

УГЛЕРОДПРОТЕКТОРНАЯ ЕМКОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АГРОЭКОСИСТЕМ ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2022 г. Н. Е. Завьялова*

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский край, 614532 Россия

*e-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 09.03.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

Количество стабилизированного и защищенного от разложения органического вещества в почве характеризует углеродпротекторную емкость почвы (Carbon Protection Capacity-СРС). Представлены экспериментальные данные по накоплению и потерям органического углерода в дерново-подзолистой почве (Eutric Albic Retisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)) агроценозов Предуралья и дана характеристика целинных аналогов. Наибольшее уменьшение $C_{\text{орг}}$ отмечено в бесменном чистом пару, скорость потери углерода в слое 0–20 см в первые 7 лет составила 0.04% С/год или 1.0 т С/(га год). Среди пахотных почв максимальным содержанием и запасами органического углерода характеризуется почва под многолетней бобовой культурой – козлятником восточным (*Galéga orientalis*). За 30 лет бесменного возделывания козлятника восточного запасы углерода в слое 0–20 см увеличились на 5.4 т/га, наблюдается увеличение гумусово-аккумулятивного горизонта почвы (A1) до 36 см относительно целинной почвы злаково-разнотравного луга (22 см). Естественные почвы находятся в равновесном состоянии, содержание $C_{\text{орг}}$ под смешанным лесом в слое 3–20 см составляет $2.69 \pm 0.02\%$, злаково-разнотравным лугом в слое 0–20 см – $1.25 \pm 0.03\%$, запасы – 41.2 и 31.2 т С/га соответственно. Средняя величина углеродпротекторной емкости исследуемой почвы варьирует от 26.1 до 32.9 г С/кг в слое почвы 0–20 см и практически не зависит от приемов ее использования. Значимыми факторами, оказывающими влияние на содержание органического углерода, являются количество и качественный состав биомассы, поступающей в почву агроценозов.

Ключевые слова: целинные почвы (лес, луг), севооборот, бесменный чистый пар, органический углерод, секвестрация

DOI: 10.31857/S0032180X22080160

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с проблемой глобального изменения климата много внимания уделяется оценке возможной секвестрации углерода, повышению углеродсеквестрирующей способности агроценозов [6, 12–18, 21, 26, 27, 30–32]. 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 [3, 23, 28, 33].

Основными резервуарами-накопителями углерода, которые влияют на природные потоки CO_2 и его концентрацию в атмосфере, являются наземная растительная биомасса и почвенное органическое вещество. Углеродный баланс экосистем – это интегральный показатель их функцио-

нирования, он отражает интенсивность основных процессов, происходящих в живых системах: фотосинтеза и дыхания. Дисбаланс между продукцией и деструкцией органического углерода определяет то его количество, которое выводится из цикла $C_{\text{орг}}$ и выражается в изменении концентрации углекислого газа в атмосфере [10]. Важнейшая роль природных экосистем – регуляция цикла углерода. Особо необходимо регулировать потерю или накопление органического вещества в пахотных почвах агроценозов, которое является основным и долговременным резервуаром для стока углерода [12, 20, 22]. Любые изменения в системе землепользования неизбежно приводят к изменениям запасов органического вещества [14].

Считается, что закрепиться в почве может лишь столько $C_{\text{орг}}$, сколько позволяют физико-химические свойства почвы [27]. Вследствие этого реальные размеры секвестрации возможны только до определенного уровня, соответствующего порогу

насыщения почвы органическим углеродом, выше которого поступление свежего органического вещества не приводит к дополнительному накоплению $C_{\text{орг}}$ [25, 26, 34, 35]. Процесс образования устойчивых органо-минеральных комплексов, вероятно, лимитируется биоклиматическим потенциалом конкретной зоны [12, 14]. Количество стабилизированного органического вещества в почве характеризует углеродпротекторную емкость почвы (углероддепонирующий потенциал почвы (Carbon Protection Capacity CPC)) [29].

Данные исследований ведущих российских и зарубежных ученых показали, что способность почв стабилизировать и сохранять CO_2 атмосферы контролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером <0.05 (0.02) мм. Чем больше насыщенность этих фракций органическим углеродом, тем меньше углеродсеквестрирующий потенциал почвы. Мерой CPC предложено считать содержание $C_{\text{орг}}$ в гранулометрических фракциях пыли и глины с размером частиц <0.02 мм и частиц <0.05 мм [14, 16, 27, 28].

Почвы являются основным источником получения сельскохозяйственной продукции и сырья для некоторых отраслей промышленности. Более 90% продуктов питания человечество получает при эксплуатации сельскохозяйственных угодий. Однако сельскохозяйственное производство является одним из источников парниковых газов, меняющих климат на планете. В то же время сельское хозяйство может применять технологии, обеспечивающие уменьшение поступления парниковых газов из атмосферы при внедрении регенеративного (восстановительного) сельского хозяйства за счет методов, обеспечивающих восстановление почв в процессе использования [2, 19, 20, 36].

Цель исследования – определить накопление и потери органического углерода в зависимости от количества и качественного состава биомассы, формирующиеся в процессе фотосинтеза и поступающей в почву, и рассчитать углеродпротекторную емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Природно-климатические условия Предуралья. Территория Пермского края занимает площадь 16023.6 тыс. га. В структуре земельного фонда площадь земель сельскохозяйственного назначения составляет 4068.9 тыс. га или 25.4% территории. В составе земель сельскохозяйственного назначения сельскохозяйственные угодья занимают 2365.2 тыс. га. Регион расположен в лесной зоне, основным типом растительности в нем являются леса, занимающие 10425.1 тыс. га или 65% терри-

тории края. Площадь пашни на 1 января 2021 г. составляет 1793.8 тыс. га [4].

Земли Пермского НИИСХ расположены в IV агроклиматическом районе Пермского края. В физико-географическом отношении район находится в подзоне южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. В соответствии с почвенно-экологическим районированием территория Пермского края относится к Вятско-Камской почвенной провинции [1]. Климат умеренно континентальный с холодной, продолжительной, снежной зимой и теплым коротким летом. Сумма средних суточных температур $>10^\circ\text{C}$ составляет 1700–1900 $^\circ\text{C}$. Длительность периода активной вегетации с температурой $>10^\circ\text{C}$ в среднем 115 дней, с температурой $>15^\circ\text{C}$ – 60 дней. Район относится к зоне достаточного увлажнения: ГТК 1.4, осадков за год выпадает 470–500 мм, испаряемость с поверхности почвы составляет около 340 мм. Число дней со снежным покровом в среднем составляет 176 [5].

Характеристика естественных экосистем и агроценозов. Исследования проводили на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве (Eutric Albic Retisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)) в естественных экосистемах (смешанный лес и злаково-разнотравный луг) и агроэкосистемах (под многолетней бобовой культурой козлятником восточным (*Galéga orientalis*), паром и в восьмипольном севообороте на длительном стационарном опыте).

Лесной ценоз представлен смешанными породами деревьев, возраст которых составляет 80–100 лет, и характеризуется хорошо развитым травянистым ярусом. В древостое широко представлены береза повислая (*Bétula péndula*), осина обыкновенная (*Pópulus trémula*), режа клен ясенелистный (*Ácer negúndo*), из хвойных – ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb), сосна обыкновенная (*Pínus sylvéstris*). Хорошо развит второй ярус и подлесок из рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*), липы крупнолистной (*Tilia platyphyllos* Scop), ольхи черной (*Alnus glutinosa*), черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill) и др. В напочвенном покрове преобладают кисличные, кислично-папоротниковые и разнотравно-злаково-папоротниковые ассоциации. Почва не испытывает механических нагрузок, отчуждение биомассы не происходит.

Луговой ценоз – некосимый неудобряемый луг. Видовой состав травостоя естественного злаково-разнотравного луга: 62% злаковые, 13% бобовые, 25% разнотравье. Травостой не отчуждается. Избыточное накопление отмершей надземной массы приводит к обеднению видовой разнообразия. В результате естественного отбора сохранились виды растений, наиболее жизнеспособные в данных почвенно-климатических условиях (ежа сборная (*Dactylis glomerata*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), овсяница

луговая (*Festuca pratensis*), хвощ полевой (*Equisetum arvense*), щавель конский (*Rumex confertus*), подмаренник цепкий (*Galium aparine*) и др.). Наземная масса не отчуждается.

Агроценозы представлены четырьмя вариантами:

1. Бессменный чистый пар (40 лет), без удобрений.

2. Севооборот полевой восьмипольный – контрольный вариант длительного стационарного опыта, без удобрений.

3. Севооборот полевой восьмипольный, с внесением удобрений N150K150P150. Длительный полевой опыт был заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ – филиале ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве со следующими характеристиками (слой 0–20 см): pH_{KCl} – 5.6; гидролитическая кислотность – 2.0, обменная – 0.025, сумма обменных оснований – 21.0 смоль(экв)/кг, содержание гумуса по Тюрину – 2.20%, подвижных форм фосфора – 175, обменного калия (по Кирсанову) – 203 мг/кг почвы. Севооборот восьмипольный с чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, ячмень, овес. Перед закладкой опыта почва была известкована по полной дозе гидролитической кислотности. Органические удобрения не вносили.

4. Травостой козлятника 1988 г. посева используется для получения семян. После уборки семян солома отчуждается. По литературным данным [10, 12], козлятник улучшает агрофизические свойства, предотвращает эрозионные процессы и очищает почву от сорняков. Посевы козлятника восточного с годами не изреживаются, а загущаются, количество корневых и пожнивных остатков увеличивается, следовательно, в почве повышается содержание гумуса. Важнейшая особенность этой ценной кормовой культуры – высокая продуктивность надземной и подземной частей, в результате чего повышается поступление в почву углерода и азота. До 2000 г. под козлятник восточный вносили минеральные удобрения в дозе Р60К60, с 2001 г. по настоящее время удобрения не вносятся.

Отбор проб. Почвенные образцы, отобранные в конце августа 2017 г. методом конверта из верхнего слоя почвы (0–20 см), под лесом (3–20 см), освобождали от живых корней, просеивали через сито диаметром 2 мм. Растительные образцы в полевом опыте и на козлятнике восточном отбирали в период уборки культуры, на лугу – в период массового цветения трав.

Методы исследований. 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. Запасы органического углерода рассчитывали с учетом плотности слоя почвы 0–20 см, которая варьировала от 0.9 под лесом до 1.30 г/см³ под посевами козлятника восточного.

Расчет углеродпротекторной емкости проводили по трем уравнениям. В работе [28] зависимость СРС от доли гранулометрических частиц <0.02 мм выражена уравнением линейной регрессии (уравнение (1)):

$$CPC_1 = 4.09 + 0.37S_1, \quad (1)$$

где CPC_1 – углеродпротекторная емкость почвы, г С/кг; S_1 – доля гранулометрических частиц <0.02 мм, % от массы почвы.

По методу Качинского при определении гранулометрических фракций не проводится определение частиц размером <0.02 мм, пересчет их содержания проводили по кумулятивной кривой распределения содержания гранулометрических фракций в зависимости от логарифма диаметра частиц. В работе [34] предложено оценивать СРС почвы по доле частиц <0.05 мм, а также учитывать минералогический состав почвы, поскольку при одном и том же содержании фракций пыли и глины почвы с доминированием 2 : 1 минералов (преобладание в минеральном составе почвы глины) способны стабилизировать больше углерода, чем почвы с 1 : 1 минералами (преобладание в минеральном составе почвы оксидов железа и алюминия). В исследуемой дерново-подзолистой почве Предуралья доминируют глинистые минералы [24], в связи с этим в работе использованы следующие уравнения:

$$CPC_2 = 3.86 + 0.41S_2, \quad (2)$$

$$CPC_3 = 14.76 + 0.21S_3, \quad (3)$$

где СРС – углеродпротекторная емкость почвы, г С/кг почвы; S_2 – доля гранулометрических частиц <0.02 мм с доминированием 2 : 1 минералов, % от массы почвы; S_3 – доля гранулометрических частиц <0.05 мм с доминированием 2 : 1 минералов, % от массы почвы.

При оценке содержания углерода определяли доверительный интервал при уровне значимости $\alpha = 0.05$ с использованием программы Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание и запасы органического углерода в естественных экосистемах. Исследуемая дерново-подзолистая почва характеризуется очень низким и низким содержанием органического углерода, которое в зависимости от приемов землепользования изменяется от 0.78–2.69% в верхнем 0–20 см слое. Почва имеет сильно-, средне- и слабокислую реакцию среды (pH_{KCl} 4.2–5.2), высокое и очень высокое содержание подвижного фосфора и обменного калия по Кирсанову (160–290 и 121–

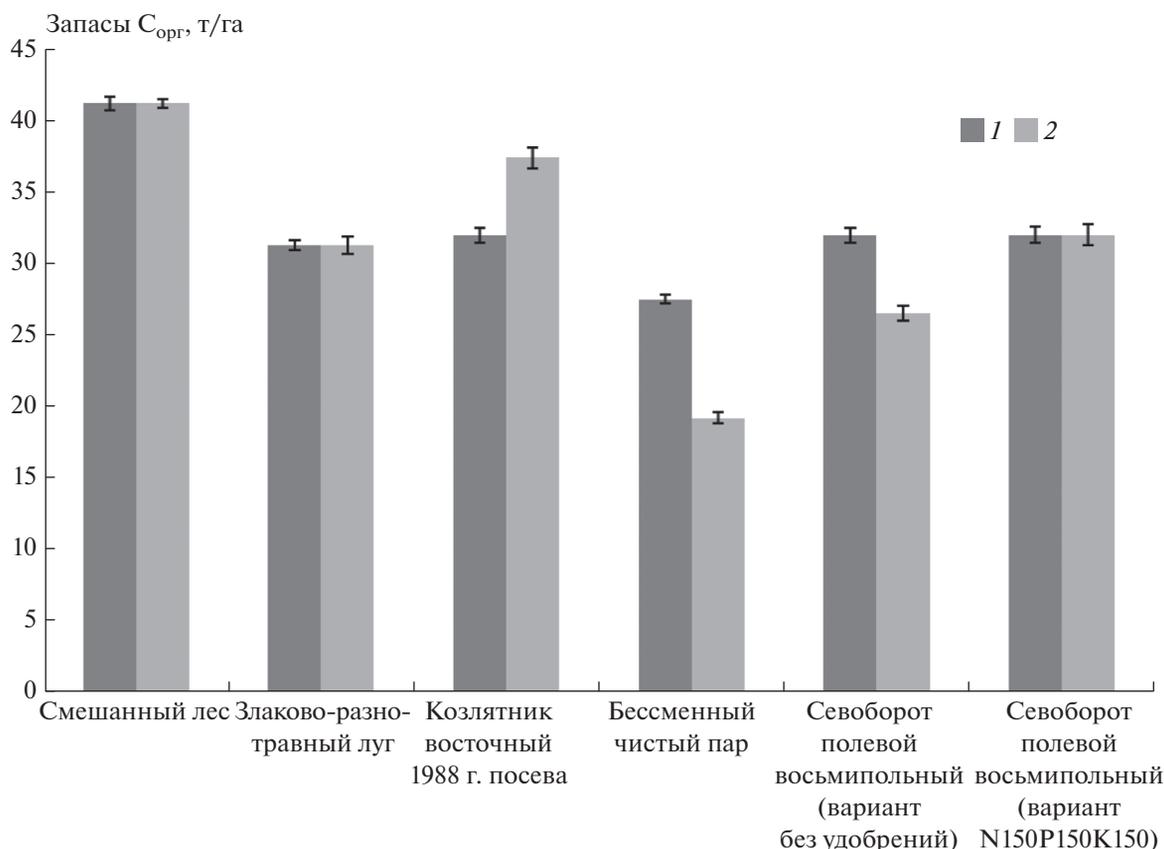


Рис. 1. Запасы $C_{орг}$ в дерново-подзолистой почве в слое 0–20 см: 1 – исходные, 2 – через 30 лет.

403 мг/кг соответственно). Сумма обменных оснований составляет 18.3–22.3 смоль(экв)/кг, степень насыщенности основаниями – 76–91%. Содержание общего азота варьирует в зависимости от характера растительного покрова в пределах 0.10–0.27%.

Лесные экосистемы являются хранилищем углерода. В них происходит перевод атмосферного углекислого газа в органическое вещество растений с последующей трансформацией мортмассы в органическое вещество почвы. Дерново-подзолистые почвы Предуралья под смешанным лесом характеризуются небольшой мощностью органо-генного слоя (10–13 см), на поверхности почвы накапливается неразложившийся за год слой опада в виде листьев, хвои, ветвей – мощная лесная подстилка, имеющая кислую реакцию среды из-за опада хвойных пород. Толщина ее под пологом смешанного леса около 3 см. По литературным данным ежегодный опад в смешанном лесу составляет около 6 т/га [9]. Содержание органического углерода в слое почвы 3–20 см составляет 2.69%, азота – 0.27%. Количество и качественный состав биомассы, поступающей ежегодно в почву под смешанным лесом, представлены в табл. 1. Слесным опадом, который характеризуется высо-

ким содержанием углерода (46.5%), в почву ежегодно поступает около 2.74 т углерода. Эта величина может быть принята за количество преобразованного атмосферного углерода CO_2 в органическое вещество опада деревьев и травянистой лесной растительности с последующей трансформацией в почвенное органическое вещество.

Это только малая часть связанного из атмосферы углерода, так как большее количество $C-CO_2$ расходуется на формирование древостоя и развитие корневой системы деревьев. Для учета общего количества используемого в процессе фотосинтеза углерода необходимо определение биомассы лесных насаждений и их корневой системы, динамики их прироста. Деструкция органического вещества лесного опада микроорганизмами протекает медленно из-за широкого отношения C/N , равного 22.6, и кислой реакции среды почвенного раствора. Почва под лесом является естественной и находится в устойчивой климаксной фазе, дальнейшего накопления углерода в наземной биомассе не наблюдается, содержание углерода в почве за годы наблюдений практически не меняется. Запасы органического углерода в почве под смешанным лесом в слое 3–20 см составляют 41.2 ± 0.3 т/га (рис. 1).

Таблица 1. Количество и качество биомассы, поступающей в почву в различных фитосензах

Объект исследования	Содержание углерода и азота в биомассе											
	основная продукция				побочная продукция (солома)				пожнивno-корневые остатки			
	количество, т/га	С		C/N	количество, т/га	С		C/N	количество, т/га	С		C/N
		%	т/га			%	т/га			%	т/га	
Лесная подстилка: мелкие ветки, листья хвойных и лиственных дере- вьев, трава	6.0	45.61	2.74	2.04	22.36	—	—	—	—	—	—	—
Злаково-разнотравный луг (наземная биомасса + войлок)	2.3	44.07	1.01	1.82	24.21	—	—	3.8	36.66	1.39	0.91	40.29
Козлятник восточный 1988 г. посева (пожнивno-корневые остатки)	8.6	44.47	3.82	2.84	15.66	—	—	10.1	45.11	4.56	2.23	20.23
Севооборот полевой восьмиполь- ный (вариант без удобрений), овес	5.02	42.52	2.13	2.03	20.95	5.0	42.33	2.11	0.35	1.13	0.60	53.3
Севооборот полевой восьмиполь- ный (вариант N150P150K150), овес	5.13	42.54	2.18	2.25	18.91	6.7	42.93	2.87	0.52	1.26	0.73	44.9

Содержание органического углерода в естественной почве злаково-разнотравного луга находится на более низком уровне, чем под лесом, и составляет $1.25 \pm 0.03\%$. С основной продукцией, образующейся в процессе фотосинтеза, из атмосферы связывается и ежегодно в почву поступает около 1.01 т С/га, в качестве войлока – 1.39 т С/га. При этом отношение С/Н составляет в органической биомассе соответственно 24.2 и 40.2. Процессы минерализации и гумусообразования в почве под луговой растительностью уравновешены, сколько поступает органического вещества, столько и минерализуется. За последние 30 лет наблюдений содержание органического углерода менялось незначительно от 1.22 до 1.28% и было связано с гидротермическими условиями вегетационных периодов, соответственно и с различным количеством свежих растительных остатков, поступающих в почву луга. В верхнем горизонте (0–20 см) почвы естественного луга содержится 31.3 ± 0.6 т/га органического углерода.

Изменение содержания и запасов органического углерода в агроэкосистемах. Наиболее часто для оценки почвенной секвестрации углерода используют такие методы, как изменение валового содержания органического углерода в почве или его запасов в слоях 0–20, 0–100 см за определенный период [12]. Анализ динамики содержания и запасов органического углерода в стационарных полевых опытах Пермского НИИСХ в зависимости от длительности использования почвы и применяемых агротехнологий показал, что наибольшие изменения происходят в первые 1–2 ротации севооборота или первые 10–12 лет землепользования [7]. Далее в почве устанавливается новое квазистационарное состояние – уравновешенность процессов минерализации и гумусообразования [12, 20].

Выявлены разнонаправленные тенденции изменения $C_{\text{орг}}$ по сравнению с исходным уровнем (перед закладкой опытов): уменьшение, сохранение и увеличение содержания $C_{\text{орг}}$.

Интенсивная обработка почвы инициировала значительные потери почвенного углерода. Наибольшее уменьшение $C_{\text{орг}}$ отмечено в бессменном чистом пару в первые 7–10 лет наблюдений за почвой (рис. 2).

Скорость потери углерода в первые 7 лет составила 0.04% С/год или 1.0 т С/(га год). В последующие годы содержание $C_{\text{орг}}$ в почве пара менялось незначительно. Небольшие тренды динамики углерода в бессменном пару в последующие годы исследований связаны с поступлением различного количества биомассы сорных растений и изменениями гидротермического режима в вегетационные периоды. За годы наблюдений в бессменно парующей почве в слое 0–20 см запасы органического углерода уменьшились на 8.3 т/га.

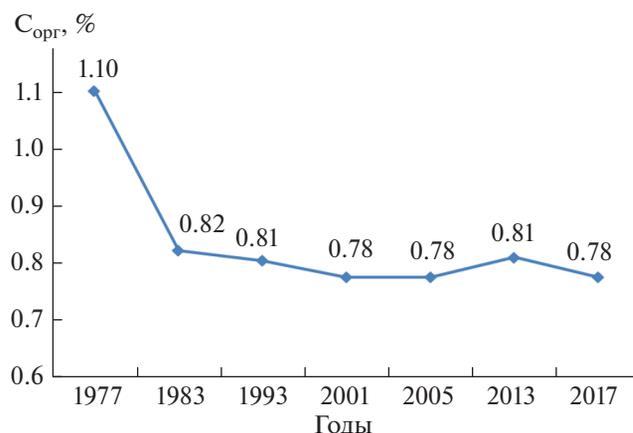


Рис. 2. Динамика изменения $C_{\text{орг}}$ в бессменном чистом пару.

Использование атмосферного углекислого газа на процесс фотосинтеза растениями на почве чистого бессменного пара приближается к нулю, однако в небольших количествах оно существует за счет сорной растительности.

Результаты, полученные в длительном стационарном опыте, свидетельствуют о различии в содержании и запасах $C_{\text{орг}}$ между контролем и вариантом с применением высокой дозы НРК. В варианте без удобрений за 30 лет ведения опыта установлено уменьшение содержания органического углерода в почве на 17.2% относительно исходного уровня. Следует отметить, что запасы органического углерода в пахотном слое почвы (0–20 см) без внесения удобрений сократились на 5.5 т/га.

С побочной продукцией (солома овса) и пожнивно-корневыми остатками в неудобренную почву севооборота поступает около 3.24 т/га углерода, связанного из атмосферы и преобразованного в биомассу. При этом поступающая в почву растительная масса характеризуется высоким содержанием углерода и низким азота, трудно и медленно разлагается микроорганизмами. В данном варианте процесс минерализации органического вещества в почве преобладает над его накоплением. Общее количество С–СО₂ атмосферы, преобразованного в фитомассу, с учетом основной продукции (зерно) посевами овса составляет около 5.37 т/(га год).

Длительное применение минеральных удобрений в дозе 150 кг д.в./га способствовало сохранению исходного уровня органического вещества в почве. Содержание углерода в слое 0–20 см после первой и последующих ротаций севооборота составило $1.25 \pm 0.03\%$ С. В данных условиях землепользования установилось относительное равновесие между поступлением $C_{\text{орг}}$ в почву и его минерализацией. После отчуждения основной продукции

в почву поступает около 4.13 т/га соломы и пожнив-но-корневых остатков с широким отношением C/N, равным 82.6 и 44.9 соответственно. С учетом основной продукции при выращивании овса в почву поступает около 6.31 т/(га год) углерода, преобразованного из углекислого газа атмосферы в биомассу растений. Количество поступающего в почву $C_{\text{орг}}$ ежегодно с побочной продукцией (соломой) и пожнивно-коневыми остатками поддерживает установившийся уровень органического вещества, и соответствуют количеству минерализованного углерода в год [20, 30]. Запасы органического углерода в слое 0–20 см пахотной длительно удобряемой почвы определены на исходном уровне и составляют 32.0 ± 0.75 т/га.

Изменение запасов органического углерода проходило более интенсивно при возделывании многолетней бобовой культуры-козлятника восточного.

Козлятник восточный (*Galéga orientalis*) – уникальная культура для перемещения атмосферного углерода в состав почвенного органического вещества, посредством заделки растительной биомассы в почву. В процессе вегетации козлятник формирует большую ассимиляционную поверхность, к моменту полного цветения площадь листьев составляет 60–70 тыс. м²/га (60–90 ц/га сухого вещества) [8, 11]. Козлятник восточный формирует в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода дополнительно второй укос (2–4 т/га сухой массы) и перед уходом в зиму наращивает зеленую массу в количестве 1–3 т/га на сухое вещество.

За вегетационный период козлятник восточный в процессе фотосинтеза преобразует из атмосферы в биомассу растений (зеленая масса + корни) более 30 т/га CO₂ или 8.38 т C/га в год, что значительно больше, чем зерновые культуры. Зеленая масса отчуждается с полей. За счет большого количества и благоприятного биохимического состава пожнивно-корневых остатков козлятника наблюдается накопление органического углерода в почве. В первые 10 лет возделывания культуры содержание углерода в дерново-подзолистой почве увеличивалось на 0.4–0.5 т/(га год), затем темпы прироста органического углерода значительно уменьшились и его содержание стабилизировалось на новом стационарном уровне $1.44 \pm 0.02\%$ C. Запасы углерода в слое 0–20 см через 30 лет ведения опыта составили 37.4 т/га, отнормированно 32.0 т/га при его закладе.

Под посевами козлятника восточного происходит депонирование углерода в виде гумуса за счет его запасания в более глубоких слоях почвы. Длительное возделывание бобовой культуры на одном участке способствовало увеличению гумусово-аккумулятивного горизонта почвы (A1) до 36 см относительно целинной почвы (на злаково-

разнотравном лугу (22 см). Запасы углерода в метровом слое почвы на 20 т/га больше, чем в целинной почве луга.

Таким образом, в агроценозах прослеживаются три разнонаправленные тенденции изменения органического углерода в почве по сравнению с исходным уровнем при смене режима землепользования: уменьшение содержания $C_{\text{орг}}$ при интенсивной механической обработке и отсутствии удобрений; сохранение $C_{\text{орг}}$ при внесении удобрений, обеспечивающих достаточное поступление растительной биомассы в почву; увеличение содержания $C_{\text{орг}}$ при минимальной обработке почвы и поступлении большого количества органического вещества с биомассой возделываемой бобовой культурой. К аналогичным выводам пришли исследователи в работе [20].

Углеродпротекторная емкость почвы. Углеродное питание растений происходит из атмосферы земли путем усвоения листьями углекислоты, запасы которой не лимитированы и постоянно пополняются за счет хозяйственной деятельности человека [13, 15]. Углеродная емкость надземной растительной биомассы и пулы органического углерода в почвах имеют свои ограничения, связанные с почвенно-климатическими условиями региона исследований. В подзолистых почвах запасы гумуса в несколько раз меньше, чем в черноземах и добиться дополнительного накопления органического углерода очень сложно в силу особенностей почвообразования, связанного с климатом, типом растительности и почвообразующими породами [14].

Расчет углеродпротекторной емкости исследуемой дерново-подзолистой почвы по трем уравнениям линейной регрессии, описанным в работах [28, 29, 34], представлен в табл. 2. Средняя величина углеродпротекторной емкости варьирует от 26.1 до 32.9 г C/кг в слое почвы 0–20 см и практически не зависит от приемов использования почвы.

Если рассчитать углеродпротекторную емкость пахотной почвы в т C/га, то СРС исследуемой почвы составляет 74.3–82.3 т/га органического углерода в слое 0–20 см. На сегодняшний день в почве под лесом в слое 3–20 см содержится 41.2 т/га углерода, расчетное значение по СРС составляет 39.9 т/га, следовательно почва полностью насыщена углеродом. Насыщенность пахотных почв различных агроценозов органическим углеродом, значительно меньше, и находится на уровне 25.9–50.4%. Минимальной насыщенностью органическим углеродом характеризуется почва бессменного чистого пара. У пахотных дерново-подзолистых почв высокий потенциал для секвестрации атмосферного углерода и его накопления и депонирования в почве. Для реализации этого потенциала необходима смена условий землепользования: минимальная обработка почвы, внесение высоких доз органических

Таблица 2. Углеродпротекторная емкость (СРС) дерново-подзолистой почвы, слой 0–20 см

Вариант	Содержание, % от массы почвы		Углеродпротекторная емкость почвы, г С/кг почвы			
	сумма частиц <0.02 мм	сумма частиц <0.05 мм	СРС ₁ (<0.02 мм) [27]	СРС ₂ (<0.02 мм 2 : 1) [33]	СРС ₄ (<0.05 мм 2 : 1) [33]	СРС среднее
Бессменный чистый пар	66.7	74.3	28.8	31.2	30.4	30.1
Севооборот полевой вось- мипольный (вариант без удобрений)	70.8	79.2	30.3	32.9	31.4	31.5
Севооборот полевой вось- мипольный (вариант N150P150K150)	74.5	84.8	31.7	34.4	32.6	32.9
Козлятник восточный 1988 г. посева	65.4	72.4	28.3	30.7	30.0	29.7
Злаково-разнотравный луг	64.9	71.2	28.1	30.5	29.7	29.4
Смешанный лес	55.3	59.0	24.6	26.5	27.2	26.1

удобрений, увеличение количества и улучшение качества биомассы поступающей в почву, возделывание сельскохозяйственных культур и сортов, активно секвестрирующих углерод атмосферы.

ВЫВОДЫ

1. Естественная дерново-подзолистая почва находится в устойчивом состоянии, процессы минерализации и гумусообразования под луговой и лесной растительностью уравновешены. Накопления органического углерода в течение 30 лет исследований не наблюдается, сколько поступает органического вещества с растительными остатками, столько и минерализуется. Содержание $C_{орг}$ в почве под лесом составляет $2.69 \pm 0.02\%$, под лугом — $1.25 \pm 0.03\%$, запасы — 41.2 и 31.3 т С/га соответственно.

2. В агроценозах прослеживаются три разнонаправленных тенденции изменения органического углерода в почве по сравнению с исходным уровнем при смене режима земледельческого использования: уменьшение содержания $C_{орг}$ при интенсивной механической обработке и отсутствии удобрений; сохранение $C_{орг}$ при внесении удобрений, обеспечивающих достаточное поступление растительной биомассы в почву; увеличение содержания $C_{орг}$ при минимальной обработке почвы и поступлении большого количества органического вещества с биомассой возделываемой бобовой культуры-козлятника восточного.

3. Установлено, что за вегетационный период в процессе фотосинтеза козлятник восточный преобразует из атмосферы в биомассу растений более

30 т/га CO_2 или 8.38 т С/(га год). За счет большого количества и благоприятного биохимического состава пожнивно-корневых остатков козлятника наблюдается накопление органического углерода в почве. В первые 10 лет возделывания культуры накопление углерода дерново-подзолистой почвой составляло по 0.4–0.5 т/(га год). За 30 лет бессменного возделывания бобовой культуры запасы углерода в слое 0–20 см увеличились на 5.4 т/га.

4. Средняя величина углеродпротекторной емкости исследуемой дерново-подзолистой почвы варьирует от 26.1 до 32.9 г С/кг в слое почвы 0–20 см и практически не зависит от приемов ее использования. Целинная почва под лесом полностью насыщена углеродом и находится в устойчивой климатической фазе. Насыщенность пахотных почв различных агроценозов — на уровне 25.9–50.4%. Минимальной насыщенностью органическим углеродом характеризуется почва бессменного чистого пара.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У автора нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Пермской области / Под ред. Е.В. Григорчук. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 156 с.
2. Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России. Экспертный доклад / Под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с.
<https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2519-7>

3. *Бойцова Л.В., Непримерова С.В., Зинчук Е.Г.* Влияние различных систем удобрений на секвестрацию органического углерода в дерново-глеевой почве // Проблемы агрохимии и экологии. 2019. № 4. С. 15–20.
4. Доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2020 году”. https://prigoda.permkrai.ru/upload/iblock/cab/doklad_oospk_2020_11.07v1zm.pdf
5. *Ерёмченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В.* Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 252 с.
6. *Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н.* Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 1. С. 14–29.
7. *Завьялова Н.Е.* Гумусное состояние дерново-подзолистых почв Предуралья при различном землепользовании и длительном применении удобрений и извести. Автореф. дис. докт. биол. наук. М., 2007. 36 с.
8. *Завьялова Н.Е., Волошин В.А., Казакова И.В.* Использование потенциального долголетия многолетней бобовой культуры козлятника восточного для сохранения плодородия дерново-подзолистой почвы Предуралья // Доклады РАСХН. 2015. № 3. С. 31–34.
9. *Зонн С.В., Карпачевский Л.О.* Проблемы лесного почвоведения и современные методы лесорастительной оценки почв // Почвоведение. 1987. № 9. С. 6–16.
10. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. и др.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
11. *Книшаткина А.Н., Тимошин О.А.* Влияние козлятника восточного на плодородие почвы // Земледелие. 2007. № 2. С. 12–13.
12. *Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н.* Дегумификация и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
13. *Кудеяров В.Н.* Почвенно-биохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
14. *Кудеяров В.Н.* Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
15. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
16. *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.
17. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
18. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н.* Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
19. *Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филиппук О.Д.* Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО) // Агрохимия. 2019. № 5. С. 3–20. <https://doi.org/10.1134/S000218811905003X>
20. *Сычев В.Г., Налиухин А.Н.* Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой // Плодородие. 2021. № 5. С. 3–7. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.01>
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. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
22. *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. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20120138>
23. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
24. *Glazovskaya M.A., Krechetov P.P., Chernitsova O.V.* General regularities of the accumulation and replenishment of the reserves of biophilous elements in soddy-podzolic soils of mixed coniferous-broad-leaved forests // Eurasian soil science. 2004. V. 37. № 12. P. 1269–1278.
25. *Christensen B.T.* Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // Adv. Soil Sci. 1992. V. 20(1). P. 90.
26. *Chung H., Grove J.H., Six J.* Indications for Soil Carbon Saturation in a Temperate Agroecosystem // Soil Sci. Soc. Am. J. 2008. V. 72(4). P. 1132–1139. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0265>
27. *Chung H., Ngo K.J., Plante A., Six J.* Evidence for Carbon Saturation in a Highly Structured and Organic-Matter-Rich Soil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2010. V. 74 (1). P. 130–138. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0097>
28. *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. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>

29. Kogut B.M., Semenov V.M. Estimation of soil saturation with organic carbon, Dokuchaev Soil Bulletin. 2020. V. 102. P. 103–124.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
30. Körschens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symposium “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig”. 2018. 12 p.
31. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.J., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collabs in Russia // Glob. Change Biol. 2014. V. 20(3). P. 938–947.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
32. Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods // Soil Biol. Biochem. 2006. V. 38. P. 425–448.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>
33. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and the global carbon cycle // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 7–20.
<https://doi.org/10.1023/A:1006247623877>
34. 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.
<https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
35. 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 Biology. 2014. V. 20(2). P. 653–665.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12384>
36. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and global carbon cycle // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 7–20.

Carbon Reserves and Carbon Protective Capacity of Sod-Podzolic Soil in Natural and Agricultural Ecosystems of the Pre-Urals

N. E. Zavyalova*

Perm Federal Research Center, Ural Branch Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*e-mail: nezavyalova@gmail.com

The amount of stabilized and protected from decomposition of organic matter in the soil characterizes the carbon protective capacity of the soil (Carbon Protection Capacity-CPC). Experimental data on the accumulation and loss of organic carbon in sod-podzolic soil (Eutric Albic Retisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)) in agrocenoses of the Pre-Urals are presented and a characteristic of virgin analogues is given. The greatest decrease in C_{org} was noted in permanent clean fallow, the rate of carbon loss in the 0–20 cm layer in the first 7 years was 0.04% C/year or 1.0 t C/(ha year). Among arable soils, the soil under the perennial leguminous crop, the oriental goat's rue (*Galéga orientalis*), is characterized by the maximum content and reserves of organic carbon. For 30 years of permanent cultivation of eastern goat's rue, carbon stocks in the 0–20 cm layer increased by 5.4 t/ha, an increase in the humus-accumulative soil horizon (A1) up to 36 cm is observed relative to the virgin soil of the grass-forb meadow (A1 = 22 cm). Natural soils are in equilibrium, the C_{org} content under mixed forest in the 3–20 cm layer is 2.69 ± 0.02%, under the grass-forb meadow in the 0–20 cm layer is 1.25 ± 0.03%, the reserves are 41.2 t C/ha and 31.2 t C/ha, respectively. The average value of the carbon-protective capacity of the studied soil varies from 26.1 to 32.9 g C/kg in a soil layer of 0–20 cm and practically does not depend on the methods of its use. Significant factors influencing the content of organic carbon are the quantity and qualitative composition of the biomass entering the soil of agrocenoses.

Keywords: virgin soils (forest, meadow), crop rotation, permanent clean fallow, organic carbon, sequestration