом следует считать только ту часть ПОВ, которая относится к медленному и пассивному пулам со временем оборачиваемости (*ТТ*) углерода соответственно 10–100 и >100 лет в отличие от быстро оборачиваемого активного пула с *ТТ* от нескольких суток и месяцев до 10 лет [4, 6]. В операциональном понимании, предусматривающем переход от концептуального к эмпирическому познанию этого природного образования, гумус – это хорошо разложившийся органический материал преимущественно микробного происхождения размером <0.053 мм, связанный, как правило, почвенными минералами [7]. Если в ПОВ растительная биомасса может находиться в исходном или в слабо-разложившемся виде, то в гумусе она содержится только после переработки микроорганизмами и преобразования в микробную биомассу. Гумус отвечает за консервативные свойства ПОВ, придает ему стабильность и обеспечивает сохранность в почве.

Дегумусирование. Процесс уменьшения содержания в почве органического углерода и мощности гумусового профиля с ухудшением качественного состава почвенного органического вещества [4]. При дегумусировании, в отличие от сезонной или краткосрочной динамики, уменьшение содержания органического углерода в почве затрагивает не только активную (лабильную) часть ПОВ, но и стабильную (пассивную) часть в виде гумуса, которую невозможно моментально восполнить. По сравнению с дегумификацией, которой следует обозначать распад гуминовых веществ, дегумусирование характеризует тотальные потери ПОВ и гумуса, которые подразделяются на биохимические и физические [8].

Биохимические потери. Уменьшение содержания и/или запасов ПОВ и гумуса в верхнем слое почв за счет минерализации органических соединений и материалов.

Физические потери. Уменьшение содержания и/или запасов ПОВ и гумуса в почве в результате механического удаления части/всего почвенного профиля или физического перемещения тонкодисперсных частиц. Среди них, в свою очередь, можно выделить эрозионные, технологические и миграционные потери.

В результате выноса почвенных тонкодисперсных частиц (относительно обогащенных гумусом) под воздействием водных потоков или ветра происходят эрозионные потери гумуса. В местах привноса этих частиц формируются намытые (наносные), богатые гумусом почвы, т.е.

образующиеся за счет физических процессов накопления органического вещества.

При уборке сельскохозяйственных культур, особенно пропашных (сахарная свекла, картофель и т.п.), вместе с урожаем выносятся почвенный материал верхних, наиболее гумусированных слоев, что приводит к технологическим потерям гумуса.

В процессе иссушения (замерзания—оттаивания) почв образуются трещины, по которым под воздействием природных и/или антропогенных факторов, происходит просыпка почвенного материала, приводящая к миграционным потерям гумуса из верхних горизонтов почв. Миграционные потери могут быть также и физико-химическими, обусловленными растворением органических и гумусовых веществ в воде под влиянием процессов подкисления, подщелачивания, что приводит к миграции последних по почвенному профилю. Нисходящая миграция растворенных органических соединений является одним из механизмов обогащения нижних горизонтов почвы органическим углеродом и его депонирования. Основные причины и механизмы потерь органического вещества при сельскохозяйственном использовании почв ранее изложены в работах [2, 4].

Образование и накопление почвенного органического вещества и гумуса (гумусообразование и гумусонакопление. Сохранение гумуса, почвенная секвестрация и почвенное депонирование органического углерода имеют сходные процессы и эффекты, но отличаются по смысловому наполнению терминов.

Гумусообразование — это биотическое и абиотическое преобразование органических материалов в ПОВ и в гумус. Образование “нового” ПОВ может происходить как при дегумусировании, так и при гумусонакоплении или не сопровождаться приростом $C_{орг}$ в почве в случае уравновешенных размеров образования и потерь ПОВ.

Гумусонакопление — приращение содержания и/или запасов ПОВ и гумуса в почве, вследствие преобладания гумусообразования над дегумусированием.

Сохранение гумуса — длительное поддержание содержания и/или запасов ПОВ и гумуса в почве на стационарном уровне при условиях уравновешенности гумусообразования и дегумусирования.

Почвенная секвестрация углерода. Перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией формирующейся морт-массы в гумус с периодом полного разложения (минерализации) составляющих его новообразо-

ванных компонентов от 10 до 100 лет. Чтобы считаться секвестрированным, органическое вещество должно не просто поступить в почву, а стабилизироваться, приобретая защищенность от быстрого разложения, но быть способным к медленной минерализации. Углерод со временем полного оборота >100 лет следует считать депонированным. Наиболее употребляемые способы оценки почвенной секвестрации углерода — это определение изменений валового содержания $C_{орг}$ в почве или его запасов в слое 0–20 (0–50, 0–100) см за какой-либо период или содержания $C_{орг}$ в гранулометрических фракциях пыли и глины размером <0.05 (0.02) мм [9].

Депонирование органического углерода в почве. Долговременное запасание $C_{орг}$ преимущественно в виде гумуса с периодом полного разложения (минерализации) составляющих его компонентов >100 лет в верхнем 0–30 (50) см слое почв и/или захоронение неживого органического вещества в почвенном профиле на глубине >50 (100) см. Если почвенная секвестрация углерода обязательно предусматривает удаление CO_2 из атмосферы за счет получения новой биомассы, то депонирование направлено на сохранение $C_{орг}$ в почве и предотвращение относительно быстрого его возврата из почвы в атмосферу в ходе минерализации.

МОНИТОРИНГ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

Общие закономерности дегумусирования при сельскохозяйственном освоении и использовании почв достаточно хорошо известны. Вместе с тем глобальные количественные оценки потерь органического углерода почвами по вполне понятным причинам слишком условны и приблизительны. И это, несмотря на то что принципы, технология и методы организации и проведения мониторинга органического углерода, в том числе и высокоточного, в почвах России достаточно подробно ранее разработаны и описаны [10–17].

Высокоточный мониторинг почвенного органического углерода включает следующие составляющие: аналитическое обеспечение (унифицированная методика прямого определения содержания $C_{орг}$ способом сухого сжигания на автоматических анализаторах, стандартные образцы почв, аттестованные на содержание $C_{орг}$ и информация об аналитических ошибках), учет пространственной variability, сезонной изменчивости и многолетних изменений содержания $C_{орг}$ в почве, определение фактических размеров поступления $C_{орг}$ в почву, пороговой величины насыщения

почвы органическим углеродом, эмиссионного и секвестрирующего потенциалов почвы. Только располагая надежной информацией об этих составляющих, можно оценить реальные запасы $C_{\text{орг}}$ в почвах России, определить углеродсеквестрирующую способность почв и дать количественную оценку многолетней динамики (тренда изменения) содержания органического углерода в почвах длительных полевых опытов и биосферных заповедников.

Однако масштабировать высокоточный мониторинг органического углерода по финансовым, техническим и организационным причинам даже в условиях одной страны крайне затруднительно. Вместе с тем, в связи с проектом ФАО ООН GSOC17 по составлению Всемирной карты запасов органического углерода в слое 0–30 см почвы [18, 19] предлагаемая методология мониторинга $C_{\text{орг}}$ в почвах в настоящее время оказывается весьма востребованной. Представляется актуальным поэтапная ее реализация в почвах длительных полевых опытов и биосферных заповедников России, а затем на региональном уровне. Срок проведения работ по уточнению оценки запасов $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое 0–30 см почв России в целом составит не менее 10–15 лет. Следует отметить, что Почвенная карта РСФСР масштаба 1:2 500 000 [20, 21] создавалась в течение почти 20 лет. Работа по созданию и аттестации государственных стандартных образцов почвенных масс Почвенного института им. В. В. Докучаева и НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета продолжалась около 20 лет [22], а последующий срок переаттестации этих образцов составил еще 10 лет [23]. Не вызывает сомнений, что для реализации крупных научных проектов в области почвоведения требуется длительный период. Именно к таким проектам необходимо отнести и национальный мониторинг органического углерода в почвах России.

Фундаментальное определение Ю.А. Израэля [24] гласит, что “Экологический мониторинг (мониторинг окружающей среды) — это комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды”. Тогда мониторинг органического углерода в почве — это система наблюдений и контроля за содержанием и запасами $C_{\text{орг}}$, оценка их состояния и прогноз изменений под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Потери и накопление органического вещества и гумуса на современном (~100 лет) этапе агрогенной и постагрогенной эволюции почв происходят в основном в слое 0–40 см [6, 25–35]. Можно предположить, что изменения при таких условиях в содержании $C_{\text{орг}}$ в более глубоких слоях почв могут составлять максимум 10^{-2} – $10^{-3}\%$, а учитывая уровень аналитических ошибок и высокую вариабельность этого показателя в слоях глубже 40 см, экспериментально количественно зафиксировать такие флуктуации не представляется реальным.

По данным радиоуглеродного датирования, современное обновление гумуса происходит только в верхнем слое 0–40 см черноземов [36, 37]. В работе [38] показано увеличение среднего времени пребывания почвенного органического углерода до 2000–10000 лет на глубине >20 см, что, по мнению авторов, отражает существенное снижение микробиологической активности вниз по почвенному профилю.

На основании обобщения материалов из 50 литературных источников [34], обработаны данные 625 целинных и освоенных почв (13 стран мира), находящихся на парных делянках, в длительных опытах или хронорядках. Анализ динамики запасов органического углерода в зависимости от длительности использования почв показал, что наибольшие изменения происходили в первые 20 лет освоения. Во всех случаях проявилось влияние исходного содержания $C_{\text{орг}}$: почвы с очень низким содержанием $C_{\text{орг}}$ (<1%) теряли очень мало гумуса или имели тенденцию к накоплению небольших количеств органического углерода после введения в культуру; почвы с высоким содержанием $C_{\text{орг}}$ (>5%) в период возделывания теряли ~20% $C_{\text{орг}}$. Потери $C_{\text{орг}}$ большинством пахотных почв из верхнего слоя (0–30 см) составляют в среднем менее чем 20% от исходных величин. Эти изменения, по мнению автора, не могут быть перенесены на более глубокие слои. В другой работе, этот же автор [33], сопоставляя содержание $C_{\text{орг}}$ в 303 профилях, охватывающих 88 почвенных серий из 12 штатов США, пришел к выводу, что потери гумуса характерны главным образом для пахотных слоев, и они частично могут компенсироваться его накоплением в нижележащих слоях.

В 1964 г. на Петринском опорном пункте (Курская обл.) Почвенного института им. В.В. Докучаева на типичном черноземе был заложен опыт с бессменным чистым паром. В 1998 г. этот опыт был модифицирован: 1/3 участка отведена под залежь, а 2/3 оставлены без изменений [39]. При бессменном паровании типичного чернозе-

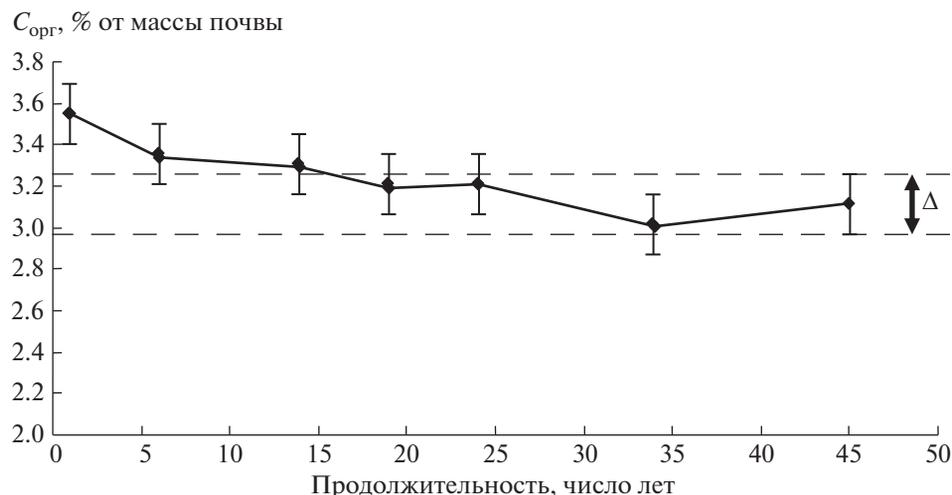


Рис. 1. Дегумусирование старопахотного типичного чернозема под бесменным чистым паром: Δ — максимальный размах многолетних изменений содержания $C_{\text{орг}}$ в пахотном слое 0–25 см после установления в почве квазиравновесного состояния.

ма равновесное состояние в содержании $C_{\text{орг}}$ установилось в течение ~20–25 лет (рис. 1). При этом следует отметить, что длительный опыт на Петринском опорном пункте был заложен на старопахотном (~200 лет) черноземе, в определенной степени уже выпаханном [40]. На начальном этапе за 14 лет парования верхний слой (0–40 см) этого типичного чернозема потерял гумуса ~31 т/га, т.е. ежегодная убыль гумуса составляла ~2.2 т/га или 0.03% [41]. Для сравнения приведем данные [42], которые показали, что за 15 лет пребывания целинного типичного чернозема (Центрально-Черноземный государственный биосферный заповедник им. В.В. Алехина, Курская обл.) в режиме бесменного черного пара из верхнего слоя 0–30 см почвы минерализовалось гумуса 33 т/га.

Анализ показал (табл. 1), что при зарастании участка бесменного пара естественной растительностью в течение 3-х лет накопления органического вещества в типичном черноземе не происходило и даже отмечена некоторая тенденция к снижению содержания $C_{\text{орг}}$ в этих условиях. Объяснить этот факт можно следующим образом. При поступлении свежего органического вещества растений в максимально выпаханную почву активизируются микробиологические процессы. Микроорганизмы начинают использовать в качестве основного источника питания инертный гумус, вызывая его минерализацию, т.е. проявляется прайминг-эффект [45–47]. С течением времени количество поступающей естественной растительности значительно возрастает: одна существенная ее часть минерализуется, а другая незначительная

часть через ряд промежуточных процессов стабилизируется, переходя в гумус. Из данных [44] следует, что ежегодное приращение $C_{\text{орг}}$ за первые 17 лет залежи составляли ~0.05% (0.5‰). Необходимо отметить, что некоторые расхождения между данными работ [43] и [44] по содержанию $C_{\text{орг}}$ в типичном черноземе под бесменным черным паром, находящимся в квазистационарном гумусовом состоянии, связаны с многолетними изменениями $C_{\text{орг}}$, использованием разных приборов

Таблица 1. Содержание органического углерода на участке бесменного черного пара, заложенного на старопахотном типичном черноземе и отведенного под залежь (C , % от массы почвы, слой 0–25 см)

Вариант, год отбора образцов	n	\bar{x}	s	$s_{\bar{x}}$	V , %
Бесменный пар (участок отведенный под залежь), 1998*	6	3.43	0.24	0.10	6.9
Залежь, 2001*	6	3.24	0.11	0.05	3.4
Залежь, 2015**	3	3.72	0.15		
Бесменный пар, 1998*	10	3.29	0.17	0.05	5.1
Бесменный пар, 2001*	10	3.19	0.09	0.03	2.8
Бесменный пар, 2015**	3	2.80	0.07		

Примечание: n — число образцов, \bar{x} — среднее, s — стандартное отклонение, $s_{\bar{x}}$ — ошибка среднего, V — коэффициент вариации.

* [43].

** [44].

при определении его содержания и методик отбора почвенных проб у двух авторских коллективов.

В хронорядях залежей на дерново-подзолистых почвах Костромской и Тверской обл. отмечали следующую динамику накопления органического вещества в процессе зарастания пашни лесом в слое 0–20 см. В первые 20 лет скорость почвенной секвестрации углерода составила ~0.8 т $C_{\text{орг}}$ /га в год (0.02% или 0.2‰), а в последующие 80 лет она снизилась до 0.23–0.64 т $C_{\text{орг}}$ /га в год (0.006–0.016% или 0.06–0.16‰) [48, 49].

В период резкой смены систем землепользования в России в конце XX века более 45 млн га из 110 млн га пашни были переведены в залежное состояние. Зарастание пашни естественной растительностью сопровождалось накоплением в почве органического вещества. В верхнем слое 0–20 см почв скорость секвестрации $C_{\text{орг}}$ в первые 20 лет после зарастания (1990–2009 гг.) составила 0.96 т/га в год (0.04% или 0.4‰), а в следующие 30 лет прогнозируется в размере 0.19 т/га в год (0.008% или 0.08‰) [31].

По мета-данным, технология No-till по сравнению с традиционной системой обработки почв способствует увеличению содержания органического вещества в верхнем слое 0–30 см [6, 29, 32, 35]. Величина почвенной секвестрации углерода в этих условиях составила 0.57–4.9 т С/га в год (~0.02–0.16% или 0.2–1.6‰). Только в субтропиках Бразилии в севообороте с травами [50] преимущество технологии No-till на накопление органического вещества проявлялось до глубины 100 см (0.48–1.53 т С/га в год). Согласно работе [51], корневая биомасса трав является основным источником накопления органического вещества в глубоких слоях почв. Поступающие на поверхность свежие растительные остатки сельскохозяйственных растений не вносят существенного вклада в накопление $C_{\text{орг}}$ в нижних горизонтах почв вследствие их минерализации и консервации в верхнем слое. К тому же по данным [30], 90% первичного органического вещества, поступившего в почву, происходящего из растительной биомассы, вновь минерализуется и возвращается в атмосферу.

По мнению [6], секвестрация органического углерода в почве требует определенного срока (~100 лет), чтобы считать устойчивым повышение его содержания по сравнению с исходным под воздействием сельскохозяйственных мероприятий.

ИНИЦИАТИВА 4 ПРОМИЛЛЕ

Основываясь на вышеприведенных в данной статье материалах о размерах потерь и накоплении органического углерода в почвах, попытаемся критически оценить широко обсуждаемую инициативу “Soil carbon 4 per mille” [52–58].

Соглашение “4 per mille Soils for Food Security and Climate” было продекларировано на 21-й Конференции участников Конвенции ООН по глобальному изменению климата (СОР21) в Париже (30.11–11.12.2015). Целью данного документа явилось стремление увеличивать содержание органического углерода в почвах мира на 4‰ в год в качестве компенсации глобальной эмиссии парниковых газов антропогенными источниками [59, 60]. В основе этой инициативы лежит следующее чисто механистическое допущение. Если соотнести ежегодные объемы антропогенных выбросов углерода в атмосферу и запасы $C_{\text{орг}}$ в 2-метровом слое почв (8.9 к 2400 Гт), то получаемая величина в 4 промилле (0.4% $C_{\text{орг}}$ от массы почвы) может служить количественным ориентиром увеличения содержания $C_{\text{орг}}$ в почве с целью компенсации эмиссии углерода в атмосферу.

Приведенные в настоящей статье собственные экспериментальные и литературные данные секвестрации органического углерода почвами земель сельскохозяйственного назначения показывают ряд существенных недостатков в выдвинутой инициативе в количественном аспекте: во-первых, способностью к накоплению $C_{\text{орг}}$ обладает только гумусовый горизонт, а не 2-метровый почвенный профиль, как совершенно необоснованно считают авторы инициативы; во-вторых, ежегодные размеры секвестрации углерода даже в верхнем слое в глобальном масштабе как минимум на порядок меньше, чем заявлено в инициативе; в-третьих, допущены грубые ошибки при переводе запасов органического углерода (т/га) в содержание $C_{\text{орг}}$ (% от массы почвы), что привело к полному несоответствию между величиной 4‰ (0.4% от массы почвы) и установленными самими же авторами скоростями ежегодной почвенной секвестрации углерода, выраженными в т/га. Следует также обратить внимание на то, что при смене систем землепользования или земледелия, способных повысить углеродсеквестрирующую способность, через определенный срок (20–50–100 лет) в почве устанавливается квазистационарное гумусовое состояние, т.е. достигается уравновешенность процессов минерализации и гумусообразования.

К приведенным выше аргументам и фактам против инициативы “Soil carbon 4 per mille” необ-

Таблица 2. Гипотетический сценарий секвестрации углерода в черноземах ЦЧО России (условная территориальная единица) в верхнем слое 0–25 см

Степень выпаханности или эродированности почв	Доля площадей, %	Элемент системы землепользования или земледелия	Средневзвешенное содержание $C_{орг}$ на участке, %		Время достижения стационарного уровня, лет	Средняя скорость секвестрации $C_{орг}$,	
			исходное	конечное		% в год	т/га в год
1. Сильновыпаханные	5	Залежь	3.1	5.0	50	0.038	1.03
2. Средневыпаханные	40	Пашня, севооборот, традиционная обработка, Навоз 4–8 т/га + + NPK	3.5	4.0	30	0.017	0.46
3. Средневыпаханные	10	Пашня, севооборот, технология No-till	3.5	4.7	50	0.024	0.65
4. Средневыпаханные	15	Лесополосы	3.4	4.0	100	0.006	0.16
5. Слабо- и среднеэродированные	20	Пастбища	2.0	4.0	1000	0.002	0.05
6. Сильноэродированные	10	Луга	1.2	3.2	5000	0.0004	0.01
Всего:	100	Средневзвешенная скорость секвестрации на всей территории				0.0124	0.34

ходимо добавить следующие убедительные примеры.

При анализе данных 42 длительных полевых опытов мира было достоверно установлено, что ежегодно вносимый навоз в дозе 11 т/га способен увеличить содержание $C_{орг}$ в пахотном слое за весь срок стационарного эксперимента по сравнению с неудобренным вариантом в среднем на 0.24% (2.4‰) $C_{орг}$ [30]. При этом отметим, что навоз – это уже ранее секвестрированное и глубоко трансформированное органическое вещество. Близкие результаты были получены и в работе [40]. Например, при ежегодном внесении навоза 20 т/га под бессменный картофель содержание $C_{орг}$ за 35 лет возросло в слое 0–25 см типичного чернозема на 0.4% (4‰) по отношению к неудобренному контролю.

Согласно [9], наличие у разных почв предельной границы насыщения углеродом делает неральной распространение инициативы “4 промилле” на весь почвенный покров в глобальном масштабе. Более того, по авторитетному мнению Кершенса, полвека изучавшего динамику гумуса в полевом стационаре (заложен в 1902 г.) в Бад-Лаухштедте (Германия) и обобщившего данные содержания $C_{орг}$ в почвах 79 длительных опытов мира, эта “инициатива” носит совершенно необоснованный характер и не может быть выпол-

нена в условиях XXI века. “Теоретически это могло быть осуществимо, если бы отказались от питания 7 миллиардов человек” [30].

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОРИЕНТИРОВОЧНЫХ РАСЧЕТОВ ПОЧВЕННОЙ СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА

Проблема сохранности гумуса и рационального управления почвенным органическим углеродом в последнее время приобретает все бóльшую актуальность, о чем свидетельствуют материалы встречи министров сельского хозяйства стран G20 (Аргентина, 2018 г.) [61]. Органическое вещество почв в определенной степени оказывает влияние на глобальные циклы углерода, в т.ч., вероятно, и на климатические флуктуации, связанные с парниковым эффектом, и играет первостепенную роль в простом и расширенном воспроизводстве плодородия почв.

Теоретически рассчитать приблизительную ежегодную скорость почвенной секвестрации углерода как для отдельных территорий, так и в целом для почвенного покрова России, не представляет особой сложности. Однако, чтобы практически выполнить эти расчеты, необходимо располагать определенной информацией, которая, к сожалению, либо отсутствует, либо харак-

теризуется как недостаточно достоверная. Тем не менее, попытаемся составить гипотетический сценарий почвенной секвестрации углерода на условной территориальной единице ЦЧО России (табл. 2). Теоретически рассчитанная ежегодная скорость почвенной секвестрации углерода для этой территории составила $\sim 0.01\%$ (0.1%), что по порядку величин ($n \times 10^{-2}\%$) достаточно близка таковой, полученной в реальных условиях. Подобным же образом можно приблизительно оценить и средневзвешенную скорость почвенной секвестрации для всей территории России. Но для практического внедрения этих расчетов требуется организация и проведение национального мониторинга почвенного органического углерода. Существующие на данный период базы данных содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ в почвах России необходимым для таких расчетов требованиям не отвечают.

Уточнение оценок запасов почвенного органического углерода является целью современного проекта Глобального почвенного партнерства ФАО ООН – создание Всемирной карты запасов органического углерода в слое 0–30 см почв [18, 19]. Еще более востребована высококачественная аналитическая информация о содержании и запасах органического углерода в верхнем слое почв для оценки реальных размеров почвенной секвестрации углерода в России.

Однако, к сожалению, следует признать, что базы данных содержания и запасов органического углерода в почвах России, сформированные на основе результатов обследований еще в 1960–1980 гг. организациями систем Гипрозема и Агротехслужбы, данных почвенно-агротеххимических аналитических лабораторий НИИ и вузов сельскохозяйственного и биологического профиля страны, существенно устарели, не отвечают современным требованиям надежности и нуждаются в полном обновлении. Они были преимущественно созданы на основе определения содержания $C_{\text{орг}}$ косвенным методом – методом Тюрина, причем в самых различных модификациях. Д.С. Орлов с соавт. [2] указывал на значительные систематические ошибки при использовании метода Тюрина в разных модификациях даже во внутрилабораторном эксперименте. Низкое качество аналитических данных было также связано и с тем, что в абсолютном большинстве исследований не применяли стандартные образцы почвенных масс, аттестованные на органический углерод. Такое положение приводило к массовым как систематическим, так и случайным аналитическим ошибкам. Отмеченное нашло, наряду и с другими упущениями и недочетами, отражение в

существенных разбросах обобщенных оценок запасов почвенного органического углерода на территории России у различных авторов [62–65].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже отмечено выше, к настоящему времени на базе современных теоретических знаний и высокоточного аналитического оборудования была создана методология мониторинга почвенного органического углерода. Существует острая необходимость скорейшего поэтапного проведения мониторинга органического углерода в почвах России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Л., Когут Б.М., Семенов В.М., Оберландер М., Шанбахер Н. Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 3–38.
2. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
3. Baldock J.A., Broos K. Soil Organic Matter // Handbook of soil sciences. Properties and processes. 2nd edit. / Eds. P.M. Huang, Y. Li, M.E. Sumner. BocaRaton: Taylor & Francis Group, 2011. P. 11.1–11.52.
4. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
5. Когут Б.М., Семенов В.М. Количественный подход к формулировке понятия ‘гумус’ пахотных почв // Современные проблемы изучения почвенных и земельных ресурсов. Сб. докл. III Всерос. откр. конф. 9–11.12.2019. М., Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2019. С. 165–169.
6. Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Courcelles V.R., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2013. V. 164. P. 80–99.
7. Семенов В.М. Органический континуум почвы: структурно-функциональная организация, ключевые процессы и основные драйверы // Гуминовые вещества в биосфере. Мат-лы VII Всерос. конф. с международ. участием, посвящ. 90-летию со дня рожд. Д.С. Орлова. Москва, 4–8 декабря 2018. М.: МАКС Пресс, 2018. С. 78.
8. Когут Б.М., Лукин С.М., Масютенко Н.П., Шарков И.Н., Турусов В.И., Чевердин Ю.И., Титова Т.В. Потери и воспроизводство органического вещества в пахотных почвах // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. Т. 1. Теоретические и

- методические основы предотвращения деградации почв (Земель) сельскохозяйственных угодий. М.: Почв. Ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2013. Гл. 9. С. 369–382.
9. *Когут Б.М., Семенов В.М.* Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103–124.
 10. Аналитическое обеспечение мониторинга гумусового состояния почв: Метод. указ. Состав. Б.М. Когут. М.: РАСХН, 1993. 74 с.
 11. *Добровольский Г.В., Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Принципы и задачи почвенного мониторинга // Почвоведение. 1983. № 11. С. 8–16.
 12. *Когут Б.М.* Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. 48 с.
 13. *Орлов Д.С., Когут Б.М.* Принципы организации мониторинга содержания и качества органического вещества почв // Ресурсосберегающие технологии использования органических удобрений в земледелии. Владимир: РАСХН, 2009. С. 18–22.
 14. Свидетельство на стандартный образец СП-1 (курский чернозем) № 901-90 (ООКО152) по Государственному реестру мер и измерительных приборов СССР (разд. “Стандартные образцы”). М.: ВАСХНИЛ, 1991. 14 с.
 15. Свидетельство на стандартный образец СП-2 (московская дерново-подзолистая почва) № 902-90 (ООКО153) по Государственному реестру мер и измерительных приборов СССР (разд. “Стандартные образцы”). М.: ВАСХНИЛ, 1991. 14 с.
 16. Свидетельство на стандартный образец СП-3 (прикаспийская светло-каштановая почва) № 903-90 (ООКО151) по Государственному реестру мер и измерительных приборов СССР (разд. “Стандартные образцы”). М.: ВАСХНИЛ, 1991. 14 с.
 17. *Сорокина Н.П., Когут Б.М.* Динамика содержания гумуса в пахотных черноземах и подходы к ее изучению // Почвоведение. 1997. № 2. С. 178–184.
 18. *Чернова О.В., Голозубов О.М.* Всемирная карта запасов органического углерода в 30 см слое почвы для территории России (проект ФАО ООН GSOC17) // Современное состояние черноземов. Мат-лы II Международ. научн. конф. Т. 1. Ростовн/Д.–Таганрог, 2018. С. 49–56.
 19. Soil Organic carbon mapping. GSOC Map. cookbook manual / Eds. Y. Yugini, R. Baritz, R.R.Vargas. Rome, 2017.
 20. *Иванов И.В., Замотаев И.В.* Научные идеи почвовед-географа В.М. Фридланда, их истоки и развитие (к 100-летию со дня рождения) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 202–219.
 21. Почвенная карта РСФСР масштаба 1:2500000 / под ред. В.М. Фридланда. М.: ГУГК, 1988. 16 листов.
 22. *Большаков В.А., Когут Б.М., Фрид А.С.* Переаттестация государственных стандартных образцов почвенных масс // Почвоведение. 1995. № 3. С. 308–313.
 23. Стандартные образцы состава континентальных осадочных отложений. Иркутск: НИИ прикладной физики ИркутГУ, 2001. 30 с.
 24. *Израэль Ю.А.* Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 376 с.
 25. *Артемьева З.С.* Органические органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 2008. 48 с.
 26. *Иванов И.В., Песочина Л.С., Семенов В.М.* Биоминерализация органического вещества в современных целинных, пахотных, погребенных и ископаемых черноземах // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1192–1202.
 27. Органическое вещество пахотных почв. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М., 1987. 173 с.
 28. *Тимова Н.А., Когут Б.М.* Трансформация органического вещества при сельскохозяйственном использовании почв // Итоги науки и техники (сер. почвоведение и агрохимия). Т. 8. М.: ВИНТИ, 1991. 156 с.
 29. *Angers D.A., Eriksen-Hamel N.S.* Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis // Soil Sci. Soc. Am. J. 2008. V. 72. P. 1370–1374.
 30. *Körschens M.* Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”. 2018. 12 p.
 31. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.J., Six J., Kuzyakov Y.* Carbon cost of collective farming collaps in Russia // Glob. Change Biol. 2014. V. 20 (3) P. 938–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
 32. *Luo Z., Wang E., Sun O.J.* Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments // Agric. Ecosyst. Environ. 2010. V. 139 (1–2). P. 224–231.
 33. *Mann L.K.* A regional comparison of carbon in cultivated and uncultivated allisols and mollisols in the Central United States // Geoderma. 1985. V. 36. P. 241–253.
 34. *Mann L.K.* Changes in soil carbon storage after cultivation // Soil Sci. 1986. V. 142. P. 279–288.
 35. *Virto I., Barre P., Burlot A., Chenu C.* Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems // Biogeochemistry. 2012. V. 108. P. 17–26.
 36. *Черкинский А.Е.* Применение радиоуглеродного метода для изучения трансформации гумусовых кислот современных почв // Тез. Всесоюз. шк.-семинара “Методы изотопной геологии”. М., 1983. С. 161–163.
 37. *Чичагова О.А.* Радиоуглеродное датирование гумуса почв. Метод и его применение в почвоведении и палеогеографии. М.: Наука, 1985. 143 с.
 38. *Fontaine S., Barot S., Barre P., Bdioui N., Mary B., Rumpel C.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply // Nature. 2007. V. 450. P. 277–280.
 39. Длительные полевые опыты на черноземах Курской области (путеводитель). Курск: ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии РАСХН, 2010. 35 с.
 40. *Когут Б.М., Фрид А.С., Масютенко Н.П., Куваева Ю.В., Романенков В.А., Лазарев В.И., Холо-*

- дов В.А. Динамика содержания органического углерода в типичном черноземе в условиях длительного полевого опыта // *Агрохимия*. 2011. № 12. С. 37–44.
41. *Когут Б.М.* Изменение содержания, состава и природы гумусовых веществ при сельскохозяйственном использовании типичного мощного чернозема: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 1982. 24 с.
 42. *Афанасьева Е.А.* Черноземы Средне-Русской возвышенности. М.: Наука, 1966. 224 с.
 43. *Когут Б.М.* Гумус почв в длительных бессменных парах (история и география изучения, экспериментальные результаты, теоретические аспекты, практическая реализация) // Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и урожайность сельскохозяйственных культур. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. М.: РГАУ–МСХА, 2012. С. 39–47.
 44. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Яшин М.А., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Филиппова О.И., Воликов А.Б., Иванов А.Л.* Оптические характеристики экстрагируемых фракций органического вещества типичных черноземов в многолетних полевых опытах // *Почвоведение*. 2020. № 6. С. 691–702.
 45. *Смирнов П.М.* Использование растениями, потери и превращение в почве азота разных форм азотных удобрений // *Изв. ТСХА*. 1968. Вып. 6. С. 98–116.
 46. *Турчин Ф.В., Береснева В.Н., Корицкая И.А., Жидких Г.Г., Лобовикова Г.А.* Превращение азота в почве по данным исследований с применением изотопа ¹⁵N // Докл. советских почвоведов к 7-му Международ. конгр. в США. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 197–201.
 47. *Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K.* Review of mechanisms and quantification of priming effects // *Soil Biol. Biochem.* 2000. V. 32. P. 1485–1498.
 48. *Артемова З.С.* Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества дерново-подзолистых почв в период зарастания пашни лесом // *Пробл. регион. экол.* 2017. № 2. С. 54–59.
 49. *Таллер Е.Б., Артемова З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н.* Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества хронорядя дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. Вып. 98. С. 77–104.
 50. *Boddey R.M., Jantalia C.P., Conceição P.C., Zanatta J.A., Bayer C., Mielniczuk J., Dieckow J., Dos Santos H.P., Denardin J.E., Aita C., Giacomini S.J., Alves B.J.R., Urquiaga S.* Carbon accumulation at depth in Ferrasols under zero-till subtropical agriculture // *Global Change Biol.* 2010. V. 16 (2). P. 784–795.
 51. *Liebmann P., Wordell-Dietrich P., Kalbitz K., Mikutta R., Kalks F., Don A., Woche S.K., Dsilva L.R., Guggenberger G.* Relevance of aboveground litter for soil organic matter formation – a soil profile perspective // <https://doi.org/Preprint>. Discussion started: 2 January 2020. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-465>
 52. *Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Инициатива “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2019. Вып. 98. С. 185–202.
 53. *Кудеяров В.Н.* Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121.
 54. *Amundson R., Biardeau L.* Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool // *PNAS*. 2018. V. 115. № 46. P. 11652–11656.
 55. *Baveye P.C.* Bypass and hyperbole in soil research: Worrying practices critically reviewed through examples // *Eur. J. Soil Sci.* 2020. V. 36 (1). P. 1–20. <https://doi.org/10.1111/ejss.12941>
 56. *Baveye P.C., White R.E.* The “4p1000” initiative: A new name should be adopted 2019 // <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01188-9>
 57. *Lal R.* Beyond COP21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative // *J. Soil Water Conserv.* 2016. V. 71 (1). P. 20A–25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
 58. *Rumpel C., Amiraslani F., Chenu C., Cardenas M.G., Kaonga M., Koutika L.-S., Ladha J., Madari B., Shirato Y., Smith P., Soudi B., Soussana J.-F., Whitehead D., Wollenberg E.* The 4p1000 initiative: opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy // *Ambio*. 2020. V. 49. P. 350–360. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>
 59. <https://www.4p1000.org/>
 60. *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., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui Chun-Chih, Vågen T.-G., vanWesemael B., Winowiecki L.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. V. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
 61. https://www.ranepa.ru/images/media/g20/2018buensaires/g20_agriculture_declaration_2018.pdf
 62. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н.* Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // *Почвоведение*. 1995. № 1. С. 21–32.
 63. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
 64. *Rozhkov V.A., Vagner V.B., Kogut B.M., Konyushkov D.E., Nilsson S., Sheremet B.V., Shvidenko A.Z.* Soil carbon estimates and soil carbon map for Russia // WP-96-60. 1996. Austria: IASA, 44 p.
 65. *Stolbovoi V.* Carbon in Russian soils // *Climat. Change*. 2002. V. 55. P. 131–156.

Humus Depletion and Soil Carbon Sequestration

B. M. Kogut^{a, #}, V. M. Semenov^{b,c}, Z. S. Artemyeva^a, and N. N. Danchenko^a

^a*Federal Research Center V.V. Dokuchaev Soil Science Institute
per. Pyzhyovskii 7, Moscow 119017, Russia*

^b*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of RAS
ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow region 142292, Russia*

^c*All-Russian Institute of Phitopathology
ul. Institut 5, Bolshie Vyazemy, Moscow region 143050, Russia*

[#]*E-mail: kogutb@mail.ru*

The concepts of losses (humus depletion), preservation and accumulation (sequestration, deposition) of organic matter in soils are considered. New formulations of certain terms are proposed. The dominant role of the upper 0–40 (50) cm soil layer in the humus depletion and carbon sequestration is theoretically and experimentally substantiated. The data on the real amount of losses and sequestration of organic carbon (C_{org}) in soils are presented. A critical analysis of the main points of the “4 per mille initiative” was carried out. It is pointed out that it is fundamentally wrong to assess the carbon sequestration potential of soils by the content and reserves of C_{org} in a two-meter layer. The necessity of long-term national monitoring of organic carbon in Russian soils has been substantiated.

Key words: soil organic matter, humus depletion, humus accumulation, 4 per mille.