

Влияние микробиологических препаратов и внесения азота на процессы, связанные с секвестрацией органического углерода в чернозёме типичном слабоэродированном

© 2024. Н. П. Масютенко, д. с.-х. н., г. н. с., А. В. Кузнецов, к. с.-х. н., с. н. с.,
М. Н. Масютенко, к. с.-х. н., с. н. с., Н. А. Чуян, д. с.-х. н., в. н. с.,
Г. М. Брескина, к. с.-х. н., с. н. с.,
Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 70б,
e-mail: vninp@mail.ru

Проведено изучение влияния обработки биопрепаратом на основе *Trichoderma viride* и биопрепаратом на основе *Pseudomonas aureofaciens*, N_{10} кг д. в. на 1 т измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур (N) перед заделкой в почву на процессы, связанные с секвестрацией в ней органического углерода. Исследования проводили в 2018–2020 гг. в стационарном полевом опыте с биопрепаратами ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Курская обл., Медвенский р-н, с. Панино) на чернозёме типичном слабоэродированном в звене зернового севооборота (яровой ячмень – гречиха – кормовые бобы). Установлено, что применение биопрепаратов отдельно или совместно с N способствовало связыванию углерода в пахотном слое почвы, значимое накопление запасов углерода гумуса в 2,2 и 2,4 раза превышало таковое на контроле, а внесение только N_{10} кг д. в. с 1 т растительных остатков обеспечило сохранение запасов углерода гумуса. Запасы углерода в побочной продукции, пожнивных и корневых остатках возделываемых культур в пахотном слое при применении биопрепаратов были выше, чем в контроле. Выявлена прямая тесная связь между средним количеством выделяемого из почвы углекислого газа в процессе вегетации кормовых бобов и количеством поступающего в слой почвы 0–10 и 0–20 см углерода их побочной продукции, пожнивных и корневых остатков, коэффициенты корреляции – 0,87 и 0,80. Эффективность связывания органического углерода в пахотном слое почвы при применении биопрепаратов отдельно или совместно с N превышало таковую на контроле, соответственно, в 2,0 и 2,1 раза, а внесение измельчённой побочной продукции с N_{10} д. в. на 1 т – только в 1,5 раза.

Ключевые слова: органический углерод, эффективность связывания, микробиологические препараты, побочная продукция, пожнивные и корневые остатки, чернозём типичный слабоэродированный, эмиссия CO_2 .

Effect of microbiological preparations and nitrogen application on the processes associated with sequestration of organic carbon in typical slightly eroded chernozem soil

© 2024. N. P. Masyutenko ORCID: 0000-0001-8348-0609
A. V. Kuznetsov ORCID: 0000-0002-0230-7503 M. N. Masyutenko ORCID: 0000-0001-8844-2433
N. A. Chuyan ORCID: 0000-0002-4212-3143 G. M. Breskina ORCID: 0000-0003-2381-312X
Federal Agricultural Kursk Research Center,
70b, Karla Marksa St., Kursk, Russia, 305021,
e-mail: vninp@mail.ru

Organic carbon sequestration is a present-day topical issue. The effect of a biological preparation based on *Trichoderma viride* and a biological preparation based on *Pseudomonas aureofaciens*, used to treat shredded by-products of crops before embedding them in the soil, and applied N_{10} kg PPN per 1 ton of by-products (N) was studied. The research was carried out in 2018–2020 in FSBSI “Kursk FARC” in a stationary field experiment with biopreparations (Kursk Region, Medvensky District, village of Panino) in a typical slightly eroded chernozem soil in a grain crop rotation link (spring barley – buckwheat – fodder beans). It was found that the use of biological preparations separately or together with N contributed to the soil sequestration of carbon in the topsoil, significant accumulation of humus carbon reserves was 2.2 and 2.4 times higher than that in the control, and the application of only N_{10} kg PPN with 1 ton of plant residues ensured the preservation of humus carbon reserves. Carbon reserves in the by-products, crop and root residues of the cultivated crops in the topsoil when using biological preparations were higher than those in the control. A direct high relationship was revealed between the average amount of carbon dioxide released from the soil during the vegetation of

fodder beans and the amount of carbon from their by-products, crop and root residues entering the soil layers of 0–10 cm and 0–20 cm, correlation coefficients were 0.87 and 0.80. The efficiency of soil carbon sequestration in the topsoil when using biological preparations separately or together with nitrogen exceeded that of the control, respectively 2.0 and 2.1 times, and of shredded by-products with N₁₀ PPN per 1 ton only 1.5 times.

Keywords: organic carbon, binding efficiency, microbiological preparations, by-products, crop and root residues, typical slightly eroded chernozem soil, CO₂ emission.

В настоящее время остро встаёт экологическая проблема превышения «углеродного бюджета человечества», связанная с разбалансированием биогеохимического цикла углерода и, как следствие, глобального изменения климата [1–3]. Известно, что значительное влияние на цикл углерода в природе, на климатические флуктуации оказывает почвенное органическое вещество, при минерализации которого увеличивается поступление углекислого газа в атмосферу [4]. Оно выполняет энергетическую, биологическую, физическую, химическую, фитосанитарную, экологическую и биосферную функции в почве и биосфере, играет важную роль в сохранении и повышении плодородия и качества почв. Сельскохозяйственное освоение земель и эрозия почв привели к деградации почв, снижению в них содержания органического углерода и ухудшению качества почвенного органического вещества [5–9].

Перевод атмосферного углерода в биомассу растений, перемещение его в состав почвенного органического вещества посредством заделки растительной биомассы в почву и долговременное сохранение в резервуаре органического вещества почвы с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу называют почвенной секвестрацией углерода [10–13]. Почвенную секвестрацию углерода, наряду с ограничением эмиссии, считают равноправным направлением контроля за содержанием парниковых газов в атмосфере, а также наиболее рентабельной природоохранной стратегией первой половины XXI века. При этом она будет препятствовать росту концентрации атмосферного углерода, способствовать сохранению и накоплению почвенного органического вещества – важнейшего условия оптимизации почвенного плодородия и предотвращения деградации почв. Поэтому в настоящее время возрастает актуальность изучения процессов, связанных с почвенной секвестрацией углерода, и приёмов управления ею.

В условиях недостаточного поступления в пахотные почвы органического вещества и снижения в них содержания органического

углерода важнейшим источником его пополнения служат побочная продукция и пожнивно-корневые остатки сельскохозяйственных культур [14, 15]. Для усиления разложения и гумификации растительных остатков в почве используют их инокуляцию перед заделкой в почву микробиологическими препаратами-деструкторами [16–18]. В то же время исследований по влиянию биопрепаратов на секвестрацию органического углерода в чернозёмных почвах недостаточно [19].

Целью исследований является изучение влияния обработки микробиологическими препаратами отдельно или совместно с азотом побочной продукции сельскохозяйственных культур на процессы, связанные с секвестрацией органического углерода в чернозёме типичном слабоэродированном: связывание углерода в гумусе, поступление органического углерода в почву с побочной продукцией, пожнивными и корневыми остатками, выделение CO₂ из почвы.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований был чернозём типичный слабоэродированный тяжелосуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке. В пахотном слое почвы 0–20 см содержится гумуса по Тюрину 5,29±0,07%; подвижного фосфора по Чирикову – 145±13 мг/кг почвы; обменного калия по Чирикову – 120±13 мг/кг почвы; обменного кальция – 22,1±0,3 мг-экв./100 г почвы, реакция среды нейтральная или близкая к нейтральной, рН_{водн.} 6,4±0,1.

Исследования проводили на опытном поле ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Курская обл., Медвенский р-н, с. Панино) в стационарном полевом опыте с биопрепаратами на северном склоне в звене зернового севооборота. В 2018 г. в опыте возделывали яровой ячмень сорта Суздалец, в 2019 г. – гречиху сорта Деметра, в 2020 г. – кормовые бобы сорта Стрелецкие.

В качестве биопрепаратов использовали биологический препарат Грибофит, содержащий споры и мицелий гриба *Trichoderma viride*, а также продуцируемые грибом в процессе производственного культивирования

биологически активные вещества (антибиотики, ферменты, витамины, фитогормоны), экологически безопасный, обладающий биофунгицидными, ростостимулирующими и фосфатмобилизирующими свойствами. Вторым являлся биологический препарат Имуназот, содержащий ризосферные бактерии *Pseudomonas aureofaciens*, – биофунгицид, ростостимулятор, фосфатмобилизатор контактного и системного действия [20].

Схема опыта включала в себя следующие варианты: 1. Контроль. Фон: измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры. Количество побочной продукции зависело от культуры и её урожайности, его определяли и учитывали в расчётах, в среднем: ячмень – 2,2, гречиха – 2,8, бобы – 1,9 т/га. 2. Измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры + N_{10} кг д. в. в виде аммиачной селитры на 1 т побочной продукции (N). 3. Измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры + обработка биопрепаратами (БП) Грибофит на основе *Trichoderma viride* (5 л/га, 106 КОЕ/мл) и БП Имуназот на основе *Pseudomonas aureofaciens* (3 л/га, 106 КОЕ/мл). 4. Измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры + обработка Грибофитом 5 л/га и Имуназотом 3 л/га + (N).

Учётная площадь делянок составляла 600 м² (12 × 50 м). Повторность – 3. Размещение делянок – систематическое. Обработку измельчённых растительных остатков биопрепаратами проводили опрыскивателем ОП-2000/24, внесение аммиачной селитры – навесным разбрасывателем РН-0,8, заделку измельчённых растительных остатков в почву – дисковыми боронами на глубину 10–12 см. Технология возделывания сельскохозяйственных культур – общепринятая в лесостепной зоне.

Отбор образцов почвы проводили по диагонали делянки из 5 точек буром в слоях 0–10, 10–20 см после уборки сельскохозяйственных культур, содержание углерода гумуса определяли по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91). Эмиссию CO₂ из почвы определяли во время всходов, колошения, бутонизации и перед уборкой урожая культур в трёхкратной повторности в полевых условиях по методу Л.О. Карпачевского [21].

После уборки урожая определяли количество поступающей в почву измельчённой побочной продукции на площадках 1 × 1 м² в трёхкратной повторности, пожнивных и корневых остатков – бурами объёмом 500 см³ в трёхкратной повторности в слоях 0–10 и

10–20 см методом монолитов с последующим отмыванием на ситах. При расчёте количества органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией и пожнивными и корневыми остатками возделываемых культур, допускали, что содержание С в них составляет примерно 40%. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом, плотность почвы – по методу Н.А. Качинского [22].

Эффективность почвенного связывания органического углерода в гумусе (ЭПСУ, %) за три года определяли по предложенной нами формуле:

$$ЭПСУ = (C_{2n} - C_{21}) \cdot 100 / \sum (C_{пнк_1} + \dots + C_{пнк_n}),$$

где C_{2n} – запасы углерода гумуса в почве через n лет, т/га, C_{21} – запасы углерода гумуса в почве в первый год исследований, т/га; $C_{пнк_1}$ – количество органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией, пожнивными и корневыми остатками возделываемых культур в первый год, т/га, $C_{пнк_n}$ – количество органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией, пожнивными и корневыми остатками возделываемых культур в n год; 100 – коэффициент перевода в % [23]. Расчёты проводили на основе полученных нами в опыте экспериментальных данных. Экспериментальные данные обработаны методами математической статистики с использованием программных средств Microsoft Office Excel, STATISTIKA, STATGRAF.

Результаты и обсуждение

Изучение изменения запасов углерода гумуса (C_2) в почве с 2018 по 2020 гг. в звене зернового севооборота (ячмень – гречиха – кормовые бобы) показало, что его накопление в пахотном слое почвы происходит в основном за счёт его изменений в слое 0–10 см, в который поступает основная масса измельчённой побочной продукции возделываемых культур (табл. 1). Причём отмечено значимое увеличение C_2 в слое 0–10 см во всех вариантах опыта, а в слое 10–20 см – только при применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотными минеральными удобрениями.

В 2018 г. запасы углерода гумуса в слое почвы 0–20 см во всех вариантах опыта изменялись незначительно от 59,39 до 60,13 т/га. В 2019 г. отмечали увеличение запасов C_2 в

слое 0–20 см во всех вариантах по сравнению с предыдущим годом: в контроле незначимое – на 0,47 т/га, при внесении измельчённых растительных остатков с азотными минеральными удобрениями – на 0,81 т/га, с биопрепаратами – на 1,08 т/га, а при их сочетании с азотом – на 1,10 т/га – значимое ($HSP_{05} = 0,71$ т/га).

Значимое увеличение запасов углерода гумуса в слое почвы 0–20 см в период с 2018 по 2020 гг. выявлено при применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотными удобрениями, и составляло оно, соответственно, 1,11 и 1,21 т/га ($HSP_{05} = 0,71$ т/га), то есть можно констатировать почвенную секвестрацию углерода. Это согласуется с нашими данными о том, что процессы разложения и гумификации растительных остатков в черно-

зёме типичном слабоэродированном выше при обработке их биопрепаратами [24].

Незначимое увеличение запасов C_2 в период с 2018 к 2020 г. в слое почвы 0–20 см выявлено в контроле при внесении измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур – на 0,50 т/га ($HSP_{05} = 0,71$ т/га), что соответственно, в 2,2 и 2,4 раза меньше, чем при применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотными минеральными удобрениями. Однако внесение измельчённых растительных остатков сельскохозяйственных культур с азотом способствует невысокому, но значимому (на 0,78 т/га) повышению запасов C_2 в почве.

Источником накопления запасов углерода гумуса в почве является органический углерод, поступивший в почву в 2018–2020 гг. с побоч-

Таблица 1 / Table 1

Изменение запасов углерода гумуса в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного в звене зернового севооборота в зависимости от внесения биопрепаратов и азотных минеральных удобрений, т/га / Changes in humus carbon reserves in the topsoil of typical slightly eroded chernozem soil in a grain crop rotation link depending on the application of biopreparations and nitrogen fertilizers, t/ha

Вариант (фактор А) / Variant (factor A)	Глубина, см Depth, cm	Годы исследований (фактор В) / Years of research (factor B)			ΔC_2 ΔCh
		2018*	2019	2020	
1. Контроль – Фон: измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры Control – Background: shredded crop by-product	0–10	29,82	30,06	30,20	+0,38
	10–20	29,57	29,80	29,69	+0,12
	0–20	59,39	59,86	59,89	+0,50
2. Фон + N_{10} кг д. в. на 1 т побочной продукции Background + N_{10} kg PPN per 1 t of by-product	0–10	29,60	30,16	30,08	+0,48
	10–20	30,52	30,77	30,82	+0,30
	0–20	60,12	60,93	60,90	+0,78
3. Фон + обработка биопрепаратом (БП) на основе <i>Trichoderma viride</i> 5 л/га и БП на основе <i>Pseudomonas aureofaciens</i> 3 л/га Background + treatment with a biopreparation based on <i>Trichoderma viride</i> 5 L/ha and a biopreparation based on <i>Pseudomonas aureofaciens</i> 3 L/ha	0–10	28,99	29,70	29,72	+0,73
	10–20	30,82	31,19	31,20	+0,38
	0–20	59,81	60,89	60,92	+1,11
4. Фон + обработка БП на основе <i>T. viride</i> 5 л/га и БП на основе <i>P. aureofaciens</i> 3 л/га + N_{10} кг д. в. на 1 т побочной продукции Background + treatment with a biopreparation based on <i>T. viride</i> 5 L/ha and a biopreparation based on <i>P. aureofaciens</i> 3 L/ha + N_{10} kg PPN per 1 t of by-product	0–10	28,99	29,90	29,84	+0,85
	10–20	30,82	31,01	31,18	+0,36
	0–20	59,81	60,91	61,02	+1,21
HSP_{05} для фактора А LSD ₀₅ for factor A	0–10	0,31	0,24	0,49	**
	10–20	0,31	0,25	0,37	
	0–20	0,57	0,52	0,66	
HSP_{05} для фактора В LSD ₀₅ for factor B	0–10	0,36			
	10–20	0,34			
	0–20	0,71			

Примечание: ΔC_2 – изменение углерода гумуса в почве за три года, т/га; * 2018 г. – ячмень; 2019 г. – гречиха; 2020 г. – кормовые бобы; ** оценку значимости ΔC_2 проводили по HSP_{05} для фактора В.

Note: ΔCh – changes in humus carbon in the soil for three years, t/ha; * 2018 – barley; 2019 – buckwheat; 2020 – fodder beans; ** significance of ΔCh was evaluated according to LSD_{05} for factor B.

Таблица 2 / Table 2

Количество органического углерода (*С_{орг}*), поступившего в пахотный слой чернозёма типичного слабоэродированного с побочной продукцией, пожнивными и корневыми остатками возделываемых культур (т/га) и эффективность почвенного связывания углерода (ЭПСУ) за 2018–2020 гг.
Amount of organic carbon (*С_{org}*) entering the topsoil of typical slightly eroded chernozem soil with the by-product, crop and root residues of the cultivated crops (t/ha) and Efficiency of soil carbon sequestration (ESCS) for 2018–2020

Вариант Variant	Глубина, см Depth, cm	<i>С_{орг}</i> , т/га <i>С_{org}</i> , t/ha			ЭПСУ, % ESCS, %
		2018*	2019	2020	
1. Контроль – Фон: измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры Control – Background: shredded crop by-product	0–10	1,32±0,08	2,40±0,08	2,20±0,08	6,4
	10–20	0,46±0,06	1,11±0,04	1,53±0,05	3,9
	0–20	1,78±0,13	3,52±0,10	3,72±0,11	5,5
2. Фон + N ₁₀ кг д. в. на 1 т побочной продукции Background + N ₁₀ kg PPN per 1 t of by-product	0–10	1,24±0,09	2,69±0,13	2,40±0,10	7,6
	10–20	0,81±0,05	1,02±0,07	1,39±0,08	9,3
	0–20	2,05±0,14	3,71±0,19	3,79±0,16	8,2
3. Фон + обработка биопрепаратом (БП) на основе <i>Trichoderma viride</i> 5 л/га и БП на основе <i>Pseudomonas aureofaciens</i> 3 л/га Background + treatment with a biopreparation based on <i>Trichoderma viride</i> 5 L/ha and a biopreparation based on <i>Pseudomonas aureofaciens</i> 3 L/ha	0–10	1,09±0,09	2,81±0,08	2,39±0,09	11,6
	10–20	0,98±0,03	1,24±0,10	1,56±0,08	10,1
	0–20	2,07±0,12	4,05±0,14	3,95±0,16	11,0
4. Фон + обработка БП на основе <i>T. viride</i> 5 л/га и БП на основе <i>P. aureofaciens</i> 3 л/га + N ₁₀ кг д. в. на 1 т побочной продукции Background + treatment with a biopreparation based on <i>T. viride</i> 5 L/ha and a biopreparation based on <i>P. aureofaciens</i> 3 L/ha + N ₁₀ kg PPN per 1 t of by-product	0–10	1,11±0,06	2,84±0,09	2,34±0,07	13,5
	10–20	0,98±0,07	1,33±0,05	1,66±0,06	9,1
	0–20	2,09±0,13	4,17±0,12	4,00±0,12	11,8

Примечание: * 2018 г. – ячмень; 2019 г. – гречиха; 2020 г. – кормовые бобы.
Note: * 2018 – barley; 2019 – buckwheat; 2020 – fodder beans.

ной продукцией, пожнивными и корневыми остатками возделываемых культур (табл. 2). Следует отметить неравномерное распределение запасов углерода побочной продукции, пожнивных и корневых остатков возделываемых культур (*С_{орг}*) по слоям 0–10 и 10–20 см. Во всех вариантах их основное накопление (53–74%) отмечено в верхнем слое 0–10 см, но распределение по слоям различалось по годам, очевидно в зависимости от вида культуры. Запасы *С_{орг}* в слое почвы 0–20 см в вариантах с биопрепаратами в 2018–2019 гг. были выше, чем в контроле, но незначимо отличались от такового в варианте с внесением азота (N), а в 2020 г. они были выше как по сравнению с контролем, так и по сравнению с вариантом N (табл. 2). Запасы *С_{орг}* в слое почвы 0–20 см

в 2020 г. по сравнению с 2018 г. увеличилось в 1,8–2,1 раза.

Количество углерода побочной продукции, пожнивных и корневых остатков связано с урожайностью и продуктивностью возделываемых культур, а также зависит от перевода углекислого газа атмосферы в живое органическое вещество растений (фотосинтез). Рассмотрим выделение CO₂ из почвы на третий год исследований во время вегетации кормовых бобов (2020 г.) в фазы всходов, бутонизации и в период уборки урожая (рис.).

Установлено, что эмиссия углекислого газа из почвы во все сроки наблюдений значимо ниже в контроле по сравнению с другими вариантами. Наибольшее выделение CO₂ из почвы отмечено в фазу бутонизации и в период

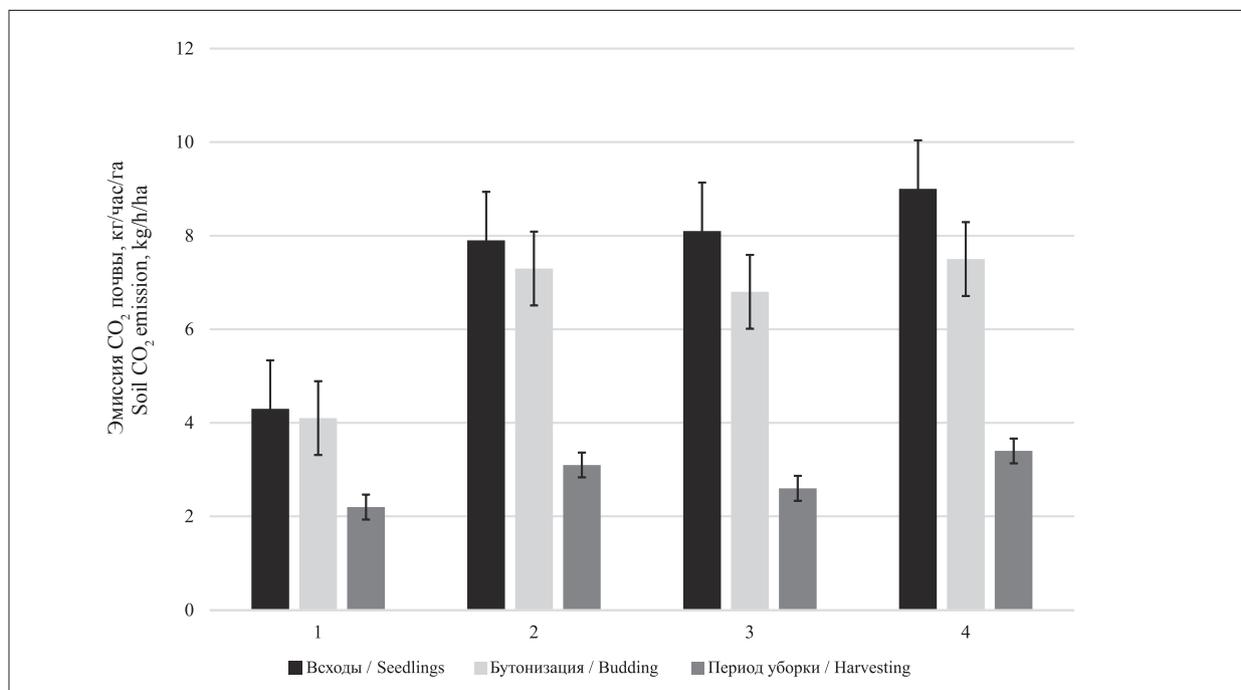


Рис. Эмиссия CO₂ (дыхание) почвы в посевах кормовых бобов в фазы развития: 1, 2, 3, 4 – варианты опыта те же, что в таблице 1; НСР₀₅: всходы – 0,56 кг/час/га, бутонизация – 0,61 кг/час/га, уборка урожая – 0,28 кг/час/га

Fig. Soil CO₂ emission (respiration) in fodder beans in the development stages: 1, 2, 3, 4 – variants are similar to those in Table 1, LSD₀₅: seedlings – 0.56 kg/h./ha, budding – 0.61 kg/h./ha, harvesting – 0.28 kg/h./ha

уборки урожая на вариантах с биопрепаратами + N и с азотом, несколько ниже по сравнению с ними – при применении биопрепаратов в период уборки урожая.

Выделяемый из почвы углекислый газ в процессе вегетации сельскохозяйственных растений усваивается в процессе фотосинтеза. На основе корреляционного анализа установлена прямая тесная связь эмиссии углекислого газа из почвы с количеством поступающего в почву углерода побочной продукции, пожнивных и корневых остатков. Коэффициент корреляции между средним значением эмиссии CO₂ из почвы во время вегетации кормовых бобов в фазы всходов, бутонизации, период уборки урожая и количеством углерода побочной продукции и пожнивных и корневых остатков, находящегося в слое 0–10 см почвы, составляет 0,87, а в слое 0–20 см – 0,80 при $p = 0,05$.

На основе полученных экспериментальных данных была рассчитана эффективность почвенной секвестрации углерода в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного в зависимости от внесения биопрепаратов и азотных минеральных удобрений (табл. 2). Эффективность связывания углерода в почве (ЭПСУ) характеризует долю (%) трансформи-

рующегося в гумус почвы углерода от количества органического углерода, поступившего в почву, в данном случае, с побочной продукцией и пожнивными и корневыми остатками возделываемых культур, за 2018–2020 гг.

Установлена наименьшая эффективность почвенного связывания углерода в пахотном слое почвы в контроле. Применение биопрепаратов отдельно или совместно с азотом способствует увеличению ЭПСУ, соответственно, в 2,0 в 2,1 раза, а внесение измельчённой побочной продукции с N₁₀ д.в. на 1 т повышало в 1,5 раза по сравнению с контролем. Очевидно, процессы гумификации, способствующие почвенному связыванию углерода, были выше при применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотом.

Эффективность почвенного связывания органического углерода различалась в слоях почвы 0–10 и 10–20 см. Причём, в контроле и при внесении биопрепаратов отдельно или совместно с азотом большая ЭПСУ отмечена в верхнем (0–10 см) слое почвы, а при применении N₁₀ д. в. на 1 т побочной продукции в слое 10–20 см.

Снижение эффективности почвенного связывания органического углерода при заделке в почву измельчённой побочной про-

дукции от слоя 0–10 к 10–20 см различалось в зависимости от применения биопрепаратов и азота. На контроле снижение ЭПСУ составляло 64%, при применении биопрепаратов – 15%, биопрепаратов с азотом – 48%.

Заключение

Таким образом, применение биопрепаратов на основе *Trichoderma viride* (5 л/га) и биопрепаратов на основе *Pseudomonas aureofaciens* (3 л/га) для обработки измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур отдельно или совместно с N_{10} кг д. в. на 1 т перед заделкой в почву в звене зернового севооборота способствовало связыванию углерода в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного в 2018–2020 гг., причём значимое накопление запасов углерода гумуса превышало таковое на контроле в 2,2 и 2,4 раза. Внесение N_{10} кг д. в. с 1 т измельчённых растительных остатков сельскохозяйственных культур обеспечило в звене зернового севооборота сохранение запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы в эти годы.

При применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотом запасы углерода в побочной продукции, пожнивных и корневых остатках возделываемых культур в пахотном слое превышали таковые в контроле в среднем на 12 и 14%. Между средним количеством выделяемого из почвы углекислого газа в процессе вегетации кормовых бобов, участвующего в фотосинтезе, выявлена прямая тесная связь с количеством поступающего в почву углерода побочной продукции, пожнивных и корневых остатков, причём связь выше в слое 0–10 см, чем в слое 0–20 см, коэффициенты корреляции, соответственно, составляют 0,87 и 0,80 при $p = 0,05$.

Эффективность почвенного связывания органического углерода, характеризующая долю трансформирующегося в гумус почвы углерода от количества органического углерода, поступившего в почву, в пахотном слое почвы за 2018–2020 гг. при применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотом была выше, соответственно, в 2,0 в 2,1 раза, а при внесении измельчённой побочной продукции с N_{10} д. в. на 1 т – только в 1,5 раза по сравнению с контролем. Очевидно, что процессы гумификации были активнее при применении биопрепаратов отдельно или совместно с азотом, а при использовании N_{10} д. в. на 1 т побочной продукции эффектив-

ность почвенного связывания органического углерода снижалась.

Работа выполнена по теме государственного задания № FGZU-2022-0001.

Литература

1. Когут Б.М., Семёнов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13. doi: 10.31857/S0002188421050070
2. Семёнов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
3. Семёнов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семёнова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая ёмкость почв зонального ряда // *Почвоведение*. 2008. № 7. С. 819–832.
4. Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Vasenev I.I., Sotnikova Y.L., Ryzhkov O.V., Morin T. Carbon stocks and CO₂ emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia // *Catena*. 2017. V. 158. P. 131–140. doi: 10.1016/j.catena.2017.06.021
5. Illiger P., Schmidt G., Walde I., Hese S., Kudrjavzev A.E., Kurepina N., Mizgirev A., Stephan E., Bondarovich A., Frühauf M. Estimation of regional soil organic carbon stocks merging classified land-use information with detailed soil data // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 695. Article No. 133755. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133755
6. Масютенко Н.П. Трансформация органического вещества в чернозёмных почвах и системы его воспроизводства. М.: Россельхозакадемия, 2012. 150 с.
7. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528. P. 60–68. doi: 10.1038/nature16069
8. Castellano M.J., Mueller K.E., Olk D.C., Sawyer J.E., Six J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept // *Global Change Biology*. 2015. V. 21. No. 9. P. 3200–3209. doi: 10.1111/gcb.12982
9. Завьялова Н.Е., Широких И.Г., Косолапова А.И., Широких А.А. Микробная трансформация органического вещества дерново-подзолистой почвы Предуралья при различном использовании и внесении минеральных удобрений // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 1. С. 102–110. doi: 10.25750/1995-4304-2019-1-102-110
10. Семёнов В.М., Тулина А.С., Семёнова Н.А., Иванникова Л.А. Гумификационные и негумификационные пути стабилизации органического вещества в почве (обзор) // *Почвоведение*. 2013. № 4. С. 393–407.
11. Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Courcelles V.R., Singh K., Wheeler I.,

Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. V. 164. P. 80–99. doi: 10.1016/j.agee.2012.10.001

12. Aertsens J., De Nocker L., Gobin A. Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture // *Land Use Policy*. 2013. No. 31. P. 584–594. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.09.003

13. Amundson R., Biardeau L. Soil carbon sequestration is an exclusive climate mitigation tool // *PNAS*. 2018. V. 115. No. 46. P. 11652–11656.

14. Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromyckina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O. Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. No. 10. P. 1183–1194. doi: 10.1134/S1064229319100119

15. Maarastawi S.A., Frindte K., Bodelier P.L.E., Knief C. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption // *Soil Biology and Biochemistry*. 2019. V. 135. P. 235–238. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.007

16. Русакова И.В. Влияние микробных препаратов и минерального азота на разложение соломы // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 3. С. 107–111.

17. Goyal S., Sindhu S.S. Composting of rice straw using different inocula and analysis of compost quality // *Microbiol.* 2011. V. 4. P. 126–138. doi: 10.3923/mj.2011.126.138

18. Петров В.Б., Чеботарь А.К. Управление деструкцией и гумификацией пожнивных остатков зерновых культур и использованием микробиологического препарата Экстрасол // *Сельскохозяйственная биология*. 2012. № 3. С. 103–108.

19. Jurys A., Feizienė D. The effect of specific soil microorganisms on soil quality parameters and organic matter content for cereal production // *Plants*. 2021. V. 10 (10). Article No. 2000. doi: 10.3390/plants10102000

20. Брескина Г.М., Чуян Н.А. Влияние приёмов биологизации на урожайность сельскохозяйственных культур // *Земледелие*. 2020. № 3. С. 30–33.

21. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 312 с.

22. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

23. Масютенко Н.П., Кузнецов А.В., Масютенко М.Н., Панкова Т.И., Брескина Г.М. Эффективность связывания органического углерода в черноземе типичном слабоэродированном при применении биопрепаратов // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 2. С. 63–67. doi: 10.31857/S2500262723020138

24. Масютенко Н.П., Панкова Т.И., Кузнецов А.В., Масютенко М.Н., Брескина Г.М., Чуян Н.А. Влияние биопрепаратов на разложение растительных остатков сельскохозяйственных культур в черноземе типичном // *Юг России: экология, развитие*. 2021. Т. 16. № 2 (59). С. 108–118. doi: 10.18470/1992-1098-2021-2-108-118

References

1. Kogut B.M., Semenov V.M., Artemyeva Z.S., Danchenko N.N. Dehumification and soil carbon sequestration // *Agrochemistry*. 2021. No. 5. P. 3–13 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188421050070

2. Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moskva: GEOS Publ., 2015. 233 p. (in Russian).

3. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Tulina A.S. Mineralizability of organic matter and carbon sequestering capacity of the soils of zonal sequence // *Pochvovedenie*. 2008. No. 7. P. 819–832 (in Russian).

4. Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Vasenev I.I., Sotnikova Y.L., Ryzhkov O.V., Morin T. Carbon stocks and CO₂ emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia // *Catena*. 2017. V. 158. P. 131–140. doi: 10.1016/j.catena.2017.06.024

5. Illiger P., Schmidt G., Walde I., Hese S., Kudrjavzev A.E., Kurepina N., Mizgirev A., Stephan E., Bondarovich A., Frühauf M. Estimation of regional soil organic carbon stocks merging classified land-use information with detailed soil data // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 695. Article No. 133755. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133755

6. Masyutenko N.P. Organic matter transformation in chernozemic soils and systems of its reproduction. Moskva: Rosselkhozakademia, 2012. 150 p. (in Russian).

7. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528. P. 60–68. doi: 10.1038/nature16069

8. Castellano M.J., Mueller K.E., Olk D.C., Sawyer J.E., Six J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept // *Global Change Biology*. 2015. V. 21. No. 9. P. 3200–3209. doi: 10.1111/gcb.12982

9. Zavyalova N.E., Shirokikh I.G., Kosolapova A.I., Shirokikh A.A. Microbial transformation of organic matter of sod-podzolic soils in the Pre-Urals under conditions of different use and application of mineral fertilizers // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 102–110 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-102-110

10. Semenov V.M., Tulina A.S., Semenova N.A., Ivannikova L.A. Humification and non-humification ways of organic matter stabilization in the soil (review) // *Pochvovedenie*. 2013. No. 4. P. 393–407 (in Russian).

11. Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Courcelles V.R., Singh K., Wheeler I., Abbott L.,

- Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. V. 164. P. 80–99. doi: 10.1016/j.agee.2012.10.001
12. Aertsens J., De Nocker L., Gobin A. Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture // *Land Use Policy*. 2013. No. 31. P. 584–594. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.09.003
13. Amundson R., Biardeau L. Soil carbon sequestration is an exclusive climate mitigation tool // *PNAS*. 2018. V. 115. No. 46. P. 11652–11656.
14. Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromyckina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O. Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. No. 10. P. 1183–1194. doi: 10.1134/S1064229319100119
15. Maarastawi S.A., Frindte K., Bodelier P.L.E., Knief C. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption // *Soil Biology and Biochemistry*. 2019. V. 135. P. 235–238. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.007
16. Rusakova I.V. Effect of microbial preparations and mineral nitrogen on straw decomposition // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016. No. 3. P. 107–111 (in Russian).
17. Goyal S., Sindhu S.S. Composting of rice straw using different inocula and analysis of compost quality // *Microbiol*. 2011. V. 4. P. 126–138. doi: 10.3923/mj.2011.126.138
18. Petrov V.B., Chebotar A.K. Management of the destruction and humification of afterharvesting residues of grain crops and application of microbiological preparation Extrasol // *Selskokhozaistvennaya Biologiya*. 2012. No. 3. P. 103–108 (in Russian).
19. Jurys A., Feizienė D. The effect of specific soil microorganisms on soil quality parameters and organic matter content for cereal production // *Plants*. 2021. V. 10 (10). Article No. 2000. doi: 10.3390/plants10102000
20. Breskina G.M., Chuyan N.A. Influence of biologization techniques on crop yields // *Zemledelie*. 2020. No. 3. P. 30–33 (in Russian).
21. Karpachevskiy L.O. Heterogeneity of soil cover in forest biogeocenosis. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1977. 312 p. (in Russian).
22. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods of investigation of physical properties of soil. Moskva: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).
23. Masyutenko N.P., Kuznetsov A.V., Masyutenko M.N., Pankova T.I., Breskina G.M. Efficiency of organic carbon sequestration in typical slightly eroded chernozem when biopreparations are applied // *Russian agricultural Sciences*. 2023. No. 2. P. 63–67 (in Russian). doi: 10.31857/S2500262723020138
24. Masyutenko N.P., Pankova T.I., Kuznetsov A.V., Masyutenko M.N., Breskina G.M., Chuyan N.A. Effect of biopreparations on the decomposition of plant residues of crops in typical chernozem // *South of Russia: Ecology, Development*. 2021. V. 16. No. 2 (59). P. 108–118 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2021-2-108-118