

УДК 631.417.2

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124



Ссылки для цитирования:

Когут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103-124. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124

Cite this article as:

Kogut B.M., Semenov V.M., Estimation of soil saturation with organic carbon, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 102, pp. 103-124, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124

Благодарность:

Работа проведена при поддержке ФЦП “Глобальный климат и агроландшафты России: разработка системы оценки и управления рисками деградации Русских черноземов” и гранта Российского научного фонда, проект № 17-14-01120.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the federal target programme “Global climate and agrolandscapes of Russia: development of the system for assessment and management of Russian chernozem degradation risks” and Russian Science Foundation, in scientific project No. 17-14-01120.

Оценка насыщенности почвы органическим углеродом

© 2020 г. Б. М. Когут^{1*}, В. М. Семенов^{2**}

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
*e-mail: kogutb@mail.ru.

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
РАН – обособленное подразделение ФИЦ “Пушкинский научный центр
биологических исследований Российской академии наук”, Россия,
142290, Пушкино, Институтская ул., 2,
**e-mail: v.m.semenov@mail.ru.

Поступила в редакцию 09.04.2020, после доработки 20.04.2020,
принята к публикации 22.06.2020

Резюме: Сформулированы новые дефиниции понятий “секвестрация” и “депонирование” органического углерода почвами на количественной основе, учитывающие период полного оборота аккумулированного органического вещества и его распределение по почвенному профилю.

Определены уровни углеродпротекторной емкости ряда почв европейской части России согласно [Hassink \(1997\)](#) и [Six et al. \(2002\)](#), базирующиеся на информации по содержанию тонкодисперсных фракций и минералогическому составу почв. Рассчитаны степени насыщенности этих почв углеродом и их углеродсеквестрирующий потенциал по [Meyer et al. \(2017\)](#) и [Wiesmeier et al. \(2014\)](#). Установлено, что серые лесные и каштановые почвы относятся к мало насыщенным органическим углеродом, луговая слитизированная и пойменная луговая – к умеренно насыщенным, а черноземы – к насыщенным. Показано, что углеродсеквестрирующий потенциал серой лесной почвы составляет около 30 т С га^{-1} , каштановой – не превышает 25 т С га^{-1} , луговых почв равен $15\text{--}20 \text{ т С га}^{-1}$, а черноземов – менее 5 т С га^{-1} . Приводятся критические замечания к инициативе “4 промилле”.

Ключевые слова: почвенное органическое вещество, стабилизация углерода, почвенная секвестрация углерода, депонирование углерода, 4 промилле.

Estimation of soil saturation with organic carbon

B. M. Kogut^{1*}, V. M. Semenov^{2}**

¹*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: kogutb@mail.ru.

²*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
Russian Academy of Sciences,
2 Institutskaya Str., Pushchino, 142290, Russian Federation,
**e-mail: v.m.semenov@mail.ru.*

Received 09.04.2020, Revised 20.04.2020, Accepted 22.06.2020

Abstract: New definitions of “soil carbon sequestration” and “soil carbon deposition” on a quantitative basis taking into account the period of the complete turnover of accumulated organic matter and its distribution over the soil profile are formulated. The carbon protection capacity of soils in the European part of Russia was determined according to [Hassink \(1997\)](#) and [Six et al. \(2002\)](#) based on data of the fine fractions content and the mineralogical composition of soils. The carbon saturation degree of soils and their carbon sequestration potential were calculated according to [Meyer et al. \(2017\)](#) and [Wiesmeier et al. \(2014\)](#). Gray forest and chestnut soils were classified as poorly saturated with organic carbon, meadow slitized and floodplain meadow soils were moderately saturated, and chernozems was saturated. It has been shown that the carbon sequestration potential of gray forest soil is about

30 t C ha⁻¹, chestnut soil does not exceed 25 t C ha⁻¹, meadow soil is 15–20 t C ha⁻¹, and chernozem is less than 5 t C ha⁻¹. Critical remarks to the 4 ppm initiative were given.

Keywords: soil organic matter, carbon stabilisation, soil carbon sequestration, carbon storage, 4 per mille.

ВВЕДЕНИЕ

Радикальные преобразования наземных экосистем сельскохозяйственной деятельностью человека сопровождались глобально значимыми изменениями запасов органического углерода (C_{орг}) в почве. На протяжении 12 000 лет с момента оседлой сельскохозяйственной деятельности на Земле и по настоящее время потери C_{орг} в верхних 0–30, 0–100 и 0–200 см слоях почвенного профиля составили соответственно 37, 75 и 116 Pg C ([Sanderman et al., 2017](#)). Используемые в сельском хозяйстве почвы содержат на 25–75% меньше C_{орг}, чем их аналоги в ненарушенных или естественных экосистемах ([Lal, 2010](#)).

Восстановление ранее утраченных запасов почвенного C_{орг} в землях сельскохозяйственного назначения и подвергшихся эрозии будет препятствовать росту концентрации атмосферного углерода. Идея перемещения атмосферного углерода в состав почвенного органического вещества посредством заделки растительной биомассы в почву, названная почвенной секвестрацией углерода, из разряда теоретических абстракций развилась в реальную природоохранную инициативу с соответствующим комплексом агробиотехнологий ([Семенов и др., 2008](#); [Lal, 2004](#)).

Под почвенной секвестрацией органического углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество с периодом полного разложения (минерализации) составляющих его органических компонентов от 10 до 100 лет. Следует различать понятия почвенной секвестрации и депонирования углерода в почве. Депонирование органического углерода почвой – это долговременное его запасание преимущественно в виде гумуса с периодом полного разложения (минерализации) составляющих его компонентов > 100 лет и/или захоронение неживого органического ве-

щества в почвенном профиле на глубине > 50 (100) см. Если почвенная секвестрация углерода обязательно предусматривает удаление CO₂ из атмосферы за счет получения новой биомассы, то депонирование направлено на предотвращение быстрого возврата C_{орг} из почвы в атмосферу. Разумное сочетание секвестрации и депонирования органического углерода представляет собой путь эффективного решения триединой агроэкологической задачи: повышения или сохранения гумусированности почв, увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и сокращения эмиссии углекислого газа в атмосферу со множеством косвенных положительных эффектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поступление растительных остатков и синтез микробной биомассы обеспечивают непрерывное пополнение запасов C_{орг} в почве ([Семенов, Когут, 2015](#)), однако темпы и пределы прироста почвенного C_{орг} зависят не только от количества и качества поступающего органического материала ([Семенов и др., 2019](#); [Stockmann et al., 2013](#); [Hu et al., 2020](#)), но и от скорости и прочности стабилизации органических компонентов в почве ([Castellano et al., 2015](#); [Cotrufo et al., 2013](#); [Cotrufo et al., 2015](#); [von Lützwow et al., 2006](#)). Закрепиться в почве может лишь столько C_{орг}, сколько позволяют физико-химические свойства почвы, которые не идентичны у почв разных типов. Вследствие этого реальные размеры секвестрации возможны лишь до определенного уровня, соответствующего порогу насыщения почвы органическим углеродом, выше которого поступление свежего органического вещества не приводит к дополнительному накоплению C_{орг} ([Chung et al., 2008](#); [Chung et al., 2010](#); [Wiesmeier et al., 2014](#)). Поэтому понимание процессов образования, стабилизации и сохранения почвенного органического вещества, как и влияния внутрипочвенных и внешних факторов на его динамику, является важной предпосылкой выработки эффективных мер для обеспечения сбалансированной эмиссии и стока углерода в наземных экосистемах с учетом свойств почвы.

Количество стабилизированного и защищенного от разложения органического вещества в почве характеризует углеродпро-

текторную емкость почвы (Carbon Protection Capacity, CPC) или, по-другому, углероддепонирующий потенциал почвы. Наиболее прочную стабилизацию углерода и его длительную сохранность в почве в течение сотен и тысяч лет обеспечивают физико-химические взаимодействия органического вещества с минеральными частицами почвы ([von Lützw et al., 2006](#); [Kögel-Knabner et al., 2008a](#); [Kögel-Knabner et al., 2008b](#)). Допускается, что чем выше в почве доля частиц пыли и глины, тем больше углерода может быть стабилизировано и сохранено в почве. Поэтому мерой CPC предложено считать содержание $C_{\text{орг}}$ в гранулометрических фракциях пыли и глины с размером частиц < 0.02 мм ([Hassink, 1997](#)). В работе этих авторов зависимость CPC от доли гранулометрических частиц < 0.02 мм выражена уравнением линейной регрессии, которое получено при обобщении большого массива экспериментальных данных, включающего в себя почвы разных типов, местоположений, землепользований (уравнение 1):

$$\text{CPC}_1 = 4.09 + 0.37 \times (S + C)_1 \quad (1),$$

где CPC_1 – углеродпротекторная емкость почвы, г С кг^{-1} ;
 $(S + C)_1$ – доля гранулометрических частиц < 0.02 мм, % от массы почвы.

Позднее было предложено ([Six et al., 2002](#)) оценивать CPC почвы и по доле частиц < 0.05 мм, а также учитывать минералогический состав почвы, поскольку при одном и том же содержании фракций пыли и глины почвы с доминированием 2 : 1 минералов способны стабилизировать больше углерода, чем почвы с 1 : 1 минералами (уравнения 2–5):

$$\text{CPC}_2 = 3.86 + 0.41 \times (S + C)_2 \quad (2),$$

$$\text{CPC}_3 = 1.22 + 0.30 \times (S + C)_3 \quad (3),$$

$$\text{CPC}_4 = 14.76 + 0.21 \times (S + C)_4 \quad (4),$$

$$\text{CPC}_5 = 5.50 + 0.26 \times (S + C)_5 \quad (5),$$

где: $\text{CPC}_2 - \text{CPC}_5$ – углеродпротекторная емкость почвы, г С кг^{-1} почвы;

$(S + C)_2$ – доля гранулометрических частиц < 0.02 мм с до-

минированием 2 : 1 минералов, % от массы почвы;

$(S + C)_3$ – доля гранулометрических частиц < 0.02 мм с доминированием 1 : 1 минералов, % от массы почвы;

$(S + C)_4$ – доля гранулометрических частиц < 0.05 мм с доминированием 2 : 1 минералов, % от массы почвы;

$(S + C)_5$ – доля гранулометрических частиц < 0.05 мм с доминированием 1 : 1 минералов, % от массы почвы.

Величины СРС для верхнего 0–10 (0–20) см слоя ряда почв Европейской части России, рассчитанные по уравнениям 1–5, представлены в таблице 1. Предлагается оценивать СРС почвы не по одному какому-либо уравнению, а по среднему из четырех показателей, поскольку в этом случае сглаживаются частные различия в свойствах почв, вызываемые местоположением, землепользованием, способом обработки и другими факторами. По углеродпротекторной емкости исследуемые почвы располагаются в следующей последовательности: бурая лесная кислая = чернозем типичный = чернозем обыкновенный = луговая слитизированная = чернозем выщелоченный > серая лесная = пойменная луговая = каштановые > бурая полупустынная > дерново-подзолистая. В черноземе депонируется в 2.6 раза больше углерода, чем в дерново-подзолистой почве. Обращают на себя внимание еще два момента. Во-первых, подтипам чернозема свойственен практически один и тот же углеродпротекторный потенциал. И, во-вторых, при всех способах расчета максимальная величина СРС среди рассматриваемых типов почв не превышала 35 г С кг⁻¹ почвы, что дает основание считать этот уровень верхним пределом углеродпротекторной емкости для почв. Размеры СРС, свойственные российским почвам, находятся в интервале величин (5–35 г С кг⁻¹), полученных для других типов почв, залегающих в Европе, Америке, Африке и Австралии ([Hassink, 1997](#)). Величина СРС почв практически не зависит от вида угодий, составляя под пашней, пастбищем и лесом 20.8, 20.6 и 20.2 г С кг⁻¹ ([Wiesmeier et al., 2014](#)).

Таблица 1. Углеродпротекторная емкость разных почв, г С кг⁻¹ почвы
Table 1. Carbon protection capacity of different soils, g C kg⁻¹ soil

Число данных	Фракции частиц в мм, % от массы		По Hassink et al., 1997	По Six et al., 2002				
	< 0.02	< 0.05		CPC ₁	CPC ₂	CPC ₃	CPC ₄	CPC ₅
Дерново-подзолистая (Владимирская и Тверская области)								
2	12 ± 2	22 ± 3	9	9	5	19	11	11
Серая лесная (Московская и Тульская области)								
4	46 ± 2	90 ± 7	21	23	15	34	29	25
Чернозем выщелоченный (Тамбовская, Курская, Липецкая области)								
6	63 ± 5	94 ± 3	27	30	20	34	30	28
Чернозем типичный (Тамбовская, Воронежская, Курская, Белгородская области)								
13	65 ± 6	95 ± 4	28	30	21	35	30	29
Чернозем обыкновенный (Воронежская и Белгородская области, Ставропольский край)								
13	69 ± 6	93 ± 7	30	32	22	34	30	29
Темно-каштановая, каштановая, светло-каштановая (Волгоградская область)								
5	43 ± 9	64 ± 17	20	22	14	29	24	22
Луговая слитизированная (Волгоградская область)								
1	72 ± 0	87 ± 0	31	34	23	33	28	29
Пойменная луговая (Волгоградская область)								
1	51 ± 0	65 ± 0	23	25	17	28	23	23
Бурая полупустынная солонцеватая (Астраханская область)								
2	26 ± 8	38 ± 6	14	15	9	23	15	15
Бурая лесная кислая (Краснодарский край, г. Сочи)								
4	71 ± 2	86 ± 2	30	33	23	33	28	30

Примечание. Величины CPC₁ – CPC₅ рассчитаны по уравнениям 1–5, соответственно. При расчетах использованы собственные и литературные (Единый государственный реестр..., 2014; Королев, 2008; Малюкова, 2013) данные содержания в почве гранулометрических фракций.

Величина углеродпротекторной емкости почвы положительно коррелирует с валовым содержанием почвенного органического вещества ($r = 0.715$, $P < 0.001$). По мере увеличения СРС характерен экспоненциальный рост содержания $C_{\text{орг}}$ в почве (рис. 1). В большинстве сравниваемых почв с низкой (бурая полупустынная, дерново-подзолистая), с умеренной (каштановые, серая лесная) и даже с высокой (бурая лесная кислая) углеродпротекторной емкостью валовое содержание $C_{\text{орг}}$ ниже, чем СРС, и только во всех подтипах чернозема отмечается превышение $C_{\text{орг}}$ в 1.2–1.5 раза (табл. 2). Можно предположить, что в черноземе по сравнению с другими типами почв возрастает роль других механизмов сохранения углерода. В частности, образование макро- и микроагрегатов, окклюдование и другие физические процессы способствуют более продолжительному сохранению в почве твердых дискретных частиц (Particulate Organic Matter, **POM**), образующихся при разложении свежего органического материала, которые вне агрегатов подвергаются довольно быстрой и полной минерализации ([Семенов и др., 2019](#)).

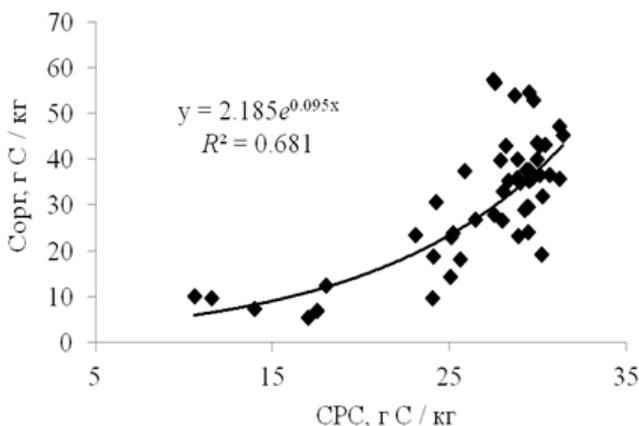


Рис. 1. Зависимость содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в почвах от углеродпротекторной емкости (СРС), свойственной этим почвам.
Fig. 1. Dependence of organic C content ($C_{\text{орг}}$) in soils on their carbon protection capacity (CPC).

Таблица 2. Соотношение общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и углеродпротекторной емкости в разных почвах ($C_{\text{орг}}/CPC$)
Table 2. Ratio of total organic carbon (C_{org}) and carbon protection capacity in different soils (C_{org}/CPC)

Почва	Минимум	Максимум	Среднее
Дерново-подзолистая	0.83	0.95	0.89
Серая лесная	0.57	0.91	0.74
Чернозем выщелоченный	0.95	1.28	1.16
Чернозем типичный	1.05	2.05	1.46
Чернозем обыкновенный	0.99	2.09	1.37
Темно-каштановая, каштановая, светло-каштановая	0.40	1.01	0.69
Луговая слитизированная	1.00	1.00	1.00
Пойменная луговая	1.02	1.02	1.02
Бурая полупустынная солонцеватая	0.31	0.53	0.42
Бурая лесная кислая	0.63	1.00	0.81

По разнице между CPC и фактическим (измеренным) содержанием углерода во фракции пыли и глины исследуемой почвы рассчитывается количество углерода, недостающее до полного насыщения почвы (Carbon Saturation Deficit, **CSD**). Если учитываются частицы размером менее 0.02 мм, то производится прямое измерение содержания $C_{\text{орг}}$ в этих гранулометрических фракциях. В случае отнесения к пыли и глине частиц менее 0.05 мм, используются данные по содержанию связанного минеральной массой $C_{\text{орг}}$ (Mineral-associated Organic Matter, **MOM**) во фракции, получаемой после отделения частиц POM вместе с гранулометрической фракцией песка в соответствии с методом ([Cambardella, Elliott, 1992](#)). Величины CSD и МОС вычисляются по формулам 6 и 7.

$$CSD = CPC - MOM \quad (6),$$

$$MOM = C_{\text{орг}} - POM \quad (7),$$

где, CSD – количество углерода, недостающее до насыщения почвы, г С кг⁻¹;

CPC – углеродпротекторная емкость почвы, г С кг⁻¹;

MOM – содержание углерода, ассоциированного с мине-

ральной массой, г С кг^{-1} ;

РОМ – углерод твердых дискретных частиц, г С кг^{-1} .

По полученным значениям CSD и CPC рассчитывается степень насыщенности почвы углеродом (Degree of Carbon Saturation, **DCS**) и углеродсеквестрирующий потенциал (Carbon Sequestration Potential, **CSP**) почвой ([Meyer et al., 2017](#); [Wiesmeier et al., 2014](#)), используя формулы 8 и 9.

$$\text{DCS} = (1 - (\text{CSD}/\text{CPC})) \times 100 \quad (8),$$

$$\text{CSP} = \text{CSD} \times \text{BD} \times 10000 \times \text{H} \quad (9),$$

где: DCS – степень насыщенности почвы углеродом, %;

CSD – количество углерода, недостающее до насыщения почвы, г С кг^{-1} ;

CPC – углеродпротекторная емкость почвы, г С кг^{-1} ;

CSP – потенциал секвестрации углерода, т/га;

BD – плотность почвы, т/м^3 ;

H – толщина слоя, м.

В верхнем слое разных почв содержится от 2.3 до 20.4 углерода РОМ (14–40% от $\text{С}_{\text{орг}}$) и, соответственно, от 12 до 36.3 г/кг углерода МОМ (60–86% от $\text{С}_{\text{орг}}$), связанного с минеральными частицами – менее 0.05 мм (табл. 3). В рассмотренном ряду почв содержание МОМ коррелировало как с $\text{С}_{\text{орг}}$ ($r = 0.960$, $P < 0.001$), так и с углеродпротекторной емкостью почв ($r = 0.692$, $P = 0.013$), демонстрируя прямую линейную зависимость (рис. 2). Из 12 образцов почв в 10 образцах дефицит насыщения углеродом составлял 2.4–13.0 г С кг^{-1} , и лишь в двух содержание $\text{С}_{\text{орг}}$ было больше предела насыщения на 1.2–8.7 г С кг^{-1} . Судя по полученным результатам, серые лесные и каштановые почвы относятся к мало насыщенным органическим углеродом, луговая слитизированная и пойменная луговая – к умеренно насыщенным, а черноземы – к насыщенным. Соответственно, углеродсеквестрирующий потенциал серой лесной почвы составляет около 30 т С га^{-1} , каштановой – не превышает 25 т С га^{-1} , луговых почв равен 15–20 т С га^{-1} , а черноземов – менее 5 т С га^{-1} .

Таблица 3. Параметры углеродсеквстрирующей способности почв
Table 3. Characteristics of carbon sequestration capacity of soils

Почва, угодье	$C_{орг}$	CPC	МOM	CSD	DCS, %
	г С кг ⁻¹				
<i>Московская область</i>					
Серая лесная, лес	18.8	24.1	12.0	12.1	50
То же, пашня	14.4	25.1	12.1	13.0	48
<i>Тульская область</i>					
Серая лесная, лес	23.0	25.1	14.8	10.4	59
То же, пашня	18.1	25.6	15.5	10.2	60
<i>Воронежская область</i>					
Чернозем обыкновенный, степь	47.2	31.2	28.5	2.7	91
То же, пашня	35.6	31.2	28.8	2.4	92
<i>Белгородская область</i>					
Чернозем типичный, лесное урочище	56.7	27.6	36.3	-8.7	131
То же, пашня	37.4	25.9	27.1	-1.2	104
<i>Волгоградская область</i>					
Луговая слитизированная, луг	29.5	29.4	22.8	6.6	77
Лугово-каштановая, луг	26.8	26.5	17.8	8.7	67
Каштановая солонцеватая, луг	23.8	25.2	15.5	9.7	61
Пойменная луговая, дубрава	23.4	23.1	17.3	5.8	75

Примечание. $C_{орг}$ – общее содержание органического углерода в почве, CPC – углеродпротекторная емкость почвы, MOM – содержание углерода, ассоциированного с минеральной массой, CSD – количество углерода, недостающее до насыщения почвы, DCS – степень насыщения почвы углеродом.

Можно заметить, что все типы почв, кроме чернозема, остаются недонасыщены органическим веществом. Вероятно, биоклиматический потенциал зон лимитирует процесс сорбции органического углерода минеральной фазой этих почв. В черноземной же зоне климат такой, что создаются благоприятные условия для микробиологической деятельности, способствующие глу-

бокой переработке органического материала под воздействием ферментов и его прочному закреплению на поверхности тонкодисперсных частиц.

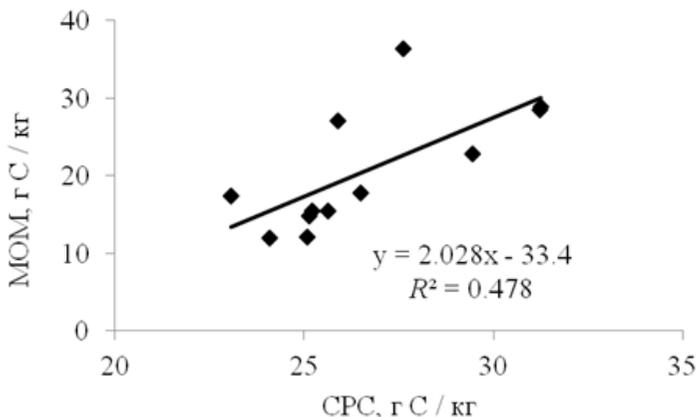


Рис. 2. Связь между потенциальной углеродпротекторной емкостью почв (CPC) и содержанием углерода, стабилизированного поверхностью минеральных частиц < 0.05 мм (MOM).

Fig. 2. Correlation between potential carbon protection capacity of soils (CPC) and content of carbon, stabilized by mineral particles (< 0.05 mm size) surface (MOM).

В базовой сводке ([Hassink, 1997](#)) ненасыщенное углеродом состояние было характерно для 15 исследуемых почв, в которых до полного насыщения недоставало от 0 до 28.5 г С кг⁻¹, а в 13 образцах почв, залегающих преимущественно в Канаде, фактическое содержание С_{орг} во фракции пыли и глины было на 1.6–8.7 г С кг⁻¹ больше, чем их углеродпротекторная емкость. В наших исследованиях не было выявлено влияния вида землепользования на степень насыщенности почв углеродом, а углеродсеквестрирующий потенциал необрабатываемых и пахотных почв был примерно одинаковым. Насыщенность почв северной части Китая, близких по своим характеристикам черноземам и серым лесным почвам, оценена в 78% для эродированных земель, 84% – для пашни и 85% – для пастбищ с углеродсеквестрирующим потенциалом на уровне

1–2 т С га⁻¹ ([Wiesmeier et al., 2015](#)). По другим оценкам средняя степень насыщенности пахотных почв на юге Германии составляла 50%, почв под естественными пастбищами и лесом – 77 и 103%, соответственно, а углеродсеквестрирующий потенциал почв этих угодий равен 15, 5 и 1 т С га⁻¹ ([Wiesmeier et al., 2014](#)). За 11 лет чистого пара степень насыщенности углеродом почвы с содержанием пыли и глины около 80% и валовым содержанием С_{орг} 12.2 г/кг снизилась с 55 до 46%, а углеродсеквестрирующий потенциал возрос с 23 до 27 т/га ([Meyer et al., 2017](#)). Важно отметить, что полученные для почв Европейской части России показатели углеродпротекторной емкости и степени насыщенности углеродом следует рассматривать как предварительные и ориентировочные, хотя они и совпадают в той или иной степени с литературными данными. Для более строгих выводов и количественных прогнозирований нужны более масштабные и тщательные измерения С_{орг} в гранулометрических фракциях почв не только на уровне типа и подтипа, но и в образцах, приуроченных к разным угодьям, местоположениям, системам земледелия, что позволит более точно оценить влияние этих факторов на углеродсеквестрирующий потенциал почв.

Современные положения о предельном насыщении почв органическим углеродом хорошо согласуются с тезисом И.В. Тюрина: “при известных постоянных условиях в отношении поступления и разложения накопление органического вещества в почвах имеет предел, выше которого накопление невозможно” ([Семенов, Когут, 2015](#)). Как показано выше, высокая степень насыщения углеродом распространенное явление для многих почв, а верхний 0–20 см слой имеет довольно ограниченный потенциал секвестрации. Наличие у разных почв предельной границы насыщения углеродом делает нереальной распространение инициативы “4 промилле” ([The “4 per 1000” Initiative, 2020](#); [Minasny et al., 2017](#)) на весь почвенный покров в глобальном масштабе. В основе этой инициативы лежит следующее допущение. Если соотнести ежегодные объемы антропогенных выбросов углерода в атмосферу и запасы С_{орг} в 2-метровом слое почв (8.9 к 2400 Гт), то получаемая величина в 4 промилле (0.4% С_{орг} от массы почвы) может служить количественным ориентиром увеличения содержания С_{орг} в почве

с целью компенсации эмиссии углерода в атмосферу. Насколько обоснован такой механистический подход к возможностям секвестрации углерода почвами с научной точки зрения? Во-первых, по данным радиоуглеродного датирования, современное (≈ 100 лет) обновление гумуса происходит только в верхнем слое почв 0–40 см ([Чичагова, 1985](#)). Во-вторых, в период резкой смены систем землепользования в России в конце 20 века более 45 млн га из 110 млн га пашни были переведены в залежное состояние. Заращение пашни естественной растительностью сопровождалось накоплением в почве органического вещества. В верхнем (0–20 см) слое почв скорость секвестрации $C_{\text{орг}}$ в первые 20 лет после заращения (1990–2009 г.) составила 0.96 т/га в год (0.04% или **0.4‰**), а в следующие 30 лет прогнозируется 0.19 т/га в год (0.008% или **0.08‰**) ([Kurganova et al., 2014](#)). В-третьих, согласно экспериментальным ([Когут, 1982](#); [Körschens, 2018](#)) и расчетным данным, содержание в 0.1% $C_{\text{орг}}$ (1 промилле) от массы почвы соответствует в зависимости от мощности верхнего слоя, содержания $C_{\text{орг}}$ и объемной массы (плотности) запасам в интервале 2–4 т/га. Следовательно, чтобы увеличить содержание $C_{\text{орг}}$ в почве на 4 промилле даже в верхнем слое среднегодовые размеры секвестрации должны составлять не как заявленные в инициативе 0.6 т/га ([Minasny et al., 2017](#)), а минимум на порядок больше. В-четвертых, современные знания о составе, структуре, свойствах, процессах трансформации и динамике почвенного органического вещества недостаточны, а используемые способы измерения, мониторинга и моделирования потоков углерода несовершенны для незамедлительной реализации инициативы “4 промилле” ([Amundson, Biardeau, 2018](#); [Baveye, 2020](#)). Более того, по авторитетному мнению М. Кёршенса ([Körschens, 2018](#)), полвека изучавшего динамику гумуса в полевом стационаре (заложен в 1902 г.) в Бад-Лаухштедте (Германия) и обобщившего данные по содержанию $C_{\text{орг}}$ в почвах 79 длительных опытов Мира, эта “инициатива” носит спекулятивный характер и находится за пределами всякой реальности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способность почв стабилизировать и сохранять секвестрируемый из атмосферы углерод контролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером < 0.05 (0.02) мм. Чем выше насыщенность этих фракций органическим углеродом, тем меньше углеродсеквестрирующий потенциал почвы.

Инициатива “4 промилле” выступает в настоящее время скорее программой познания обмена углерода между атмосферными и наземными пулами и резервуарами, чем практическим руководством по секвестрации и депонированию углерода. При этом с количественной точки зрения данная инициатива не выдерживает никакой научной критики. Задачи секвестрации и депонирования органического углерода в почвах сельскохозяйственного назначения предусматривают разные агробιοтехнологические решения, однако все они должны обеспечивать воспроизводство почвенного плодородия и формирование экологически оптимальной биопродуктивности при сохранении сельскохозяйственного предназначения угодий.

Для понимания условий и механизмов насыщения почв углеродом необходимо знать ответы на следующий круг вопросов. Возможен ли компромисс между потребностью в увеличении объемов и масштабов почвенной секвестрации углерода и ограниченной возможностью почвы запастись и сохранять поступивший в почву углерод? Как долго должен сохраняться углерод в почве, чтобы считать его секвестрированным? Что важнее, долгосрочное депонирование углерода в почве или быстрое включение углерода во внутрпочвенные процессы, поддерживающие экосистемные функции и сервисы почвы? При каких объемах поступления свежего органического материала, в каком его виде, сколько и за какое время может быть достигнуто полное насыщение почвы органическим углеродом? Каков вклад формирующихся агрегатов в секвестрацию углерода и каков углеродсеквестрирующий потенциал нижних слоев почвы? Эти и другие направления исследований становятся приоритетными в теории и практике почвенного органического вещества, задавая траекторию будущих исследова-

ний и технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
2. *Козут Б.М.* Изменение содержания, состава и природы гумусовых веществ при сельскохозяйственном использовании типичного мощного чернозема: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1982. 24 с.
3. *Королев В.А.* Современное физическое состояние черноземов центра Русской равнины. Воронеж: Воронежская областная типография – издательство им. Е.А. Болховитинова, 2008. 313 с.
4. *Малюкова Л.С.* Оптимизация плодородия бурых лесных почв и применения минеральных удобрений при выращивании чая в условиях черноморского побережья России: Дис. ... докт. биол. наук. Сочи: ГНУ ВНИИ цветоводства и субтропических культур РАСХН, 2013. 382 с.
5. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
6. *Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С.* Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
7. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б.* Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // Почвоведение. 2019. № 4. С. 440–450. DOI: [10.1134/S0032180X19040130](https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130).
8. *Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромьчкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О.* Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1172–1184. DOI: [10.1134/S0032180X19100113](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113).
9. *Чичагова О.А.* Радиоуглеродное датирование гумуса почв / Метод и его применение в почвоведении и палеогеографии. М.: Наука, 1985. 143 с.
10. *Amundson R., Biardeau L.* Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool // PNAS. 2018. Vol. 115. No. 46. P. 11652–11656. DOI: [10.1073/pnas.1815901115](https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115).
11. *Baveye P.C.* Bypass and hyperbole in soil research: Worrysome practices critically reviewed through examples // Eur. J. Soil Sci. 2020. Vol. 36. No. 1. P. 1–20. DOI: [10.1111/ejss.12941](https://doi.org/10.1111/ejss.12941).

12. *Cambardella C.A., Elliott E.T.* Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992. Vol. 56. No. 3. P. 777–783. DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x).
13. *Castellano M.J., Mueller K.E., Olk D.C., Sawyer J.E., Six J.* Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept // *Global Change Biology.* 2015. Vol. 21. No. 9. P. 3200–3209. DOI: [10.1111/gcb.12982](https://doi.org/10.1111/gcb.12982).
14. *Chung H., Grove J.H., Six J.* Indications for Soil Carbon Saturation in a Temperate Agroecosystem // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2008. Vol. 72 (4). P. 1132–1139. DOI: [10.2136/sssaj2007.0265](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0265).
15. *Chung H., Ngo K.J., Plante A., Six J.* Evidence for Carbon Saturation in a Highly Structured and Organic-Matter-Rich Soil // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2010. Vol. 74 (1). P. 130–138. DOI: [10.2136/sssaj2009.0097](https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0097).
16. *Cotrufo M.F., Soong J.L., Horton A.J., Campbell E.E., Haddix M.L., Wall D.H., Parton W.J.* Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss // *Nature Geoscience.* 2015. Vol. 8. P. 776–779. DOI: [10.1038/ngeo2520](https://doi.org/10.1038/ngeo2520).
17. *Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E.* The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? // *Global Change Biol.* 2013. Vol. 19. No. 4. P. 988–995. DOI: [10.1111/gcb.12113](https://doi.org/10.1111/gcb.12113).
18. *Hassink J.* The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // *Plant and Soil.* 1997. Vol. 191. P. 77–87. DOI: [10.1023/A:1004213929699](https://doi.org/10.1023/A:1004213929699).
19. *The “4 per 1000” Initiative.* Soils for food security and climate. 2020. URL: <https://www.4p1000.org/>.
20. *Hu Y., Zheng Q., Noll L., Zhang S., Wanek W.* Direct measurement of the *in situ* decomposition of microbial-derived soil organic matter // *Soil Biology and Biochemistry.* 2020. Vol. 141. No. 107660. P. 1–10. DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.107660](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107660).
21. *Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., von Lütow M.* An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology // *J. Plant Nutr. and Soil Sci.* 2008a. Vol. 171 (1). P. 5–13. DOI: [10.1002/jpln.200700215](https://doi.org/10.1002/jpln.200700215).
22. *Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., Leinweber P.* Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry // *J. Plant Nutr. and Soil Sci.* 2008b. Vol. 171 (1). P. 61–82. DOI: [10.1002/jpln.200700048](https://doi.org/10.1002/jpln.200700048).

23. *Körschens M.* Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symposium “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”. 2018. 12 p.
24. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.J., Six J., Kuzyakov Y.* Carbon cost of collective farming collaps in Russia // *Glob. Change Biol.* 2014. Vol. 20 (3). P. 938–947. DOI: [10.1111/gcb.12379](https://doi.org/10.1111/gcb.12379).
25. *Lal R.* Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security // *BioScience*. 2010. Vol. 60. P. 708–721. DOI: [10.1525/bio.2010.60.9.8](https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8).
26. *Lal R.* Soil carbon sequestration to mitigate climate change // *Geoderma*. 2004. Vol. 123. P. 1–22. DOI: [10.1016/j.geoderma.2004.01.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032).
27. *Meyer N., Bornemann L., Welp G., Schiedung H., Herbst M., Amelung W.* Carbon saturation drives spatial patterns of soil organic matter losses under long-term bare fallow // *Geoderma*. 2017. Vol. 306. P. 89–98. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.07.004](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.004).
28. *Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002).
29. *Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J.* Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // *PNAS*. 2017. Vol. 114 (36). P. 9575–9580. DOI: [10.1073/pnas.1706103114](https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114).
30. *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. DOI: [10.1023/A:1016125726789](https://doi.org/10.1023/A:1016125726789).
31. *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 // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99. DOI: [10.1016/j.agee.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001).
32. *Von Lützw M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H.* Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review // *Eur. J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57. P. 426–445. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x).
33. *Wiesmeier M., Hübner R., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., von Lützw M., Kögel-Knabner I.* Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon

saturation // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20 (2). P. 653–665. DOI: [10.1111/gcb.12384](https://doi.org/10.1111/gcb.12384).

34. Wiesmeier M., Munro S., Barthold F., Steffens M., Schad P., Kögel-Knabner I. Carbon storage capacity of semi-arid grassland soils and sequestration potentials in northern China // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. No. 10. P. 3836–3845. DOI: [10.1111/gcb.12957](https://doi.org/10.1111/gcb.12957).

REFERENCES

1. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii, Versiya 1.0* (Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0.), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2014, 768 p.
2. Kogut B.M., *Izmenenie sodержaniya, sostava i prirody gumusovykh veshchestv pri sel'skokhozyaistvennom ispol'zovanii tipichnogo moshchnogo chernozema: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Changes in the content, composition and nature of humic substances during agricultural use of a typical powerful black soil, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 1982, 24 p.
3. Korolev V.A., *Sovremennoe fizicheskoe sostoyanie chernozemov tsentra Russkoi ravniny* (The current physical condition of chernozems in the center of the Russian Plain), Voronezh, 2008, 313 p.
4. Malyukova L.S., *Optimizatsiya plodorodiya burykh lesnykh pochv i primeneniya mineral'nykh udobrenii pri vyrashchivanii chaya v usloviyakh chernomorskogo poberezh'ya Rossii: Dis. ... dokt. biol. nauk* (Optimization of the fertility of brown forest soils and the use of mineral fertilizers when growing tea under the conditions of the Black Sea coast of Russia, Dr. biol. sci. thesis), Sochi, 2013, 382 p.
5. Semenov V.M., Kogut B.M., *Pochvennoe organicheskoe veshchestvo* (Soil organic matter), Moscow: GEOS, 2015, 233 p.
6. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Tulina A.S., *Mineralizuemost' organicheskogo veshchestva i uglerodsekvestriruyushchaya emkost' pochv zonal'nogo ryada* (Mineralizability of organic matter and carbon sequestering capacity of zonal series soils), *Pochvovedenie*, 2008, No. 7, pp. 819–832.
7. Semenov V.M., Lebedeva T.N., Pautova N.B., *Dispersnoe organicheskoe veshchestvo v neobrabatyvaemykh i pakhotnykh pochvakh* (Dispersed organic matter in uncultivated and arable soils), *Pochvovedenie*, 2019, No. 4, pp. 440–450, DOI: [10.1134/S0032180X19040130](https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130).
8. Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromychkina D.P., Semenova N.A., Lopez de Gerenu V.O., *Razlozhenie rastitel'nykh ostatkov i formirovanie aktivnogo organicheskogo veshchestva v pochve*

inkubatsionnykh eksperimentov (Decomposition of plant residues and the formation of active organic matter in the soil of incubation experiments), 2019, No. 10, pp. 1172–1184, DOI: [10.1134/S0032180X19100113](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113).

9. Chichagova O.A., *Radiouglerodnoe datirovanie gumusa pochv, Metod i ego primenenie v pochvovedenii i paleogeografii* (Radiocarbon dating of soil humus, Method and its application in soil science and paleogeography), Moscow: Nauka, 1985, 143 p.

10. Amundson R., Biardeau L., Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool, *PNAS*, 2018, Vol. 115, No. 46, pp. 11652–11656, DOI: [10.1073/pnas.1815901115](https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115).

11. Baveye P.C., Bypass and hyperbole in soil research: Worrisome practices critically reviewed through examples, *Eur. J. Soil Sci.*, 2020, Vol. 36, No. 1, pp. 1–20, DOI: [10.1111/ejss.12941](https://doi.org/10.1111/ejss.12941).

12. Cambardella C.A., Elliott E.T., Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, Vol. 56, No. 3, pp. 777–783, DOI: [10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x](https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x).

13. Castellano M.J., Mueller K.E., Olk D.C., Sawyer J.E., Six J., Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21, No. 9, pp. 3200–3209, DOI: [10.1111/gcb.12982](https://doi.org/10.1111/gcb.12982).

14. Chung H., Grove J.H., Six J., Indications for Soil Carbon Saturation in a Temperate Agroecosystem, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2008, Vol. 72 (4), pp. 1132–1139, DOI: [10.2136/sssaj2007.0265](https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0265).

15. Chung H., Ngo K.J., Plante A., Six J., Evidence for Carbon Saturation in a Highly Structured and Organic-Matter-Rich Soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2010, Vol. 74 (1), pp. 130–138, DOI: [10.2136/sssaj2009.0097](https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0097).

16. Cotrufo M.F., Soong J.L., Horton A.J., Campbell E.E., Haddix M.L., Wall D.H., Parton W.J., Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, pp. 776–779, DOI: [10.1038/ngeo2520](https://doi.org/10.1038/ngeo2520).

17. Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E., The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biol.*, 2013, Vol. 19, No. 4, pp. 988–995, DOI: [10.1111/gcb.12113](https://doi.org/10.1111/gcb.12113).

18. Hassink J., The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles, *Plant and Soil*, 1997, Vol. 191, pp. 77–87, DOI: [10.1023/A:1004213929699](https://doi.org/10.1023/A:1004213929699).

19. The “4 per 1000” Initiative. Soils for food security and climate, 2020, URL: <https://www.4p1000.org/>.

20. Hu Y., Zheng Q., Noll L., Zhang S., Wanek W., Direct measurement of the *in situ* decomposition of microbial-derived soil organic matter, *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, Vol. 141, No. 107660, pp. 1–10, DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.107660](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107660).
21. Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., von Lütow M., An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology, *J. Plant Nutr. and Soil Sci.*, 2008a, Vol. 171 (1), pp. 5–13, DOI: [10.1002/jpln.200700215](https://doi.org/10.1002/jpln.200700215).
22. Kögel-Knabner I., Guggenberger G., Kleber M., Kandeler E., Kalbitz K., Scheu S., Eusterhues K., Leinweber P., Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry, *J. Plant Nutr. and Soil Sci.*, 2008b, Vol. 171 (1), pp. 61–82, DOI: [10.1002/jpln.200700048](https://doi.org/10.1002/jpln.200700048).
23. Körschens M., *Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments*, Vortrag zum 2. Symposium “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”, 2018, 12 p.
24. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.J., Six J., Kuzyakov Y., Carbon cost of collective farming collap in Russia, *Glob. Change Biol.*, 2014, Vol. 20(3), pp. 938–947, DOI: [10.1111/gcb.12379](https://doi.org/10.1111/gcb.12379).
25. Lal R., Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security, *BioScience*, 2010, Vol. 60, pp. 708–721, DOI: [10.1525/bio.2010.60.9.8](https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8).
26. Lal R., Soil carbon sequestration to mitigate climate change, *Geoderma*, 2004, Vol. 123, pp. 1–22, DOI: [10.1016/j.geoderma.2004.01.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032).
27. Meyer N., Bornemann L., Welp G., Schiedung H., Herbst M., Amelung W., Carbon saturation drives spatial patterns of soil organic matter losses under long-term bare fallow, *Geoderma*, 2017, Vol. 306, pp. 89–98, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.07.004](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.004).
28. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K. et al., Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, Vol. 292, pp. 59–86, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002).
29. Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J., Soil carbon debt of 12,000 years of human land use, *PNAS*, 2017, Vol. 114 (36), pp. 9575–9580, DOI: [10.1073/pnas.1706103114](https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114).
30. 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, pp. 155–176, DOI: [10.1023/A:1016125726789](https://doi.org/10.1023/A:1016125726789).
31. 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, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, Vol. 164, pp. 80–99, DOI: [10.1016/j.agee.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001).
32. Von Lütow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H., Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review, *Eur. J. Soil Sci.*, 2006, Vol. 57, pp. 426–445, DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x).
33. Wiesmeier M., Hübner R., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., von Lütow M., Kögel-Knabner I., Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation, *Global Change Biology*, 2014, Vol. 20 (2), pp. 653–665, DOI: [10.1111/gcb.12384](https://doi.org/10.1111/gcb.12384).
34. Wiesmeier M., Munro S., Barthold F., Steffens M., Schad P., Kögel-Knabner I., Carbon storage capacity of semi-arid grassland soils and sequestration potentials in northern China, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21, No. 10, pp. 3836–3845, DOI: [10.1111/gcb.12957](https://doi.org/10.1111/gcb.12957).