

УДК 631.417.1:631.582:631.81:631.445.24

АККУМУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА КУЛЬТУРАМИ СЕВООБОРОТА И ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПАХОТНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВОЙ

© 2023 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, М. Т. Васбиева¹, В. Р. Ямалтдинова¹, И. В. Казакова¹¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
614532 Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 26.02.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Представлены экспериментальные данные по накоплению и потерям органического углерода в дерново-подзолистой почве за 6 ротаций длительного стационарного опыта. Установлено, что за вегетационный период в процессе фотосинтеза растения ячменя ярового связывали в органические соединения 2.84–3.25 т С/га из атмосферы (10.3–11.6 т CO₂/га) за вегетационный период, клевера лугового второго года пользования – 4.23–5.19 т С/га (15.1–18.6 т CO₂/га) в зависимости от вариантов опыта. За ротацию 8-польного севооборота возделываемые культуры секвестрировали из атмосферы 82.28–99.31 т CO₂/га или 22.4–27.1 т С/га в зависимости от системы удобрения почвы. Длительное использование пашни без удобрений привело к уменьшению содержания углерода в почве на 13.5% относительно исходного уровня. Максимальным содержанием и запасами органического углерода характеризовалась почва стационарного опыта при насыщенности пашни навозом в дозе 20 т/га и эквивалентным количеством NPK. Содержание углерода за 6 ротаций севооборота увеличилось в слое 0–20 см на 15% от исходного, запасы углерода в этом слое возросли на 5 т/га, в слое 0–100 см – на 32.0 т/га. Средняя величина углеродпротекторной емкости исследованной почвы варьировала от 29 до 31 г С/кг в слое 0–20 см почвы и не зависела от примененных систем удобрения. Количество и качественный состав биомассы, поступающей в почву при ее различном удобрении, оказали существенное влияние на накопление органического углерода.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, длительный стационарный опыт, динамика углерода, секвестрация, углеродпротекторная емкость почвы

DOI: 10.31857/S0002188123060121, **EDN:** QPEMYE

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическая цель эффективного использования земель сельскохозяйственного назначения – накопление и сохранение органического вещества в почве. Для этого необходимо создание определенных условий землепользования: минимальная обработка почвы, внесение высоких доз органических удобрений, увеличение количества и улучшение качества биомассы, поступающей в почву, возделывание сельскохозяйственных культур и сортов, активно секвестрирующих углерод атмосферы, использование генетических ресурсов микроорганизмов, стимулирующих рост и развитие растений, и другие агротехнические приемы [1–3].

Наземная растительная биомасса и почвенное органическое вещество являются основными ре-

зервуарами-накопителями углерода, которые влияют на природные потоки CO₂ и его концентрацию в атмосфере [4, 5]. Углеродная емкость надземной растительной биомассы и пулы органического углерода в почвах имеют свои ограничения, связанные с почвенно-климатическими условиями региона исследований и применяемыми агротехнологиями [6–9]. Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности процессов фотосинтеза, которые наиболее активны у бобовых, обладающих более высокой ассимиляционной поверхностью листьев по сравнению со злаковыми культурами [10, 11].

Считается, что закрепиться в почве может лишь столько С_{орг}, сколько позволяют физико-химические свойства почвы [12, 13]. Способность почв стабилизировать и сохранять углерод кон-

тролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером 0.05 (0.02) мм [14]. Гранулометрический состав дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв указывает на высокий потенциал для насыщения их углеродом.

Применение различных систем удобрения неизбежно приводит к изменениям запасов органического вещества, следовательно, его потерю или накопление в пахотных почвах можно регулировать. Обобщение результатов длительных опытов Географической сети России показало, что минеральная система удобрения обеспечивала максимальную урожайность сельскохозяйственных культур и способствовала уменьшению потерь органического углерода, но полностью их не компенсировала. Органическая и органо-минеральная системы удобрения способствовали стабилизации содержания углерода и, в некоторых случаях, его повышению в почвах [15].

Цель работы — определить количество аккумулярованного атмосферного углерода в биомассе культур севооборота, выявить способность дерново-подзолистой почвы накапливать и удерживать органический углерод при применении различных систем удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в длительном стационарном опыте, расположенном на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве опытного поля “Пермского НИИСХ” — филиала ПФИЦ УрО РАН. Первая закладка опыта проведена в 1969 г., вторая — в 1970 г.

Схема опыта: контроль (без удобрений), навоз 10 т/га, навоз 20 т/га, NPK в дозе, эквивалентной навозу 10 т/га, NPK в дозе, эквивалентной навозу 20 т/га, навоз 5 т/га + NPK (эквивалент навоза 5 т/га), навоз 10 т/га + NPK (эквивалент навоза 10 т/га), навоз 20 т/га + NPK (эквивалент навоза 20 т/га) в год. Изученная схема в опыте сложилась со 2-й ротации севооборота (1977–1978 гг.).

Повторность четырехкратная. Размещение делянок рендомизированное. Делянки расположены в 4 яруса. Размер посевной делянки 115.5 м², учетной 80 м². Чередование культур в севообороте — пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го года пользования (г.п.), клевер 2-го г.п., ячмень, картофель, овес. Учетные культуры опыта в 2022 г. — ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.) сорта Родник Прикамья и клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) сорта Лобановский 2-го года пользования.

Почва участка перед закладкой опыта (среднее в 2-х закладках) характеризовалась среднекислой реакцией среды (рН_{KCl} 5.5) средним содержанием гумуса — 2.30%, *S* — 16.4, *H_r* — 3.4, *H_o* — 0.12 ммоль/100 г, средним содержанием фосфора и калия по Кирсанову — 160 и 158 мг/кг соответственно. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель. В посеве клевера учитывали последствие. Навоз вносили в севообороте в 2 приема — под озимую рожь и картофель.

Почвенные образцы отбирали из верхнего слоя почвы (0–20 см) и по профилю почвы до глубины 1 м с шагом 20 см, освобождали от живых корней, просеивали через сито диаметром 2 мм. Растительные образцы в полевом опыте отбирали в период уборки культуры.

Содержание *C_{орг}* в почве оценивали методом бихроматного окисления с титриметрическим окончанием. Углерод в растительных образцах определяли на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub, азот — по методу Кьельдаля.

Урожайность зерновых учитывали сплошным методом. При определении количества соломы и пожнивно-корневых остатков ячменя использовали рамочный метод (площадки по 0.16 м² в 3-х точках на делянке). Урожайность сена клевера определяли площадочным методом, количество пожнивных остатков и корней — рамочным методом в 3-х точках на делянке (площадь рамок 0.1 м²). Количество пожнивно-корневых остатков культур, возделываемых в 6-й ротации севооборота определяли по уравнениям Левина [16]. Расчет углеродпротекторной емкости почвы проводили по 3-м уравнениям, описанным в работе [17]. Статистическую обработку данных проводили по [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полевом стационарном опыте оптимизация минерального питания растений способствовала поддержанию содержания *C_{орг}* в почве на заметно более высоком уровне по сравнению с контрольным вариантом. Применение всех систем удобрения обеспечило к концу 6-й ротации севооборота увеличение содержания *C_{орг}* в почве относительно контрольного варианта на 10–30% (рис. 1). При насыщении пашни навозом 10 и 20 т/га в год наблюдали поддержание содержания органического углерода на исходном уровне. При минеральной системе удобрения поддержание содержания органического углерода на исходном уровне отмечено только при более высокой насыщенности пашни минеральными удобрениями — в варианте NPK

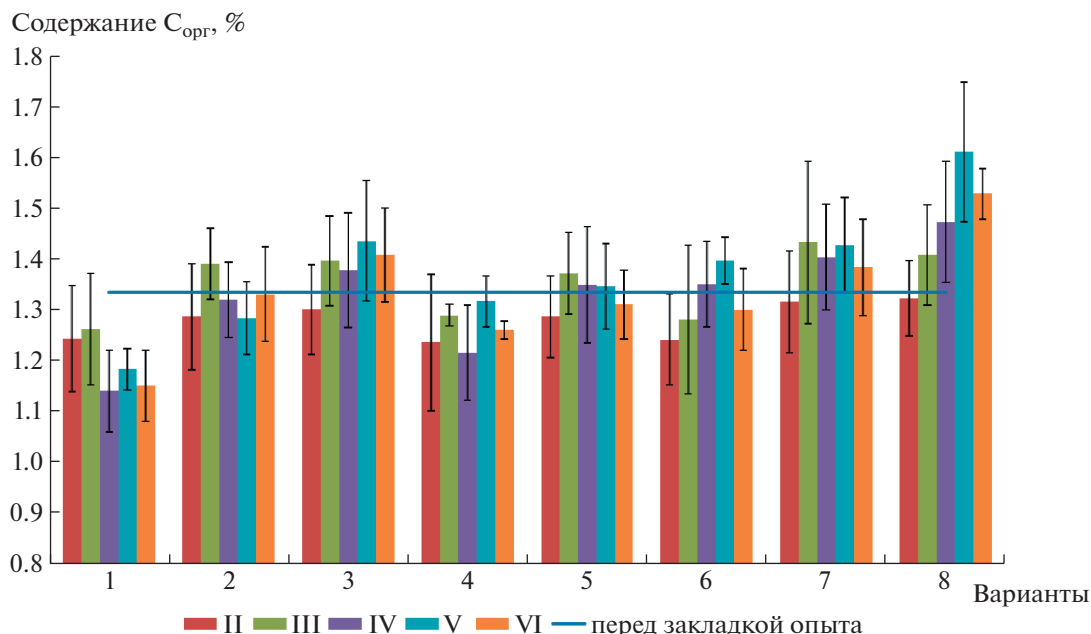


Рис. 1. Изменение содержания $C_{орг}$ в дерново-подзолистой почве (слой 0–20 см) при длительном применении органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения (среднее 2-х закладок, 2–6 ротации), %. Варианты: 1 – без удобрений, 2 – навоз 10 т/га, 3 – навоз 20 т/га, 4 – NPK в дозе, эквивалентной навозу 10 т/га, 5 – NPK в дозе, эквивалентной навозу 20 т/га, 6 – навоз 5 т/га + NPK в дозе, эквивалентной навозу 5 т/га, 7 – навоз 10 т/га + NPK в дозе, эквивалентной навозу 10 т/га, 8 – навоз 20 т/га + NPK в дозе, эквивалентной навозу 20 т/га в год. То же на рис. 2.

эквивалентно навозу 20 т/га, за счет увеличения количества поступавшего органического материала с пожнивными остатками. При более низкой насыщенности минеральными удобрениями в отдельные ротации севооборота наблюдали снижение содержания $C_{орг}$ до 10% от исходного уровня.

Применение органо-минеральной системы удобрения в варианте навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу 10 т/га обеспечило поддержание $C_{орг}$ на исходном уровне. В варианте с максимальной насыщенностью удобрениями навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу 20 т/га выявлено увеличение содержания органического углерода больше уровня при закладке опыта, его содержание возросло на 15%. Тренды динамики содержания органического углерода в ротациях могли быть обусловлены наличием аналитической ошибки, пространственной вариабельностью и сезонной составляющей.

Под почвенной секвестрацией органического углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество и его долговременное хранение в почвенном резервуаре с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу [5, 8, 18–21].

Для оценки почвенной секвестрации углерода в пахотных почвах используют такие методы как изменение валового содержания органического углерода или его запасов в слоях 0–20 см, 0–100 см за определенный период времени [5]. Считается, что наибольшие изменения этих показателей происходят в первые 1–2 ротации севооборота или первые 10–15 лет землепользования [22]. Далее в почве устанавливается новое квазистационарное состояние, т.е. достигается уравнивание процессов минерализации и гумусообразования [5, 23].

Результаты, полученные в длительном стационарном опыте, свидетельствовали о том, что в варианте без удобрений за 6 ротаций севооборота запасы органического углерода в пахотном слое почвы (0–20 см) без внесения удобрений снизились на 5.0 т/га (рис. 2).

Запасы $C_{орг}$ по профилю определяют интенсивность биологической активности всего корнеобитаемого слоя почвы, способствующей высвобождению необходимых для растений элементов питания и закреплению их избытка с последующей мобилизацией в зависимости от потребности растений и почвенной биоты [24].

Установлено, что длительное применение органической и органо-минеральной систем удоб-

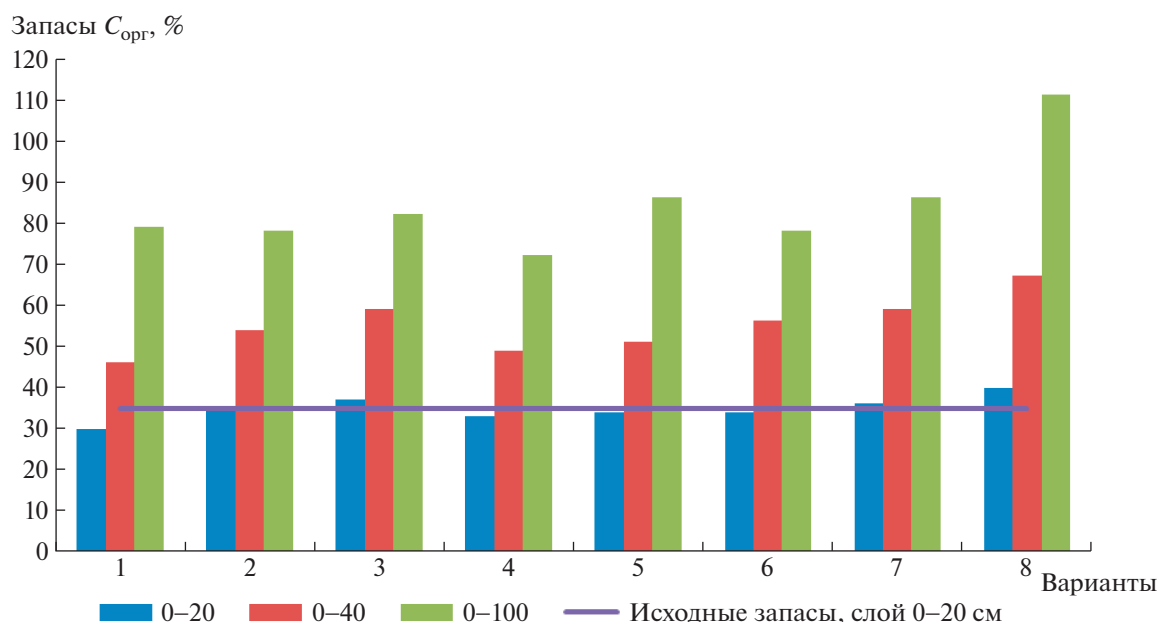


Рис. 2. Изменение запасов $C_{орг}$ в почве при длительном применении органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения (6-я ротация).

рения привело к увеличению запасов $C_{орг}$ в подпахотном слое, а в варианте с максимальным насыщением пашни органическими и минеральными удобрениями – навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу – наблюдали достоверное увеличение и в слое 40–60 см. Запасы $C_{орг}$ в этом варианте в слое 0–40 см возросли с 46 (без удобрений) до 67 т/га (на 50%), а в слое 0–100 см – с 79 до 111 т/га (на 40%). В вариантах навоз 10 и 20 т/га в год, навоз 5 и 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу отмечено повышение запасов $C_{орг}$ в слое 0–40 на 8–13 т/га (на 20–30%).

В засушливый вегетационный период 2022 г. в варианте без внесения удобрений было выявлено снижение содержания органического углерода в почве под посевами ячменя на 0.41 абс. %, под клевером 2-го года пользования – на 0.24 абс. % относительно исходного уровня (табл. 1).

Следует отметить, что насыщение почвы навозом дозой 20 т/га способствовало только поддержанию исходного уровня органического вещества. Более высокий уровень $C_{орг}$ обеспечило совместное применение навоза 20 т/га + эквивалентное количество NPK, прибавка к исходному содержанию составила 0.23–0.29 абс. %.

В 2022 г. урожайность клевера лугового в вариантах опыта значительно не менялась и варьировала в интервале 6.72–7.83 т/га ($HCP_{05} = 0.89$), количество пожнивных остатков было на уровне 1.45–2.94 т/га, корневых – 2.32–3.00 т/га (табл.

2). Учитывая содержание углерода в различных частях растений, определено количество углерода, секвестрированного клевером луговым 2-го года пользования из атмосферы на момент уборки урожая. Общий сбор углерода в зависимости от вариантов опыта составил 4.44–5.57 т/га. Таким образом, в процессе фотосинтеза клевер поглощал из атмосферы и преобразовывал в биомассу растений 17.3–26.2 т CO_2 /га. Зеленую массу с полей отчуждали, с пожнивно-корневыми остатками клевера в почву поступило от 1.54–1.85 т/га, которого было недостаточно для расширенного воспроизводства органического вещества почвы. Только дополнительное внесение органического вещества в полугумифицированном состоянии в составе навоза KPC обеспечило накопление $C_{орг}$. В вариантах навоз 10 т/га, навоз 20 т/га и навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу, навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу за весь период проведения опыта почвенная секвестрация (накопление углерода относительно исходного уровня) на этом поле составила соответственно 2.6, 1.3, 1.8 и 6.0 т/га соответственно.

Урожайность ячменя в 2022 г. составила 2.81–3.20 т/га ($HCP_{05} = 0.25$ т/га). Содержание углерода в зерне ячменя варьировало в интервале 40.4–41.3%. Таким образом, в зависимости от системы удобрения в зерне аккумулировалось атмосферного углерода от 1.16 до 1.31 т/га, в соломе – от 1.54 до 1.89 т/га, в корнях – ≈ 0.1 т/га. Общий сбор углерода за вегетационный период составил

Таблица 1. Содержание органического углерода в слое 0–20 см почвы под посевами ячменя и клевера лугового 2-го года пользования

Вариант	C _{орг} , %, перед закладкой опыта	Ячмень		Клевер 2-го г.п.*	
		C _{орг} , %	изменение C _{орг} , % относительно исходного уровня	C _{орг} , %	изменение C _{орг} , % относительно исходного уровня
Без удобрений	1.33	0.92	–0.41	1.09	–0.24
Навоз 10 т/га		1.28	–0.05	1.43	+0.10
Навоз 20 т/га		1.32	–0.01	1.38	+0.05
НРК эквивалентно навозу 10 т/га		1.13	–0.20	1.21	–0.12
НРК эквивалентно навозу 20 т/га		1.10	–0.23	1.14	–0.19
Навоз 5 т/га + НРК эквивалентно навозу 5 т/га		1.24	–0.09	1.25	–0.08
Навоз 10 т + НРК эквивалентно навозу 10 т/га		1.28	–0.05	1.40	+0.07
Навоз 20 т + НРК эквивалентно навозу 20 т/га		1.62	+0.29	1.56	+0.23
HCP ₀₅		0.09	–	0.11	–

*г.п. – год пользования. То же в табл. 2, 3.

2.80–3.26 т/га в зависимости от вариантов опыта, в пересчете на углекислый газ – 10.3–12.0 т CO₂/га.

Наиболее интенсивно секвестрация углерода растениями происходила в посевах клевера в вариантах навоз 20 т/га и НРК эквивалентно навозу 10 т/га и составила соответственно 5.18 и 5.57 т/га. Экспериментальным путем показано, что поглощение углекислого газа из атмосферы растениями более интенсивно происходило в посевах бобовых культур по сравнению со злаковыми.

Поступающая в почву биомасса ячменя (солома, корни) характеризовалась высоким содержанием углерода и низким – азота, соотношение С : N составило в соломе 43.1–85.1, в корнях – 36.0–93.6. При таком соотношении растительная масса трудно и медленно разлагается микроорганизмами. Наиболее доступной была для разложения микроорганизмами солома и корневая система растений при минеральной системе удобрения (варианты НРК эквивалентно навозу 10 и 20 т/га). В этих вариантах процесс минерализации органического вещества в почве преобладал над его накоплением. Почвенная секвестрация углерода в севообороте после уборки ячменя отмечена в варианте при совместном применении навоза 20 т/га + НРК эквивалентно навозу 20 т/га. Прирост содержания органического углерода относительно исходного на этом поле на момент обследования составлял 0.29 абс. % или 7.6 т/га.

Количество поступившего в почву C_{орг} ежегодно с побочной продукцией (соломой) и пожнивными корневыми остатками в вариантах с более низкими дозами навоза и НРК поддерживало установившийся уровень содержания органического вещества, что соответствовало количеству минерализованного углерода в год [23, 25].

По итогам 6-ти ротаций 8-польного севооборота более высокое накопление углерода в почве длительного стационарного опыта выявлено в почве при насыщении почвы навозом в дозе 20 т/га и совместном применении навоза 20 т/га и эквивалентного количества НРК. В этом варианте накопление органического углерода в слое 0–40 см увеличилось на 11 т/га, в слое 0–100 см – на 32 т/га больше, чем в варианте без удобрений. Следовательно, углерод будет длительно храниться в глубинных слоях почвы, т.е. находиться на депонировании.

Расчетные данные показали, что за 6-ю ротацию 8-польного севооборота возделываемые культуры секвестрировали из атмосферы углекислого газа (CO₂) 82.3–99.3 или углерода 22.4–27.1 т/га в зависимости от системы удобрения почвы (табл. 3).

Таким образом, в почве длительного стационарного опыта выявлены 3 разнонаправленных тенденции к изменению органического углерода по сравнению с исходным уровнем при смене си-

Таблица 2. Количество и качество биомассы, поступающей в почву в посевах клевера лугового и ярового ячменя и общий сбор углерода за вегетационный период

Вариант	Содержание углерода и азота в биомассе															Общий сбор углерода, т/га
	Основная продукция (зеленая масса, зерно)					Побочная продукция (солома)					Пожнивно-корневые остатки					
	т/га	С		N, %	C : N	т/га	С		N, %	C : N	т/га	С		N, %	C : N	
		%	т/га				%	т/га				%	т/га			
Полевой 8-польный севооборот (клевер 2-го г.п., 2022 г.)																
Без удобрений	6.72	42.0	2.70	1.88	22.4	1.93	41.8	0.81	1.60	26.1	3.00	40.6	1.22	1.58	26.6	4.73
Навоз 10 т/га	6.96	41.6	2.90	2.18	19.1	1.45	41.4	0.60	1.70	24.3	2.32	40.6	0.94	1.73	23.5	4.44
Навоз 20 т/га	7.83	41.9	3.28	2.15	19.5	1.88	41.1	0.77	1.75	23.5	2.82	40.2	1.13	1.78	22.6	5.18
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	7.52	41.6	3.13	2.10	19.8	2.94	40.6	1.19	1.70	23.9	3.09	40.3	1.25	1.95	20.7	5.57
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	7.28	41.4	3.01	2.25	19.7	2.01	39.8	0.80	1.80	22.1	2.22	40.2	0.89	2.05	19.6	4.70
Навоз 5 т/га + НРК экви- валентно навозу 5 т/га	7.03	41.6	2.92	2.20	18.4	1.65	40.2	0.66	1.70	23.7	2.94	40.5	1.19	1.63	24.9	4.77
Навоз 10 т + НРК эквива- лентно навозу 10 т/га	7.62	41.3	3.14	2.13	19.4	1.83	40.1	0.73	1.75	22.9	2.42	40.2	0.97	1.80	22.3	4.84
Навоз 20 т + НРК эквива- лентно навозу 20 т/га	7.72	41.2	3.18	2.28	18.1	1.58	40.0	0.63	1.90	21.0	2.46	40.4	0.99	1.85	21.8	4.80
НСР ₀₅	0.89	0.3	—	0.16	—	0.45	0.5	—	0.08	—	0.29	0.6	—	0.11	—	—
Полевой 8-польный севооборот (ячмень, 2022 г.)																
Без удобрений	2.93	41.0	1.20	2.00	16.1	3.93	43.0	1.69	0.60	71.7	0.29	40.3	0.12	0.43	93.6	3.01
Навоз 10 т/га	2.95	40.7	1.20	2.10	19.4	3.63	42.5	1.54	0.50	85.1	0.26	40.0	0.10	0.60	66.7	2.84
Навоз 20 т/га	3.12	40.7	1.27	2.73	14.9	4.36	43.4	1.89	0.78	55.6	0.24	39.8	0.10	0.63	63.2	3.26
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	3.06	40.7	1.24	2.10	19.4	3.64	42.8	1.56	0.80	53.6	0.24	39.7	0.10	1.10	36.1	2.90
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	2.81	40.4	1.14	2.18	18.5	3.71	42.2	1.56	0.90	46.8	0.25	39.3	0.10	0.88	44.6	2.80
Навоз 5 т/га + НРК экви- валентно навозу 5 т/га	3.20	40.8	1.31	1.90	21.5	4.26	42.1	1.79	0.50	84.2	0.28	39.4	0.11	0.60	65.7	3.21
Навоз 10 т + НРК эквива- лентно навозу 10 т/га	3.15	41.0	1.29	2.00	20.5	4.32	41.3	1.78	0.65	63.5	0.24	39.2	0.08	0.80	49.0	3.15
Навоз 20 т + НРК эквива- лентно навозу 20 т/га	2.80	41.3	1.16	2.95	14.0	4.62	41.0	1.89	0.95	43.1	0.31	39.1	0.12	1.03	37.9	3.17
НСР ₀₅	0.25	0.2	—	0.14	—	0.38	0.6	—	0.08	—	0.02	0.6	—	0.10	—	—

Таблица 3. Секвестрация атмосферного углерода сельскохозяйственными культурами за 6-ю ротацию севооборота (среднее 2-х полей)

Вариант	Урожайность/сбор углерода	Рожь		Пшеница		Клевер 1-го г.п.		Клевер 2-го г.п.		Ячмень		Картофель		Овес		Общий сбор C/CO ₂ , т/га
		зерно	солома + ПКО	зерно	солома + ПКО	сено	ПКО	сено	ПКО	зерно	солома + ПКО	Клубни	Ботва + ПКО	зерно	солома + ПКО	
Без удобрений	1	3.2	8.1	2.5	6.31	3.3	4.26	3.0	4.19	3.6	7.16	2.8	1.34	1.6	3.84	22.4/82.3
	2	1.34	3.27	1.05	2.58	1.38	1.74	1.25	1.71	1.48	2.96	1.15	0.54	0.68	1.29	
Навоз 10 т/га	1	3.8	9.1	2.8	6.74	3.2	4.24	3.0	4.21	3.8	7.36	3.2	1.54	1.6	4.14	23.9/87.8
	2	1.59	3.66	1.18	2.75	1.33	1.74	1.25	1.72	1.56	3.04	1.31	0.62	0.68	1.50	
Навоз 20 т/га	1	4.1	9.6	3.0	7.12	3.5	4.32	3.3	4.26	3.8	7.66	3.4	1.64	1.8	4.33	25.3/92.7
	2	1.72	3.89	1.26	2.91	1.46	1.77	1.38	1.74	1.56	3.17	1.40	0.66	0.77	1.58	
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	1	4.0	9.5	3.4	7.58	3.1	4.23	3.3	4.26	3.8	7.56	4.1	1.96	1.8	4.33	25.7/94.3
	2	1.68	3.83	1.43	3.10	1.29	1.73	1.38	1.74	1.56	3.13	1.68	0.79	0.77	1.58	
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	1	4.2	9.7	3.4	7.78	3.1	4.22	3.8	4.39	4.1	8.33	4.0	1.92	2.1	4.75	26.9/98.5
	2	1.76	3.92	1.43	3.18	1.29	1.73	1.58	1.80	1.68	3.44	1.64	0.78	0.89	1.73	
Навоз 5 т/га + НРК эквивалентно навозу 5 т/га	1	4.1	9.8	3.2	7.30	3.5	4.32	3.7	4.36	3.9	7.42	4.9	2.36	1.6	4.14	26.4/96.7
	2	1.72	3.94	1.35	2.98	1.46	1.77	1.54	1.78	1.60	3.06	2.01	0.96	0.68	1.50	
Навоз 10 т/га + НРК эквивалентно навозу 10 т/га	1	4.2	10.11	3.5	8.12	3.4	4.29	3.9	4.41	3.8	7.26	4.3	1.96	1.9	4.37	26.8/98.3
	2	1.76	4.09	1.47	3.32	1.42	1.76	1.63	1.81	1.56	3.00	1.77	0.79	0.81	1.59	
Навоз 20 т/га + НРК эквива- лентно навозу 20 т/га	1	4.4	10.3	3.3	8.04	3.4	4.29	3.9	4.40	3.5	7.30	4.2	2.02	2.02	5.19	27.1/99.3
	2	1.85	4.15	1.39	3.28	1.42	1.76	1.63	1.80	1.43	3.02	1.73	0.82	0.86	1.92	

Примечание. В графе 1 – урожайность основной и побочной продукции, т/га; 2 – сбор углерода, т/га.

Таблица 4. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, слой 0–20 см

Вариант	Фракции частиц (мм), % от массы почвы		Углеродпротекторная емкость почвы, г С/кг почвы			
	сумма частиц <0.02	сумма частиц <0.05	CPC_1 (<0.02 мм)	CPC_2 (<0.02 мм 2 : 1)	CPC_4 (<0.05 мм 2 : 1)	CPC среднее
Без удобрений	65.2	72.0	28	31	30	30
Навоз 10 т/га	68.9	76.9	30	32	31	31
Навоз 20 т/га	65.7	73.0	28	31	30	30
НРК эквивалентно навозу 10 т/га	65.7	73.2	28	31	30	30
НРК эквивалентно навозу 20 т/га	66.7	74.7	29	31	30	30
Навоз 5 т/га + НРК экви- валентно навозу 5 т/га	67.8	75.6	29	32	31	30
Навоз 10 т + НРК экви- валентно навозу 10 т/га	64.6	71.7	28	30	30	29
Навоз 20 т + НРК экви- валентно навозу 20 т/га	65.2	72.7	28	31	30	30

стемы удобрения: 1 — уменьшение содержания $C_{орг}$ в отсутствие удобрений на 13.5%, 2 — сохранение количества $C_{орг}$ при насыщении почвы навозом КРС 10 т/га и совместном применении навоза КРС 10 т/га и минеральных удобрений в эквивалентном количестве, обеспечивающих достаточное поступление биомассы и полугумифицированного органического вещества в почву, 3 — увеличение содержания $C_{орг}$ при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га и эквивалентным количеством НРК на 15%.

Почвенную секвестрацию углерода и его длительное хранение (накопление в глубинных горизонтах) наблюдали при насыщении дерново-подзолистой почвы навозом КРС 20 т/га совместно с эквивалентным количеством НРК.

Почвенно-климатические условия региона исследования влияли на углеродную емкость надземной растительной биомассы и пулы органического углерода в почвах, лимитировали процесс сорбции органического углерода минеральной фазой почвы [5, 7, 8].

Углеродпротекторная емкость почвы (carbon protective capacity (CPC)) или углероддепонирующий потенциал почвы — это количество стабилизированного органического вещества в почве [14]. Способность почв стабилизировать и сохранять секвестрируемый из атмосферы углерод контролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером <0.05 (0.02) мм. Содержание $C_{орг}$ в гранулометрических фракциях пыли и глины с разме-

ром частиц <0.02 мм и частиц <0.05 мм предложено считать мерой CPC [12, 13].

Величина углеродпротекторной емкости исследованной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при различных системах удобрения рассчитана по 3-м уравнениям, описанным в работе [17], и представлена в табл. 4. Средняя величина CPC варьировала от 29 до 31 г С/кг в слое 0–20 см почвы и практически не зависела от примененных удобрений. Если рассчитать углеродпротекторную емкость почвы в т С/га, то CPC исследованной пахотной почвы составляла 76–80 т $C_{орг}$ /га в слое 0–20 см. Насыщенность пахотного слоя исследованной почвы органическим углеродом составляла ≈50%. Минимальной насыщенностью органическим углеродом характеризовалась почва варианта опыта без внесения удобрений. У пахотных дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв выявлен высокий потенциал для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве.

ВЫВОДЫ

1. В длительном стационарном опыте выявлены 3 разнонаправленных тенденции к изменению содержания органического углерода в почве по сравнению с исходным уровнем при смене систем удобрения: 1 — уменьшение содержания $C_{орг}$ в отсутствие удобрений на 13.5%, 2 — сохранение содержания $C_{орг}$ при насыщении почвы навозом КРС 10 т/га и совместном применении навоза КРС 10 т/га и минеральных удобрений в эквива-

лентном количестве, обеспечивающих достаточное поступление растительной биомассы и гумифицированного органического вещества навоза в почву, 3 — увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га и совместном применении навоза КРС 20 т/га и эквивалентного количества НРК на 15%.

2. Установлено, что растения ячменя ярового в процессе фотосинтеза связывали в органические соединения углерод из атмосферы в количестве 2.84–3.25 т/га (10.3–11.6 т $\text{CO}_2/\text{га}$) за вегетационный период, клевера лугового 2-го года пользования — 4.23–5.19 т С/га (15.1–18.6 т $\text{CO}_2/\text{га}$) в зависимости от систем удобрения почвы. За 6-ю ротацию 8-польного севооборота возделываемые культуры секвестрировали из атмосферы 82.3–99.3 т $\text{CO}_2/\text{га}$ или 22.4–27.1 т С/га в зависимости от системы удобрения почвы.

3. Накопление органического углерода относительно исходного содержания за 6 ротаций севооборота на 5.0 т/га в слое 0–20 см наблюдали при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га и совместном применении навоза КРС 20 т/га + эквивалентное навозу количество НРК. В этом варианте накопление органического углерода в слое 0–40 см увеличилось на 11 т/га, в слое 0–100 см — на 32 т/га больше, чем в варианте без удобрений. Следовательно, углерод будет длительно храниться в глубинных слоях почвы, т.е. находится на депонировании.

4. Величина углеродпротекторной емкости исследованной дерново-подзолистой почвы практически не зависела от примененных систем удобрения и находилась в диапазоне 29.0–31.0 г С/кг. Насыщенность углеродом пахотного слоя почвы составляла $\approx 50\%$. Минимальной насыщенностью органическим углеродом характеризовалась неудобренная дерново-подзолистая почва длительного стационарного опыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заварзин Г.А., Кудяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // *Вестн. РАН*. 2006. Т. 76. № 1. С. 14–29.
2. Кудяров В.Н. Почвенно-биохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121.
3. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС. 2015. С. 233.
4. Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. С. 315.
5. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумификация и почвенная секвестрация углерода // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13.
6. Кудяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (Аналит. обзор) // *Почвоведение*. 2018. № 6. С. 634–658.
7. Кудяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // *Почвоведение*. 2015. № 9. С. 1049–1060.
8. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // *Почвоведение*. 2008. № 7. С. 819–832.
9. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: Агрохимические аспекты // *Агрохимия*. 2015. № 11. С. 3–12.
10. Благовещенский Г.В., Конанчук В.В., Тимошенко С.М. Углеродная секвестрация в травяных экосистемах // *Кормопроизводство*. 2019. № 9. С. 17–21.
11. Стрижева Ф.М., Царева Л.Е., Тимов Ю.Н. Растениеводство: учеб. пособ. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. С. 219.
12. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // *Plant and Soil*. 1997. V. 191. P. 77–87.
13. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil*. 2002. V. 241. P. 155–176.
14. Kogut B.M., Semenov V.M. Estimation of soil saturation with organic carbon // *Dokuchaev Soil Bul.* 2020. V. 102. P. 103–124.
15. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // *Почвоведение*. 2020. № 12. С. 1521–1536.
16. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в посевах полевых культур и его определение по урожаю основной продукции // *Агрохимия*. 1977. № 8. С. 36–42.
17. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // *Почвоведение*. 2022. № 8. С. 1046–1055.
18. Бойцова Л.В., Непримерова С.В., Зинчук Е.Г. Влияние различных систем удобрений на секвестрацию органического углерода в дерново-глеевой почве // *Пробл. агрохим. и экол.* 2019. № 4. С. 15–20.
19. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and the global carbon cycle // *Biogeochemistry*. 2000. V. 48. P. 7–20.
20. Wiesmeier M., Hübner R., Spörlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., von Lütow M., Kögel-Knabner I. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic

- carbon saturation // *Global Change Biol.* 2014. V. 20 (2). P. 653–665.
21. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // *Плодородие*. 2021. № 6. С. 38–41.
 22. Завьялова Н.Е. Гумусное состояние дерново-подзолистых почв Предуралья при различном землепользовании и длительном применении удобрений и извести: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: ВНИИА, 2007. С. 36.
 23. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой // *Плодородие*. 2021. № 5. С. 3–7.
 24. Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Беличенко М.В., Рухович О.В., Иванова О.И. Влияние длительного применения различных систем удобрения на органофиль основных зональных типов почв. Сообщ. 1. Дерново-подзолистые почвы // *Плодородие*. 2019. № 2(107). С. 3–7.
 25. Körschens M. Soil–Humus–Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”. 2018. P. 12.

Accumulation of Atmospheric Carbon by Crop Rotation Crops and the Effect of Fertilizer Systems on the Accumulation of Organic Carbon by Arable Sod-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova^{a,*}, M. T. Vashbieva^a, V. R. Yamaltdinova^a, and I. V. Kazakova^a

^a Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences
ul. Kultury 12, Perm Krai, d. Lobanovo 614532, Russia

^{*}E-mail: nezavyalova@gmail.com

Experimental data on the accumulation and loss of organic carbon in sod-podzolic soil over 6 rotations of a long stationary experiment are presented. It was found that during the growing season during photosynthesis, spring barley plants were bound into organic compounds 2.84–3.25 t/ha from the atmosphere (10.3–11.6 t CO₂/ha) during the growing season, meadow clover of the second year of use – 4.23–5.19 t C/ha (15.1–18.6 t CO₂/ha) depending on the experience options. During the rotation of the 8-field crop rotation, cultivated crops were sequestered from the atmosphere 82.28–99.31 tons of CO₂/ha or 22.4–27.1 tons C/ha, depending on the soil fertilization system. Long-term use of arable land without fertilizers led to a decrease in the carbon content in the soil by 13.5% relative to the initial level. The soil of the stationary experiment was characterized by the maximum content and reserves of organic carbon when the arable land was saturated with manure at a dose of 20 t/ha and an equivalent amount of NPK. The carbon content for 6 rotations of crop rotation increased in the 0–20 cm layer by 15% of the initial one, carbon reserves in this layer increased by 5 t/ha, in the 0–100 cm layer – by 32.0 t/ha. The average value of the carbon-protective capacity of the studied soil varied from 29 to 31 g/kg in a layer of 0–20 cm of soil and did not depend on the applied fertilizer systems. The quantity and qualitative composition of biomass entering the soil with its various fertilizers had a significant impact on the accumulation of organic carbon.

Key words: sod-podzolic soil, long-term stationary experience, carbon dynamics, sequestration, carbon-protective capacity of the soil.