

Научная статья
 УДК 631.417:631.51
 doi:10.35694/YARCX.2025.72.4.003

ДИНАМИКА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ В ПОСЕВАХ ЯРОВЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ОДНОЛЕТНИХ ТРАВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ АГРОТЕХНОЛОГИЙ

С. В. Щукин¹, Е. А. Горнич², А. М. Труфанов³, А. Н. Воронин⁴

^{1, 2, 3, 4}Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

¹s.shhukin@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-9718-9273

²gornich@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-3992-7386

³a.trufanov@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-8815-2441

⁴voronin@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-9924-9142

Реферат. В стационарном трёхфакторном опыте (2015–2018 гг.) оценено влияние систем основной обработки почвы – отвальная (От), поверхностная с рыхлением (ПР), поверхностно-отвальная (ПО), поверхностная (П); систем удобрений – без удобрений (БУ), N_{30} (N), солома 3 т/га (С), солома + N_{30} (С + N), солома + NPK (С + NPK), NPK и систем защиты растений – без гербицидов (БГ), с гербицидами (и их последствием) (Г) – на содержание органического вещества (ОВ) дерново-подзолистой почвы и урожайность культур севооборота (ячмень → однолетние травы → яровая пшеница → однолетние травы). Установлено, что замена отвальной обработки (От) на ресурсосберегающие системы (П, ПО, ПР) достоверно повышала среднее содержание ОВ в слое 0–20 см с 2,65% до 2,80–2,86%, формируя выраженную стратификацию профиля. Максимальные значения по фактору удобрений достигнуты в вариантах С + NPK (3,17%) и NPK (3,02%), тогда как БУ (2,61%) и С (2,63%) демонстрировали минимальные показатели. Наибольшее накопление ОВ в трёхфакторных комбинациях зафиксировано при сочетании поверхностных обработок с органоминеральной системой удобрений: П × С + NPK × Г (3,39%) и ПО × С + NPK × БГ (3,34%). Гербициды и их последствие в среднем по фактору не оказывали статистически значимого влияния на содержание ОВ (БГ 2,82% против Г 2,76% при $НСР_{0,05} = 0,06\%$), однако на фоне NPK в сочетании с ПР и ПО отмечены достоверные снижения показателя. Выявлена положительная корреляционная связь между содержанием ОВ и урожайностью культур ($r = 0,37–0,56$), при этом максимальная урожайность получена в вариантах с комбинациями ресурсосберегающих обработок (П, ПО) и систем удобрений С + NPK / NPK. Результаты подтверждают эффективность комплексного применения ресурсосберегающих обработок почвы (П, ПО, ПР) и органоминеральной системы удобрений (С + NPK) для воспроизводства ОВ и повышения продуктивности агроценозов в условиях Верхневолжья.

Ключевые слова: органическое вещество почвы, дерново-подзолистая почва, яровые зерновые, однолетние травы, ресурсосберегающие системы обработки, солома, NPK, гербициды, Верхневолжье

DYNAMICS OF SOIL ORGANIC MATTER IN SPRING GRAIN CROPS AND ANNUAL GRASSES UNDER RESOURCE-SAVING AGRICULTURAL TECHNOLOGIES

S. V. Shhukin¹, E. A. Gornich², A. M. Trufanov³, A. N. Voronin⁴

^{1, 2, 3, 4}Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

¹s.shhukin@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-9718-9273

²gornich@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-3992-7386

³a.trufanov@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-8815-2441

⁴voronin@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-9924-9142

Abstract. In a stationary three-factor experiment (2015–2018), the influence of primary soil cultivation systems – moldboard (MT), surface with loosening (SL), surface-moldboard (SM), surface (S) – fertilizer systems – no fertilizers (NF), N_{30} , straw 3 t/ha (S), straw + N_{30} (S+N), straw + NPK (S+NPK), NPK – and plant protection systems – without herbicides (WG) / with herbicides (and their aftereffect) (G) – on the content of organic matter (OM) of sod-podzolic soil and the yield of crop rotation crops (barley → annual grasses → spring wheat → annual grasses) was assessed. It was found that replacing moldboard tillage (MT) with resource-saving systems (S, SM, SL) significantly increased the average OM content in the 0–20 cm layer from 2.65% to 2.80–2.86%, forming a pronounced profile stratification. The maximum values for the fertilizer factor were achieved in the S+NPK (3.17%) and NPK (3.02%) variants, while NF (2.61%) and S (2.63%) demonstrated minimal indicators. The highest accumulation of OM in three-factor combinations was recorded

with a combination of surface tillage with an organo-mineral fertilizer system: SL×S+NPK×G (3.39%) and SM×S+NPK×WG (3.34%). The herbicides and their aftereffects on average by factor did not have a statistically significant effect on OM content (WG 2.82% vs G 2.76% at $LSD_{0.05} = 0.06\%$), although against the background of NPK combined with SL and SM reliable decreases were observed. A positive correlation was revealed between OM content and crop yield ($r = 0.37-0.56$), with the maximum yields obtained under resource-saving tillage (S, SM) combined with S+NPK/NPK fertilizer systems. The results confirm the effectiveness of the integrated use of resource-saving tillage (S, SM, SL) and organomineral fertilizer systems (S + NPK) for the reproduction of OM and increasing the productivity of agrocenoses in the Upper Volga region.

Keywords: soil organic matter, sod-podzolic soil, spring cereals, annual grasses, resource-saving tillage, straw return, NPK fertilization, herbicides, Upper Volga region

Введение. Органическое вещество (ОВ) пахотных почв Нечернозёмной зоны остаётся ключевым фактором плодородия и устойчивости агроценозов. Отрицательный баланс гумуса, высокая скорость минерализации растительных остатков и периодические нарушения водного режима способствуют деградации почвенной структуры и снижению продуктивности [1; 2]. В условиях Верхневолжья дерново-подзолистые почвы отличаются повышенной лабильностью гумусового состояния, что обуславливает их чувствительность к изменениям в системах обработки и удобрения [3].

Современная парадигма ресурсосберегающего земледелия основана на минимизации механического воздействия на почву. Снижение интенсивности обработки способствует не только уменьшению минерализации лабильного пула ОВ, но и увеличению доли стабильных гумусовых соединений [4; 5; 6]. Важным дополнением к минимизации обработки является управление растительными остатками, которые могут сохраняться на поверхности или заделываться в почву. Возврат соломы в сочетании с азотными и полными минеральными удобрениями признан ключевым условием для предотвращения иммобилизации азота и трансформации пожнивных остатков в стабильные формы гумуса [7; 8].

Современные исследования подчеркивают, что важным аспектом является не только количество, но и качество накапливающегося ОВ. Длительная минимальная обработка и внесение соломы повышают термическую стабильность органического вещества почвы, что свидетельствует о накоплении более устойчивых гумусовых соединений [9]. Мета-анализ Y. Yan et al. [10] подтверждает, что совмещение сберегающих обработок и заделка соломы в почву в качестве удобрения является эффективной практикой для секвестрации углерода. В условиях Верхневолжья дополнительную значимость приобретает фактор защиты растений, поскольку минимизация обработки может сопровождаться увеличением засорённости и, как следствие, дополнительным выносом элементов питания сорняками [3; 11; 12]. При этом эффективность ресурсосберегающих приёмов в северных регионах Нечерноземья может варьировать под влиянием контрастных погодных условий, что требует верификации в ходе многолетних полевых экспериментов.

Целью настоящего исследования являлась оценка динамики содержания органического вещества в дерново-подзолистой почве и её связи с урожайностью яровых зерновых культур и однолетних трав при различных ресурсосберегающих агротехнологиях в условиях стационарного полевого опыта.

Материалы и методы исследований. Исследование выполнено в стационарном трёхфакторном поле-вом опыте, заложенном в 2015 году методом расщеплённых делянок в четырёхкратной повторности. Схема опыта включала три фактора:

Фактор А – система основной обработки почвы: Отвальная (От): дискование (6–8 см) + вспашка (20–22 см) ежегодно; Поверхностная с рыхлением (ПР): дискование (6–8 см) + рыхление (25–27 см) 1 раз в 4 года; Поверхностно-отвальная (ПО): дискование ежегодно + вспашка 1 раз в 4 года; Поверхностная ежегодная (П): дискование (6–8 см).

Фактор В – система удобрений: Без удобрений (БУ); N_{30} (N); солома 3 т/га (С); солома 3 т/га + N_{30} (С + N); солома 3 т/га + NPK на расчётную прибавку (С + NPK); NPK на расчётную прибавку (NPK). Солому вносили после уборки ячменя (2015 г.) и яровой пшеницы (2017 г.), минеральные удобрения – в дозах, рассчитанных на получение 1,5 т/га зерна и 90 т/га зелёной массы.

Фактор С – система защиты от сорняков: Без гербицидов (БГ); С гербицидами (Г): в 2015 г. – Линтур 180 г/га; в 2016–2018 гг. изучали последствие.

Почва опытного участка – дерново-подзолистая глееватая среднесуглинистая. Агрохимическая характеристика пахотного горизонта (0–20 см) в среднем за 2015–2018 гг.: содержание органического вещества – 2,72%, подвижного фосфора (P_2O_5) – 153,6 мг/кг, обменного калия (K_2O) – 80,2 мг/кг, сумма обменных оснований – 21,5 мг-экв/100 г, гидролитическая кислотность – 1,41 мг-экв/100 г, pH солевой вытяжки – 5,6. Климат умеренно-континентальный. Гидротермический коэффициент (ГТК) в годы исследований варьировал от 0,9 (2018 г.) до 2,0 (2017 г.).

Возделываемые культуры: ячмень (*Hordeum vulgare* L., сорт Эльф) – 2015 г.; однолетние травы (*Vicia sativa* L., сорт Ярославская-136 + *Avena sativa* L., сорт Скакун) – 2016 г.; яровая пшеница (*Triticum aestivum* L., сорт Дарья) – 2017 г.; однолетние травы (*Vicia sativa* L., сорт Ярославская-136 + *Avena sativa* L., сорт Кречет) – 2018 г.

Содержание органического вещества определяли по методу И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91). Урожайность учитывали сплошным методом. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного и корреляционного анализа с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 12.

Результаты. Динамика содержания органического вещества (ОВ) в пахотном горизонте за 2015–2018 гг.

носила волнообразный характер: на фоне повышения в 2015 г. и 2017 г. фиксировалось снижение в 2016 г., 2018 г. (рис. 1, 2, 3).

Важно отметить, что в течение большей части ротации варианты с поверхностной (П) и поверхностно-отвальной (ПО) обработками показывали более

высокие значения содержания ОВ по сравнению с отвальной (От) (рис. 1). Это согласуется с данными, полученными в работе G. Jakab et al. [13], где снижение интенсивности обработки способствовало аккумуляции органического углерода, особенно в верхних слоях почвы.

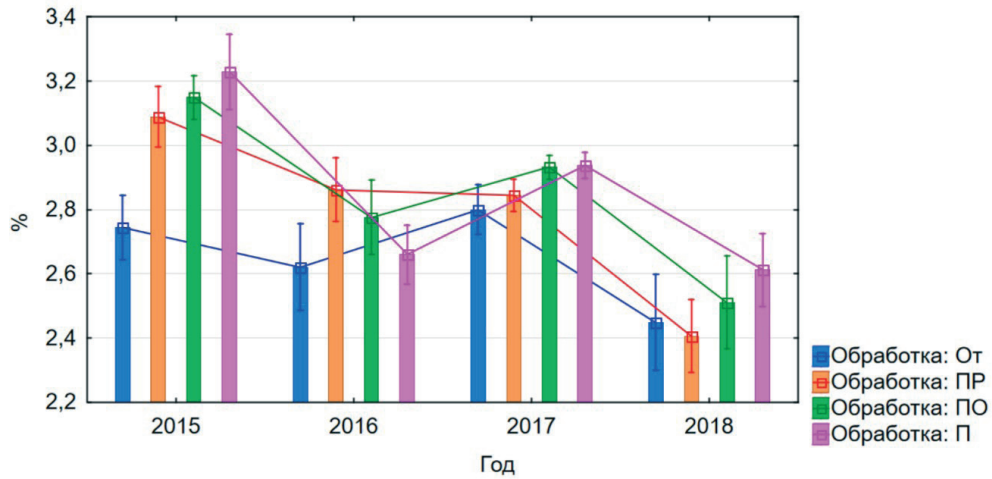


Рисунок 1 – Динамика органического вещества почвы в зависимости от системы обработки (в среднем по изучаемым системам удобрений и защиты растений)

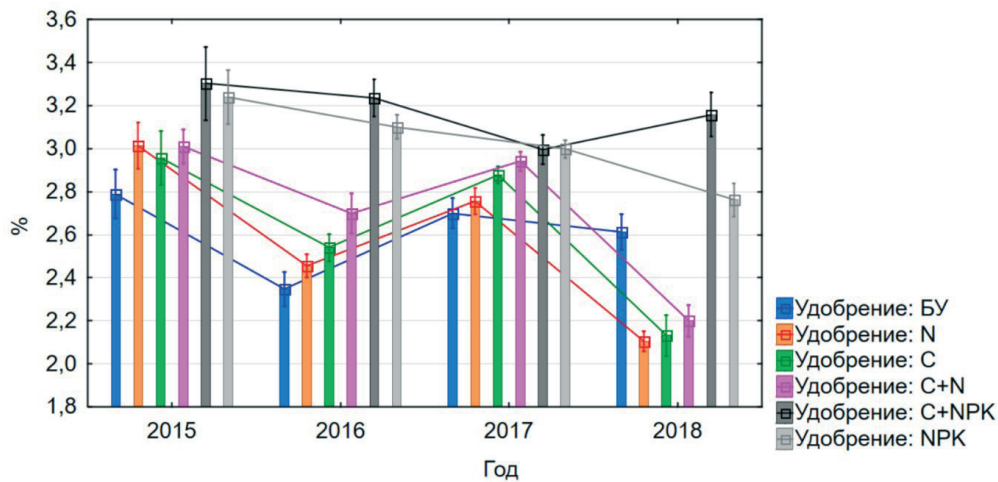


Рисунок 2 – Динамика органического вещества почвы в зависимости от системы удобрения (в среднем по изучаемым системам обработки и защиты растений)

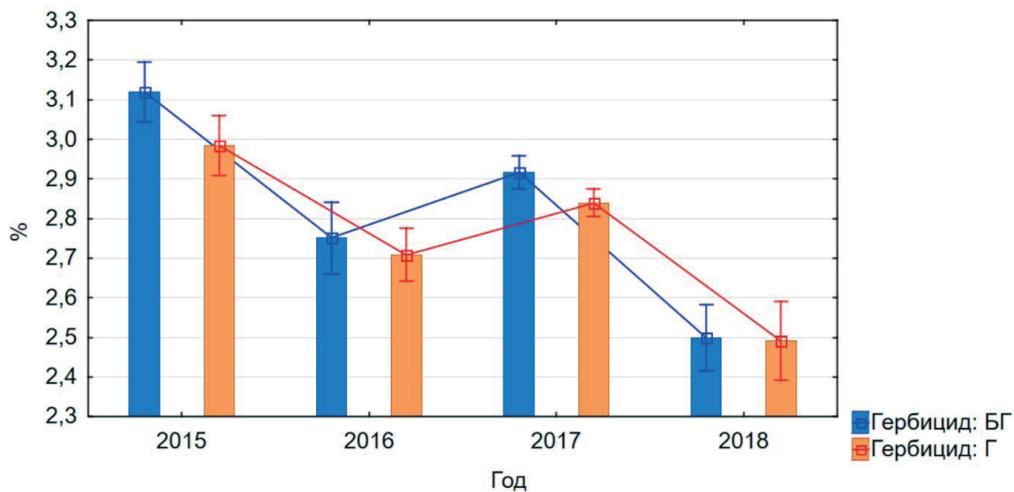


Рисунок 3 – Динамика органического вещества почвы в зависимости от системы защиты растений (в среднем по изучаемым системам обработки и удобрений)

Анализ динамики ОВ в среднем по системам удобрений (рис. 2) выявил чёткую градиацию вариантов. На протяжении всех лет исследований варианты с внесением соломы в сочетании с NPK (С + NPK) и, в меньшей степени, NPK без соломы, стабильно лидировали по содержанию гумуса. Варианты без удобрений (БУ) и с внесением только соломы (С) демонстрировали наименьшие значения. Это подтверждает выводы Е. Filimonenko et al. [9] о синергетическом эффекте совместного применения органических остатков и минеральных удобрений для стабилизации почвенного органического вещества.

Динамика ОВ в среднем по системам защиты растений (рис. 3) показала отсутствие статистически значимого влияния последствия гербицидов на содержание гумуса, хотя в отдельные годы отмечались небольшие колебания.

Более детальная информация о содержании органического вещества представлена в таблице 1 (среднее за 2015–2018 гг.).

Анализ влияния систем основной обработки почвы в разрезе фонов удобрений и защиты растений выявил устойчивые тенденции, хотя и не достигшие уровня статистической значимости на уровне трёхфакторных комбинаций ($HSP_{0,05}$ обработки = 0,60 п.п.). Во всех без исключения сочетаниях фонов удобрений и режимов защиты растения ресурсосберегающие системы (П, ПО, ПР) демонстрировали более высокие значения содержания органического вещества по сравнению с отвальной обработкой (От). Наиболее выраженные расхождения наблюдались в следующих комбинациях: на фоне органо-минеральной системы удобрения (С + NPK) с применением гербицидов поверхностная обработка (П) обеспечила содержание ОВ 3,39% против 3,09% при отвальной обработке ($\Delta = 0,30$ п.п.); на том же фоне удобрений, но без применения гербицидов, поверхностно-отвальная обработка (ПО) показала результат 3,34% против 3,07% при отвальной ($\Delta = 0,27$ п.п.). Несмотря на то, что абсолютные величины различий не превы-

Таблица 1 – Содержание органического вещества в почве (в среднем за 2015–2018 гг.), %

| Система обработки почвы | Вариант Система удобрений | Система защиты растений | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------|------|------------------|-------|------|
| | | без гербицидов, БГ | | | с гербицидами, Г | | |
| | | Слой почвы, см | | | | | |
| | | 0–10 | 10–20 | 0–20 | 0–10 | 10–20 | 0–20 |
| Отвальная, От | БУ | 2,55 | 2,29 | 2,42 | 2,48 | 2,46 | 2,47 |
| | N _{30r} N | 2,37 | 2,36 | 2,36 | 2,39 | 2,61 | 2,50 |
| | Солома, С | 2,40 | 2,41 | 2,40 | 2,32 | 2,23 | 2,28 |
| | Солома + N _{30r} С + N | 2,76 | 2,51 | 2,64 | 2,73 | 2,56 | 2,64 |
| | Солома + NPK, С + NPK | 2,99 | 3,15 | 3,07 | 2,98 | 3,19 | 3,09 |
| | NPK, NPK | 2,79 | 2,99 | 2,89 | 3,18 | 2,98 | 3,08 |
| Поверхностная с рыхлением, ПР | БУ | 2,44 | 2,87 | 2,65 | 2,31 | 2,67 | 2,49 |
| | N _{30r} N | 2,70 | 2,41 | 2,56 | 2,71 | 2,43 | 2,57 |
| | Солома, С | 2,76 | 2,66 | 2,71 | 2,76 | 2,66 | 2,71 |
| | Солома + N _{30r} С + N | 2,60 | 2,82 | 2,71 | 2,77 | 2,75 | 2,76 |
| | Солома + NPK, С + NPK | 3,17 | 3,16 | 3,16 | 3,14 | 2,94 | 3,04 |
| | NPK, NPK | 3,21 | 3,43 | 3,32 | 3,07 | 2,76 | 2,92 |
| Поверхностно-отвальная, ПО | БУ | 2,86 | 2,78 | 2,82 | 2,57 | 2,91 | 2,74 |
| | N _{30r} N | 3,04 | 2,47 | 2,76 | 2,53 | 2,56 | 2,54 |
| | Солома, С | 2,87 | 2,74 | 2,81 | 2,68 | 2,67 | 2,68 |
| | Солома + N _{30r} С + N | 2,72 | 2,92 | 2,82 | 2,55 | 2,63 | 2,59 |
| | Солома + NPK, С + NPK | 3,48 | 3,20 | 3,34 | 3,29 | 3,05 | 3,17 |
| | NPK, NPK | 3,21 | 2,94 | 3,08 | 2,70 | 2,83 | 2,77 |
| Поверхностная, П | БУ | 2,79 | 2,56 | 2,68 | 2,69 | 2,57 | 2,63 |
| | N _{30r} N | 2,71 | 2,73 | 2,72 | 2,71 | 2,61 | 2,66 |
| | Солома, С | 2,77 | 2,73 | 2,75 | 2,74 | 2,60 | 2,67 |
| | Солома + N _{30r} С + N | 3,01 | 2,75 | 2,88 | 2,60 | 2,72 | 2,66 |
| | Солома + NPK, С + NPK | 3,24 | 3,01 | 3,12 | 3,37 | 3,41 | 3,39 |
| | NPK, NPK | 3,17 | 2,96 | 3,06 | 3,24 | 2,92 | 3,08 |
| HCP _{0,05} обработка | | 0,64 | 0,62 | 0,60 | 0,64 | 0,62 | 0,60 |
| HCP _{0,05} удобрение | | 0,52 | 0,57 | 0,48 | 0,52 | 0,57 | 0,48 |
| HCP _{0,05} гербицид | | 0,42 | 0,39 | 0,29 | 0,42 | 0,39 | 0,29 |

силы порог статистической значимости, выявленная устойчивая тенденция свидетельствует о потенциальных преимуществах ресурсосберегающих систем обработки в накоплении органического вещества в изучаемых условиях.

Анализ влияния систем удобрений при фиксированных вариантах обработки почвы и защиты растений выявил статистически значимое преимущество органоминеральной системы. На фоне отвальной обработки (От) без гербицидов вариант С + NPK обеспечил достоверное увеличение содержания ОВ до 3,07% по сравнению с 2,42% на безудобренном фоне ($\Delta = +0,65$ п.п.), а при использовании гербицидов – 3,09% против 2,47% ($\Delta = +0,62$ п.п.). Аналогичная закономерность наблюдалась при поверхностной обработке с рыхлением (ПР), где на фоне С + NPK без гербицидов содержание ОВ составило 3,16% против 2,65% ($\Delta = +0,51$ п.п.), а с гербицидами – 3,04% против 2,49% ($\Delta = +0,55$ п.п.).

Наибольший эффект от применения органоминеральной системы зафиксирован при поверхностной обработке (П) с гербицидами, где содержание ОВ достигло 3,39% против 2,63% на контроле ($\Delta = +0,76$ п.п.). Вариант с внесением только минеральных удобрений (NPK) также показал статистически значимые результаты, например, при отвальной обработке с гербицидами (3,08% против 2,47%, $\Delta = +0,61$ п.п.) и при поверхностной обработке с рыхлением без гербицидов (3,32% против 2,65%, $\Delta = +0,67$ п.п.).

Установлена стабильная иерархия эффективности систем удобрений: С + NPK \geq NPK > С \approx N₃₀ \geq БУ. Особенно важно отметить, что эффективность органоминеральной системы С + NPK существенно усиливалась при использовании ресурсосберегающих обработок почвы (П, ПО, ПР), что свидетельствует о синергетическом взаимодействии изучаемых факторов. Полученные данные подтверждают перспективность комплексного применения ресурсосберегающих обработок почвы в сочетании с органоминеральной системой удобрения для повышения содержания органического вещества в дерново-подзолистых почвах Верхневолжья.

Анализ влияния системы защиты растений на содержание органического вещества показал ограниченный и точечный характер действия данного фактора. При фиксированных системах обработки почвы и фонах удобрений сравнение вариантов «без гербицидов / с гербицидами» выявило преимущественно слабые различия, не достигавшие порога статистической значимости (НСР_{0,05} защиты растений = 0,29 п.п.). Единственные статистически значимые эффекты применения гербицидов зафиксированы на фоне минеральной системы удобрения (NPK) в сочетании с ресурсосберегающими обработками: при поверхностной обработке с рыхлением (ПР) содержание ОВ снизилось с 3,32% до 2,92% ($\Delta = -0,40$ п.п.), а при поверхностно-отвальной обработке (ПО) – с 3,08% до 2,77% ($\Delta = -0,31$ п.п.). Наиболее эффективная органоминеральная система (С + NPK) демонстрировала стабильность к воздействию гербицидов – различия между вариантами защиты не превышали 0,27 п.п. и оставались статистически незначимыми. Важно отметить, что общая иерархия эффективности

изучаемых факторов, определяемая системами обработки почвы и удобрениями, сохранялась неизменной независимо от применения средств защиты растений. Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние гербицидов проявляется преимущественно как сложное трёхфакторное взаимодействие (обработка \times удобрения \times защита растений) и ограничивается специфическими комбинациями агроприёмов.

Анализ взаимодействия факторов, представленных в таблице 1, выявил синергетический эффект при сочетании определённых систем удобрения и обработки почвы. Преимущества органоминеральной системы (С + NPK) и минеральной системы (NPK) существенно усиливаются на фоне поверхностных и комбинированных обработок (П, ПО, ПР), что подтверждается максимальными значениями содержания органического вещества 3,39–3,34%, достигнутыми при поверхностной (П) и поверхностно-отвальной (ПО) обработках. В то же время, даже при интенсивных системах удобрения, отвальная обработка (От) демонстрирует значения в нижнем диапазоне, не превышающие 3,09%.

Межслойное распределение органического вещества служит дополнительным свидетельством специфики ресурсосберегающих технологий обработки. При поверхностных и комбинированных обработках наблюдается чёткая стратификация профиля – содержание ОВ в слое 0–10 см стабильно превышает показатели слоя 10–20 см на 0,20–0,30 п.п., с максимальным различием +0,57 п.п. в комбинации поверхностно-отвальной обработки с внесением N₃₀ без гербицидов (ПО \times N₃₀, БГ). Наблюдаемая стратификация логически объясняется поверхностным размещением растительных остатков и ограниченным перемешиванием почвенных слоёв при ресурсосберегающих системах обработки, что согласуется с современными представлениями о механизмах гумусообразования в условиях минимизированного воздействия на почву [14; 15].

Обобщённые данные в среднем по факторам свидетельствуют, что поверхностная (П) и поверхностно-отвальная (ПО) обработки обеспечили значимо более высокое содержание гумуса в слое 0–20 см (2,86 и 2,84% соответственно) по сравнению с отвальной (2,65%) (табл. 2). Это согласуется с современными представлениями о том, что минимизация обработки снижает аэрацию и интенсивность минерализации ОВ [3; 13].

Применение удобрений оказало наиболее сильное влияние на изучаемый показатель. Варианты С + NPK и NPK достоверно превосходили все остальные, формируя содержание гумуса на уровне 3,17 и 3,02% соответственно. Вариант с внесением только соломы (С) не показал значимого прироста ОВ по сравнению с контролем без удобрений (2,63% против 2,61%), что подчеркивает необходимость внесения азота с удобрениями для эффективной гумификации соломы [16–18]. Вариант С + N занимал промежуточное положение (2,71%), что указывает на недостаточность только азотного питания для полноценного гумусообразования по сравнению с полным минеральным удобрением.

Изучаемые системы защиты растений отличались содержанием ОВ на уровне порога значимости:

Таблица 2 – Содержание органического вещества в почве в зависимости от изучаемых факторов (в среднем за 2015–2018 гг.), %

| Вариант | Слой почвы, см | | |
|---|----------------|-------|------|
| | 0–10 | 10–20 | 0–20 |
| Фактор А. Система основной обработки почвы | | | |
| Отвальная, От | 2,66 | 2,65 | 2,65 |
| Поверхностная с рыхлением, ПР | 2,80 | 2,80 | 2,80 |
| Поверхностно-отвальная, ПО | 2,88 | 2,81 | 2,84 |
| Поверхностная, П | 2,92 | 2,80 | 2,86 |
| НСР _{0,05} | 0,18 | 0,18 | 0,17 |
| Фактор В. Система удобрений | | | |
| Без удобрений, БУ | 2,59 | 2,64 | 2,61 |
| N _{30r} N | 2,64 | 2,52 | 2,58 |
| Солома, С | 2,66 | 2,59 | 2,63 |
| Солома + N _{30r} С + N | 2,72 | 2,71 | 2,71 |
| Солома + NPK, С + NPK | 3,21 | 3,14 | 3,17 |
| NPK, NPK | 3,07 | 2,98 | 3,02 |
| НСР _{0,05} | 0,18 | 0,20 | 0,17 |
| Фактор С. Система защиты растений от сорняков | | | |
| Без гербицидов, БГ | 2,86 | 2,78 | 2,82 |
| С гербицидами, Г | 2,77 | 2,74 | 2,76 |
| НСР _{0,05} | 0,08 | 0,08 | 0,06 |

БГ – 2,82% против Г – 2,76% ($\Delta = 0,06$ п.п. при $НСР_{0,05} = 0,06$ п.п.). Вероятно, минерализация органического вещества сорняков в варианте БГ могла компенсировать отсутствие гербицидного воздействия.

Анализ урожайности культур за 2015–2018 гг. показывает тесную прямую связь между уровнем обеспечения органическим веществом и продуктивностью культур (ячмень – 2015 г.: $r = 0,52$; $P < 0,001$; яровая пшеница – 2017 г.: $r = 0,37$; $P < 0,011$; однолетние травы – 2018 г.: $r = 0,56$; $P < 0,001$). Максимальные урожайности ячменя (до 27,40 ц/га), яровой пшеницы (до 29,38 ц/га) и однолетних трав (до 461,66 ц/га) были получены в вариантах, сочетающих ресурсосберегающие обработки (ПО, П) с внесением соломы и NPK (С + NPK) или полного минерального удобрения (NPK) (табл. 3). Это подтверждает продуктивный тип баланса органического вещества, при котором его накопление сопряжено с ростом урожайности. Последствие гербицидов в большинстве случаев способствовало стабилизации и некоторому повышению урожайности, особенно в годы с повышенной засорённостью, хотя статистическая значимость этого фактора была не для всех культур.

Обсуждение. Наблюдаемая динамика ОВ в период 2015–2018 гг. интерпретируется как результат наложения трёх факторов. Во-первых, контрастные гидро-термические режимы (влажный 2017 г. и более сухой 2018 г.) усиливали циклы «высушивание – повторное увлажнение», вызывая импульсные выбросы CO_2 и ускоренную минерализацию лабильных пулов органического вещества – классический эффект Бирча [19–21]. Во-вторых, выращивание вико-овсяной смеси за счёт

фиксации азота бобовыми и низкого С:N их остатков повышало доступность N и приток легкоразлагаемого углерода в ризосферу; это ускоряло рост микробной биомассы и активность ферментов и могло вызывать прайминг-эффект – кратковременное усиление минерализации не только свежих остатков, но и части нативного гумуса. В результате возрастала скорость оборота «быстрых» фракций (POM/DOC), что проявлялось повышенной межгодовой изменчивостью содержания ОВ [14; 22–24]. В-третьих, циклическое внесение соломы после зерновых формировало пульсирующие поступления углерода: в среднем соломистые остатки повышают содержание органического углерода почвы, но межгодовая вариабельность велика и определяется влажностью и температурой сезона; в отдельные годы возможны просадки за счёт ускоренной минерализации лёгких фракций [25; 26]. В совокупности это делает пики 2015 и 2017 гг. и сравнительно более низкие значения 2016 и 2018 гг. закономерной реакцией дерново-подзолистой почвы на сочетание влажного сезона, смены режимов увлажнения и «быстрого» углерода от однолетних трав и соломы.

Полученные результаты убедительно демонстрируют эффективность ресурсосберегающих систем обработки почвы в сочетании с органоминеральной системой удобрения для воспроизводства органического вещества дерново-подзолистой почвы. Установленное достоверное увеличение содержания гумуса при переходе от отвальной обработки к поверхностным и комбинированным вариантам (табл. 2) полностью согласуется с современными мировыми трендами в земледелии [9; 13].

Таблица 3 – Влияние систем основной обработки почвы, удобрений и защиты растений на урожайность, ц/га

| Обработка | Удобрение | Гербицид | Ячмень, 2015 г. | Однолетние травы, 2016 г. | Яровая пшеница, 2017 г. | Однолетние травы, 2016 г. | |
|-------------------------------|-------------------------------|----------|-----------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------|
| Отвальная, От | БУ | БГ | 15,1 | 280,1 | 14,9 | 217,0 | |
| | | Г | 14,2 | 256,1 | 19,7 | 203,9 | |
| | N | БГ | 14,9 | 294,0 | 20,8 | 265,7 | |
| | | Г | 15,7 | 377,9 | 21,3 | 226,6 | |
| | С | БГ | 15,0 | 382,1 | 20,6 | 272,1 | |
| | | Г | 19,3 | 387,2 | 16,4 | 231,9 | |
| | С + N | БГ | 15,4 | 344,6 | 22,9 | 205,6 | |
| | | Г | 18,1 | 337,7 | 19,9 | 220,5 | |
| | С + NPK | БГ | 18,9 | 399,7 | 23,0 | 258,7 | |
| | | Г | 22,6 | 383,4 | 23,9 | 236,3 | |
| | NPK | БГ | 20,6 | 378,3 | 26,7 | 259,9 | |
| | | Г | 19,5 | 362,0 | 25,4 | 233,6 | |
| | Поверхностная с рыхлением, ПР | БУ | БГ | 12,2 | 378,0 | 20,0 | 203,0 |
| | | | Г | 13,2 | 372,0 | 21,1 | 186,4 |
| N | | БГ | 12,9 | 320,5 | 24,4 | 157,5 | |
| | | Г | 18,9 | 331,7 | 23,5 | 172,4 | |
| С | | БГ | 14,2 | 345,9 | 19,7 | 136,5 | |
| | | Г | 21,7 | 357,2 | 24,3 | 199,5 | |
| С + N | | БГ | 15,9 | 373,8 | 19,4 | 161,0 | |
| | | Г | 19,5 | 358,2 | 17,2 | 166,3 | |
| С + NPK | | БГ | 20,8 | 331,1 | 28,9 | 255,5 | |
| | | Г | 24,4 | 328,6 | 28,2 | 263,4 | |
| NPK | | БГ | 21,4 | 358,5 | 25,9 | 285,3 | |
| | | Г | 24,9 | 333,4 | 25,6 | 275,6 | |
| Поверхностно-отвальная, ПО | | БУ | БГ | 17,0 | 335,7 | 16,6 | 221,4 |
| | | | Г | 13,4 | 328,6 | 15,9 | 210,0 |
| | N | БГ | 16,5 | 287,0 | 23,9 | 230,1 | |
| | | Г | 18,2 | 363,1 | 23,6 | 283,5 | |
| | С | БГ | 15,7 | 339,9 | 21,1 | 174,1 | |
| | | Г | 17,5 | 375,0 | 24,3 | 167,1 | |
| | С + N | БГ | 17,7 | 334,3 | 20,9 | 215,3 | |
| | | Г | 21,8 | 361,6 | 25,6 | 207,4 | |
| | С + NPK | БГ | 26,0 | 347,3 | 24,0 | 359,6 | |
| | | Г | 27,4 | 461,7 | 28,2 | 350,0 | |
| | NPK | БГ | 24,7 | 315,6 | 26,4 | 341,3 | |
| | | Г | 25,1 | 346,4 | 29,4 | 340,4 | |
| | Поверхностная, П | БУ | БГ | 15,0 | 323,7 | 14,8 | 186,4 |
| | | | Г | 16,2 | 353,6 | 16,1 | 215,3 |
| N | | БГ | 16,8 | 294,4 | 24,0 | 226,6 | |
| | | Г | 19,7 | 320,1 | 24,7 | 201,3 | |
| С | | БГ | 16,9 | 332,6 | 24,5 | 207,4 | |
| | | Г | 17,8 | 360,1 | 26,0 | 226,6 | |
| С + N | | БГ | 15,4 | 343,8 | 21,0 | 214,4 | |
| | | Г | 20,6 | 408,1 | 23,2 | 230,1 | |
| С + NPK | | БГ | 21,3 | 350,9 | 24,3 | 280,9 | |
| | | Г | 25,9 | 342,6 | 24,0 | 311,5 | |
| NPK | | БГ | 21,4 | 382,4 | 25,4 | 325,5 | |
| | | Г | 26,6 | 286,8 | 25,3 | 285,3 | |
| НСР _{0,05} обработка | | | 1,46 | $F_{\phi} < F_{0,05}$ | $F_{\phi} < F_{0,05}$ | 25,2 | |
| НСР _{0,05} удобрение | | | 1,98 | 28,99 | 2,85 | 19,95 | |
| НСР _{0,05} гербицид | | | 1,11 | $F_{\phi} < F_{0,05}$ | $F_{\phi} < F_{0,05}$ | $F_{\phi} < F_{0,05}$ | |

Снижение интенсивности механического воздействия минимизирует аэрацию почвы и деструкцию агрегатов, что создаёт благоприятные условия для сохранения и стабилизации лабильного органического вещества [27–29].

Выявленная дифференциация пахотного горизонта по содержанию ОБ, особенно выраженная при поверхностной обработке, является характерным признаком формирования стратифицированного профиля, типичного для технологий с безотвальными обработками [13; 15; 28; 30]. Накопление органического вещества в верхнем (0–10 см) слое при поверхностных обработках связано с локализацией растительных остатков и меньшей интенсивностью его минерализации вследствие снижения аэрации и сохранения агрегатной защиты ОБ [30; 31]. В то время как отвальная обработка, перемешивая почвенную массу, приводит к более равномерному распределению ОБ по пахотному горизонту, но в целом – к меньшим его запасам из-за интенсификации минерализационных процессов [32]. С агрономической точки зрения повышенное содержание гумуса в самом верхнем слое способствует улучшению водно-физических свойств, ускоряет прорастание семян и развитие корневой системы молодых растений, а также снижает эрозионные потери, что особенно важно в начальные фазы роста яровых культур [33; 34]. Вместе с тем концентрация ОБ и растительных остатков у поверхности при пересыхании верхнего слоя может ограничивать доступность влаги для культур и усиливать конкурентное давление со стороны сорных растений, семена которых также преимущественно аккумулируются в верхней части профиля при минимизации обработки [35–38].

Ключевое влияние на динамику органического вещества оказывает система удобрений. То, что наибольший эффект достигался при совместном внесении соломы и NPK, а не соломы с одним азотом, указывает на комплексность процессов гумификации, требующих не только азота, но и фосфора с калием для обеспечения жизнедеятельности почвенной микробиоты и синтеза устойчивых гумусовых соединений. Эти данные коррелируют с выводами Е. Filimonenko et al. [9] о повышении термической стабильности ОБ при длительном применении подобных систем и с исследованиями Л. Н. Шиховой и др. [39], показавшими значительный вклад длительного минерального удобрения в накопление углерода гумуса. Отсутствие значимого прироста гумуса при внесении одной соломы подчеркивает риск иммобилизации азота и замедления процессов её разложения, что необходимо учитывать при разработке агротехнологий [16; 18].

Влияние системы защиты растений в среднем по фактору оказалось незначительным и погранично существенным ($\Delta = 0,06$ п.п. при $HCP_{0,05} = 0,06$ п.п.), что согласуется с отсутствием устойчивых различий в большинстве трёхфакторных комбинаций; статистически значимые изменения содержания ОБ отмечены лишь локально – в вариантах ПР × NPK и ПО × NPK. С точки зрения механизма наблюдаемых процессов, влияние системы защиты растений на содержание ОБ опосредовано в первую очередь величиной потока ор-

ганического углерода. Подавление сорной растительности гербицидами сокращает поступление в почву сорной биомассы (надземной и корневой) и сопутствующих корневых экссудатов, что на фоне интенсивного минерального питания (NPK) может приводить к незначительному снижению содержания ОБ, по сравнению с вариантами без применения гербицидов [40; 41]. В том же стационарном трёхфакторном опыте ранее показано, что безотвальные и поверхностные системы обработки (ПР и П) увеличивают численность и сухую массу сорных растений главным образом за счёт малолетних видов, тогда как комбинированная поверхностно-отвальная система (ПО) сохраняет засорённость на уровне отвальной обработки. На фонах полного минерального питания и совместного внесения соломы с NPK отмечено многократное снижение доли многолетних сорняков, что отражает усиление конкурентоспособности культур и косвенно поддерживает стабилизацию потока органического углерода в почву. Эти факты усиливают интерпретацию слабого среднего эффекта фактора защиты растений на содержание ОБ как следствия перераспределения углеродного потока в агроценозе [42]. В вариантах с внесением соломы и полного минерального удобрения (С + NPK) данный эффект нивелируется доминирующим углеродным потоком от соломы, в результате чего статистически значимые различия между вариантами БГ и Г не проявляются [25]. Вклад фактора защиты растений на исследуемом временном горизонте остаётся второстепенным по сравнению с системами обработки почвы и удобрения: по данным обзоров, прямые эффекты гербицидов на почвенные микробные функции чаще всего носят малый и/или кратковременный характер и существенно варьируют в зависимости от дозы, почвенных условий и истории применения [43; 44]. Практически это означает, что при переходе на ресурсосберегающие системы обработки (П/ПО/ПР) ключевым фактором воспроизводства ОБ остаётся поддержание достаточного потока углерода (возврат соломы в сочетании со сбалансированным минеральным питанием), тогда как схемы применения гербицидов следует оптимизировать прежде всего по фитосанитарным критериям; ожидаемое прямое влияние на ОБ в краткосрочной перспективе невелико и носит локальный характер [43].

Выявленная положительная связь между содержанием ОБ и урожайностью культур имеет важное практическое значение. Она свидетельствует о том, что мероприятия, направленные на воспроизводство гумуса, одновременно являются и факторами интенсификации растениеводства. Ресурсосберегающие системы обработки в сочетании с соломой и NPK не только улучшают агрофизические и агрохимические свойства почвы, но и реализуют потенциал продуктивности яровых зерновых и однолетних трав, что особенно актуально для рискованного земледелия Верхневолжья [3]. Полученные данные согласуются с глобальным мета-анализом Y. Yan et al. [10], который показал, что комбинация возврата соломы и снижения интенсивности обработки является наиболее перспективной для одновременного увеличения запасов ОБ и урожайности.

Выводы.

1. Замена ежегодной отвальной обработки на ресурсосберегающие системы (поверхностная, поверхностно-отвальная и поверхностная с рыхлением) достоверно повышала среднее за ротацию содержание органического вещества в пахотном слое 0–20 см с 2,65% до 2,84–2,86%, способствуя формированию стратифицированного профиля с преимущественным накоплением ОВ в слое 0–10 см.
2. Система удобрений оказывала наибольшее влияние на накопление ОВ. Органоминеральная система (С + NPK) обеспечивала максимальное содержание гумуса – 3,17%, достоверно превышающее варианты без удобрений (2,61%) и одной соломы (2,63%).
3. Выявлен синергетический эффект при сочетании ресурсосберегающих обработок с органоминеральной системой удобрения, что подтверждается абсолютными максимумами содержания ОВ (3,34–3,39%) в трёхфакторных комбинациях П × С + NPK и ПО × С + NPK.
4. Система защиты растений оказывала ограниченное влияние на содержание ОВ. Хотя средняя разность между вариантами (2,82% без гербицидов против 2,76% с гербицидами) находилась на грани статистической значимости, достоверные снижения отмечались точечно – на фоне NPK в сочетании с ресурсосберегающими обработками ПР и ПО.
5. Установлена устойчивая положительная корреляция между содержанием ОВ и урожайностью культур ($r = 0,37–0,56$). Максимальная продуктивность достигнута при сочетании ресурсосберегающих обработок с системами удобрений С + NPK/NPK.
6. Наблюдаемая волнообразная динамика ОВ с пиками в 2015 и 2017 гг. отражает комплексное влияние гидротермических условий ротации и биологических особенностей культур севооборота на процессы трансформации органического вещества в дерново-подзолистой почве.

Список источников

1. Чеботарев Н. Т., Шергина Н. Н., Тарабукина Т. В. Влияние комплексного применения органических и минеральных удобрений на фракционно-групповой состав и баланс гумуса дерново-подзолистой почвы Европейского Северо-Востока // *Агрохимический вестник*. 2020. № 3. С. 15–18. DOI 10.24411/1029-2551-2020-10032. EDN ZPXGOG.
2. Афанасьева Т. И., Труфанов А. М., Иванова М. Ю., Цвик Г. С. Динамика содержания гумуса почвы при различном по интенсивности её сельскохозяйственном использовании // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2021. № 3 (55). С. 5–11. DOI 10.35694/YARCX.2021.55.3.001. EDN METEQI.
3. Щукин С. В., Горнич Е. А., Труфанов А. М. [и др.] Влияние минимальной обработки, удобрений и гербицидов на динамику органического вещества и агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы в посевах яровых зерновых культур и вико-овсяной смеси // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2022. № 2. С. 16–31. DOI 10.26897/0021-342X-2022-2-16-31. EDN MNFXNE.
4. Ding G., Novak J. M., Amarasiriwardena D. [et al.] Soil organic matter characteristics as affected by tillage management // *Soil Science Society of America Journal*. 2002. Vol. 66, No. 2. P. 421–429. DOI 10.2136/sssaj2002.0421.
5. Chivenge P. P., Murwira H. K., Giller K. E. [et al.] Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 94, Is. 2. P. 328–337. DOI 10.1016/j.still.2006.08.006.
6. Dugan I., Pereira P., Kisis I. [et al.] Analyzing the influence of conservation tillage and manure on soil parameter modulations in croplands // *Plants (MDPI)*. 2024. Vol. 13, Is. 5. Art. 607. DOI 10.3390/plants13050607.
7. Русакова И. В. Эффективность различных доз и сроков внесения азота при заделке соломы под ячмень и тритикале // *Владимирский земледелец*. 2020. № 2 (92). С. 27–33. DOI 10.24411/2225-2584-2020-10115. EDN LOQFEF.
8. Завалин А. А., Соколов О. А., Шмырева Н. Я. [и др.] Циклы, баланс азота и устойчивость агроэкосистемы при применении органических удобрений (эксперименты с 15N) // *Почвоведение*. 2022. № 1. С. 68–76. DOI 10.31857/S0032180X22010130. EDN ULTUIB.
9. Filimonenko E., Liu Z., Wang Z. [et al.] Long-term conservation tillage and straw return affect thermal stability of soil organic matter // *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 991. Art. 179934. DOI 10.1016/j.scitotenv.2025.179934.
10. Yan Y., Li H., Zhang M. [et al.] Straw return or no tillage? Comprehensive meta-analysis based on soil organic carbon contents, carbon emissions, and crop yields in China // *Agronomy*. 2024. Vol. 14, No. 10. Art. 2263. DOI 10.3390/agronomy14102263.
11. Тойгильдин А. Л., Хайртдинова Н. А., Сыромятников В. В. Оценка эффективности гербицидов при возделывании ячменя пивоваренного в условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. № 1 (65). С. 47–53. DOI 10.18286/1816-4501-2024-1-47-53. EDN DDUSAH.
12. Рзаева В. В. Способ и глубина основной обработки почвы при влиянии на засоренность посевов яровой пшеницы // *Аграрный вестник Урала*. 2017. № 12 (166). С. 9. EDN YMDGCB.
13. Jakab G., Madarász B., Masoudi M. [et al.] Soil organic matter gain by reduced tillage intensity: Storage, pools, and chemical composition // *Soil & Tillage Research*. 2023. Vol. 226. Art. 105584. DOI 10.1016/j.still.2022.105584.
14. Sainju U. M., Singh B. P., Whitehead W. F. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA // *Soil and Tillage Research*. 2002. Vol. 63, Is. 3-4. P. 167–179. DOI 10.1016/S0167-1987(01)00244-6.
15. Franzluebbers A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality // *Soil and Tillage Research*. 2002. Vol. 66, Is. 2. P. 95–106. DOI 10.1016/S0167-1987(02)00018-1.
16. Черкасов Г. Н., Чуян Н. А., Еремина Р. Ф. Использование растительных остатков как органических удобрений // *Плодородие*. 2007. № 6 (39). С. 22–23. EDN KUCLCT.
17. Guo R. B., Li G. D., Pan M. Y. [et al.] Effects of long-term straw return and nitrogen application rate on organic carbon storage, components and aggregates in cultivated layers // *Scientia Agricultura Sinica*. 2023. Vol. 56, Is. 20. P. 4035–4048. DOI 10.3864/j.issn.0578-1752.2023.20.009.
18. Ахтямова А. А., Еремин Д. И. Агроэкономическое обоснование заделки соломы яровой пшеницы при использовании возрастающих доз минеральных удобрений в лесостепи Зауралья // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 10 (199). С. 121–128. DOI 10.36718/1819-4036-2023-10-121-128. EDN KHROGV.
19. Jarvis P., Rey A., Petsikos C. [et al.] Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The "Birch effect" // *Tree Physiology*. 2007. Vol. 27, Is. 7. P. 929–940. DOI 10.1093/treephys/27.7.929.

20. Borken W., Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15, Is. 4. P. 808–824. DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x.
21. Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T. [et al.] Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, Is. 15. P. 4007–4023. DOI 10.5194/bg-17-4007-2020.
22. Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42, Is. 9. P. 1363–1371. DOI 10.1016/j.soilbio.2010.04.003.
23. Bongiorno G., Bünemann E. K., Oguejiofor C. U. [et al.] Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 99. P. 38–50. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.12.008.
24. Bernard L., Basile-Doelsch I., Derrien D. [et al.] Advancing the mechanistic understanding of the priming effect on soil organic matter mineralization // *Functional Ecology*. 2022. Vol. 36, Is. 6. P. 1355–1377. DOI 10.1111/1365-2435.14038.
25. Berhane M., Xu M., Liang Z. [et al.] Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis // *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26, Is. 4. P. 2686–2701. DOI 10.1111/gcb.15018.
26. Hu N., Shi H., Wang B. [et al.] Effects of different wheat straw returning modes on soil organic carbon sequestration in a rice–wheat rotation // *Canadian Journal of Soil Science*. 2018. Vol. 98, Is. 1. P. 25–35. DOI 10.1139/cjss-2018-0094.
27. Six J., Paustian K., Elliott E. T. [et al.] Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon // *Soil Science Society of America Journal*. 2000. Vol. 64, Is. 2. P. 681–689. DOI 10.2136/sssaj2000.642681x.
28. Иващенко К. В., Сушко С. В., Дворников Ю. А. [и др.] Запасы почвенного органического углерода при нулевой обработке почвы в условиях Среднего Поволжья // *Агротехника*. 2023. № 12. С. 47–56. DOI 10.31857/S0002188123110066. EDN VGFOLD.
29. Krauss M., Berner A., Perrochet F. [et al.] Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Art. 4403. DOI 10.1038/s41598-020-61320-8.
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, Is. 2. P. 155–176. DOI 10.1023/A:1016125726789.
31. Blanco-Canqui H., Lal R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2009. Vol. 28, Is. 3. P. 139–163. DOI 10.1080/07352680902776507.
32. López-Fando C., Pardo M. T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment // *Soil and Tillage Research*. 2009. Vol. 104, Is. 2. P. 278–284. DOI 10.1016/j.still.2009.03.005.
33. Кирюшин В. И. Экологические основы земледелия. М. : Колос, 1996. 335 с. ISBN 5-10-003342-8.
34. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // *Science*. 2004. Vol. 304, No. 5677. P. 1623–1627. DOI 10.1126/science.1097396.
35. Swanton C., Shrestha A., Knezevic S. Z. [et al.] Influence of tillage type on vertical weed seedbank distribution in a sandy soil // *Canadian Journal of Plant Science*. 2000. Vol. 80, No. 2. P. 455–457. DOI 10.4141/P99-020.
36. Chauhan B. S., Singh R. G., Mahajan G. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: A review // *Crop Protection*. 2012. Vol. 38. P. 57–65. DOI 10.1016/j.cropro.2012.03.010.
37. Derksen D. A., Anderson R. L., Blackshaw R. E., Maxwell B. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the northern Great Plains // *Agronomy Journal*. 2002. Vol. 94, No. 2. P. 174–185. DOI 10.2134/agronj2002.1740.
38. Ивченко В. К., Михайлова З. И., Филиппов А. Г., Кокин С. В. Влияние ресурсосберегающих технологий основной обработки почвы на засоренность посевов яровой пшеницы // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2020. № 3 (156). С. 35–43. DOI 10.36718/1819-4036-2020-3-35-43. EDN UBWVAE.
39. Шихова Л. Н., Челлакова О. А. Влияние многолетнего внесения минеральных удобрений на уровень содержания углерода гумуса в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы // *Пермский аграрный вестник*. 2024. № 4 (48). С. 52–61. DOI 10.47737/2307-2873_2024_48_52. EDN VAPBМК.
40. Казнин Р. Е., Щукин С. В., Сивкова С. С., Смирнов Б. А. Водоустойчивость макроструктуры дерново-подзолистой глееватой почвы при минимизации обработки // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2012. № 4 (90). С. 24–28. EDN OXAKMF.
41. Choudhary V. K., Gurjar D. S., Meena R. S. Crop residue and weed biomass incorporation with microbial inoculation improve the crop and soil productivity in the rice (*Oryza sativa* L.)–toria (*Brassica rapa* L.) cropping system // *Environmental and Sustainability Indicators*. 2020. Vol. 7. Art. 100048. DOI 10.1016/j.indic.2020.100048.
42. Щукин С. В., Горнич Е. А., Труфанов А. М. [и др.] Влияние основной обработки почвы, удобрений и последствий гербицидов на засоренность посевов полевых культур // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2020. Т. 57, № 1. С. 25–31. EDN XEIWYD.
43. Rose M. T., Cavagnaro T., Scanlan C. A. [et al.] Impact of herbicides on soil biology and function // *Advances in Agronomy*. 2016. Vol. 136. P. 133–220. DOI 10.1016/bs.agron.2015.11.005.
44. Samson-Brais É., Lucotte M., Moingt M. [et al.] Impact of weed management practices on soil biological activity in corn and soybean field crops in Québec (Canada) // *Canadian Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 101, No. 1. P. 12–21. DOI 10.1139/CJSS-2020-0023.

References

1. Chebotarev N. T., Shergina N. N., Tarabukina T. V. Vliyanie kompleksnogo primeneniya organicheskikh i mineral'nykh udobrenij na frakcionno-grupповой sostav i balans gumusa dernovo-podzolistoj pochvy Evropejskogo Severo-Vostoka // *Агротехнический вестник*. 2020. № 3. С. 15–18. DOI 10.24411/1029-2551-2020-10032. EDN ZPXGOG.
2. Afanas'eva T. I., Trufanov A. M., Ivanova M. Yu., Tsvik G. S. Dinamika soderzhaniya gumusa pochvy pri razlichnom po intensivnosti eyo sel'skohozyajstvennom ispol'zovanii // *Vestnik APK Verhnevolzh'ya*. 2021. № 3 (55). С. 5–11. DOI 10.35694/YARX.2021.55.3.001. EDN METEQI.
3. Shchukin S. V., Gornich E. A., Trufanov A. M. [и др.] Vliyanie minimal'noj obrabotki, udobrenij i gerbicidov na dinamiku organicheskogo veshchestva i agrohicheskikh svojstv dernovo-podzolistoj pochvy v posevah yarovyh zernovykh kul'tur i vikoovsyanoj smesi // *Izvestiya Timiryazevskoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2022. № 2. С. 16–31. DOI 10.26897/0021-342X-2022-2-16-31. EDN MNFXNE.
4. Ding G., Novak J. M., Amarasiriwardena D. [et al.] Soil organic matter characteristics as affected by tillage management // *Soil Science Society of America Journal*. 2002. Vol. 66, No. 2. P. 421–429. DOI 10.2136/sssaj2002.0421.

5. Chivenge P. P., Murwira H. K., Giller K. E. [et al.] Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 94, Is. 2. P. 328–337. DOI 10.1016/j.still.2006.08.006.
6. Dugan I., Pereira P., Kiscic I. [et al.] Analyzing the influence of conservation tillage and manure on soil parameter modulations in croplands // *Plants (MDPI)*. 2024. Vol. 13, Is. 5. Art. 607. DOI 10.3390/plants13050607.
7. Rusakova I. V. Effektivnost' razlichnykh doz i srokov vnesheniya azota pri zadelke solomy pod yachmen' i tritikale // *Vladimirskij zemledec*. 2020. № 2 (92). S. 27–33. DOI 10.24411/2225-2584-2020-10115. EDN LOQFEF.
8. Zavalin A. A., Sokolov O. A., Shmyreva N. Ya. [i dr.] Cikly, balans azota i ustojchivost' agroekosistemy pri primenenii organicheskikh udobrenij (eksperimenty s 15N) // *Pochvovedenie*. 2022. № 1. S. 68–76. DOI 10.31857/S0032180X22010130. EDN ULTUIB.
9. Filimonenko E., Liu Z., Wang Z. [et al.] Long-term conservation tillage and straw return affect thermal stability of soil organic matter // *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 991. Art. 179934. DOI 10.1016/j.scitotenv.2025.179934.
10. Yan Y., Li H., Zhang M. [et al.] Straw return or no tillage? Comprehensive meta-analysis based on soil organic carbon contents, carbon emissions, and crop yields in China // *Agronomy*. 2024. Vol. 14, No. 10. Art. 2263. DOI 10.3390/agronomy14102263.
11. Tojgil'din A. L., Khajrtidinova N. A., Syromyatnikov V. V. Ocenka effektivnosti gerbicidov pri vozdeleyvanii yachmenya pivovarennogo v usloviyah lesostepnoj zony Srednego Povolzh'ya // *Vestnik Ul'yanovskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2024. № 1 (65). S. 47–53. DOI 10.18286/1816-4501-2024-1-47-53. EDN DDUSAH.
12. Rzaeva V. V. Sposob i glubina osnovnoj obrabotki pochvy pri vliyarii na zasorennost' posevov yarovoj pshenicy // *Agrarnyj vestnik Urala*. 2017. № 12 (166). S. 9. EDN YMDGCB.
13. Jakab G., Madarász B., Masoudi M. [et al.] Soil organic matter gain by reduced tillage intensity: Storage, pools, and chemical composition // *Soil & Tillage Research*. 2023. Vol. 226. Art. 105584. DOI 10.1016/j.still.2022.105584.
14. Sainju U. M., Singh B. P., Whitehead W. F. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA // *Soil and Tillage Research*. 2002. Vol. 63, Is. 3–4. P. 167–179. DOI 10.1016/S0167-1987(01)00244-6.
15. Franzluebbers A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality // *Soil and Tillage Research*. 2002. Vol. 66, Is. 2. P. 95–106. DOI 10.1016/S0167-1987(02)00018-1.
16. Cherkasov G. N., Chuyan N. A., Eremina R. F. Ispol'zovanie rastitel'nyh ostatkov kak organicheskikh udobrenij // *Plodorodie*. 2007. № 6 (39). S. 22–23. EDN KUCLCT.
17. Guo R. B., Li G. D., Pan M. Y. [et al.] Effects of long-term straw return and nitrogen application rate on organic carbon storage, components and aggregates in cultivated layers // *Scientia Agricultura Sinica*. 2023. Vol. 56, Is. 20. P. 4035–4048. DOI 10.3864/j.issn.0578-1752.2023.20.009.
18. Akhtyamova A. A., Eremin D. I. Agroekonomicheskoe obosnovanie zapashki solomy yarovoj pshenicy pri ispol'zovanii vozrastayushchih doz mineral'nyh udobrenij v lesostepi Zaural'ya // *Vestnik KrasGAU*. 2023. № 10 (199). S. 121–128. DOI 10.36718/1819-4036-2023-10-121-128. EDN KHROGV.
19. Jarvis P., Rey A., Petsikos C. [et al.] Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The "Birch effect" // *Tree Physiology*. 2007. Vol. 27, Is. 7. P. 929–940. DOI 10.1093/treephys/27.7.929.
20. Borken W., Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15, Is. 4. P. 808–824. DOI 10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x.
21. Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T. [et al.] Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, Is. 15. P. 4007–4023. DOI 10.5194/bg-17-4007-2020.
22. Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42, Is. 9. P. 1363–1371. DOI 10.1016/j.soilbio.2010.04.003.
23. Bongiorno G., Bünemann E. K., Ogueji C. U. [et al.] Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 99. P. 38–50. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.12.008.
24. Bernard L., Basile-Doelsch I., Derrien D. [et al.] Advancing the mechanistic understanding of the priming effect on soil organic matter mineralization // *Functional Ecology*. 2022. Vol. 36, Is. 6. P. 1355–1377. DOI 10.1111/1365-2435.14038.
25. Berhane M., Xu M., Liang Z. [et al.] Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis // *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26, Is. 4. P. 2686–2701. DOI 10.1111/gcb.15018.
26. Hu N., Shi H., Wang B. [et al.] Effects of different wheat straw returning modes on soil organic carbon sequestration in a rice-wheat rotation // *Canadian Journal of Soil Science*. 2018. Vol. 98, Is. 1. P. 25–35. DOI 10.1139/cjss-2018-0094.
27. Six J., Paustian K., Elliott E. T. [et al.] Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon // *Soil Science Society of America Journal*. 2000. Vol. 64, Is. 2. P. 681–689. DOI 10.2136/sssaj2000.642681x.
28. Ivashchenko K. V., Sushko S. V., Dvornikov Yu. A. [i dr.] Zapasy pochvennogo organicheskogo ugleroda pri nulevoj obrabotke pochvy v usloviyah Srednego Povolzh'ya // *Agrohimiya*. 2023. № 12. S. 47–56. DOI 10.31857/S0002188123110066. EDN VGFOLD.
29. Krauss M., Berner A., Perrochet F. [et al.] Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Art. 4403. DOI 10.1038/s41598-020-61320-8.
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, Is. 2. P. 155–176. DOI 10.1023/A:1016125726789.
31. Blanco-Canqui H., Lal R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2009. Vol. 28, Is. 3. P. 139–163. DOI 10.1080/07352680902776507.
32. López-Fando C., Pardo M. T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment // *Soil and Tillage Research*. 2009. Vol. 104, Is. 2. P. 278–284. DOI 10.1016/j.still.2009.03.005.
33. Kiryushin V. I. *Ekologicheskie osnovy zemledeliya*. M.: Kolos, 1996. 335 s. ISBN 5-10-003342-8.
34. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // *Science*. 2004. Vol. 304, No. 5677. P. 1623–1627. DOI 10.1126/science.1097396.
35. Swanton C., Shrestha A., Knezevic S. Z. [et al.] Influence of tillage type on vertical weed seedbank distribution in a sandy soil // *Canadian Journal of Plant Science*. 2000. Vol. 80, No. 2. P. 455–457. DOI 10.4141/P99-020.
36. Chauhan B. S., Singh R. G., Mahajan G. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: A review // *Crop Protection*. 2012. Vol. 38. P. 57–65. DOI 10.1016/j.cropro.2012.03.010.

37. Derksen D. A., Anderson R. L., Blackshaw R. E., Maxwell B. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the northern Great Plains // *Agronomy Journal*. 2002. Vol. 94, No. 2. P. 174–185. DOI 10.2134/agronj2002.1740.
38. Ivchenko V. K., Mikhajlova Z. I., Filippov A. G., Kokin S. V. Vliyanie resursosberegayushchih tekhnologij osnovnoj obrabotki pochvy na zasorennost' posevov yarovoj pshenicy // *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. № 3 (156). S. 35–43. DOI 10.36718/1819-4036-2020-3-35-43. EDN UBWVAE.
39. Shikhova L. N., Cheglakova O. A. Vliyanie mnogoletnego vneseniya mineral'nyh udobrenij na uroven' soderzhaniya ugleroda gumusa v pahotnom gorizonte dernovo-podzolistoj pochvy // *Permskij agrarnyj vestnik*. 2024. № 4 (48). S. 52–61. DOI 10.47737/2307-2873_2024_48_52. EDN BAPBMK.
40. Kaznin R. E., Shchukin S. V., Sivkova S. S., Smirnov B. A. Vodoustojchivost' makrostruktury dernovo-podzolistoj gleevatoj pochvy pri minimizacii obrabotki // *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. № 4 (90). S. 24–28. EDN OXAKMF.
41. Choudhary V. K., Gurjar D. S., Meena R. S. Crop residue and weed biomass incorporation with microbial inoculation improve the crop and soil productivity in the rice (*Oryza sativa* L.)–toria (*Brassica rapa* L.) cropping system // *Environmental and Sustainability Indicators*. 2020. Vol. 7. Art. 100048. DOI 10.1016/j.indic.2020.100048.
42. Shchukin S. V., Gornich E. A., Trufanov A. M. [i dr.] Vliyanie osnovnoj obrabotki pochvy, udobrenij i posledejstviya gerbicidov na zasorennost' posevov polevyh kul'tur // *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. T. 57, № 1. S. 25–31. EDN XEIWYD.
43. Rose M. T., Cavagnaro T., Scanlan C. A. [et al.] Impact of herbicides on soil biology and function // *Advances in Agronomy*. 2016. Vol. 136. P. 133–220. DOI 10.1016/bs.agron.2015.11.005.
44. Samson-Brais E., Lucotte M., Moingt M. [et al.] Impact of weed management practices on soil biological activity in corn and soybean field crops in Québec (Canada) // *Canadian Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 101, No. 1. P. 12–21. DOI 10.1139/CJSS-2020-0023.

Сведения об авторах

Сергей Владимирович Щукин – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой агрономии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 2622-3345.

Екатерина Андреевна Горнич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 4473-9416.

Александр Михайлович Труфанов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрономии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 5673-4920.

Александр Николаевич Воронин – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрономии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 8605-2537.

Information about the authors

Sergey V. Shchukin – Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Head of the Department of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 2622-3345.

Ekaterina A. Gornich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Production and Processing of Agricultural Products, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 4473-9416.

Aleksandr M. Trufanov – Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Professor of the Department of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 5673-4920.

Aleksandr N. Voronin – Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Agronomy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agrarian University", spin-code: 8605-2537.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.