

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЯЗЫВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЧЕРНОЗЕМЕ ТИПИЧНОМ СЛАБОЭРОДИРОВАННОМ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БИОПРЕПАРАТОВ

Н.П. Масютенко, доктор сельскохозяйственных наук, А.В. Кузнецов, кандидат сельскохозяйственных наук,
М.Н. Масютенко, кандидат сельскохозяйственных наук, Т.И. Панкова, кандидат биологических наук,
Г.М. Брескина, кандидат сельскохозяйственных наук

Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70б
E-mail: vninp@mail.ru

Исследования проводили с целью изучения эффективности связывания органического углерода черноземом типичным слабоэродированным при использовании с побочной продукцией сельскохозяйственных культур биопрепаратов (на основе *Trichoderma viride* и *Pseudomonas aureofaciens*) отдельно или совместно с азотом и её корреляции с показателями трансформации растительных остатков и биологического состояния почвы. Почва – чернозем типичный слабоэродированный тяжёлоуглинистый с содержанием в пахотном слое гумуса (по Тюрину) 5,11...5,36 %; азота щелочногидролизуемого – 160,2±2,6 мг/кг, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 112,0±7,8 и 102,2±9,8 мг/кг соответственно; обменного кальция – 223,5±2,2 мг-экв/кг, с близкой к нейтральной реакцией среды (pH_{KCl} – 5,6±0,1). Работу выполняли в 2018–2021 гг. в Курской области в зернопропашном севообороте (подсолнечник – ячмень – соя – гречиха). Схема стационарного полевого опыта включала следующие варианты: измельченная побочная продукция (контроль) – фон; фон + аммиачная селитра из расчета 10 кг д.в. N на 1 т побочной продукции (фон + азот); обработка Грибофитом и Имуназотом семян, почвы перед посевом, растений 2 раза за вегетацию и измельченной побочной продукции (фон + биопрепараты); фон + биопрепараты + азот. Эффективность связывания органического углерода в почве рассчитывали по формуле, выведенной на основе изучения динамики запасов гумуса в пахотном слое, ежегодного поступления измельченной побочной продукции и содержания в почве пожнивно-корневых остатков. Применение биопрепаратов повышало эффективность связывания органического углерода в пахотном слое почвы в 3,7 раза, биопрепаратов и азота – в 4,9 раза, только внесение азота – в 2,3 раза, по сравнению с контролем. Установлена прямая очень тесная корреляция между эффективностью связывания органического углерода в почве со средней скоростью разложения растительных остатков ($r=0,98$), тесная – с эмиссией CO_2 из почвы ($r=0,88$), средняя – с целлюлолитической активностью почвы ($r=0,69$).

EFFICIENCY OF ORGANIC CARBON SEQUESTRATION IN TYPICAL SLIGHTLY ERODED CHERNOZEM

N.P. Masyutenko, A.V. Kuznetsov, M.N. Masyutenko, T.I. Pankova, G.M. Breskina

Federal Agricultural Kursk Research Center,
305021, Kursk, ul Karla Marksa, 70b
E-mail: vninp@mail.ru

The research was carried out to study the efficiency of organic carbon sequestration (ESCS) in the arable layer of typical slightly eroded chernozem when biopreparations (based on *Trichoderma viride* and *Pseudomonas aureofaciens*) were applied with by-products of crops separately or together with nitrogen, nitrogen fertilizers, as well as to assess its relationship with indicators of transformation of plant residues and biological state of soil. The object of the study was typical slightly eroded heavy loamy chernozem on carbonate loess-like loams with humus content in the topsoil (according to Tyurin's method) of 5.11...5.36%; that of alkaline hydrolyzable nitrogen 160.2±2.6 mg/kg, mobile phosphorus and potassium (according to Chirikov's method) 112.0±7.8 mg/kg and 102.2±9.8 mg/kg, respectively, that of exchange calcium 223.5±2.2 mg-eq/kg, with a medium reaction close to neutral (pH_{KCl} 5.6±0.1). The research was carried out in 2018–2021 in a stationary field experiment with biopreparations in Kursk Region, in a grain-row crop rotation (sunflower-barley-soybeans-buckwheat). The experimental design included the following variants: crushed by-products (background) as a control; background + nitrogen of ammonium nitrate at the rate of 10 kg of PPN per 1 ton of by-products; treating seeds, soil before sowing, crops 2 times during the growing season and crushed by-products before embedding them in the soil (biopreparations + background) with biopreparations Gribophyte and Imunazot; biopreparations + background + nitrogen of ammonium nitrate at the rate of 10 kg of PPN per 1 ton of by-products. The efficiency of organic carbon sequestration in the soil was calculated according to the formula proposed by the authors based on the study of the dynamics of humus reserves in the arable soil layer, the annual intake of crushed by-products into the soil and the content of crop-root residues in the soil. It was revealed that the use of biopreparations and crushed by-products contributed to an increase in ESCS in the arable soil layer 3.7 times, the combined use of biopreparations with N 4.9 times, and the application of only N_{10} kg of PPN with 1 ton of by-products 2.3 times compared with the control (by adding only crushed by-products). A direct, very close correlation of efficiency of organic carbon sequestration in the soil with an average rate of decomposition of plant residues ($r=0.98$), a close one with CO_2 emission from the soil ($r=0.88$), and an average one with the cellulolytic activity of the soil ($r=0.69$) was established.

Ключевые слова: органический углерод, гумус, эффективность связывания, чернозем типичный слабоэродированный, побочная продукция, биопрепараты, азотные минеральные удобрения, зернопропашной севооборот, связь, скорость разложения растительных остатков, показатели биологической активности почвы.

Key words: organic carbon, humus, sequestration efficiency, typical slightly eroded chernozem, by-products, biopreparations, nitrogen mineral fertilizers, grain crop – row crop rotation, relation, rate of decomposition of plant residues, indicators of biological activity of the soil.

Проблема связывания органического углерода почвой, при котором происходит перевод атмосферного углекислого газа в биомассу растений (фотосинтез),

перемещение его в состав почвенного органического вещества посредством заделки растительной биомассы в почву с последующей трансформацией в гумус и долго-

временным сохранением в резервуаре органического вещества почвы с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу (почвенная секвестрация), стала особенно актуальной в последние десятилетия [1, 2, 3]. Это вызвано тем, что сельскохозяйственное использование земель и проявление эрозионных процессов привели к значительным потерям органического углерода из пахотных почв во всем мире, ухудшению качества почвенного органического вещества [4, 5, 6]. Усиление минерализации гумуса приводит, с одной стороны, к увеличению поступления в атмосферу CO_2 , что сопровождается изменением климата – глобальным потеплением, с другой, к снижению качества и деградации почв [7, 8, 9].

Связывание органического углерода почвой препятствует росту концентрации этого элемента в атмосфере, а также способствует сохранению и накоплению почвенного органического вещества, выступающего основой плодородия, здоровья, повышения продуктивности земель и предотвращения деградации почвенных ресурсов [10, 11, 12]. В связи с этим, в последние годы возрастает актуальность изучения процессов, связанных с почвенной секвестрацией углерода, оценки их эффективности с целью выявления приемов, способов и агротехнологий управления и повышения интенсивности секвестрации [13, 14, 15].

Цель исследований – изучение эффективности связывания органического углерода в пахотном слое чернозема типичного слабоэродированного при применении с побочной продукцией сельскохозяйственных культур биопрепаратов отдельно или совместно с азотом минеральных удобрений, а также оценка её корреляции с показателями трансформации растительных остатков и биологического состояния почвы.

Методика. Работу проводили в 2018–2021 гг. на опытном поле ФГБНУ «Курский ФАНЦ» (Курская обл., Медвенский р-н, с. Панино) в стационарном полевом опыте на чернозёме типичном слабоэродированном тяжелосуглинистом на северном склоне в зерно-пропашном севообороте (подсолнечник масличный гибрид Имерия КС – ячмень яровой сорта Суздалец – соя сорта Казачка – гречиха сорта Деметра). Агрохимическая характеристика пахотного (0...20 см) слоя почвы: содержание гумуса (по Тюрину) – 5,11...5,36 %; азота щелочногидролизуемого – 160,2±2,6 мг/кг, подвижных (по Чирикову) фосфора – 112,0±7,8 мг/кг и калия – 102,2±9,8 мг/кг; обменного кальция – 223,5±2,2 мг-экв./кг, реакция среды близкая к нейтральной (pH_{KCl} – 5,6±0,1).

Схема опыта включала следующие варианты: измельчённая (до 5...7 см) побочная продукция сельскохозяйственной культуры (стебли, солома и др.) – контроль (фон); фон + аммиачная селитра из расчета 10 кг д.в. азота на 1 т побочной продукции (фон + азот); обработка семян биопрепаратами Грибофит (Г) 2 л/га и Имуназот (И) 3 л/га + обработка почвы перед посевом биопрепаратами (3 л/га Г + 2 л/га И) + обработка посевов биопрепаратами (3 л/га Г + 2 л/га И) 2 раза в течение вегетации + обработка измельченной побочной продукции после уборки урожая биопрепаратами (5 л/га Г + 3 л/га И) перед заделкой в почву (фон + биопрепараты); фон + биопрепараты + азот.

Экологически безопасный, обладающий биофунгицидными, ростостимулирующими и фосфат-мобилизирующими свойствами, микробиологический препарат Грибофит (Г) содержит споры и мицелий гриба *Trichoderma viride*, а также продуцируемые грибом в процессе производственного культивирования биологически активные вещества (антибиотики,

ферменты, витамины, фитогормоны). Биофунгицид, ростостимулятор, фосфатмобилизатор контактного и системного действия Имуназот (И) содержит ризосферные бактерии *Pseudomonas aureofaciens*, [16].

Общая площадь делянки составляла 240 м² (6 м × 40 м), учетная – 152 м² (4 м × 38 м), повторность – 3-кратная. 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. Технологии возделывания сельскохозяйственных культур, за исключением изучаемых факторов, общепринятые в лесостепной зоне региона [17, 18].

Для определения запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы почвенные образцы отбирали осенью по диагонали делянки из 5 точек буром в слоях 0...10, 10...20 см, содержание углерода гумуса определяли по методу Тюрина (ГОСТ 26213–91). После уборки урожая учитывали количество побочной продукции на площадках 1 м² в трёхкратной повторности, пробы для определения содержания в почве пожнивно-корневых остатков отбирали буром объёмом 500 см³ в трёхкратной повторности в слоях 0...10 см и 10...20 см с последующим отмыванием на ситах. При расчёте количества органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией и пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур, принимали, что содержание С в них составляло примерно 40 % [19]. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом, плотность почвы – по методу Н.А. Качинского [20]. Ежегодно в вариантах опыта изучали скорость разложения поступившей в почву в первые 1,5...2,0 месяца после заделки измельченной побочной продукции возделываемых культур на основании экспериментальных данных по собственной методике [21]. Эмиссию CO_2 из почвы изучали по фазам развития культур и перед уборкой урожая в трёхкратной повторности в полевых условиях по методу Л.О. Карпачевского [22], целлюлозолитическую активность почвы – методом аппликаций в 3-кратной повторности [23].

Для оценки воздействия различных факторов, а также приёмов, способов и агротехнологий на процессы, связанные с почвенной секвестрацией углерода, был предложен показатель – эффективность почвенного связывания (секвестрации) органического углерода в гумусе (ЭПСУ). Он характеризует долю трансформирующегося в гумус почвы углерода от общего количества органического углерода, поступившего в почву с удобрениями (в том числе, с соломой, стеблями, ботвой – побочной продукцией) и пожнивно-корневыми остатками возделываемых сельскохозяйственных культур. Величину этого показателя рассчитывали на основе предложенной нами формулы и экспериментальных данных за 2018–2021 гг. в зернопропашном севообороте для пахотного слоя почвы:

$$\text{ЭПСУ (\%)} = (\text{C}_n - \text{C}_1) \cdot 100 / \sum \{(\text{C}_{\text{пк}_1} + \text{C}_{\text{пк}_2} + \dots + \text{C}_{\text{пк}_n}) + (\text{C}_{\text{оу}_1} + \text{C}_{\text{оу}_2} + \dots + \text{C}_{\text{оу}_n})\},$$

где C_n – запасы углерода гумуса в почве через n лет, т/га; C_1 – запасы углерода гумуса в почве в первый год исследований, т/га; $\text{C}_{\text{пк}_1}$, $\text{C}_{\text{пк}_2}$, $\text{C}_{\text{пк}_n}$ – количество органического углерода, находящегося в пахотном слое почвы с пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур в первый, второй и последующие годы, т/га (в период уборки урожая); $\text{C}_{\text{оу}_1}$, $\text{C}_{\text{оу}_2}$, $\text{C}_{\text{оу}_n}$ – количество

органического углерода, поступившего в почву с органическими удобрениями в первый, второй и последующие годы, т/га; 100 – коэффициент перевода в %; n – количество лет.

Если запасы гумуса за изучаемый период снижаются, ЭСПУ может быть отрицательной величиной, что будет свидетельствовать об отсутствии связывания органического углерода в гумусе. При оценке ЭСПУ в первую ротацию севооборота можно определить эффективность и направленность процессов связывания органического углерода в гумусе почвы. Для оценки почвенной секвестрации органического углерода предлагаемый показатель ЭСПУ целесообразно определять за две и более ротаций севооборота.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики с использованием программных средств Microsoft Office EXCEL, STATISTIKA, STATGRAF.

Результаты и обсуждение. Для исследования потоков органического углерода в системе растение – почва – гумус в зернопропашном севообороте после формирования органического вещества сельскохозяйственных культур в процессе фотосинтеза в 2018–2021 гг. было определено его количество, поступившее в пахотный слой почвы с побочной продукцией в виде органического удобрения ($C_{\text{оп}}$), пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур (Спк). Величина этого показателя зависит от изучаемых в опыте факторов – сельскохозяйственная культура, азотное удобрение, биопрепарат, слой почвы (табл. 1). Основная часть побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур концентрируется в верхнем (0...10 см) слое пахотного горизонта, в который проводится заделка измельченной побочной продукции. В результате в этом слое отмечено 54...80 % органического углерода в пожнивно-корневых остатках и побочной продукции, а в слое 10...20 см – 20...46 %. При этом распределение его по слоям различалось по годам, очевидно в зависимости от вида культуры и применения биопрепаратов.

При использовании биопрепаратов отдельно или совместно с N в 2018–2019 гг. отмечена только тенденция к увеличению запасов органического углерода в измельченной побочной продукции и растительных остатках в слое 0...20 см, по сравнению с контролем, а в слое 0...10 см они были примерно одинаковыми. В варианте с внесением аммиачной селитры из расчета

10 кг азота на 1 т измельченной побочной продукции выявлено повышение, по сравнению с контролем, запасов органического углерода в пожнивно-корневых остатках и побочной продукции в слоях 0...10 см и 10...20 см. В пахотном слое содержание органического углерода, поступившего с побочной продукцией и пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур за 2018–2021 гг., в вариантах с применением биопрепаратов отдельно или с азотным удобрением, по сравнению с контролем, было больше соответственно на 23 и 42 %, с внесением азота – на 40 %.

Поступившее в почву и находящееся в ней органическое вещество, подвергается процессам трансформации, в результате которых часть его переходит в гумус. Об этом свидетельствует изменение содержания и запасов углерода в гумусе в почве. За 2018–2021 гг. в контроле при внесении измельченной побочной продукции подсолнечника, ячменя, сои, гречихи в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного отмечена тенденция к росту величины этого показателя на 0,26 т/га (при $HCP_{05} = 0,75$ т/га), в основном, вследствие незначимого ее повышения в слое 0...10 см (табл. 2). При внесении измельченной побочной продукции с азотом отмечено увеличение запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы на 0,87 т/га, причем на 71% благодаря их повышению в слое 0...10 см. Применение биопрепаратов в сочетании с измельченной побочной продукцией сельскохозяйственных культур способствовало значимому увеличению запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы на 1,16 т/га (при $HCP_{05} = 0,75$ т/га), в основном, вследствие их повышения в слое 0...10 см. При использовании биопрепаратов, измельченной побочной продукции сельскохозяйственных культур и азота установлено значимое возрастание запасов углерода гумуса в пахотном слое почвы на 1,79 т/га.

Внесение с измельченной побочной продукцией сельскохозяйственных культур азота минерального удобрения способствовало росту ЭПСУ в пахотном слое почвы в 2,3 раза, по сравнению с контролем, в котором величина этого показателя составляла 2,1 %. При использовании биопрепаратов с измельченной побочной продукцией сельскохозяйственных культур эффективность почвенного связывания органического углерода возрастала в 1,5 раза, достигая 7,7 %, а при совместном применении биопрепаратов и минерального

Табл. 1. Количество органического углерода, поступившего в пахотный слой почвы с побочной продукцией и пожнивно-корневыми остатками возделываемых культур в зернопропашном севообороте, т/га

Вариант	Глубина, см	Год, культура			
		2018, подсолнечник	2019, ячмень	2020, соя	2021, гречиха
Измельчённая побочная продукция – контроль (фон)	0...10	2,59±0,08	2,20±0,08	1,74±0,13	1,54±0,05
	10...20	0,93±0,04	1,10±0,05	1,46±0,11	0,75±0,03
	0...20	3,52±0,12	3,29±0,12	3,21±0,20	2,30±0,08
Фон + азот	0...10	4,63±0,13	2,44±0,11	1,86±0,07	2,84±0,11
	10...20	1,15±0,05	1,34±0,06	1,49±0,06	1,50±0,04
	0...20	5,78±0,17	3,78±0,16	3,35±0,13	4,34±0,15
Фон + биопрепараты	0...10	2,54±0,11	2,29±0,11	2,07±0,07	3,32±0,13
	10...20	1,31±0,07	1,15±0,04	1,23±0,05	1,21±0,04
	0...20	3,84±0,17	3,44±0,15	3,30±0,12	4,53±0,16
Фон + биопрепараты + азот	0...10	2,56±0,11	2,15±0,12	2,32±0,12	5,33±0,16
	10...20	1,30±0,07	1,04±0,05	1,36±0,08	1,47±0,05
	0...20	3,86±0,18	3,19±0,18	3,68±0,19	6,80±0,20

Табл. 2. Динамика запасов углерода гумуса в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного в зернопропашном севообороте в зависимости от внесения биопрепаратов и азотного минерального удобрения, т/га

Вариант (фактор А)	Глубина, см	Год (фактор В)		
		2018	2021	среднее
Измельчённая побочная продукция сельскохозяйственной культуры – контроль (фон)	0...10	29,10	29,29	29,20
	10...20	32,71	32,78	32,75
	0...20	61,81	62,07	61,94
Фон + азот	0...10	30,00	30,62	30,31
	10...20	31,77	32,02	31,90
	0...20	61,77	62,64	62,21
Фон + биопрепараты	0...10	28,19	29,22	28,71
	10...20	33,16	33,29	33,23
	0...20	61,35	62,51	61,93
Фон + биопрепараты + азот	0...10	28,19	29,60	28,90
	10...20	33,17	33,54	33,36
	0...20	61,35	63,14	62,25
Среднее	0...10	28,87	29,68	29,28
	10...20	32,70	32,91	32,81
	0...20	61,57	62,59	62,08
НСР ₀₅ для фактора А	0...10	0,32	0,49	
	10...20	0,33	0,38	
	0...20	0,59	0,69	
НСР ₀₅ для фактора В	0...10		0,46	
	10...20		0,22	
	0...20		0,75	
НСР ₀₅ для частных различий	0...10	0,37	0,50	
	10...20	0,39	0,40	
	0...20	0,74	0,85	

азота она увеличилась в 2 раза до 10,2 %, по сравнению с обработкой побочной продукции только азотным минеральным удобрением, а по сравнению с контролем, – соответственно в 3,7 и 4,9 раза.

В первые 1,5...2,0 месяца после применения биопрепаратов более эффективно, чем азотные удобрения, воздействуют на скорость разложения поступившей в почву измельченной побочной продукции возделываемых культур (рис.1). В среднем она возрастает, по сравнению с контролем, в 1,7 раза. При использовании биопрепаратов совместно с азотом величина этого показателя повышается в 1,8 раза, только азотного удобрения – в 1,4 раза.

Эффективность почвенной секвестрации органического углерода за 2018–2021 гг. в зернопропашном

севообороте в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного была очень тесно связана со средней скоростью разложения побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур, коэффициент корреляции (r) составил 0,98 при уровне значимости (λ) 0,05. Тесная корреляция выявлена между эффективностью почвенного связывания органического углерода (ЭПСУ) за 2018–2021 гг. в зернопропашном севообороте в пахотном слое чернозёма типичного слабоэродированного и средней эмиссией из почвы CO₂ – r=0,88 при λ =0,05; средняя – со средней целлюлолитической активностью – r=0,69 при λ =0,05.

Выводы. Наибольшее воздействие на эффективность процессов, связанных с секвестрацией почвенного углерода в черноземе типичном слабоэродированном, оказывает совместное применение биопрепаратов на основе *Trichoderma viride* и *Pseudomonas aureofaciens* с внесением азота и измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур (ЭПСУ = 10,2 %), несколько меньшее – только обработка биопрепаратами (ЭПСУ=7,7 %) или только внесение азота (ЭПСУ=5,0 %). Использование измельчённой побочной продукции сельскохозяйственных культур без азота и биопрепаратов по отдельности или в сочетании обеспечивает низкую эффективность связывания органического углерода в почве на уровне 2,1 %.

Установлены прямые корреляции эффективности связывания органического углерода в почве со средней скоростью разложения поступивших в пахотный слой побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур, средней эмиссии углекислого газа из почвы, целлюлолитической активностью почвы. По силе связи их можно расположить в следующем



Средняя скорость разложения поступивших в пахотный слой почвы в 2018–2021 гг. побочной продукции и пожнивно-корневых остатков возделываемых культур, сутки⁻¹.

убывающем порядке: средняя скорость разложения ($r=0,98$) > эмиссия CO_2 ($r=0,88$) > целлюлозолитическая активность почвы ($r=0,69$).

Показатель эффективности связывания (секвестрации) органического углерода в почве целесообразно применять для оценки используемых способов внесения биопрепаратов и удобрений, обработки почвы, севооборотов и агротехнологий.

Литература

1. Дегумусирование и почвенная секвестрация гумуса / Б.М. Козут, В.М. Семёнов, З.С. Артемьева и др. // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13. doi: 10.31857/S0002188121050070.
2. 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.
3. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon / U. Stockmann, M.A. Adams, J.W. Crawford, et al. // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99.
4. Мониторинг основных агрохимических показателей плодородия пахотных почв в Центральном-Черноземном районе России / Р.В. Некрасов, С.В. Лукин, Д.А. Куницын и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 9. С. 4–10.
5. Влияние развития эрозийных процессов на содержание и запасы органического вещества, урожайность озимой пшеницы и разнотравно-злаковых ассоциаций, возделываемых на темнокаштановых почвах // В.А. Стукало, Т.Г. Зеленская, Е.Е. Степаненко и др. // *Земледелие*. 2021. № 4. С. 20–23.
6. Качественный состав органического вещества дерново-подзолистого почв в длительном полевом опыте // Р.Ф. Байбеков, К.П. Хайдуков, А.А. Коваленко и др. // *Земледелие*. 2020. № 1. С. 8–11.
7. Sanderman J., Hengl T., Fiske J.G. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. P. 9575–9580. doi: 10.1073/pnas.1706103114.
8. Влияние агробиотехнологий на запасы и состав органического вещества чернозема типичного слабоэродированного / Н.П. Масютенко, А.В. Кузнецов, М.Н. Масютенко и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 10. С. 45–50.
9. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept / M.J. Castellano, K.E. Mueller, D.C. Olk, et al. // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. No. 9. P. 3200–3209. doi: 10.1111/gcb.12982.
10. Amundson R., Biardeau L. Soil carbon sequestration is an exclusive climate mitigation tool // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2018. Vol. 115. No. 46. P. 11652–11656.
11. Soil Quality Refurbishment through Carbon Sequestration in Climate Change: A Review / V. Kumar, K. Sharma, V. Sharma, et al. // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6. P. 1210–1223. doi: 10.20546/ijcmas.2017.605.131.
12. Сафин Р.И., Валиев А.Р., Колесар В.А. Современное состояние и перспективы развития углеродного земледелия в Республике Татарстан // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. №3 (63). С. 7–13.
13. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates / K.R. Olson, M.M. Al-Kaisi, R. Lal, et al. // *Soil Science Society of America Journal*. 2014. Vol. 78. P. 348–360. doi: 10.2136/sssaj2013.09.0412.
14. Агротехнологический потенциал управления органическим углеродом черноземов обыкновенных в зернопаропропашном севообороте / И.Т. Хусниев, В.А. Романенков, С.В. Пасько и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 3. С. 38–44.
15. Амиров М.Ф. Интенсивность усвоения углерода полевыми культурами в зависимости от технологии возделывания в условиях Республики Татарстан // *Вестник Казанского ГАУ*. 2021. №3 (63). С. 14–18.
16. Брескина Г.М., Чуян Н.А. Влияние приемов биологизации на урожайность сельскохозяйственных культур // *Земледелие*. 2020. № 3. С. 30–33.
17. Регистр технологий возделывания зерновых культур для Центрального Черноземья / Г.Н. Черкасов, И.Г. Пыхтин, А.В. Гостев и др. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2013. 249 с.
18. Регистр технологий возделывания масличных культур для Центрального Черноземья / Г.Н. Черкасов, И.Г. Пыхтин, А.В. Гостев и др. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН. 2014. 179 с.
19. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов / В.М. Семенов, Н.Б. Паутова, Т.Н. Лебедева и др. // *Почвоведение*. 2019. № 10. С. 1172–1184.
20. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат. 1986. 416 с.
21. Влияние биопрепаратов на почвенное органическое вещество, структурное и биологическое состояние чернозема типичного слабоэродированного: коллективная монография / Н.П. Масютенко, А.В. Кузнецов, Н.А. Чуян и др. Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2022. 217 с.
22. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 312 с.
23. Мишустин Е.В., Востров И.П., Петрова А.Н. Методика определения целлюлозоразрушающей активности почвы. М.: Наука, 1987. 375 с.

Поступила в редакцию 09.02.2023

После доработки 03.03.2023

Принята к публикации 14.03.2023