

УДК 581.132:631.433.53:631.417.1:631.445.24

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ И УГЛЕРОД СЕКВЕСТРИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЕВЗЕИ САФЛОРОВИДНОЙ И НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2024 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, Г. П. Майсак¹, И. В. Казакова¹, О. В. Иванова¹¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский край, 614532, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

По величине содержания пигментов фотосинтеза выявлен наиболее активный период поглощения фотосинтетически активной радиации листьями левзеи сафлоровидной в течение вегетации. С момента полного отрастания до цветения сумма хлорофиллов *a* и *b* в листьях составила 6.2–8.5 мг/г сухой массы, каротина – в 3–4 раза меньше. В процессе фотосинтеза содержание углерода в листьях левзеи сафлоровидной практически не менялось и составляло 39.5–42.5%. Массовая доля основного продукта фотосинтеза – сахаров увеличивалась от фазы отрастания до формирования семян с 4.0 до 11.8%. В период активного роста содержание азота в листьях левзеи составило 1.3–1.6, фосфора – 1.1–1.6, калия – 4.4–5.1%. После уборки левзеи сафлоровидной 14-го года жизни в дерново-подзолистой почве определили высокое количество ПКО – 13.7–17.3 т/га. Количество поглощенного в процессе фотосинтеза углерода составило 6.8–11.5 т/га (24.3–41.3 т CO₂/га) в зависимости от варианта опыта, для естественного фитоценоза этот показатель был равен 2.4 т С/га (или 8.6 т CO₂/га) за вегетационный период. Содержание органического углерода под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни в слое 0–20 см почвы повысилось относительно исходного уровня на 3.6% в варианте без удобрений, на 15.1% – в варианте N60P60K60, в слое 20–40 см – на 8.8–42.6% соответственно. Относительно целинного аналога в слое 0–20 см содержание углерода было больше на 15.2–28.0, в слое 20–40 см – на 25.0–64.4% в зависимости от варианта опыта, что свидетельствовало о депонировании углерода в виде гумусовых веществ за счет его запасаения в более глубоких слоях почвы.

Ключевые слова: левзея сафлоровидная, фотосинтез, органический углерод, элементы минерального питания, дерново-подзолистая почва.

DOI: 10.31857/S0002188124070073, EDN: CFUKTU

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным природным способом секвестрации углерода является перевод атмосферного углекислого газа в органическое вещество растениями, то есть фотосинтез. В процессе фотосинтеза углерод превращается в сахара и включается в процессы жизнедеятельности растений. С увеличением фотосинтетической активности происходит наращивание новой биомассы, из атмосферы удаляются излишние объемы CO₂, повышается урожайность сельскохозяйственных культур, создаются условия для длительного запасаения (депонирования) углерода почвой. Уровень секвестрации углерода существенно зависит от фотосинтетической способности трав [1]. По данным [2], объемы секвестрации естественным травостоем варьируют в пределах 2.2–2.5 т/га/год. Примерно 40% территории суши покрыто травянистыми растениями – их роль в секвестрации углерода

чрезвычайно велика, в них содержится до 30% глобальных запасов почвенного углерода [3]. Для травянистой растительности и сельскохозяйственных культур продукционная эффективность хлорофилла составляет 300 кг С/кг хлорофилла/год [4, 5].

По данным [6], общая первичная продукция фотосинтеза – это весь углерод, поглощенный в процессе фотосинтеза. Чистая первичная продукция представляет весь углерод, ассимилированный растениями в течение периода вегетации за вычетом дыхания надземной массы растений, корней и микроорганизмов. Отношение общей первичной продукции к чистой первичной продукции равно 2 : 1, чистая первичная продукция фотосинтеза для посевов сельскохозяйственных культур в среднем на основании урожайных данных Росстата составляет 5.25 т С/га/год.

Известно, что многолетние травы имеют не только кормовое значение, но и способствуют

повышению плодородия почвы и увеличению урожая последующих за ними культур в севообороте. Количество органической биомассы, поступающее в почву с корневыми и пожнивными остатками многолетних трав при благоприятных погодных условиях, в 3–5 раз превышает его количество, оставляемое однолетними культурами [7].

Одним из основных показателей потенциальной продуктивности растений является содержание пигментов фотосинтеза в ассимилирующих органах [8]. Количество пигментов фотосинтеза зависит от фазы развития растений и является наследуемым сортовым признаком [9]. Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности процессов фотосинтеза, который более активно проходит у культур с высокой ассимиляционной поверхностью листьев, чем у злаковых [10]. Изучение продуктивности и содержания углерода в тканях растений позволяет оценить их секвестрационный потенциал [11].

Накопление и депонирование атмосферного углерода в почве – один из путей смягчения парникового эффекта. В связи с этим большой интерес представляет изучение возможности многолетних культур аккумулировать углерод из атмосферы и накапливать его в почве.

Цель работы – изучение влияния фотосинтетической и углерод-секвестрирующей способности левзеи сафлоровидной на накопление органического вещества в дерново-подзолистой почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Травостой левзеи сафлоровидной (маралий корень, рапонтникум сафлоровидный, большеголовник сафлоровидный, *Rhaponticum carthamoides* (Willd.) Pjin maral root) был заложен в 2010 г. на опытном поле Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой тяжелоуглинистой почве в соответствии с общепринятой в Предуралье технологией возделывания многолетних трав на корма. Агрохимическая характеристика пахотного слоя (0–20 см): pH_{KCl} 4.9 ед., гидролитическая кислотность – 3.9, сумма поглощенных оснований – 21.4 мг экв/100 г, содержание подвижных форм фосфора – 355, обменного калия – 165 мг/кг почвы (по Кирсанову). Содержание органического углерода в слое 0–20 см составляло 1.39, в слое 20–40 см – 0.68%.

Исследование проводили в 2022–2023 гг. контрольного варианта (без использования минеральных удобрений) и варианта с внесением в почву удобрения в дозе N60P60K60. Минеральные удобрения под левзею сафлоровидную вносили ежегодно весной с 2010 по 2017 гг. в виде N_{aa} , P_c и K_x . С 2018 г. минеральные удобрения не вносили,

изучали их последствие. Учет урожайности зеленой массы проводили в фазе цветения.

Для сравнения аккумулированного из атмосферы и накопленного в почве углерода использовали целинный аналог – злаково-разнотравный луг, который является некосимым и неудобренным лугом. Видовой состав травостоя естественного злаково-разнотравного луга: 62% злаковые, 13% бобовые, 25% разнотравье. Травостой не отчуждается. Избыточное накопление отмершей надземной массы приводит к обеднению видового 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*), шавель конский (*Rumex confertus*), подмаренник цепкий (*Galium aparine*) и др.

Почвенные образцы отбирали перед уборкой возделываемой культуры буром в 3-х полевых повторениях в 3-х точках на делянке на глубину 0–20 и 20–40 см. Основные агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почве оценивали методом бихроматного окисления с титриметрическим окончанием. Углерод в растительных образцах определяли на элементном анализаторе Elementary Vario ElCub.

Содержание хлорофилла в листьях растений определяли по методике [12]. Максимум поглощения хлорофилла *a* в области 665 нм, хлорофилла *b* – 649 нм. Каротин определяли по ГОСТ 13496.17 (максимум поглощения 440 нм). Легкорастворимые углеводы (сахара) определяли по ГОСТ 26176-2019, клетчатку – по ГОСТ 31675-2-12, жир – по ГОСТ 13496.15-1016, содержание влаги – по ГОСТ Р 549510-2012.

Определение азота, фосфора и калия в растениях проводили в воздушно-сухих размолотых образцах после мокрого озоления: общего азота – по методу Кьельдаля (ГОСТ 13496.4–93), общего фосфора – спектрофотометрическим методом (ГОСТ 28902–91), общего калия – пламенно-фотометрическим методом (ГОСТ 30504–97).

Урожайность левзеи сафлоровидной определяли площадочным методом, учетная площадь – $50 \times 50 = 2500 \text{ см}^2$. Количество пожнивно-корневых остатков определяли рамочным способом взятия корней по методике Станкова с последующей отмывкой монолитов [13].

Доверительный интервал определяли с помощью программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Левзея сафлоровидная является многолетним травянистым растением, относится к сем. Астровые или Сложноцветные. Продолжительность периода от весеннего отрастания до первого укоса в Пермском крае составляет 44–52 сут при сумме положительных температур 456.2–676.5°C, до второго укоса – 44–52 сут после первого скашивания при сумме температур 899.2–1355.7°C.

В качестве универсальных показателей для оценки первичной продукции фотосинтеза левзеи сафлоровидной использовано содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротина. Хлорофилл и каротиноиды являются фоторецепторами–пигментами фотосинтеза у высших растений, они превращают световую энергию в химическую. Основная фотосинтетическая растительная биомасса – это листья, они являются центром образования первичных продуктов и их трансформации. В структуре урожая зеленой массы левзеи сафлоровидной количество листьев составляет 84–90%. Площадь листовой (ассимилирующей) поверхности листьев левзеи в фазе бутонизации составляет 41.8–80.8 тыс. м²/га, в фазе цветения – 126–181 тыс. м²/га [14]. В процессе вегетации при нарастании вегетативной массы левзеи сафлоровидной от момента отрастания до фазы цветения наблюдали накопление в листьях хлорофилла – зеленого пигмента, который помогает листьям улавливать энергию солнечного света для синтеза питательных веществ. Содержание хлорофилла в период отрастание–цветение (03–25 мая) составило 6.8–8.5 мг/г сухой массы (табл. 1).

Последствие применения N60P60K60 не оказало значимого влияния на накопление хлорофилла. Содержание каротина в левзее сафлоровидной

в период наиболее интенсивного поглощения фотосинтетически активной радиации было в 4.0–4.5 раза меньше, чем хлорофилла. Снижение фотосинтетической активности левзеи наблюдали с 06.06 до формирования семенной головки (19.06), сумма хлорофиллов *a* и *b* в этот период в листьях уменьшилась в 4.5–5.3 раза, содержание каротина – в 3.5–4.0 раза. При этом отмечено пожелтение и отмирание нижних листьев.

В процессе фотосинтеза углекислый газ атмосферы восстанавливается, водород молекул воды соединяется с углеродом с образованием молекул сахара (глюкозы). Сахара – это не только промежуточные соединения, образующиеся в процессе фотосинтеза, но и основные продукты ассимиляции углекислого газа, а их содержание – важнейший показатель биохимического состава и физиологического состояния вегетирующих растений [15–17]. Полученные экспериментальные данные показали накопление сахаров в листьях левзеи сафлоровидной в процессе роста и развития растений от 4.0 до 11.8% (табл. 2).

В процессе фотосинтеза происходит трансформация простых углеводов в более сложные – крахмал, клетчатку и в жиры. Содержание жира возрастало в 1.6 раза от периода отрастания к моменту формирования семян. Наблюдали повышение содержания трудногидролизующихся углеводов – клетчатки от 14.7 до 17.7%.

Следует отметить, что содержание углерода в листьях левзеи сафлоровидной практически не менялось в течение всего периода вегетации и оставалось на уровне 39.5–42.5%. По-видимому, это связано с непрерывным ходом параллельно идущих процессов – образование сахаров при аккумуляции атмосферного углерода, их трансформации в более

Таблица 1. Содержание хлорофилла, каротина и углерода в листьях левзеи сафлоровидной в вегетационный период 2023 г.

Дата отбора	Вариант	Сухое вещество, %	Хлорофилл, мг/г сухой массы			Каротин, мг/г сухой массы	Углерод, %
			<i>a</i>	<i>b</i>	Σ хл. <i>a+b</i>		
03.05	Без удобрений N60P60K60	15.0 ± 2.3	4.8 ± 1.0	2.0 ± 0.5	6.8 ± 1.5	2.0 ± 0.3	42.5 ± 0.3
		16.6 ± 2.0	5.9 ± 1.1	2.5 ± 0.6	8.5 ± 1.7	2.1 ± 0.3	42.3 ± 0.1
15.05	Без удобрений N60P60K60	19.3 ± 2.8	4.5 ± 0.3	2.2 ± 0.1	6.7 ± 0.4	1.6 ± 0.6	41.7 ± 0.9
		18.4 ± 2.4	4.1 ± 0.5	2.1 ± 0.2	6.2 ± 0.7	1.5 ± 0.3	42.3 ± 0.9
25.05	Без удобрений N60P60K60	23.6 ± 2.0	4.7 ± 0.7	2.1 ± 0.3	6.8 ± 0.9	1.5 ± 0.5	41.1 ± 1.0
		21.6 ± 1.4	4.8 ± 1.3	2.2 ± 0.7	7.0 ± 2.0	1.5 ± 0.4	40.6 ± 0.8
06.06	Без удобрений N60P60K60	30.3 ± 2.4	1.2 ± 0.7	0.4 ± 0.2	1.7 ± 0.9	0.4 ± 0.2	41.2 ± 0.2
		27.3 ± 1.3	1.1 ± 0.5	0.4 ± 0.2	1.5 ± 0.7	0.4 ± 0.2	41.8 ± 0.6
19.06	Без удобрений N60P60K60	29.9 ± 0.8	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	39.5 ± 0.3
		29.9 ± 1.3	0.9 ± 0.3	0.5 ± 0.2	1.5 ± 0.5	0.3 ± 0.1	39.8 ± 0.1

Таблица 2. Содержание углеводов и жира в листьях левзеи сафлоровидной в вегетационный период 2023 г.

Дата отбора	Вариант	Массовая доля, %		
		жира	клетчатки	сахаров
03.05	Без удобрений	0.5 ± 0.1	14.7 ± 1.7	4.0 ± 0.1
	N60P60K60	0.8 ± 0.1	16.1 ± 1.7	4.2 ± 0.1
15.05	Без удобрений	0.8 ± 0.1	15.3 ± 1.7	8.9 ± 1.2
	N60P60K60	1.1 ± 0.1	16.5 ± 1.7	7.6 ± 1.1
25.05	Без удобрений	1.2 ± 0.1	17.2 ± 1.8	7.2 ± 1.0
	N60P60K60	1.6 ± 0.1	17.4 ± 1.8	8.6 ± 1.1
06.06	Без удобрений	1.2 ± 0.1	14.9 ± 1.7	12.4 ± 1.4
	N60P60K60	1.5 ± 0.1	15.1 ± 1.7	8.9 ± 1.2
19.06	Без удобрений	1.2 ± 0.1	15.8 ± 1.7	10.4 ± 1.3
	N60P60K60	1.8 ± 0.1	17.7 ± 1.8	11.8 ± 1.4

сложные соединения и оттока из листа к корням растений. При этом атмосферный углерод на 30–70% окисляется растениями, расходуется на дыхание и биосинтез их новой биомассы. В период активного развития и наращивания биомассы баланс сдвинут в сторону поглощения и секвестрации CO₂ [3].

Вегетирующие растения нуждаются в постоянном притоке элементов минерального питания, которые они получают из почвенного раствора, воздушной или водной среды. Известно, что через листья растения получают >95% углекислого газа, а путем некорневого питания могут усваивать из водных растворов зольные элементы и азот. Основное количество азота, воды и зольных питательных веществ поступает из почвы через корневую систему. Содержание азота, фосфора и калия – основных элементов минерального питания в листьях левзеи сафлоровидной снижалось

в процессе вегетации растений и было минимальным в период формирования семян. Молодые листья левзеи до фазы цветения содержали 2.3–3.2% азота, 1.1–1.6% фосфора и 4.1–5.1% калия (рис. 1).

Под почвенной секвестрацией органического углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией биомассы в почвенное органическое вещество и его долговременное хранение в почвенном резервуаре с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу [18, 19, 20–22]. Внесение в почву растительных остатков приводит к усилению эмиссии углерода за счет разложения органического вещества. Однако в результате дыхания почва теряет лишь часть углерода растительных остатков (от 15 до 85%), остальной углерод

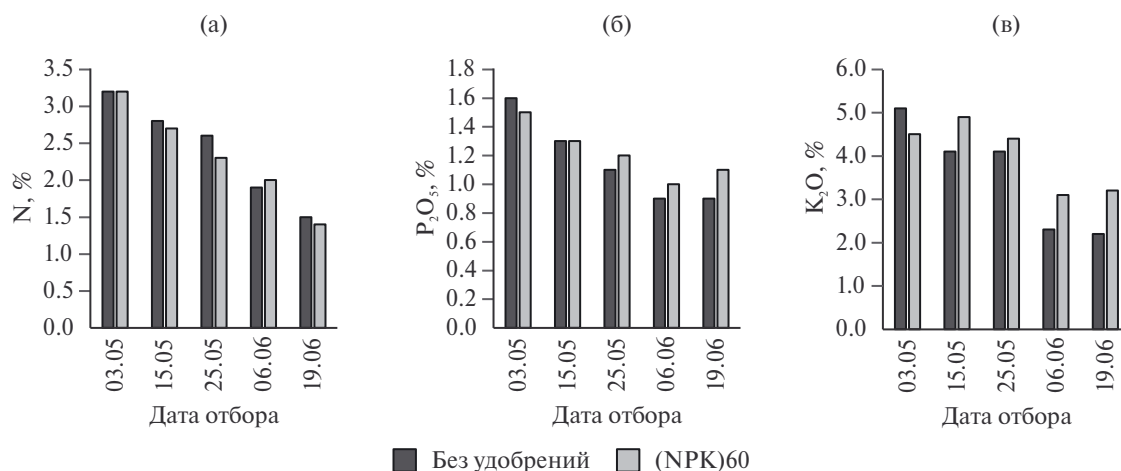


Рис. 1. Содержание азота (а), фосфора (б) и калия (в) в листьях левзеи сафлоровидной в различные периоды вегетации.

Таблица 3. Содержание углеводов и жира в растениях перед уборкой

Культура	Вариант	Органы растения	Массовая доля, %		
			жира	клетчатки	сахаров
Левзея сафлоро-видная	Без удобрений	Надземная часть	1.3 ± 0.4	32.1 ± 2.5	15.6 ± 1.7
		ПКО	0.1 ± 0.1	42.2 ± 3.0	16.5 ± 1.7
	N60P60K60	Надземная часть	2.08	31.1 ± 2.5	15.6 ± 1.7
		ПКО	0.3 ± 0.4	41.7 ± 3.0	16.0 ± 1.7
Травостой злаково-разнотравного луга	Без удобрений	Наземная часть	1.2 ± 0.4	29.8 ± 2.4	12.0 ± 1.4
		ПКО	1.8 ± 0.5	38.5 ± 2.8	8.5 ± 1.1

Примечание. ПКО – пожнивно-корневые остатки. То же в табл. 4, 5.

Таблица 4. Содержание элементов питания в различных органах растений перед уборкой

Образец	Органы растения	C, %	N, %	P ₂ O ₅ , %	K ₂ O, %
Левзея сафлоровидная, без удобрений	Зеленая масса	41.3 ± 0.4	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.1	2.6 ± 0.4
	ПКО	40.1 ± 0.7	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.1	1.6 ± 0.3
	Семенная головка	41.8 ± 0.4	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.1	3.1 ± 0.1
Левзея сафлоровидная, N60P60K60	Зеленая масса	41.8 ± 1.2	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.1	3.0 ± 0.6
	ПКО	41.1 ± 0.8	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.8 ± 0.1
	Семенная головка	41.9 ± 0.6	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	3.4 ± 0.1
Травостой злаково-разнотравного луга	Зеленая масса	44.1 ± 1.4	1.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1	2.4 ± 0.8
	ПКО	36.7 ± 2.9	0.5 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.2

переходит преимущественно в почвенное органическое вещество и микробную биомассу [10].

При выполнении работы проведено сравнение количества и качества биомассы левзеи сафлоровидной и травостоя злаково-разнотравного луга, накопленной в процессе фотосинтеза, и количества аккумуляированного углерода.

Перед уборкой надземная продукция и пожнивно-корневые остатки (ПКО) левзеи сафлоровидной характеризовались высоким содержанием сахара (15.6 и 16.5%), низким содержанием жира и высоким содержанием клетчатки (32.1 и 42.2%) соответственно (табл. 3).

В травостое злаково-разнотравного луга в период массового цветения трав, представленного в основном злаковыми травами, определено высокое содержание сахаров и клетчатки. Пожнивно-корневые остатки левзеи имели в 1.9 раза больше содержание сахаров, в 1.1 раза больше клетчатки и в 9 раз меньше жира, чем ПКО естественного травостоя.

Концентрация основных элементов минерального питания в биомассе изученных травостоев зависела в основном от органа растения (табл. 4).

Зеленая масса левзеи сафлоровидной содержала 0.6–0.8% азота в зависимости от варианта опыта. В пожнивно-корневых остатках этой культуры азота было в 2.0 раза меньше. При этом высокое содержание

калия определено в семенной головке и зеленой массе левзеи. Концентрация фосфора изменялась от 0.3 до 0.8% в различных органах левзеи сафлоровидной. Содержание углерода в различных частях растения практически не менялось в зависимости от варианта опыта и находилось в интервале 40.1–41.9%. Зеленая масса травостоя злаково-разнотравного луга характеризовалась более высоким (в 1.4–1.8 раза) содержанием азота, чем зеленая масса левзеи сафлоровидной. Содержание калия в наземной и подземной биомассе травостоя естественного луга составляло 2.4 и 0.8% соответственно. По содержанию фосфора биомасса травостоев практически не отличалась.

Важнейшим показателем фотосинтетической продуктивности растений является накопление ими сухой массы. Длительность использования травяной биомассы и ее качество отражаются на секвестрации углерода. С возрастом травостоя почвенная углеродная секвестрация имеет тенденцию к увеличению. В наших исследованиях левзея 14-го года жизни аккумуляировала из атмосферы 24.3 т CO₂/га (или 6.8 т C/га) в варианте без удобрений (табл. 5).

Применение азота в составе NPK оказало стимулирующее действие на депонирование углерода [6], величина CO₂, поглощенного травостоем левзеи, возросла в 1.7 раза. Высокое содержание поглощенного углекислого газа связано с высокой урожайностью зеленой массы и корней. По данным работы

Таблица 5. Урожайность (средняя за 2022–2023 гг.) и аккумуляция углерода левзеей сафлоровидной за вегетационный период

Образец	Органы растения	Урожайность, т/га	Содержание углерода, %	Накопление углерода, т/га	Аккумуляция, т/га	
					C	CO ₂
Левзея сафлоровидная, без удобрений	Зеленая масса	3.2	41.3	1.31	6.8	24.3
	ПКО	13.7	40.2	5.49		
Левзея сафлоровидная, N60P60K60	Зеленая масса	10.6	41.8	4.43	11.5	41.3
	ПКО	17.3	41.1	7.10		
Травостой злаково-разнотравного луга	Зеленая масса	2.3	44.1	1.0	2.4	8.6
	ПКО (войлок)	3.8	36.7	1.4		

[23], урожайность левзеи сафлоровидной в варианте без удобрений в среднем за 2 года составила 3.2 т сухой массы/га, в варианте N60P60K60—10.6 т/га. С корневыми и пожнивными остатками в почву поступило 13.7 и 17.3 т/га органической биомассы. Считается, что увеличение поступления углерода растительных остатков на 5.5% может обусловить рост секвестрации углерода в 2 раза, а увеличение на 20% – в 5 раз [24]. Левзея сафлоровидная сформировала в переводе на углерод чистой первичной продукции фотосинтеза от 6.8 до 11.5 т/га в зависимости от варианта опыта.

В современном земледелии большое значение уделяется повышению плодородия почв за счет использования растительных остатков и побочной продукции культур. Пожнивные и корневые остатки сельскохозяйственных культур – основной источник поступления углерода в пахотные почвы, на их долю приходится 60–65% от всех источников органического вещества, используемых для поддержания почвенного плодородия [25]. Использование стерни способствует накоплению не только органического углерода в пахотных почвах, но и поддерживает азотный статус, увеличивает запасы минеральных элементов и содержание микробной биомассы.

Углероддепонирующие функции связаны с показателями продуктивности растительной биомассы и с качественным составом растительного сырья, прежде всего с содержанием углерода и азота [26]. В дерново-подзолистую почву после уборки левзеи сафлоровидной поступило 13.7–17.3 т ПКО/га в зависимости от варианта опыта. Применение минеральных удобрений стимулировало развитие корневой системы изученной культуры. Разложение и минерализация растительных остатков в почве зависит от соотношения в них углерода к азоту. ПКО левзеи сафлоровидной разлагаются медленно, соотношение C : N = 134–103. Минеральные удобрения (NPK) в дозе 60 кг д.в./га способствовали сужению соотношения C : N.

Длительное возделывание левзеи сафлоровидной способствовало обогащению дерново-подзолистой почвы органическим веществом. Содержание углерода выросло в слое 0–20 см относительно исходного уровня на 3.6% в варианте без удобрений и на 15.1% в варианте N60P60K60. Относительно целинного аналога (почвы под злаково-разнотравным лугом) содержание углерода в варианте без удобрений было больше на 15.2%, в варианте N60P60K60 – на 28.0% (рис. 2).

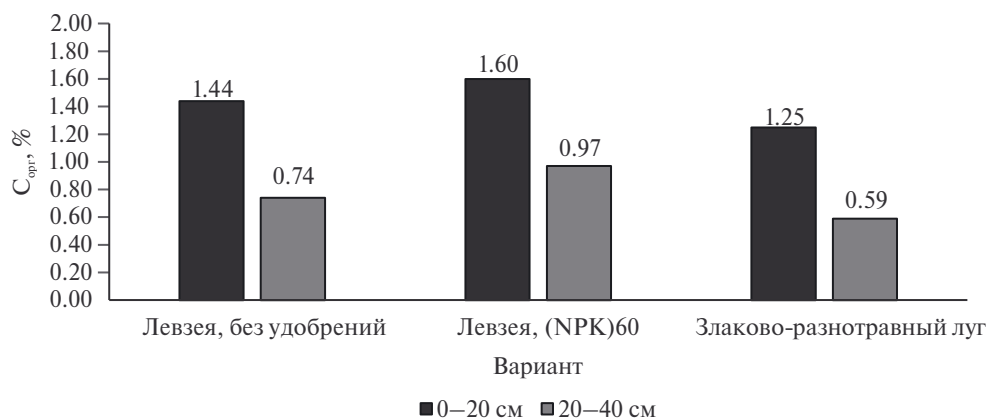


Рис. 2. Содержание органического углерода в дерново-подзолистой почве (среднее за 2022–2023 гг.).

Минеральные удобрения, с одной стороны, активизируют процессы микробного разложения органического вещества в почве. С другой стороны, минеральные удобрения определяют рост и развитие растений, интенсификацию корневой экссудации, накопление растительного опада, т.е. повышение секвестрации углерода в почве [3]. В наших исследованиях внесение N60P60K60 способствовало повышению урожайности зеленой массы левзеи в 3.3 раза относительно неудобренного варианта, что обеспечило накопление 17.3 т ПКО/га и повышение содержания углерода в слое 0–20 см почвы до 1.60%.

При оценке почвенной секвестрации необходимо учитывать более глубокие слои почвы, которые изменяются под влиянием растительной корневой массы. Обычно в слое почвы ниже 20 см содержание углерода уменьшается в связи с меньшим поступлением органической биомассы в эти горизонты, и его накопление происходит медленно. Перед посевом левзеи сафлоровидной содержание углерода в слое 20–40 см составляло 0.68%, в целинной почве злаково-разнотравного луга – 0.59%. В почве под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни содержание углерода в слое 20–40 см в варианте без удобрений было больше в 1.1 раза, в варианте N60P60K60 – в 1.4 раза, чем в исходной почве, и в 1.3–1.6 раза соответственно больше целинного аналога. Таким образом, большое количество пожнивно-корневых остатков левзеи сафлоровидной способствовало накоплению и депонированию атмосферного углерода в глубинных слоях почвы.

Содержание органического углерода в естественной почве злаково-разнотравного луга находилось на уровне $1.25 \pm 0.03\%$ в слое 0–20 см, $0.59 \pm 0.04\%$ – в слое 20–40 см [27]. С основной продукцией, образующейся в процессе фотосинтеза, из атмосферы связывается и ежегодно в почву поступает ≈ 1.01 т С/га, в качестве войлока – 1.39 т С/га. При этом соотношение С : N равно в органической биомассе соответственно 44 и 26, следовательно, биомасса разлагается значительно интенсивнее, чем ПКО левзеи сафлоровидной. Объем секвестрации естественным травостоем за вегетационный период составлял 2.40 т/га, что согласуется с литературными данными. Естественная дерново-подзолистая почва находится в устойчивом состоянии, процессы минерализации и гумусообразования под луговой растительностью уравновешены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее активно процесс поглощения фотосинтетически активной радиации для левзеи сафлоровидной проходил в период отрастание–цветение, сумма хлорофиллов

a и *b* в листьях составила 6.2–8.5 мг/г сухой массы. Содержание каротина в листьях было в 3–4 раза меньше, чем хлорофилла, его динамика в различные периоды роста культуры была аналогичной динамике содержания хлорофилла. В процессе вегетации содержание углерода в листьях левзеи сафлоровидной составляло 39.5–42.5%. Массовая доля основного продукта фотосинтеза – сахаров в листьях левзеи увеличивалась от фазы отрастания до фазы формирования семян с 4.0 до 11.8%, клетчатки – с 14.7 до 17.7%, жира – с 0.5 до 1.8%. Содержание элементов минерального питания (азота, фосфора и калия) в листьях левзеи сафлоровидной снижалось в процессе вегетации растений. Минеральные удобрения в дозе N60P60K60 в последствии не оказали значимого влияния на накопление основных минеральных элементов. В период активного роста содержание азота в листьях левзеи составило 1.3–1.6, фосфора – 1.1–1.6, калия – 4.4–5.1%.

Количество поглощенного в процессе фотосинтеза углерода для травостоя левзеи сафлоровидной составило 6.8–11.5 т С/га (24.3–41.3 т CO₂/га) в зависимости от варианта опыта, для естественного фитоценоза – 2.4 т С/га или 8.6 т CO₂/га за вегетационный период.

Левзея сафлоровидная характеризуется большой надземной и подземной зеленой массы уборки левзеи сафлоровидной 14-го года жизни в дерново-подзолистой почве обнаружено высокое количество ПКО – 13.7–17.3 т/га. В целинную почву злаково-разнотравного луга ежегодно поступало в среднем по 2.3 т зеленой массы/га, содержание ПКО (войлока) составило 3.8 т/га.

Содержание органического углерода в почве под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни определяли величина ежегодного поступления большого количества растительных остатков и скорость их гумификации, которые зависели от качественного состава и гидротермических условий. В слое 0–20 см почвы содержание углерода повысилось относительно исходного уровня на 3.6% в варианте без удобрений и на 15.1% в варианте N60P60K60, в слое 20–40 см – на 8.8–42.6% соответственно. В почве под многолетней кормовой культурой наблюдали депонирование углерода в виде гумусовых веществ за счет его запасаения в более глубоких слоях почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калов Р.О., Гакаев Р.А. Место природных травяных экосистем в глобальном углеродном балансе // Вестн. Чечен. гос. ун-та. 2022. № 6. С. 50–54.

2. Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Мерзлая Г.Е. Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 3–16. <https://doi.org/10.7868/S0002188118020011>
3. Кудеяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (Аналит. обзор) // *Почвоведение*. 2018. № 6. С. 643–658. <https://doi.org/10.1134/S1064229318060091>
4. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М: Наука, 1993. 293 с.
5. Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // *Почвы и окр. среда*. 2022. Т. 5. № 2. С. 1–7.
6. Кудеяров В.Н. Почвенно-биохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // *Почвоведение*. 2019. № 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010095>
7. Эседулаев С.Т. Многолетние травы и их смеси – важнейший фактор повышения плодородия почв и продуктивности пашни в Верхневолжье // *Плодородие*. 2022. № 6. С. 59–63. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.129.16>
8. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // *Физиология растений*. 1980. Т. 27. Вып. 2. С. 341–348.
9. Кумаков В.А. Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. М.: Агропромиздат, 2003. 270 с.
10. Мамаева Г.Г. Сравнительная оценка количества углерода, поступившего в почву из корневых или послеуборочных остатков при нулевой и традиционной обработках почвы (США) // *Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн.* 2005. № 32. С. 390.
11. Артемьева Е.П., Валдайских В.В., Радченко Т.А., Карпунин М.Ю. Перспективы выращивания высокотравных растений в качестве углероддепонирующих культур // *Аграрн. вестн. Урала*. 2022. № 12(227). С. 2–10. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10>
12. Лобков В.Т., Наполова Г.В. Способ определения хлорофилла в растениях гречихи: Пат. 2244916 РФ // *Б.И.* 2005. № 2. С. 1–4.
13. Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М. Практикум по земледелию. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
14. Матолинец Д.А. Кормовая продуктивность лезвие сафлоровидной при различных приемах возделывания в Среднем Предуралье: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Самара, 2021. 18 с.
15. Курсанов А.Л. Транспорт ассимилятов в растении. М.: Наука, 1976. 646 с.
16. Никитин С.Н. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах и динамика ростовых процессов при применении биологических препаратов // *Усп. совр. естествознания*. 2017. № 1. С. 33–38.
17. Ничипорович А.А. Физиология фотосинтеза и продуктивность растений. Физиология фотосинтеза. М., 1982. С. 7–34.
18. 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>
19. 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>
20. 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.
21. 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>
22. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and the global carbon cycle // *Biogeochemistry*. 2000. V. 48. P. 7–20.
23. Майсак Г.П., Авдеев Н.В., Старцева А.В., Иванова К.Ю. Накопление органического вещества и элементов минерального питания при длительном возделывании многолетних трав на дерново-подзолистой почве Пермского края // *Земледелие*. 2023. № 7. С. 18–21. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-7-1-48>
24. Благовещенский Г.В., Конанчук В.В., Тимошенко С.М. Углеродная секвестрация в травяных экосистемах // *Кормопроизводство*. 2019. № 9. С. 17–21.
25. Суховеева О.Э. Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками сельскохозяйственных культур // *Почвоведение*. 2022. № 6. С. 737–746. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060120>
26. Столбовой В.С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2020. Т. 34. № 7. С. 19–26. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10703>
27. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // *Почвоведение*. 2022. № 8. С. 1046–1055. <https://doi.org/10.1134/S1064229322080166>

Photosynthetic and Carbon Sequestering Ability of Safflower *Leucea* and Accumulation of Organic Carbon in Sod-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova^{a,#}, G. P. Maysak^a, I. V. Kazakova^a, O. V. Ivanova^a

^aPerm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS,
ul. Kultury 12, Perm region, d. Lobanovo 614532, Russia

[#]E-mail: nezavyalova@gmail.com

According to the content of photosynthesis pigments, the most active period of photosynthetically active radiation absorption by the leaves of *Leucea safflower* during the growing season was revealed. From the moment of full regrowth to flowering, the amount of chlorophylls a and b in the leaves was 6.2–8.5 mg/g of dry weight, carotene – 3–4 times less. During photosynthesis, the carbon content in the leaves of *Leucea safflower* practically did not change and amounted to 39.5–42.5%. The mass fraction of the main product of photosynthesis, sugars, increased from the regrowth phase to seed formation from 4.0 to 11.8%. During the period of active growth, the nitrogen content in the leaves of the leucea was 1.3–1.6, phosphorus – 1.1–1.6, potassium – 4.4–5.1%. After harvesting the safflower leucea of the 14th year of life, a high amount of crop and root residues (CRR) was determined in the sod-podzolic soil – 13.7–17.3 t/ha. The amount of carbon absorbed during photosynthesis was 6.8–11.5 t C/ha (24.3–41.3 t CO₂/ha), depending on the experiment variant, for natural phytocenosis this indicator was equal to 2.4 t C/ha (or 8.6 t CO₂/ha) during the growing season. The organic carbon content under the safflower leucea of the 14th year of life in the 0–20 cm soil layer increased relative to the initial level by 3.6% in the version without fertilizers, by 15.1% in the N60P60K60 variant, and in the 20–40 cm layer by 8.8–42.6%, respectively. Relative to the virgin analogue, the carbon content in the 0–20 cm layer was 15.2–28.0 higher, in the 20–40 cm layer – 25.0–64.4%, depending on the experiment variant, which indicated the deposition of carbon in the form of humic substances due to its storage in deeper soil layers.

Keywords: safflower leucea, photosynthesis, organic carbon, elements of mineral nutrition, sod-podzolic soil.