

УДК 631.417.2:631.872

## ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОБЩЕГО И ЛЕГКОРАЗЛАГАЕМОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ СОЛОМЫ

© 2022 г. И. В. Русакова

Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа – филиал Верхневолжского федерального аграрного научного центра  
601390 Владимирская обл., Судогодский р-н, д. Вяткино, ул. Прянишникова, 2, Россия

E-mail: rusakova.iv@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.04.2022 г.

После доработки 27.05.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Растительные остатки, побочная продукция зерновых и зернобобовых культур являются важнейшим ресурсом сохранения и воспроизводства почвенного органического вещества (ПОВ). Для оценки состояния ПОВ и его агроэкологического значения важно иметь информацию не только о содержании валового органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ), но и о содержании и соотношении лабильных, легкоминерализуемых и биологически доступных компонентов, наиболее значимых для формирования питательного режима почв, поддержания микробной активности и эффективного плодородия в целом. В научной литературе данные об изменениях в содержании и динамике различных пулов и фракций ПОВ под влиянием многолетнего внесения соломы практически отсутствуют. Влияние длительного многократного внесения соломы зерновых и зернобобовых культур на содержание  $C_{\text{орг}}$  и легкоразлагаемых фракций ПОВ: водорастворимого (экстрагируемого холодной и горячей водой) углерода, мортмассы, а также их взаимосвязь с урожайностью культур севооборота изучали в длительном полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве в условиях Мещерской низменности по окончании 4-й ротации 5-польного зернопропашного севооборота (озимая пшеница–люпин на зерно–картофель–ячмень–однолетние травы). Установлено, что многократная заделка соломы озимой пшеницы, люпина и ячменя по 3 т/га, (суммарно 36 т/га за 4 ротации севооборота) на фоне ежегодного внесения минеральных удобрений (в среднем N54P51K57 в год) обеспечила в пахотном слое дерново-подзолистой почвы увеличение содержания  $C_{\text{орг}}$  на 13% по сравнению с исходным, углерода, экстрагируемого холодной водой ( $C_{\text{в}}$ ) – на 11%, экстрагируемого горячей водой ( $C_{\text{эГВ}}$ ) – на 31%, запасов мортмассы – в 2.42, содержания углерода мортмассы ( $C_{\text{мм}}$ ) – в 2.36 раза относительно варианта без удобрений. Отмечено увеличение доли фракций  $C_{\text{эГВ}}$ ,  $C_{\text{мм}}$  в составе ПОВ в вариантах с соломой, что свидетельствовало об увеличении обеспеченности почвы лабильным, легкоразлагаемым углеродом. Выявлена положительная корреляционная зависимость различной степени тесноты между урожайностью возделываемых культур и содержанием изученных компонентов ПОВ. Сделан вывод, что регулярная заделка соломы в почву является эффективным методом сохранения и воспроизводства ПОВ и повышения обеспеченности почвы лабильным углеродом.

*Ключевые слова:* почвенное органическое вещество, водорастворимый углерод, мортмасса, солома, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S000218812210009X

### ВВЕДЕНИЕ

Почвенное органическое вещество рассматривается как незаменимый биосферный и агропроизводственный ресурс, центральный индикатор качества и здоровья почвы, в значительной степени зависящий от характера и интенсивности сельскохозяйственной деятельности [1, 2].

Согласно современным представлениям, почвенное органическое вещество (ПОВ) представ-

ляет собой многокомпонентный, гетерогенный и полифункциональный континуум биомолекул частично или полностью трансформировавшихся остатков биоты, различающихся по размеру, массе, химической структуре [1–4] или, по определению Б.М. Когута и В.М. Семенова, “подсистема почвы, сформировавшаяся из органических веществ и соединений растительного, микробного и животного происхождения, прошедших гуми-

фикационные и негумификационные стадии стабилизации” [5]. По степени доступности почвенным микроорганизмам и устойчивости к биодеградации ПОВ условно подразделяется на 2 пула: трудно разлагаемое (устойчивое, консервативное, пассивное) и легко разлагаемое (легкоминерализуемое, лабильное, активное) [6–9].

Большая часть органического углерода в минеральных почвах стабильна, поскольку находится в химически или физически защищенном состоянии, либо в составе гумусовых образований, мало доступных микроорганизмам-редуцентам [7]. Легко трансформируемый углерод почвы представлен компонентами, характеризующимися высокой химической и биологической активностью (свежие растительные остатки, мортмасса, детрит, водорастворимое органическое вещество и др.), что определяет их основополагающую роль в осуществлении агрономических, экологических функций, формировании основных почвенных режимов и свойств. Именно эта часть общего запаса органического вещества в первую очередь изменяется под действием природных и антропогенных факторов [6]. Быстро оборачиваемые, с коротким временем существования компоненты ПОВ наиболее значимы для формирования питательного режима почвы и поддержания микробной активности и являются чувствительными индикаторами ранних изменений количества и качества органического вещества под воздействием природных и антропогенных факторов, в т.ч. под влиянием сельскохозяйственного использования [10, 11]. По мнению Кузнецова [12], в агрономическом отношении наиболее важным является то органическое вещество, которого либо “не видно”, либо “его уже нет”, т.е. постоянно оборачиваемое, легко минерализуемое и поэтому трудно улавливаемое химическими способами. Согласно выводам, изложенным в работах [7, 13], общими запасами ПОВ определяется потенциальное плодородие, а долей легкоразлагаемого (лабильного, подвижного, активного) – эффективное. Поэтому для оценки состояния ПОВ с точки зрения его агроэкологического значения и роли в плодородии почв важно знать не столько валовое содержание  $C_{орг}$ , но и обеспеченность лабильными органическими соединениями.

Фракция легкоминерализуемого ПОВ, определяемая как мортмасса и представленная свежими и полуразложившимися, негумифицированными растительными остатками, как правило, свободная, не стабилизированная и поэтому наиболее доступна микроорганизмам как источник углерода и энергии [14]. Она состоит из остатков растений, почвенной фауны, микробиомассы на

разных уровнях трансформации, в биохимическом отношении – из легко разлагаемых (негумусовых) компонентов: углеводов, полисахаридов, белков, органических кислот, аминокислот и других неспецифических соединений, являющихся потенциальными источниками образования гумусовых веществ [9].

В состав водорастворимого органического вещества с размером частиц  $<0.45$  мкм входят в основном простые (аминокислоты, моносахара) и более сложные (аминосахара, фенолы, гуминовые и фульвокислоты) соединения, представляющие наиболее активную часть гумуса и являющиеся важнейшим источником минерализуемых N, P и S и энергии для почвенной биоты [15–17]. Признавая важность и значимость водорастворимого ПОВ в осуществлении агрономических и экологических функций, формировании почвенных режимов и свойств, Д.С. Орлов [18] предложил включить показатель  $C_v$  в систему показателей гумусного состояния почв. По данным исследований [19, 20], достоверным параметром оценки разлагаемой части ПОВ является также содержание углерода во фракции, экстрагируемой горячей водой ( $C_{эгв}$ ). По данным экспериментальных исследований в длительных опытах [11, 21], установлено, что показатель  $C_{эгв}$  является одним из наиболее чувствительных для обнаружения изменений в ПОВ под влиянием различных сельскохозяйственных практик и наиболее пригоден для характеристики разлагаемой части ПОВ в пахотных почвах. Химический состав фракции  $C_{эгв}$  изучен еще недостаточно, но известно, что она содержит в основном углеводы (40–50%), значительную часть углерода микробной биомассы, биохимически несложные азотсодержащие соединения, представляющие очень легко разлагаемую часть активного органического вещества почв [11, 19, 22]. Высокое соотношение  $C : N = 5–10$  [19] позволяет предположить ее немаловажную роль в обеспечении растений и микрофлоры доступным азотом. В работе [11] рекомендовано использовать  $C_{эгв}$  как интегральный показатель качества ПОВ. По мнению [23], содержание  $C_{эгв}$  может быть индикатором общего плодородия почв.

В сельскохозяйственных почвах при недостатке органических удобрений (навоза) основным средством поддержания уровня ПОВ являются послеуборочные растительные остатки, обеспечивающие оптимизацию содержания и качества органического вещества в почве, регулярное удаление их с поля приводит к отрицательному балансу гумуса [3, 24]. В научной литературе данные

об изменениях в содержании и составе ПОВ под влиянием длительного внесения соломы ограничены. Результаты научных исследований и информация об изменениях в содержании и составе органического вещества под влиянием длительного использования соломы в качестве удобрения может быть полезна для прогнозирования динамики содержания ПОВ в агротехнологиях, предусматривающих использование агроприемов, направленных на обогащение почвы растительной биомассой в виде побочной продукции возделываемых культур.

Цель работы – выявить изменения в содержании общего углерода и легкоразлагаемых его фракций в дерново-подзолистой почве ( $C_b$ ,  $C_{эв}$ ,  $C_{мм}$ ), обусловленные длительным внесением соломы зерновых и зернобобовых культур и минеральных удобрений в зернопропашном севообороте, и выявить их связь с урожайностью культур.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном полевом опыте (заложен в 1996–1997 гг. на опытном поле ВНИИОУ) в 5-польном зернопропашном севообороте: озимая пшеница–люпин (на зерно)–картофель–ячмень–однолетние травы (люпин + овес) на дерново-подзолистой супесчаной почве с содержанием в пахотном слое физической глины ( $<0.01$  мм) – 16–17%. Почва до закладки опыта характеризовалась следующими агрохимическими показателями пахотного слоя (0–20 см):  $pH_{KCl}$  4.6–4.9 ед., подвижный фосфор – 65–79 (по Кирсанову), обменный калий – 83–99 мг/кг почвы (по Кирсанову),  $C_{орг}$  – 0.48–0.51%. Схема опыта включала варианты с внесением минеральных удобрений под каждую культуру (среднегодовая доза N54P51K57, перед посевом), измельченной соломы зерновых и зернобобовых культур (осенью, после уборки зерна) в дозе 3 т/га, а также варианты с сочетанием соломы и минеральных удобрений. Для проведения данного исследования были выбраны следующие варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – N54P51K57, 3 – N54P51K57 + солома озимой пшеницы, люпина, ячменя – по 3 т/га, 4 – солома озимой пшеницы, люпина, ячменя – по 3 т/га. В вариантах 1 и 2 солому с поля удаляли, оставляли только стерню. Суммарно за 4 ротации севооборота в пахотный слой почвы в вариантах 3 и 4 было внесено соломы 36 т/га. Повторность в опыте во времени двукратная, в пространстве – трехкратная, площадь делянок 42–47 м<sup>2</sup>.

Образцы почвы для проведения анализов отбирали со всех повторений опыта по окончании 4-й

ротации севооборота тростевым буром (0–20 см) через 2 нед после уборки зеленой массы однолетних трав, готовили смешанные образцы из 20–30 индивидуальных проб с каждой делянки. Также в качестве эталонов сравнения в эти же сроки были отобраны почвенные образцы с участков многолетней залежи и длительно парующей почвы (0–20 см), расположенных вблизи от пахотной почвы севооборота и являвшихся ее генетическими аналогами. Общее содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) определяли методом мокрого “сжигания” с фотометрическим окончанием ( $\lambda = 590$  нм), углерода, растворимого в холодной воде ( $C_b$ ) – по Панникову (при соотношении почва : вода = 1 : 5), углерода, экстрагируемого горячей водой ( $C_{эв}$ ) – при 1-часовом кипячении почвенной суспензии (почва : вода = 1 : 5) на водяной бане с обратным холодильником, с последующим определением углерода в отфильтрованных вытяжках (аналогично  $C_{орг}$ , после выпаривания аликвот по методике [25]). Содержание мортмассы определяли по методике, изложенной в работе [26]: выделяли эту фракцию из почвы методом декантации водой, переносили на сито ( $d = 0.5$  мм), промывали дистиллированной водой, высушивали при 60°C и определяли содержание углерода ( $C_{мм}$ ) методом “мокрого окисления” с бихроматом калия.

Статистическую обработку данных проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа ( $p = 0.05$ ) с вычислением средних,  $HSP_{05}$  и использованием критерия Фишера для оценки существенности разности между средними. Построение графиков и расчет коэффициентов корреляции провели с помощью программы Microsoft Excel 2010.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание углерода в сухом веществе соломы зерновых и зернобобовых культур, примененной в опыте, составляло в среднем 40–41%, с каждой ее 1 т в почву поступало 400–410 кг С. За время проведения опыта при заделке соломы суммарно 36 т/га вход углерода составил в среднем 14.6 т/га или 97% от исходных запасов, которые составляли в начале опыта  $\approx 15$  т/га в пахотном слое. Установлено, что по окончании 4-й ротации севооборота многократное внесение соломы на фоне применения минеральных удобрений обеспечило положительный баланс углерода, рассчитанный по его приросту по сравнению с исходным содержанием: +0.067%, в то время как в варианте без удобрений произошло снижение содержания  $C_{орг}$  на 0.048%. Согласно расчетам, накопление органического углерода в

**Таблица 1.** Содержание  $C_{орг}$  и его легкоразлагаемых фракций в дерново-подзолистой супесчаной почве опыта (слой 0–20 см) по окончании 4-й ротации севооборота (среднее за 2016–2017 гг.)

Вариант	$C_{орг}$		$C_B$		$C_{эГВ}$		$C_{мм}$	
	% в почве	$\pm$ к исходному	мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$	мг/кг	% от $C_{орг}$
1. Без удобрений	0.463	–0.048	47.1	1.02	157	3.39	211	4.56
2. N54P51K57	0.501	–0.011	49.7	0.99	171	3.41	276	5.51
3. N54P51K57 + солома	0.567	+0.067	52.3	0.92	206	3.63	499	8.80
4. Солома	0.524	+0.039	54.9	1.05	182	3.47	404	7.71
5. Залежь	0.778	–	122	1.57	363	4.67	1520	19.6
6. Пар	0.400	–	47.2	1.18	116	2.90	88	2.20
$HCP_{05}$	0.038	–	9.2	–	16	–	84	–

Примечания. 1. N54P51K57 – среднегодовая доза минеральных удобрений. 2. Солома – солома озимой пшеницы, люпина, ячменя по 3 т/га, суммарно за 4 ротации – 36 т/га.

пахотном слое дерново-подзолистой почвы за счет использования соломы в опыте составило 54 кг/т. При ежегодном внесении минеральных удобрений баланс гумуса был почти бездефицитным. В залежной почве с доминированием многолетней лугово-злаковой растительности, оставляющей в почве значительное количество корневых остатков, содержание  $C_{орг}$  было самым высоким в этом исследовании – 0.778%, что в 1.37 раза превышало вариант NPK + солома, почва пара характеризовалась минимальным содержанием  $C_{орг}$  – 0.400% (табл. 1).

По данным некоторых исследований, применение минеральных удобрений может повысить содержание  $C_{орг}$  в почве, но только в долгосрочной перспективе и при условии систематического и полного поступления растительных остатков в почву [27, 28]. На супесчаных почвах (опытная станция Askov, Дания) почва, получавшая солому 4, 8 и 12 т/га ежегодно в течение 18 лет, содержала углерода на 12, 21 и 30% больше соответственно, чем при удалении соломы [29].

По данным исследований [27], в пахотной почве накопить значительное количество углерода за счет растительных остатков невозможно. Максимальное накопление углерода в почве при ежегодном внесении соломы в дозах 3.0–9.0 т/га не превышало 0.1–0.3% от массы почвы. По данным [30], применение минеральных удобрений в сочетании с растительными остатками зерновых культур позволяло не только повысить урожайность, но и регулировать баланс углерода в почве. Образование из растительных остатков гумифицированных веществ от 190 до 340 кг/га создавало основу для расширенного воспроизводства гумуса в почве.

Известно, что валовое содержание  $C_{орг}$  в почве является устойчивым, консервативным показателем и изменяется очень медленно, в течение нескольких лет и даже десятилетий, поэтому измерения только общего углерода не всегда могут адекватно отразить изменения качества и соотношения различных фракций ПОВ, происходящие при внесении растительных остатков, особенно если их применяют в невысоких дозах.

Изучение различных пулов и фракций, выделенных физическими и химическими методами, дает более разностороннее представление о составе, структуре и качестве ПОВ, изменяющихся под действием природных и антропогенных факторов, в т.ч. агротехнических приемов и методов, его биологической доступности и степени участия в формировании продуктивности. Органическое вещество, извлекаемое водной вытяжкой ( $C_B$ ) является одним из основных показателей ближайшей доступности ПОВ для микроорганизмов. Имеется ряд публикаций, свидетельствующих, что содержание водорастворимого органического вещества служит надежным показателем эффективного плодородия ряда типов почв, хорошо отзывается на вносимые минеральные и органические удобрения, коррелирует с урожайностью и биологической активностью почв [15, 16]. Научные публикации об изменениях содержания  $C_B$  в пахотных почвах под влиянием внесения соломы очень малочисленны.

Показано, что содержание  $C_B$  в варианте без удобрений и при внесении только минеральных удобрений было очень низким: 47.1 и 49.7 мг/кг почвы соответственно (на одном уровне с почвой пара). Наиболее высокой обеспеченностью  $C_B$  характеризовался пахотный слой почвы в вариантах

с многократной заделкой соломы – 52.3 (на фоне минеральных удобрений) и 54.9 мг/кг (без минеральных удобрений), однако достоверных различий в вариантах опыта не обнаружено. Незначительные изменения содержания  $C_b$  после длительного внесения соломы в дерново-подзолистую почву можно объяснить с тем, что внесение соломы в почву при увеличении биологической активности одновременно стимулировало и “производство”, и “потребление” водорастворимых органических соединений, наиболее биологически доступных и быстро утилизируемых почвенной микрофлорой, поэтому чистый эффект в полевых условиях мог быть трудно предсказуемым. В работе [31] показано, что содержание водорастворимого углерода в почве (камбисоли) было значительно увеличено на 34% после 10 лет внесения соломы (в дозе  $\approx 4$  т/га ежегодно).

Согласно исследованиям [11], под влиянием практик управления гораздо более заметными были изменения в содержании  $C_{эгв}$ , чем  $C_{орг}$ . Содержание  $C_{эгв}$  в не удобренных почвах длительных опытов, как показано в работе [19], независимо от типа почв и содержания в них общего органического углерода было достаточно близким и не превышало 200 мг/кг почвы. Например, по данным [23], содержание  $C_{эгв}$  в пахотных почвах Сербии (Haplic Chernozem) находилось в интервале от 125 до 226 мг/кг почвы.

Исследованная дерново-подзолистая супесчаная почва характеризовалась низким содержанием  $C_{эгв}$  – 157 мг/кг в контроле без удобрений. При ежегодном внесении минеральных удобрений содержание  $C_{эгв}$  было немного больше контроля – 171 мг/кг, но значимо от него не отличалось. При регулярном внесении соломы без минеральных удобрений было зафиксировано существенно более высокое по сравнению с неудобренным вариантом содержание экстрагируемого горячей водой углерода – 182 мг/кг. Максимальной обеспеченностью этой формой водорастворимого углерода характеризовалась почва при совместном внесении минеральных удобрений и соломы – 206 мг/кг, что в 1.31 и 1.20 раза превышало варианты без удобрений и NPK соответственно. Сопоставимые данные приведены в работе [32]: по результатам длительного полевого опыта, после 45-летнего внесения соломы в сочетании с минеральными удобрениями содержание  $C_{эгв}$  в почве (Eutric Cambisol, sandy loam) повысилось на 17–30% по сравнению с неудобренным контролем. В залежи содержание  $C_b$  и  $C_{эгв}$  составило 122 и 363 мг/кг, что было значимо больше (в 2.33 и 1.76 раза) даже в сравнении с вариантом NPK + солома.

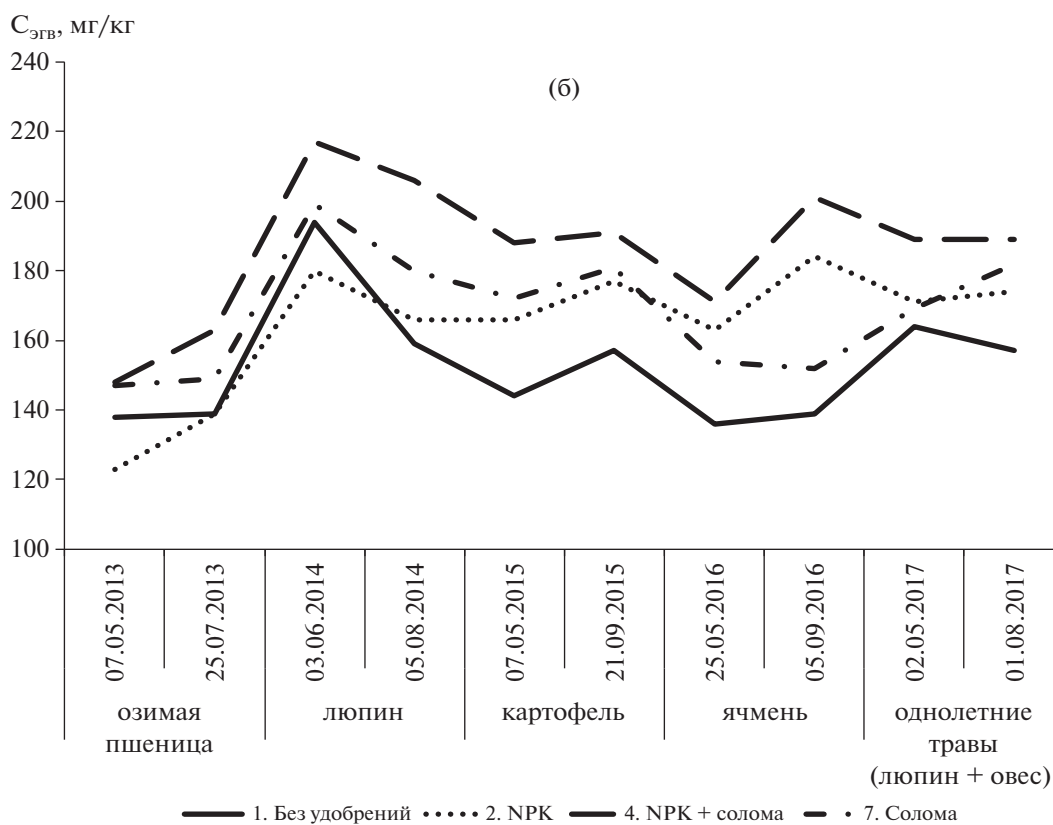
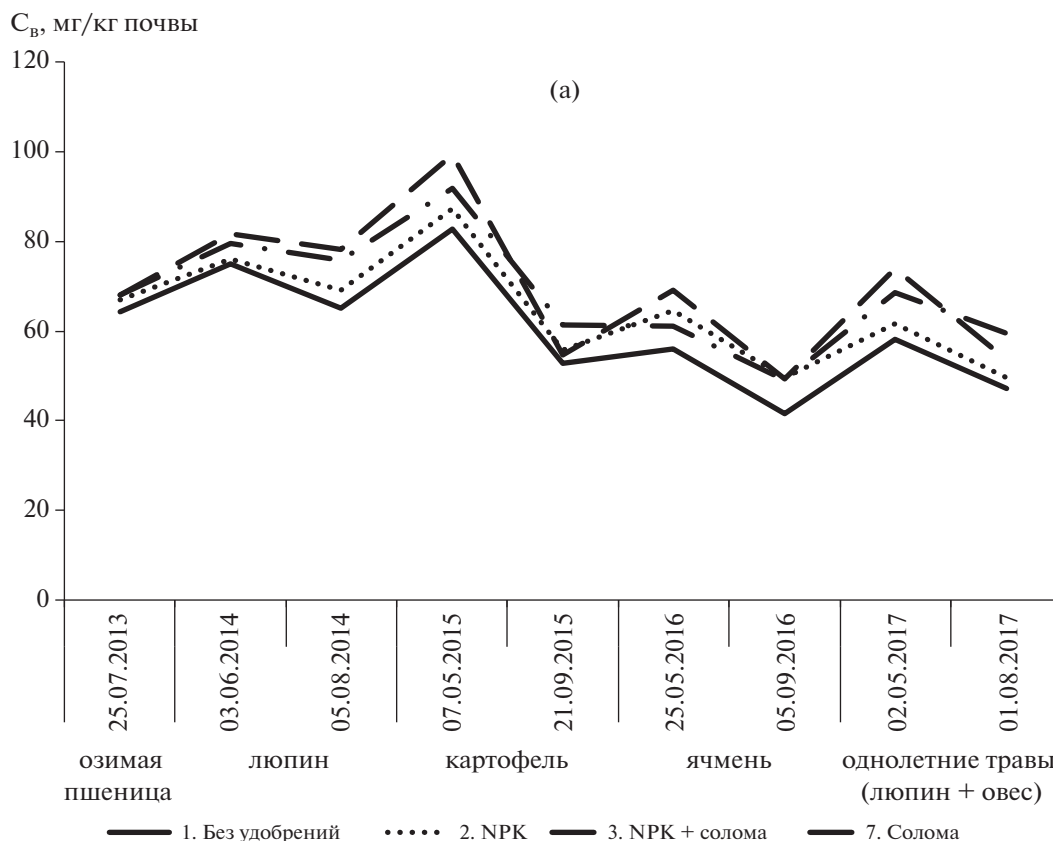
Отношение содержания углерода лабильных фракций к валовому  $C_{орг}$  является показателем доли этой фракции в общем содержании органического вещества. Доля экстрагируемого холодной водой углерода менялась в вариантах опыта в достаточно узком диапазоне: 0.92–1.05%, самая высокая величина соотношения  $C_b : C_{орг} = 1.57\%$  отмечена в залежной почве (табл. 1).

Соотношение  $C_{эгв} : C_{орг}$  чаще всего находилось в диапазоне от 1 до 6%, в зависимости от типа почвы, гранулометрического состава, системы удобрения и пр. По результатам исследования [33], в лювосолях (Luvisol) доля  $C_{эгв}$  составляла от 3.5 до 4.8% от общего содержания углерода. В работе [32] сообщали, что отношение  $C_{эгв} : C_{орг}$  в почвах Чехии составляло 2.58–3.01%. В нашем исследовании получены близкие сопоставимые данные: относительное содержание  $C_{эгв}$  в  $C_{орг}$  изменялось от 3.39 (вариант без удобрений) до 3.63% (вариант NPK + солома), что было показателем улучшения качества ПОВ в результате увеличения в его составе легкоминерализуемых компонентов, источников C, N, P и S для биоты.

Наблюдения за характером многолетней динамики  $C_b$  и  $C_{эгв}$  в течение 4-й ротации показали, что систематическое внесение соломы в сочетании со средними дозами минеральных удобрений позволило поддерживать в дерново-подзолистой почве под всеми культурами стабильно более высокий уровень этих показателей по сравнению с контролем без удобрений и вариантом NPK (рис. 1).

По мнению [14], в пахотных почвах основным лабильным органическим веществом является внутрипочвенная мортмасса, предшественником которой бывают главным образом растительные остатки возделываемых культур: корне-поживные, прижизненный опад. В отличие от природных биоценозов, в агроценозах значительная часть фитомассы ежегодно отчуждается с урожаем, обедняя почву свежим органическим веществом, источником восполнения запасов мортмассы. Восполнить этот запас можно за счет оставления соломы в поле и заделки ее в почву после уборки зерновых и зернобобовых культур.

Установлено, что такие факторы, как длительное внесение минеральных удобрений и соломы, оказывали значительное влияние на запасы мортмассы в пахотном слое почвы. Например, ежегодное внесение минеральных удобрений за счет увеличения урожайности возделываемых культур и фитомассы корне-поживных остатков обеспечило увеличение запасов мортмассы в пахотном слое с 2.17 (без удобрений) до 3.08 т/га (на 42%), систематическая запашка соломы зерновых и



**Рис. 1.** Динамика содержания С<sub>в</sub> (а) и С<sub>эГВ</sub> (б) в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы в 4-й ротации севооборота.

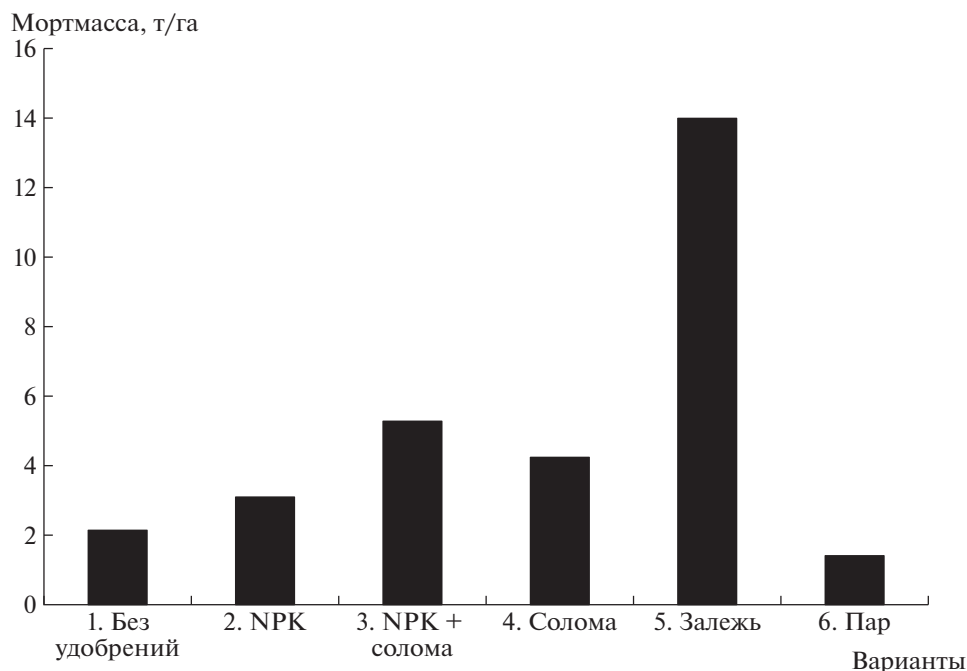


Рис. 2. Запасы мортмассы в дерново-подзолистой почве севооборота, залежи и пара (слой 0–20 см).

зернобобовых культур севооборота – до 4.22 т/га (на 94%). Максимальные запасы мортмассы в опыте (5.25 т/га) сформировались при регулярной заправке соломы в сочетании с минеральными удобрениями (рис. 2).

Поскольку биогенные элементы мортмассы хорошо доступны растениям, можно полагать, что увеличение ее запасов значительно улучшает обеспеченность растений элементами питания. В целом в опыте в мортмассе было аккумулировано от 211 до 499 мг/кг углерода, или 4.56–8.80% от общего  $C_{орг}$ . Самая высокая доля этой фракции в составе ПОВ зафиксирована в варианте с комбинированным внесением соломы и минеральных удобрений, что свидетельствовало о самых высоких потенциальных возможностях сохранения запасов гумуса и его воспроизводства в почве (табл. 1). Роль соломы в увеличении обеспеченности легкоразлагаемым ПОВ подтверждена в работе [26], где сообщали, что в зерновом севообороте при оставлении сухого вещества растительных остатков с учетом соломы пшеницы в среднем в год 3.87 т/га после 9 лет с начала опыта содержание мортмассы было в 1.57 раза больше, чем в варианте с удалением соломы с поля.

В отсутствии механических обработок и ежегодного отчуждения растительной продукции в почве залежи отмечен значительно более высокий, чем в почве севооборота, уровень запасов мортмассы и содержания  $C_{мм}$  – 14 т/га и 1524 мг/кг со-

ответственно. Длительно парующая почва без поступления свежего органического вещества характеризовалась запасами мортмассы и содержанием  $C_{мм}$  в 1.55 и 2.39 раза более низкими, чем вариант без удобрений (табл. 1).

В работах [34–36] установлено, что количество и процессы разложения мортмассы во многом определяют эффективное плодородие почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Урожайность зеленой массы однолетних трав (люпино-овсяной смеси), завершающей культуры севооборота, в варианте без удобрений составила 68 ц/га (в среднем за 2016–2017 гг.). Многолетнее внесение соломы в комбинации с минеральными удобрениями обеспечило максимальную урожайность трав 141 ц/га, что было существенно больше по сравнению не только с не удобренным вариантом, но и фоном минеральных удобрений (табл. 2).

В настоящем исследовании была сделана попытка найти количественную связь урожайности с содержанием фракций ПОВ. Проведенный корреляционный анализ показал тесные положительные корреляции величины урожайности однолетних трав в опыте с содержанием общего  $C_{орг}$  ( $r = 0.78$ ) и легкоминерализуемых фракций:  $C_{эГВ}$  ( $r = 0.79$ ), мортмассы ( $r = 0.69$ ) и  $C_{мм}$  ( $r = 0.65$ ), что показало важное агрономическое значение этих компонентов ПОВ, фонд которых возрастал при длительном внесении соломы.

**Таблица 2.** Урожайность однолетних трав (среднее за 2016–2017 гг.)

Вариант	Зеленая масса		
	урожайность, ц/га	прибавка	
		ц/га	%
1. Без удобрений	68	—	—
2. N60P45K45	115	47	69
3. N60P45K45 + + солома ячменя 3 т/га	141	73	107
4. Солома ячменя 3 т/га <i>HCP</i> <sub>05</sub> , ц/га	80	12	18

Примечание. Указаны дозы минеральных удобрений и соломы, внесенных под однолетние травы.

В работе [37] также найдена тесная корреляционная зависимость между урожайностью культур в севообороте и содержанием  $C_{эгв}$  в дерново-подзолистой почве Предуралья ( $r = 0.72–0.84$ ). В исследовании [19] обнаружены линейные зависимости между содержанием  $C_{эгв}$  и урожайностью. Тесная корреляция между содержанием мортмассы и урожайностью яровой пшеницы ( $r = 0.86–0.90$ ) отмечена в работе [38]. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что за счет увеличения уровня обеспеченности почвы легкоразлагаемым органическим веществом при длительном регулярном возврате пожнивных растительных остатков можно поддерживать уровень эффективного плодородия дерново-подзолистой почвы на более высоком уровне.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что длительная систематическая (в течение 4-х ротаций 5-польного зернопропашного севооборота) заделка соломы зерновых и зернобобовых культур (суммарно 36 т/га) в комбинации со средними дозами минеральных удобрений (в среднем N54P51K57 в год), обеспечила увеличение содержания  $C_{орг}$  в пахотном слое дерново-подзолистой супесчаной почвы на 0.067% (на 13%) по отношению к исходному. Ежегодное внесение минеральных удобрений за счет увеличения урожайности культур и, соответственно, корне-пожнивных остатков позволило сохранить содержание  $C_{орг}$  в пахотном слое на исходном уровне. Дополнительный вход свежего органического вещества, обеспечиваемый возвратом в почву всей незерновой части урожая культур севооборота, в комбинации с минеральными удобрениями способствовал накоплению в почве легкоразлагаемых компонентов

ПОВ:  $C_b$  – с 47.1 до 52.3 мг/кг,  $C_{эгв}$  – с 157 до 206 мг/кг,  $C_{мм}$  – с 211 до 499 мг/кг, что в пересчете соответствовало повышению величин этих фракций в 1.11, 1.31 и 2.36 раза относительно варианта без удобрений. Увеличение доли фракций  $C_{эгв}$ ,  $C_{мм}$  в составе ПОВ свидетельствовало об увеличении обеспеченности почвы активным углеродом, легко доступным для микробиоты. Полученные данные показали существенную роль побочной продукции растениеводства, растительных остатков в повышении обеспеченности пахотных почв легкоразлагаемым органическим веществом, во многом определяющим уровень их эффективного плодородия. Возврат всех послеуборочных остатков зерновых и зернобобовых культур (суммарно 9 т/га за каждую ротацию севооборота) не позволил достичь показателей содержания общего углерода и легкоминерализуемых его компонентов до уровней, характерных для почвы залежи. Содержание всех фракций положительно коррелировали между собой и урожайностью, что подтвердило их немаловажное значение в формировании эффективного плодородия и продуктивности культур.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // *Агрохимия*. 2011. № 12. С. 53–63.
2. Liu E.X., Herbert S.J., Hashemi A.M., Zhang X., Ding G. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review // *Plant Soil Environ*. 2006. V. 52 (12). P. 531–543.
3. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121.
4. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528 (7580). P. 60–68.
5. Козут Б.М., Семенов В.М. Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе // *Агрохимия*. 2015. № 12. С. 3–19.
6. Шевцова Л.К. Современные направления в исследовании органического вещества почвы в длительных опытах // *Пробл. агрохим. и экол.* 2009. № 3. С. 39–47.
7. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС. 2015. 233 с.
8. Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Якутин М.В., Булавко Г.И., Миронычева-Токарева Н.П. Запасы лабильного углерода в экосистемах Западной Сибири // *Почвоведение*. 1999. № 3. С. 332–334.
9. Strosser E. Methods for determination of labile soil organic matter: An overview // *J. Agrobiol*. 2010. V. 27 (2). P. 49–60.



10. *Haynes R.J.* Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview // *Adv. Agron.* 2005. V. 85. P. 221–268.
11. *Ghani A., Dexter M., Perrott K.W.* Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation // *Soil Biol. Biochem.* 2003. V. 35 (9). P. 1231–1243.
12. *Кузнецов А.М.* Активный пул органического вещества почвы при разных способах землепользования и системах удобрения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 23 с.
13. *Пуртова Л.Н., Шапова Л.Н., Костенков Н.М.* Влияние современных агротехнологий на содержание лабильного гумусового вещества, микрофлору и оптические показатели лугово-бурых отбеленных почв Приморья // *Агрохимия.* 2013. № 10. С. 13–19.
14. *Тутлянова А.А.* Легкоразлагаемое органическое вещество пахотных почв // Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: итоги и перспективы: Мат-лы Всерос. конф. с международ. участием (14–15 октября 2010 г., Санкт-Петербург). СПб.: АФИ, 2010. С. 149–153.
15. *Embacher A., Zsol A., Gattinger A., Munch J.C.* The dynamics of water extractable organic matter (WEOM) in common arable topsoils: I. Quantity, quality and function over a three year period // *Geoderma.* 2007. V. 139. P. 11–22.
16. *Кауричев И.С., Яшин И.М., Карпунин А.И., Платонов И.Г.* Особенности минерализации и трансформации водорастворимых органических веществ в подзолистых почвах Архангельской области // *Изв. ТСХА.* 1991. Вып. 3. С. 71–84.
17. *Wang Q., Wang S.* Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions // *Appl. Soil Ecol.* 2011. V. 47. P. 210–216.
18. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С.* Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // *Почвоведение.* 2004. № 8. С. 918–926.
19. *Шульц Э., Кершенс М.* Характеристика разлагаемой части органического вещества почв и ее трансформации при помощи экстракции горячей водой // *Почвоведение.* 1998. № 7. С. 890–894.
20. *Nedvěd V., Balík J., Černý J., Kulháněk M., Balíková M.* The changes of soil nitrogen and carbon contents in a long-term field experiment under different systems of nitrogen fertilization // *Plant Soil Environ.* 2008. V. 54 (11). P. 463–470.
21. *Weigel A., Kubat J., Körschens M., Powlson D.* Determination of the decomposable part of soil organic matter in arable soils // *Arch. Acker. Pfl. Boden.* 1998. V. 43. P. 123–143.
22. *Leineweber P., Schulten H.R., Körschens M.* Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment // *Biol. Fertil. Soils.* 1995. V. 20. P. 17–23.
23. *Šeremešić S., Milošev D., Sekulić P., Nešić L., Ćirić V.* Total and hot-water extractable carbon relationship in Chernozem soil under different cropping systems and land use // *J. Centr. Europ. Agricult.* 2013. V. 14 (4). P. 1496–1504.
24. *Lal R.* Restoring soil quality to mitigate soil degradation // *Sustainability.* 2015. V. 7 (5). P. 5875–5895.
25. *Методы определения активных компонентов в составе гумуса.* М.: ВНИИА, 2010. 34 с.
26. *Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В., Шепелев А.Г.* Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Западной Сибири // *Почвоведение.* 2014. № 4. С. 473–479.
27. *Шарков И.Н., Данилова А.А.* Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах // *Агрохимия.* 2010. № 12. С. 72–81.
28. *Alvarez R.* A review of nitrogen fertilizer and conservative tillage effects on soil organic storage // *Soil Use Manag.* 2005. V. 21. P. 38–52.
29. *Thomsen I.K., Christensen B.T.* Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops // *Soil Use Manag.* 2004. V. 20. № 4. P. 432–438.
30. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Продуктивность растений и баланс углерода в агроэкосистемах при использовании минеральных удобрений и растительных остатков // *Пробл. агрохим. и экол.* 2018. № 4. С. 9–14.
31. *Xu M., Lou Y., Sun X., Wang W., Baniyamuddin B., Zhao K.* Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation // *Biol. Fertil. Soils.* 2011. V. 47. P. 745–752.
32. *Šimon T.* Long-term effect of straw and farmyard manure on soil organic matter in field experiment in the Czech Republic // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2012. V. 59 (9). P. 1–13.
33. *Soon Y.K., Arshad M.A., Haq A., Lupway N.* The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil // *Soil Till. Res.* 2007. V. 85. P. 38–46.
34. *Сидоров М.И., Зезюков Н.И.* Роль негумифицированных растительных остатков почвы в земледелии // *Вестн. сел.-хоз. науки.* 1981. № 11. С. 78–84.
35. *Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А., Флоринский М.А.* Легкоразлагаемое органическое вещество и эффективное плодородие почв // *Земледелие.* 1995. № 1. С. 10–12.
36. *Балабанова Н.Ф., Воронкова Н.А., Дороненко В.Д., Волкова В.А., Цыганова Н.А.* Содержание лабильного органического вещества в лугово-черноземной почве при длительном применении удобрений // *Земледелие.* 2020. № 2. С. 7–9.
37. *Завьялова Н.Е., Косолапова А.И., Сторожева А.Н.* Влияние возрастающих доз полного минерального удобрения на органическое вещество и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья // *Агрохимия.* 2014. № 6. С. 20–28.
38. *Балабанова Н.Ф., Воронкова Н.А.* Влияние длительного применения удобрений в зернотравяном севообороте на содержание лабильного органического вещества в лугово-черноземной почве // *Агрохимия.* 2015. № 1. С. 16–22.

## Change in the Content of Total and Easily Degradable Organic Matter in Sod-Podzolic Soil with Continuous Application of Straw

I. V. Rusakova

*All-Russian Research Institute for Organic Fertilizers and Peat – branch of Upper Volga Federal Agrarian Research Center  
ul. Pryanishnikova 2, Vyatkinno, Sudogda district, Vladimir region 601390, Russia*

*E-mail: rusakova.iv@yandex.ru*

Plant residues and by-products of cereal grains and grain legumes are the most important resource for the preservation and regeneration of soil organic matter (SOM). To assess the state of SOM and its role for agriculture and the environment, it is important to have information not only about total organic carbon ( $C_{org}$ ), but also about the content and ratio of labile, easily mineralized and biologically accessible components that are vital for establishing soil nutrient status and maintaining microbial activity and effective fertility in general. In the scientific literature, there is almost no data about content changes and dynamics of various SOM pools and fractions affected by multi-year straw incorporation. The influence of prolonged and repeated incorporation of cereal grains and grain legumes straw on the content of  $C_{org}$  and easily degradable SOM fractions, i.e., water-soluble (cold and hot water extractable) carbon and mortmass, as well as their relation with crop yields have been studied in long-term field practices on sod-podzolic sandy loam soils in the Meshchera Lowlands at the end of the 4th rotation cycle of five-crop grain-row rotation (winter wheat, edible lupins, potatoes, barley and annual grasses). It was established that repeated incorporation of winter wheat, lupin and barley straw in the amount of 3 t/ha (a total of 36 t/ha during four crop rotations) together with annual application of mineral fertilizers (on average N54P51K57 per year) have improved the arable layer of sod-podzolic soil through increasing the content of  $C_{org}$  by 13% (compared to the initial content), mortmass reserves by 2.42 times, carbon stocks in mortmass ( $C_{mm}$ ) by 2.36 times, cold water extractable carbon ( $C_w$ ) by 11% and hot water extractable carbon ( $C_{wec}$ ) by 31% relative to the option without fertilizers. The proportion of Chwe and Cmm fractions in SOM for the options with straw has proved to be higher, which indicates an increase in the availability of labile easily degradable carbon in soil. The correlation between yields of cultivated crops and the content of SOM components under study have showed to be positive with varying degree of coherence. The conclusion is that regular straw incorporation in soil is an effective method of preserving/regenerating SOM and increasing the availability of labile carbon.

*Key words:* soil organic matter, water-soluble carbon, mortmass, straw, sod-podzolic soil.