

УДК 631.417.1:631.51.01(470.40/.43)

ЗАПАСЫ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПРИ НУЛЕВОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ¹

© 2023 г. К. В. Ивашенко^{1,*}, С. В. Сушко^{1,2}, Ю. А. Дворников^{1,3}, Л. А. Мирный¹, Л. В. Орлова^{4,5}, Н. Д. Ананьева¹, С. В. Непримерова², А. В. Юдина⁶, Н. М. Троц⁷

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
ул. Институтская, 2, стр. 2, Пушкино Московской обл. 142290, Россия

²Агрофизический научно-исследовательский институт
Гражданский просп., 14, Санкт-Петербург 195220, Россия

³Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва 117198, Россия

⁴ООО “Орловка–АИЦ”
ул. Центральная, 42е, Самарская обл., с. Старый Аманак 446472 Россия

⁵Национальное движение сберегающего земледелия
ул. Куйбышева, 88, Самара 443099, Россия

⁶Почвенный институт им. В.В. Докучаева
Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва 119017, Россия

⁷Самарский государственный аграрный университет
ул. Учебная, 2, Самарская обл., г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский 446442, Россия

*E-mail: ivashchenko.kv@gmail.com

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

Внедрение ресурсосберегающих технологий в практику земледелия является одним из подходов к сохранению плодородия почв и увеличению запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$). Одной из таких технологий является нулевая обработка почвы, которую активно применяют во всем мире с середины XX века. Однако сведений об эффективности применения данной технологии для накопления и сохранения $C_{\text{орг}}$ в агропочвах нашей страны все еще недостаточно. В работе проведена оценка скорости накопления $C_{\text{орг}}$ агрочерноземами при нулевой обработке почвы в условиях Среднего Поволжья. На территории агрохозяйств (Похвистневский р-н Самарской обл.) были выбраны 2 сельскохозяйственных поля с 5- и 8-летней нулевой обработкой почвы (88 и 161 га соответственно) и поле с безотвальной вспашкой (42 га). В каждом поле выбрано по 30 точек исследования, из которых отобраны почвенные образцы верхнего (0–10 см) и нижнего (10–30 см) слоев. В работе приведены основные физико-химические показатели почвы и рассчитаны запасы $C_{\text{орг}}$. Показано значимое увеличение запасов $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое почвы при 5- и 8-летней нулевой обработке (в среднем на 0.57 и 0.45 кг/м²) по сравнению с таковыми при вспашке, однако для нижнего слоя значимых различий не выявлено. Суммарные запасы $C_{\text{орг}}$ для слоя 0–30-см почвы при нулевой обработке возросли на 0.61 и 0.34 кг/м² относительно таковых при вспашке. Следовательно, в результате применения нулевой обработки скорость накопления запасов $C_{\text{орг}}$ в агрочерноземах Среднего Поволжья может достигать 1.22 и 0.43 т С/га в год, что в 1.3–41 раз больше рекомендуемой программой “4 промилле” для сельскохозяйственных земель нашей страны (от 0.03 до 0.33 т С/га в год).

Ключевые слова: прямой посев, программа “4 промилле”, секвестрация углерода, пространственное распределение запасов углерода, почва пашни.

DOI: 10.31857/S0002188123110066, EDN: VGFOLD

ВВЕДЕНИЕ

Почва влияет на газовый состав атмосферы через продукцию климатически активных газов [1]. В то же время способность почвы сохранять и на-

капливать органический углерод ($C_{\text{орг}}$) может быть полезным инструментом в сокращении выбросов углеродсодержащих парниковых газов в результате антропогенной деятельности [2]. Отмечают, что высокий потенциал в накоплении $C_{\text{орг}}$ характерен для агропочв. Подсчитано, что сельскохозяйственные почвы мира могут секве-

¹ Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122111000095-8).

Таблица 1. Общая характеристика исследованных сельскохозяйственных полей

Обработка	Площадь, га	В год отбора образцов (2022 г.)			Предшествующая культура	
		Удобрения, кг/га	Урожайность, ц/га	Культура	2021	2020
Вспашка	42	Без удобрений	13.0	Пшеница	Подсолнечник	Пшеница
Нулевая (5 лет)	88	N34.4	19.2	Пшеница	Подсолнечник	Пшеница
Нулевая (8 лет)	161	N20.6	10.8	Соя	Пшеница	Подсолнечник

стрировать в 1-метровом слое 2–3 Гт С/год, что позволит компенсировать 20–35% выбросов парниковых газов от антропогенных источников [2]. Добиться таких эффективных результатов предлагает международная программа “почвенные 4 промилле для продовольственной безопасности и климата”, предложенная в 2015 г. на конференции “COP21 – UN Climate Change Conference” и нацеленная на увеличение глобальных запасов $C_{орг}$ почвы на 4 промилле в год, что в определенной степени будет компенсировать глобальные выбросы парниковых газов из антропогенных источников. Ресурсосберегающее земледелие, в частности нулевая обработка почвы (“прямой посев”, no-till), считается эффективной технологией для повышения плодородия и запаса $C_{орг}$. Скорость накопления $C_{орг}$ при нулевой обработке почвы во Франции, Великобритании, Китае и США может составлять от 0.16 до 0.40 т С/га в год в зависимости от почвенно-климатических условий и периода наблюдений [3–6]. В России площадь сельскохозяйственных земель с нулевой обработкой почвы занимает лишь 1–2% от их общей площади, составляющей 121.6 млн га [7, 8]. В настоящее время в России недостаточно информации о влиянии технологий нулевой обработки почвы на урожайность культур, биологические и химические свойства почв, в том числе на запасы $C_{орг}$, что в аспекте климатических изменений весьма актуально [8]. Кроме того, следует отметить отсутствие системного подхода для такой оценки агроэкосистем и достаточно отлаженного взаимодействия между учеными, практиками и управляющими агрохозяйств. Более того, отсутствуют данные количественных показателей эффективности применения различных агротехнологий для накопления запасов почвенного $C_{орг}$. В этой связи инициатива “4 промилле”, к положениям которой некоторые исследователи относятся с определенной долей скепсиса [9], может быть рекомендательным ориентиром для оценки углерод-секвестрирующего потенциала технологий ресурсосберегающего земледелия. Следует отметить также, что подходы к расчетам скорости

накопления $C_{орг}$ на единицу площади для реализации программы “4 промилле” различаются [2, 10, 11]. Например, если запасы $C_{орг}$ в слое 0–30 см пахотных почв России составляют в среднем 82 т С/га [11], то скорость его накопления с учетом выполнения программы “4 промилле” должна достигать 0.33 т С/га в год. Другие исследователи учитывают потери $C_{орг}$ почвами пашен за всю историю землепользования в нашей стране (2.6 и 3.6 Гт С для слоев 0–30 и 0–100 см соответственно), откуда скорость его накопления оценивают в 0.03–0.16 т С/га в год для достижения целей “4 промилле” [2, 10]. В рамках сотрудничества с представителями агрохозяйства “Орловка–АИЦ” (Самарская обл.), практикующими современные ресурсосберегающие технологии с 2012 г., оценили скорость накопления почвенных запасов $C_{орг}$ и их пространственную вариацию при нулевой обработке разной продолжительности применения. Полагаем, что для условий лесостепной зоны Среднего Поволжья применение технологии “прямого посева” значительно увеличит почвенные запасы $C_{орг}$, скорость накопления которых будет сопоставима с рекомендуемой международной программой “4 промилле”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были агрочерноземы типичные и выщелоченные (Haplic Hortic Chernozems и Luvisc Hortic Chernozems) с нулевой обработкой и безотвальной вспашкой (глубина 25 см), расположенные в автоморфном ландшафте в Похвистневском р-не Самарской обл. (54.181° с.ш., 50.322° в.д., Среднее Поволжье, лесостепная зона). Сельскохозяйственные поля с 5- и 8-летней нулевой обработкой почвы располагались на территории агрохозяйства ООО “Орловка–АИЦ”, рядом с ними было выбрано поле с безотвальной вспашкой (табл. 1, рис. 1). В год исследования, (2022) на полях возделывали пшеницу (вспашка, нулевая обработка – 5 лет) и сою (нулевая обработка – 8 лет).



Рис. 1. Исследованные сельскохозяйственные поля (Самарская обл., Похвистневский р-н).

Выбранные сельскохозяйственные поля характеризовались общей историей землепользования с 1929 г. Подстилающие породы представлены преимущественно бурими глинами, редко встречаются глинистый и известняковый мергели. Регион исследования характеризуется умеренно континентальным климатом со среднегодовой температурой воздуха 4.7°C и количеством осадков 459 мм (по данным за 1991–2020 гг. с ближайшей метеостанции “Бугуруслан”, 53.62° с.ш., 52.43° в.д.).

Дизайн исследования. Рекогносцировка территории исследования выявила неоднородность морфометрических характеристик рельефа местности. В связи с этим проанализировали пространственное распределение основных морфометрических показателей (абсолютной высоты, крутизны и экспозиции склонов) для выбора точек исследования в каждом поле. В пределах каждого поля было распределено по 30 точек опробования (рис. 2). Расположение точек исследования было выбрано случайно, учитывая весь спектр величин основных морфометрических параметров, т.е. статистическое равенство общей гистограммы и гистограммы выборки — стратифицированная случайная выборка [12]. В качестве исходной информации о рельефе изученной территории использовали цифровую модель рельефа (ЦМР) Shuttle radar topographic mission (SRTM) с пространственным разрешением 30 м.

В каждой точке опробования в октябре 2022 г. были выполнены почвенные прикопки шириной 30 см и глубиной 40 см, из которых были отобраны образцы почвы (слои 0–10 и 10–30 см). Дополнительно металлическим цилиндром (объемом 88 см^3) было отобрано по 2 образца из каждого слоя (для верхнего — из 0–5 и 5–10 см, для нижележащего — из 10–15 и 25–30 см) с сохранением естественного сложения почвы для последующего определения ее плотности.

Физико-химический анализ почвы. Образцы почвы доставляли в лабораторию и высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре. Затем в них определяли содержание общего углерода ($\text{C}_{\text{общ}}$) и азота (N) методом ИК-спектроскопии после их сжигания в токе кислорода (1100°C , анализатор Vario EL III, Elementar, Германия). Содержание углерода карбонатов ($\text{C}_{\text{карб}}$) в почве определяли манометрическим методом [13]. Воздушно-сухую почву (навеска 2 г) помещали во флакон (объем 480 мл), вносили 20 мл 10% HCl, закрывали герметично резиновой пробкой и измеряли давление ртутным манометром. Результаты определения $\text{C}_{\text{карб}}$ выражали в %. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ (%) в почве определяли по разнице величин $\text{C}_{\text{общ}}$ и $\text{C}_{\text{карб}}$. Рассчитывали отношение $\text{C}_{\text{орг}} : \text{N}$. Величину $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ определяли в суспензии (почва : вода = 1 : 2.5) потенциометрическим методом (pH-метр “Эксперт-001”, Россия). Гранулометрический состав почвенных образцов анализировали в водных суспензиях почвы после их ультразвуковой обработки методом лазерной дифракции с помощью лазерного дифрактометра MicrotracS3500 Bluewave (США) [14].

Оценка запасов углерода. Запасы $\text{C}_{\text{орг}}$ ($\text{кг}/\text{м}^2$) рассчитывали по формуле $P \times h \times C/10$, где P — объемный вес почвы ($\text{г}/\text{см}^3$), h — мощность почвенного слоя (см), C — содержание органического углерода в почве (%). Для оценки объемного веса почвы образцы фиксированного объема высушивали (105°C , 8 ч) с последующим определением их массы. Величины массы каждой пары образцов (0–5/5–10 и 10–15/25–30 см) были усреднены с целью оценки плотности почвы для слоев 0–10 и 10–30 см почвы.

Картографирование запасов углерода. Анализ пространственного распределения запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве (0–10 см) был проведен с помощью подходов цифровой почвенной картографии и машинного обучения. Подход заключался в создании

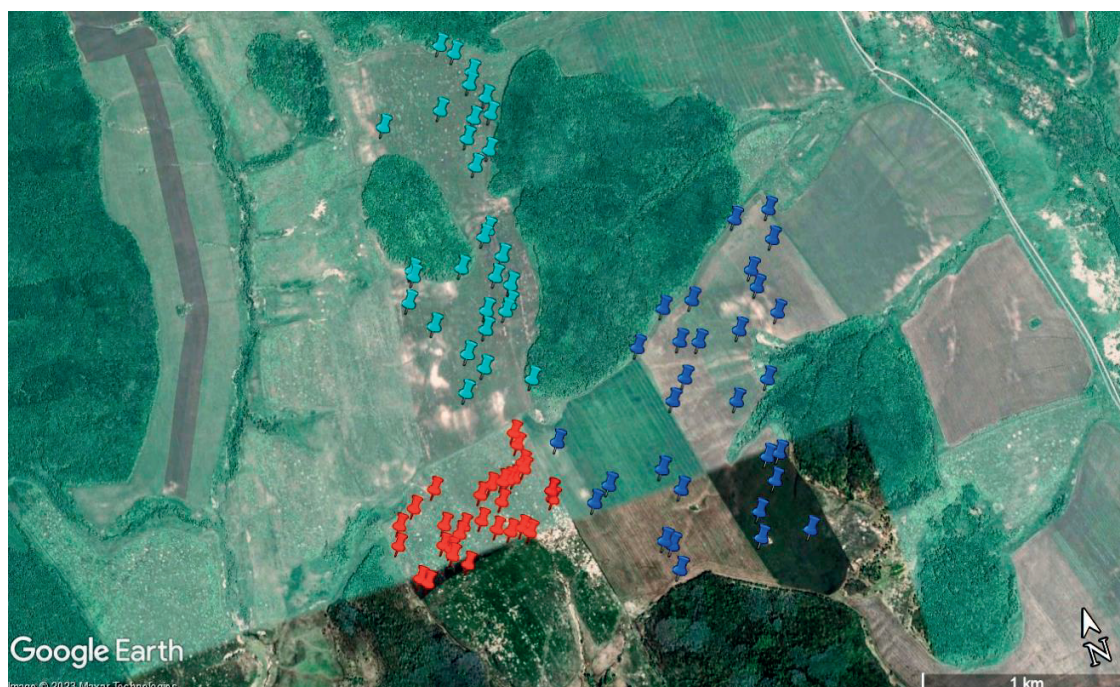


Рис. 2. Расположение точек исследования (всего 90) на сельскохозяйственных полях Самарской обл. (красным отмечены точки исследования на поле со вспашкой, бирюзовым и синим — с нулевой обработкой в течение 5- и 8-ми лет соответственно).

нелинейной статистически значимой модели зависимости между запасом $C_{орг}$ и набором предикторов (независимых переменных), пространственное распределение которых известно для всей территории исследования. В качестве модели применен подход “расширяемые регрессионные деревья” (РРД) [15]. Кроме основных морфометрических параметров использовали еще 40 [16], рассчитанных также на основе ЦМР в программном комплексе SAGA (версия 7.8.2). Дополнительно, в качестве предикторов применяли спектральный индекс для характеристики фотосинтетически активной биомассы растений ($NDVI$). Величины индекса были получены на основе космической съемки со спутника Sentinel-2 (июль—август, 2022 г.). Оценку пространственного распределения запасов $C_{орг}$ в нижележащем слое почвы (10–30 см) проводили на основе уравнения линейной регрессии для верхнего слоя 0–10 см.

Статистический анализ данных. Значимость различий морфометрических свойств рельефа, $NDVI$ -индекса, физических и химических свойств почвы между изученными полями оценивали однофакторным дисперсионным анализом с последующим попарным множественным сравнением критерием Тьюки, предварительно выполнив статистический тест на однородность

дисперсий и нормальность распределения данных. Распределение показателя (абсолютная высота), которое не удалось преобразовать для выполнения условий параметрической статистики, было проанализировано критерием Краскела—Уоллиса с последующим попарным множественным сравнением критерием Данна. Статистическую обработку и визуализацию экспериментальных данных выполняли в среде программирования R 4.0.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние величины абсолютных высот для каждого поля значимо различались (табл. 2), различие между ними составило 8–19 м н.у.м. Перепад высот в пределах поля со вспашкой и нулевой обработкой в течение 5 лет был одинаковым и составил 18 м, а для поля с 8-летней нулевой обработкой он достигал 50 м. Уклон местности в среднем не превышал 3° и значимо не различался для изученных сельскохозяйственных полей. Показано, что урожайность и количество фотосинтетически активной биомассы пшеницы ($NDVI$ -индексе) для поля с нулевой обработкой почвы были больше на 31 и 23% по сравнению с таковыми для поля со вспашкой (табл. 1, 2). Стационарный опыт в зоне “рискованного земледелия” (Крымский полуостров, чернозем южный мицелярно-карбонатный) выявил, что технология нулевой

Таблица 2. Морфометрическая характеристика рельефа и вегетационный индекс (*NDVI*, июль–август 2022 г.) для сельскохозяйственных полей с различной обработкой почвы (среднее $\pm$ стандартное отклонение)

Обработка	Высота, м н.у.м.*	Разница высот, м	Уклон, °	<i>NDVI</i>
Вспашка	186 $\pm$ 4 b	18	2.1 $\pm$ 1.2 a	0.51 $\pm$ 0.22 b
Нулевая (5 лет)	194 $\pm$ 5 a	18	2.5 $\pm$ 1.3 a	0.66 $\pm$ 0.05 a
Нулевая (8 лет)	175 $\pm$ 12 c	50	2.7 $\pm$ 1.1 a	0.45 $\pm$ 0.06 c

Примечание. Величины с разными буквами различаются значимо для каждого показателя отдельно ($p \leq 0.05$, параметрический критерий Тьюки и *непараметрический критерий Данна).

Таблица 3. Физико-химические свойства почвы сельскохозяйственных полей при различной обработке (среднее $\pm$ стандартное отклонение)

Обработка (количество лет)	Плотность, г/см ³	Ил (частицы <0.002 мм), %	рН _{H₂O}	С _{орг}	С _{карб}	С _{орг} : N
				%		
Верхний слой (0–10 см)						
Вспашка	1.00 ± 0.09 б	26.2 ± 4.5 а	7.18 ± 0.60 а	4.17 ± 0.67 а	0.47 ± 0.93 а	12.0 ± 0.7 а
Нулевая (5)	1.06 ± 0.09 а	23.6 ± 1.2 б	6.89 ± 0.63 а	4.49 ± 0.87 а	0.32 ± 0.67 а	12.3 ± 0.5 а
Нулевая (8)	1.06 ± 0.09 а	23.3 ± 4.3 б	6.78 ± 0.71 а	4.38 ± 0.69 а	0.33 ± 0.61 а	12.1 ± 0.8 а
Нижний слой (10–30 см)						
Вспашка	1.10 ± 0.07 а	28.7 ± 8.7 а	7.06 ± 0.64 а	4.05 ± 0.69 а	0.47 ± 0.94 а	12.2 ± 0.8 а
Нулевая (5)	1.12 ± 0.09 а	24.4 ± 3.7 б	6.75 ± 0.65 а	4.00 ± 0.84 а	0.36 ± 0.80 а	12.6 ± 0.6 а
Нулевая (8)	1.09 ± 0.07 а	26.2 ± 4.9 аb	6.86 ± 0.71 а	4.05 ± 0.70 а	0.36 ± 0.63 а	12.2 ± 0.8 а

обработки почвы позволила увеличить урожайность в среднем на 0.08 т/га (3 года исследований) по сравнению с традиционной обработкой почвы [17]. В нашем исследовании увеличение урожайности при нулевой обработке могло быть связано с внесением азотного удобрения (табл. 1).

Анализ гранулометрического состава выявил, что поля с разными обработками почвы отличались значимо только содержанием илистой фракции в верхнем слое: вспашка способствовала ее увеличению на 2.6–2.9% (табл. 3). Ежегодная механическая обработка почвы приводит к перемешиванию пахотного и подпахотного горизонтов, для которого характерно большее содержание ила.

В целом, верхний слой 0–10 см почвы изученных сельскохозяйственных полей по международной классификации гранулометрического состава (**USDA**) относился в основном к пылевой и тяжелой глине (рис. 3а). Нижний слой почвы (10–30 см) также характеризовался тяжелым гранулометрическим составом, большинство точек исследования были распределены в пределах одного диапазона фракций ила, песка и пыли (рис.

3б). Плотность верхнего слоя почвы при нулевой обработке (5 и 8 лет) значимо увеличивалась на 0.06 г/см³ по сравнению со вспашкой, а для нижнего 10–30 см слоя значимых различий не обнаружено. Следует отметить, что в научной литературе представлены весьма неоднозначные данные о влиянии технологии прямого посева на плотность почвы. Например, в обзоре [18] показано увеличение плотности почвы только в 39% случаев применения данной агротехнологии, в то время как в остальных случаях она значимо не менялась или даже снижалась (42% и 19% соответственно). При этом авторы отмечали основные изменения плотности только для верхнего слоя 0–10 см почвы. Очевидно, что уплотнение почвы при прямом посеве происходило в результате отсутствия вспашки, однако увеличению плотности может способствовать более продолжительный период применения этой технологии [19, 20] при неблагоприятных погодных условиях (например, обильных осадках) в период обработки, внесения удобрений, посева или сбора урожая. Вместе с тем важно, чтобы уплотнение почвы при нулевой обработке не ограничивало прорастание семян, развитие корней и рост

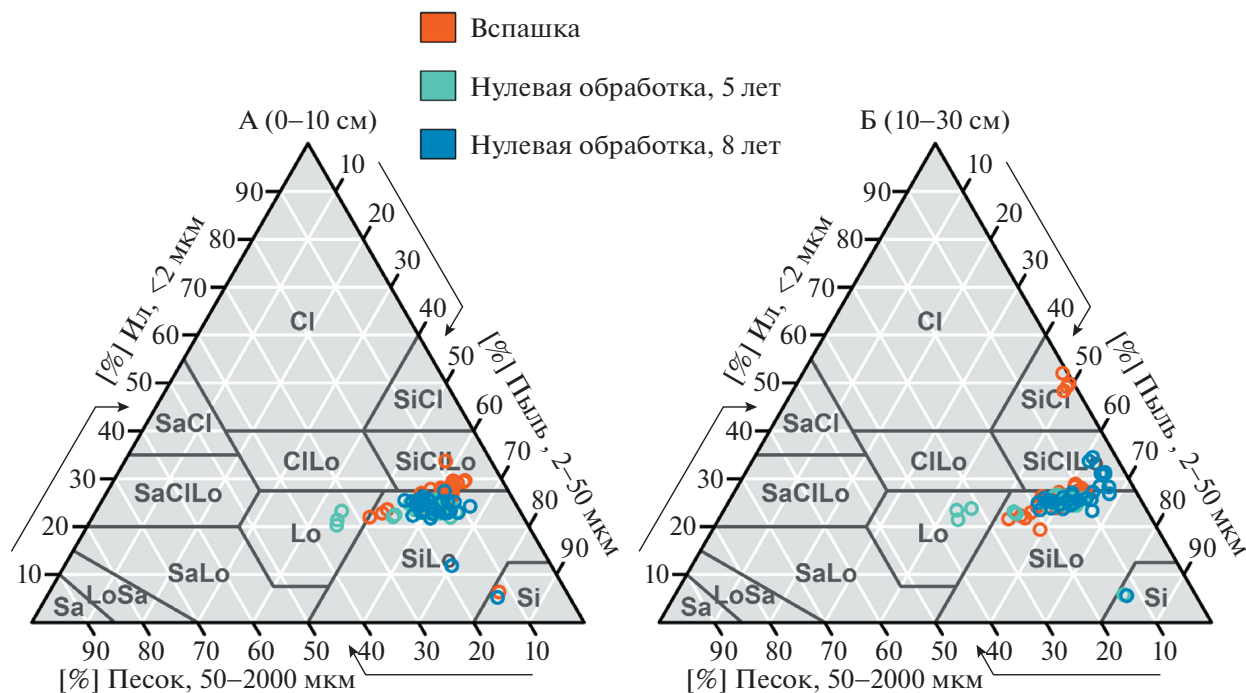


Рис. 3. Треугольник Ферре, характеризующий гранулометрический состав верхнего (а) и нижнего (б) слоев почвы при ее различной обработке. Название по российской номенклатуре: Cl, глина; SiCl, глина; SiClLo, пылеватая глина; SiLo, тяжелый суглинок-глина; Si, пылеватая глина; Lo, суглинок; SaLo, легкий суглинок; LoSa, супесь средняя – легкий суглинок; Sa, песок; SaClLo, легкий–тяжелый суглинок, SaCl, тяжелый суглинок–глина, ClLo, глина.

растений. В нашем исследовании прямой посев не приводил к увеличению предельной величины плотности для глинистых почв (1.40 г/см^3) согласно рекомендациям USDA–NRCS [21], все показатели соответствовали оптимальному диапазону плотности для черноземов тяжелого гранулометрического состава, равному $1.05\text{--}1.30 \text{ г/см}^3$ [22].

Изученные почвы характеризовались нейтральной реакцией среды, величина $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ значительно не изменялась при различных обработках почвы. Вклад $\text{C}_{\text{карб}}$ в содержание $\text{C}_{\text{общ}}$ почвы был незначительным (7–10%) и не различался между изученными сельскохозяйственными полями. Отмечена тенденция к увеличению содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ и отношения $\text{C}_{\text{орг}} : \text{N}$ в верхнем слое почвы от вспашки к нулевой обработке в среднем на 0.2–0.3% и 0.1–0.3 ед. соответственно, при этом для нижнего слоя такой закономерности не обнаружено.

Нулевая обработка почвы в течение 5 и 8 лет приводила к значимому увеличению запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ в верхнем слое на 0.57 и 0.45 кг/м^2 (рис. 4а). Например, скорость накопления запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ в этом слое составила в среднем 1.14 и 0.56 т С/га в год при нулевой обработке (5 и 8 лет), при этом для

нижнего слоя почвы такого эффекта не обнаружено (рис. 4б). Суммарный запас $\text{C}_{\text{орг}}$ в слое 0–30 см почвы составил в среднем 13.0 , 13.6 и 13.3 кг/м^2 для полей со вспашкой, 5- и 8-летней нулевой обработкой соответственно. Следовательно, в результате применения нулевой обработки скорость накопления запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ в агрочерноземах Среднего Поволжья может достигать 1.22 и 0.43 т С/га в год, что в $1.3\text{--}41$ раз больше рекомендуемой программой “4 промилле” для сельскохозяйственных земель нашей страны (от 0.03 до 0.33 т С/га в год) [2, 10, 11]. К тому же, рассчитанная скорость накопления $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве при нулевой обработке в изученном регионе была сопоставима или даже больше в $1.4\text{--}7.6$ раза по сравнению с такой же практикой землепользования во Франции, Великобритании, Китае и США (табл. 4) [3–6].

С практической точки зрения оценка эффективности внедряемой агротехнологии будет полезна аграриям с целью участия, например, в биржевых сделках с углеродными единицами [23]. В настоящее время в России активно развивается рынок углеродных единиц, принято постановление Правительства РФ от 30 апреля 2022 г. № 790 (ред. от 30.11.2022) “Об утверждении Правил создания и ведения реестра углеродных единиц, а также проведения операций с углеродными

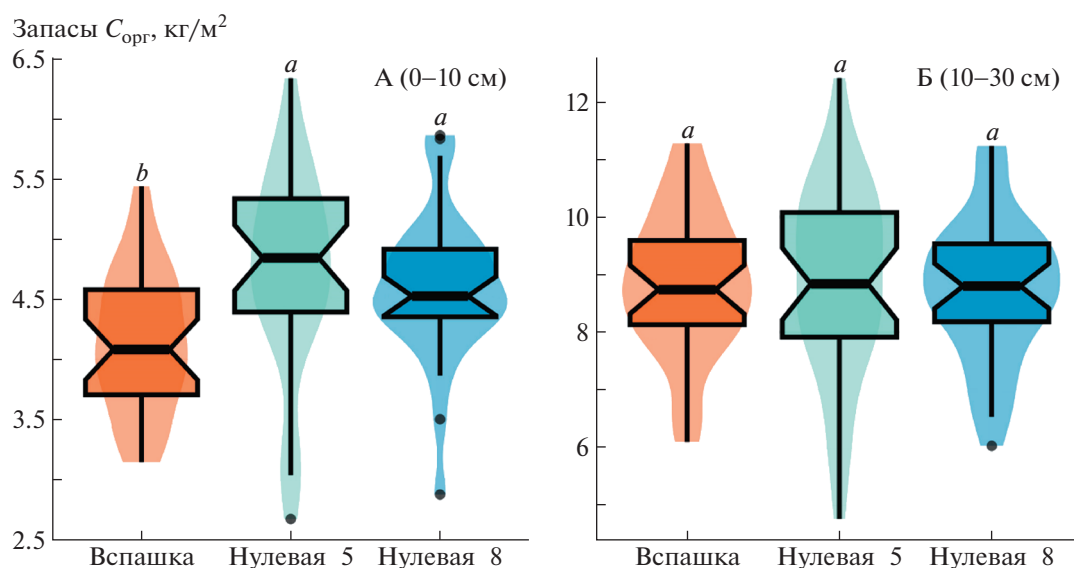


Рис. 4. Распределение запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в верхнем (а) и нижнем слое (б) почвы сельскохозяйственных полей со вспашкой, нулевой обработкой (5 и 8 лет, $n = 30$ для каждого поля и слоя). Визуализация данных выполнена в виде боксплотов с вырезами (notches), которые представляют 95%-ный доверительный интервал для медианы (медиана $\pm 1.58 \times$ межквартильный размах / $n^{0.5}$). Разные буквы указывают на значимые различия ($p < 0.05$, критерий Тьюки).

ми единицами в реестре углеродных единиц” (<http://government.ru/docs/all/140827/>) [24]. Согласно данным АО “Национальная товарная биржа”, в сентябре 2022 г. в России впервые была осуществлена биржевая сделка, для которой стоимость одной углеродной единицы (т CO_2 -эквивалента) составила 1000 руб. [23]. Учитывая значительные изменения запасов углерода в верхнем слое 0–10 см изученных почв, можно предположить, что внедрение технологии прямого посева позволит дополнительно увеличить ежегодный доход с 1-го га на ~2000–4000 руб. при продаже углеродных единиц на бирже.

На основе полученных данных была создана модель РРД (“расширяемые регрессионные деревья”), которая объясняла ~80% дисперсии запаса

сов $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое 0–10 см ($p < 0.01$) (рис. 5). Недостатки созданной модели связаны с завышением низких (3–4 кг $C_{\text{орг}}/\text{м}^2$) и занижением высоких (5–6 кг $C_{\text{орг}}/\text{м}^2$) показателей запасов $C_{\text{орг}}$ в почве, однако она хорошо воспроизводит их средние показатели. Данные о пространственном распределении изученных предикторов (много-слойное растровое изображение) позволили предсказать величины содержания $C_{\text{орг}}$ для всей территории исследования (рис. 6). Общие запасы в верхнем слое 0–10 см почвы составили 1770, 4080 и 7130 т $C_{\text{орг}}$, а для слоя 10–30 см – 3750, 7700 и 13600 т $C_{\text{орг}}$ для полей со вспашкой, 5- и 8-летней нулевой обработкой на площади 42, 88 и 161 га соответственно. Показано, что наряду с типом

Таблица 4. Оценка средней скорости накопления запасов органического углерода ($\Delta C_{\text{орг}}$) в агропочвах при применении технологии нулевой обработки в различных странах мира

Страна	Слой почвы, см	Период наблюдений, лет	$\Delta C_{\text{орг}}$, т/га в год	Источник
Франция	0–30	20	0.16	[3]
США	0–7.5, 0–15, 0–20, 0–25, 0–30	5–100	0.40	[4]
Китай	0–20	3–13	0.25	[5]
Англия, Уэльс	0–30	2–23	0.31	[6]

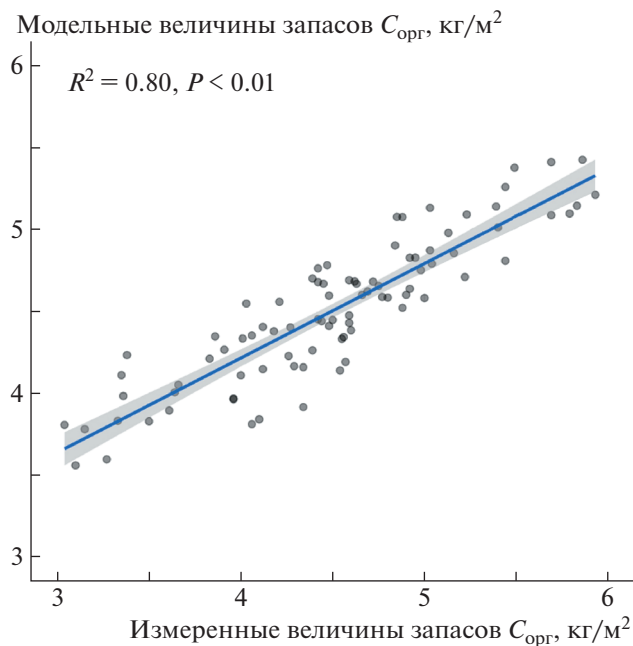


Рис. 5. Зависимость между смоделированными и измеренными показателями запасов $C_{\text{орг}}$ в слое 0–10 см почвы изученных сельскохозяйственных полей.

обработки почвы значимое влияние на запасы $C_{\text{орг}}$ оказывала и крутизна склонов (вклад 9%). Например, для участков с уклоном 3–6° было характерно уменьшение почвенных запасов $C_{\text{орг}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что применение нулевой обработки в течение 5 и 8 лет приводило к увеличению почвенных запасов $C_{\text{орг}}$ на 0.57 и 0.45 кг/м² и уплотнению почвы на 0.06 г/см³ для верхнего слоя 0–10 см почвы по сравнению со вспашкой, при этом значимых изменений этих почвенных показателей в нижнем слое 10–30 см не обнаружено. Полученные данные указали на определенную эффективность применения технологии нулевой обработки почвы для секвестрации углерода в условиях Среднего Поволжья, что может способствовать компенсации антропогенных выбросов CO_2 (программа “4 промилле”). Такая оценка, с одной стороны, необходима для понимания динамики почвенного плодородия и последующей адаптации данной практики к определенным почвенно-климатическим условиям, а с другой – будет полезна аграриям с целью участия в биржевых сделках с углеродными единицами.

В рамках реализации эколого-климатических программ необходимо расширять сведения о потенциале агропочв в секвестрации углерода при применении ресурсосберегающих технологий, учитывая пространственное распределения почвенных запасов $C_{\text{орг}}$ и эмиссии CO_2 , длительный мониторинг их динамики, анализ качественного состава органического вещества и углеродсеквестрирующего потенциала [9].

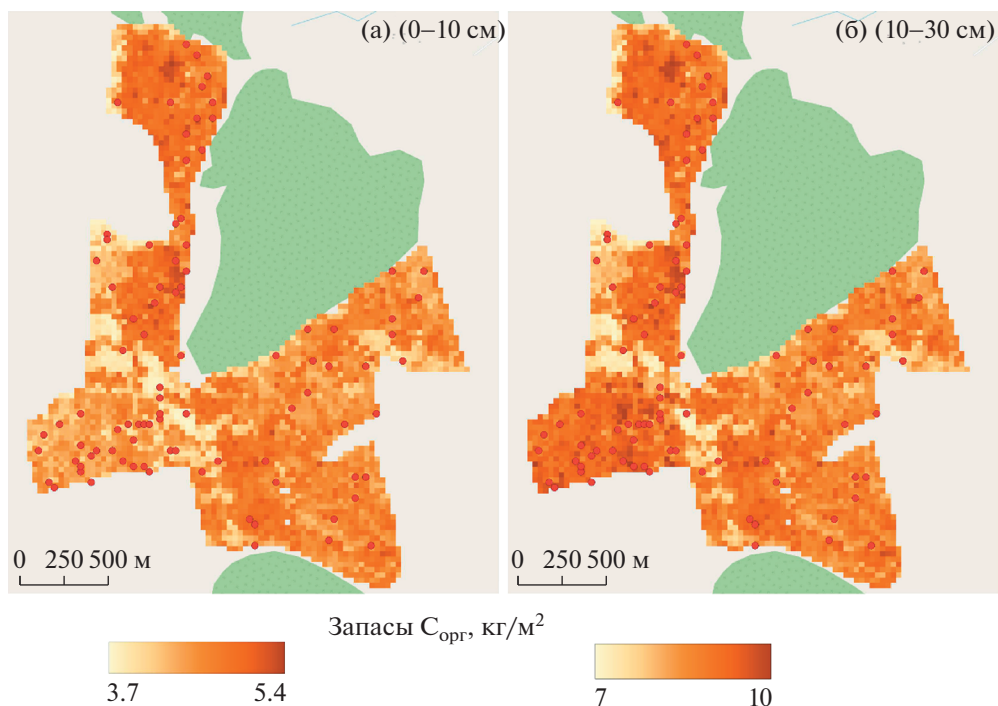


Рис. 6. Распределение предсказанных моделью запасов $C_{\text{орг}}$ в верхнем 0–10 см (а) и нижнем 10–30 см (б) слоях почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудеяров В.Н., Демкин В.Ф., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А. Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
2. Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Su-laeman Y., Tsui C.-C., Vågen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille // Geoderma. 2017. V. 292. P. 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
3. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. Increasing carbon stocks in French agricultural soils? Synthesis of an Assessment Report by the French Institute for Agricultural Research on Request of the French Ministry for Ecology and Sustainable Development // Sci. Assess. Paris: Unit for Expertise, INRA, 2002. 36 p.
4. Johnson J.M.F., Reicosky D.C., Allmaras R.R., Saue, T.J., Venterea R.T., Dell C.J. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA // Soil Till. Res. 2005. V. 83. P. 73–94.
5. Lu F., Wang X., Han B., Ouyang Z., Duan X., Zheng H.U.A., Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland // Glob. Chang. Biol. 2009. V. 15. P. 281–305.
6. Powlson D.S., Bhogal A., Chambers B.J., Coleman K., Macdonald A.J., Goulding K.W.T., Whitmore A.P. The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: a case study // Agric. Ecosyst. Environ. 2012. V. 146. P. 23–33.
7. Национальный атлас почв Российской Федерации: М.: Астель, 2011. 632 с.
8. Турин Е.Н. Преимущества и недостатки системы земледелия прямого посева в мире (обзор) // Таврич. вестн. аграрн. науки. 2020. № 2(22). С. 150–168.
9. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13.
10. Столбовой В.С., Савин И.Ю. Могут ли почвы России влиять на изменение климата? // Природн.-ресурс. ведомости. 2018. № 9 (456). С. 5.
11. Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // Climate Change. 2002. V. 55. P. 131–156.
12. Minasny B., McBratney A.B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information // Comput. Geosci. 2006. V. 32. № 9. P. 1378–1388.
13. Воробьева Л.А. Химический анализ почвы. М.: Изд-во МГУ, 1998. 272 с.
14. Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Чурилин Н.А., Александрова М.С., Головлева Ю.А., Филиппов Н.В., Ковда И.В., Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371.
15. Elith J., Leathwick J. R., Hastie T. A working guide to boosted regression trees // J. Anim. Ecol. 2008. № 77. С. 802–813.
16. Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию [Электр. ресурс] // Электронное научное издание Альманах “Пространство и время”. 2016. Т. 11. Вып. 1: Система планета Земля. Стационар. Сетев. адрес: 2227-9490e-aprov_e-ast11-1.2016.71
17. Турин Е.Н., Женченко К.Г., Гонгало А.А. Выращивание сорго зернового без обработки почвы в сравнении с традиционной технологией в центральной степи Крыма // Агрономия. 2019. № 17 (180). С. 75–85.
18. Blanco-Canqui H., Ruis S.J. No-tillage and soil physical environment // Geoderma. 2018. V. 326. P. 164–200.
19. Guan D., Al-Kaisi M.M., Zhang Y., Duan L., Tan W., Zhang M., Li Z. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, rootbleeding sap and nutrients uptake in summer maize // Field Crop Res. 2014. V. 157. P. 89–97.
20. Fan R.Q., Yang X.M., Drury C.F., Reynolds W.D., Zhang X.P. Spatial distributions of soil chemical and physical properties prior to planting soybean in soil under ridge-, no-, and conventional-tillage in a maize-soybean rotation // Soil Use Manag. 2014. V. 30. P. 414–422.
21. USDA-NRCS, 1996. Soil quality resource concerns: compaction. https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5294092.pdf
22. Бондарев А.Г., Медведев В.В. Некоторые пути определения оптимальных параметров агрофизических свойств почв // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. М.: Наука, 1980. С. 85–98.
23. Захаров Н. Карбоновые рынки в России, в том числе аграрный. Углеродные кредиты // Ресурсосбер. земледелие. Спец. сел.-хоз. журн. 2022. № 56(04). С. 31.
24. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.04.2022 г. № 790. <http://government.ru/docs/all/140827/> Дата обращ. 13.07.2023.

Soil Organic Carbon Stocks under No-Tillage in the Middle Volga Region

K. V. Ivashchenko^{a, #}, S. V. Sushko^{a, b}, Yu. A. Dvornikov^{a, c}, L. A. Mirny^a,
L. V. Orlova^{d, e}, N. D. Ananyeva^a, S. V. Neprimerova^c, A. V. Yudina^f, and N. M. Trots^g

^a*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

^b*Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia*

^c*Peoples' Friendship University of Russia
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia*

^d*LLC "Orlovka—AIC"
ul. Central'naya 42e, Samara region, Stary Amanak 446472, @city Russia*

^e*National movement of conservation agriculture
ul. Kuibysheva 88, Samara 443099, Russia*

^f*V.V. Dokuchaev Soil Institute
Pyzhevsky per. 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia*

^g*Samara State Agrarian University
ul. Uchebnaya 2, Samara region, Kinel, Ust-Kinelsky 446442, Russia*

[#]*E-mail: ivashchenko.kv@gmail.com*

The introduction of resource-saving technologies into the practice of agriculture is one of the approaches to preserving soil fertility and increasing the reserves of organic carbon (C_{org}). One of such technologies is zero tillage, which has been actively used all over the world since the middle of the twentieth century. However, there is still insufficient information about the effectiveness of this technology for the accumulation and preservation of C_{org} in the agro-soils of our country. The paper estimates the rate of accumulation of C_{org} by ag-rochernozeams with zero tillage in the conditions of the Middle Volga region. On the territory of agricultural farms (Pokhvistnevsky district of the Samara region), 2 agricultural fields with 5- and 8-year zero tillage (88 and 161 ha, respectively) and a field with non-fallow plowing (42 ha) were selected. 30 study points were selected in each field, from which soil samples of the upper (0–10 cm) and lower (10–30 cm) layers of humus-accumulative and partially illuvial horizons were selected. The paper presents the main physic-chemical parameters of the soil and calculated the reserves of C_{org} . A significant increase in sorghum reserves in the upper soil layer was shown at 5- and 8-year zero tillage (on average by 0.57 and 0.45 kg/m²) compared with those during plowing, but no significant differences were found for the lower layer. The total sorghum reserves for the 0–30 cm soil layer at zero tillage increased by 0.61 and 0.34 kg/m² relative to those during plowing. Consequently, as a result of the application of zero processing, the rate of accumulation of C_{org} reserves in the ag-rochernozeams of the Middle Volga region can reach 1.22 and 0.43 t/ha per year, which is 1.3–41 times more than the recommended program “4 ppm” for agricultural lands of our country (from 0.03 to 0.33 t/ha per year).

Keywords: direct seeding, “4 ppm” program, carbon sequestration, spatial distribution of reserves, soil organic carbon.