

ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА СИДЕРАЛЬНОГО ПАРА И РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ЕГО ОБРАБОТКИ

Н. В. Данилова, А. Р. Камалова, П. А. Курынцева, Р. И. Сафин,
С. Ю. Селивановская

Реферат. Исследования проводили с целью оценки влияния сидеральных культур на эмиссию CO_2 в атмосферу, путем расчета углеродного следа при выращивании горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и редьки масличной (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) с последующей заделкой биомассы в почву или скашиванием и оставлением ее на поверхности. Работу выполняли в 2023 году в Республике Татарстан. Почва опытного участка – серая лесная, супесчаная. Полевой эксперимент включал выращивание сидератов с последующей заделкой биомассы в почву при отвальной вспашке или дисковании, а также скашивании и оставлении ее на поверхности. Суммарная эмиссия CO_2 от почвенной респираторной активности на участках с горчицей белой за вегетационный период при скашивании составила 361 кг $\text{CO}_2/\text{га}$, при дисковании – 469 кг $\text{CO}_2/\text{га}$, при вспашке – 674 кг $\text{CO}_2/\text{га}$, тогда как с редькой масличной при тех же приемах – 368, 501 и 684 кг $\text{CO}_2/\text{га}$ соответственно. Суммарная эмиссия CO_2 от агротехнических мероприятий составляла 93...130 кг/га в зависимости от технологической операции основной обработки почвы. Количество CO_2 , зафиксированное в биомассе растений, существенно отличалось в зависимости от вида культуры: для горчицы белой оно находилось на уровне 18605 кг $\text{CO}_2/\text{га}$, для редьки масличной – 10560 CO_2 кг/га. Баланс CO_2 при скашивании горчицы белой составлял -18145 кг/га, при дисковании – -18004 кг/га, при вспашке – -17791 кг/га, для редьки масличной – соответственно -10107, -9991 и -9756 кг/га. Выращивание горчицы белой более эффективный способ улавливания углерода из атмосферного воздуха. На углеродный баланс больше всего влияют количество углерода, зафиксированное в растительной биомассе, и применяемые агротехнические мероприятия.

Ключевые слова: сидеральные культуры, эмиссия CO_2 , углеродный след, респираторная активность, агротехнические мероприятия

Введение. Эмиссия CO_2 в атмосферу выступает основным путем потери почвенного углерода и служит одним из индикаторов биологического здоровья почвы [1]. Образование CO_2 – результат гетеротрофного (микроорганизмы, почвенная фауна) и автотрофного (корни растений) дыхания почвы [2, 3]. Факторы, определяющие эмиссию CO_2 из почвы, имеют абиотическую (температура, влажность почвы), биотическую (вид растительного покрова, состав и функционирование почвенного микробиома), а также антропогенную природу (обработка почв, внесение удобрений) [4, 5, 6]. При этом факторы часто взаимосвязаны между собой, так повышение температуры и влажности почвы обычно увеличивает микробную активность почвы и высвобождение питательных веществ, тем самым увеличивая эмиссию CO_2 в атмосферу. Агротехнические мероприятия, которые повышают эффективность сохранения осадков в почве, снижают температуру почвы, благодаря растительному покрову, потенциально могут повысить биологическую активность почвы без увеличения эмиссии CO_2 , что приведет к увеличению секвестрации органического вещества почвы [7].

За последние несколько десятилетий сидеральные культуры выращивали во всем мире с целью увеличения плодородия и агрегирования почвы, борьбы с сорняками, снижения выщелачивания питательных веществ и эрозии почвы, а также повышения секвестрации углерода [8, 9, 10]. Однако мало что известно о влиянии видов сидеральных культур,

качества и количества их биомассы, а также способов заделки биомассы в поле, на эмиссию парниковых газов. Растительные остатки, запаханные в почву, разлагаются быстрее, чем те, что находятся на поверхности, из-за повышенного контакта с почвенными микроорганизмами [11, 12, 13]. Сидеральные культуры могут увеличить выбросы CO_2 , по сравнению с чистым паром, вследствие активизации почвенного микробного сообщества корневыми выделениями и поступления в почву их биомассы.

Горчица белая (*Sinapis alba* L.) и редька масличная (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) из семейства крестоцветных часто используются в качестве сидеральных культур, потому что их посевы способствуют предотвращению эрозии почвы и вымыванию азота в поверхностные воды, улучшают питательный состав почвы, подавляют почвенных вредителей и патогены, включая растительноядные нематоды [14, 15, 16]. Также исследователи отмечают такие преимущества сидеральных культур, как быстрый рост, формирование большого количества биомассы и низкая стоимость семян для посева [17].

Сельское хозяйство выступает третьей отраслью после энергетики и промышленности по выбросам парниковых газов в России [18]. Максимальный вклад в эти выбросы вносит животноводство и системы обращения с навозом. Однако наибольший вклад в эмиссию парниковых газов, который зачастую не учитывается, вносят агротехнические мероприятия на полях, повышающие респираторную

активность почвенного микробного сообщества. В атмосферу выделяется углерод, содержащийся в почвенном органическом веществе, тем самым снижая ее плодородие.

Цель исследования – изучить влияние сидератов на эмиссию CO₂ в атмосферу, путем расчета углеродного следа от выращивания горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и редьки масличной (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) с последующей заделкой биомассы в почву при отвальной вспашке, дисковании или скашивании (без обработки почвы) с оставлением ее на поверхности для совершенствования методов управления плодородием почв.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в стационарном полевом опыте по биологизации земледелия ФГБОУ ВО Казанский ГАУ. Опытный участок находится на научной площадке агробиотехнопарка Казанского ГАУ у с. Нармонка Лаишевского района, г. Казань (55.502299°, 49.297227°). В 2022 году на участке выращивали яровой ячмень. Эксперимент проводили с мая по сентябрь 2023 года.

Метеорологические условия 2023 года в период вегетации растений были следующими: среднемесячная температура мая составила 15,6°C (на 0,7°C выше среднегодовой за период 2013–2023 годов), июня – 16,2°C (на 0,5°C ниже среднегодовой), июля – 21,3°C (на 0,7°C выше среднегодовой), августа – 19,6°C (на 0,2°C ниже среднегодовой), сентября – 14,7 °C (на 2,2°C выше среднегодовой). Влажность в мае составила 54,2% (на 3,8% ниже среднегодовой), в июне – 52,7% (на 12,3% ниже среднегодовой), в июле – 64% (на 4% ниже среднегодовой), в августе – 62,3% (на 7,7% ниже среднегодовой), в сентябре – 65,5% (на 9,5% ниже среднегодовой). В целом, агроклиматические параметры вегетационного периода отличались периодически засушливыми явлениями, что отразилось на формировании урожая биомассы сидеральных культур.

Почва опытного участка – серая лесная, характеризовалась как супесь по Качинскому и пылеватый суглинок по Ферре. Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции на приборе Microtrac Bluewave, в соответствии с ISO 13320:2020, на основании относительного содержания фракций песка, пыли и глины по Аттербергу. Агрохимические характеристики следующие: содержание гумуса по Тюрину 3,0%, подвижного фосфора высокое (250 мг/кг), калия – повышенное (145 мг/кг по Кирсанову), содержание общего углерода (2,8%) и азота (0,184%) по методу Дюма определяли на приборе VariomaxCube согласно ISO 10694:2024 и ISO 13878:1998, реакция почвенного раствора была близка к нейтральной (pH 6,6).

На опытных участках были посеяны редька масличная (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) сорта Альфа (норма высева 15 кг/га) и горчица

белая (*Sinapis alba*) сорта Рапсодия (норма высева 20 кг/га). Общая площадь каждого участка 1,5 га.

Для подготовки почвы под посев озимой пшеницы использовали три способа основной обработки почвы – отвальная (вспашка плугом), безотвальная (дискование тяжелой бороной), нулевая (No Till). В вариантах со вспашкой и дискованием сидераты заделывали в оптимальные сроки, путем двукратной обработки дискатормом в разных направлениях. В последующем, выполняли основную обработку почвы под озимую пшеницу. В варианте с No Till осуществляли скашивание сидератов ротационной косилкой без обработки почвы.

Мониторинг эмиссии CO₂ проводили каждые 4 недели с использованием портативного инфракрасного газоанализатора Wohler CD 210 (Бохум, Германия). Оценку почвенных потоков диоксида углерода осуществляли «камерным методом» [19] по изменению концентрации CO₂ в непрозрачных цилиндрических ПВХ-камерах объемом 1,5 л и диаметром 110 мм, вкопанных в почву на глубину 4 см. Во время измерений камеры герметично накрывали крышкой (объединенной с инфракрасным газоанализатором с разрешением 1 ppm) и встроенным вентилятором для перемешивания воздуха в камере. Общее время экспозиции для каждой камеры составляло 4 мин., первая из которых требовалась для обеспечения равномерности изменения концентрации CO₂, остальные 3 мин. – на регистрацию прироста концентрации. Перед каждым измерением газоанализатор калибровали. Для расчета изменения массы углерода (в форме углекислого газа) в камере за время экспозиции использовали формулу на основе уравнения Менделеева-Клапейрона [19]. Параллельно прибором Checktemp-1 (Hanna, Германия) измеряли температуру приземного слоя воздуха и почвы на глубине 5 и 10 см с точностью до 0,1°C.

Отбор почвенных образцов осуществляли каждые 4 недели в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019. Углерод микробной биомассы почвы оценивали согласно ISO 16072:2002 с использованием газового хроматографа Nexis GC-2030 и программного обеспечения Lab Solution (Shimadzu, Япония). Навеску почвы массой 1 г и 10 мг D-глюкозы в качестве легкодоступного питательного субстрата помещали в хроматографическую вialу и инкубировали в течение 24 часов при температуре 20°C. Измерение проводили на капиллярной колонке Rt-Q-BOND 30 m с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя нанесенной фазы 20 мкм. Скорость потока составляла 10 мл/мин, объем впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 минут на образец. Влажность почвы определяли по ГОСТ 28268-89.

Баланс углекислого газа (ΔCO₂) учитывает эмиссию углерода из почвы, которая включает респираторную активность, выбросы от агротехники и выбросы от внесения азотных

удобрений, а также количество углерода, накопившееся в почве в виде биомассы растений и органических удобрений [20]. Для расчета баланса углерода за вегетационный период редьки масличной и горчицы белой была использована следующая формула:

$$\Delta CO_2 = CO_2 \text{ агротехника} + PA - \text{сбиомасса}$$

где ΔCO_2 – баланс углерода,

CO_2 агротехника – выбросы углерода от сжигания топлива при использовании сельскохозяйственных машин с соответствующими орудиями,

РА – респираторная активность почвы,

Сбиомасса – углерод растительной биомассы.

Расчет углерода растительной биомассы проводили на основании данных по урожайности культуры и его содержания в сухой биомассе.

Еще одним процессом, который приводит к увеличению эмиссии парниковых газов, выступает сжигание топлива при выполнении агротехнических мероприятий. Для каждого вида обработки было рассчитано количество топлива, согласно нормам его расхода, а также эмиссия CO_2 от сжигания горючего в передвижных источниках согласно методике расчета выбросов углекислого газа, разработанная с учетом национальных условий Узбекистана и ее особенности [21].

Все измерения проводили не менее чем в трехкратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с использованием Microsoft Office Excel 2021 (США).

Все графические данные содержат средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha = 0,05$.

Результаты и обсуждение. На первом этапе оценили изменение температуры и влажности почвы для каждой культуры при трех способах обработки (рис. 1). Весной в начале сезона приемы обработки почвы на опытных участках с редькой масличной и горчицей белой не отличались, поэтому температура почвы имела одинаковые значения. В июне температура почвы снизилась, при этом под горчицей белой она была больше, чем под редькой масличной. Такие различия, вероятно, связаны с тем, что редька масличная отличается размером листьев и большей площадью проективного покрытия. Способ обработки внес вклад в конце июля – были установлены одинаковые закономерности для обеих культур.

В конце мая влажность почвы опытных участков обеих культур была одинаковой. В июне отмечали влияние на увлажнение почвы самих культур – 11,7% под редькой масличной и 12,04% под горчицей белой. При этом влажность находилась в обратной связи с температурой почвы (рис. 1). Значительное влияние оказала обработка почвы в конце июля: максимальная в опыте влажность (13,9% и 13,2%) была зафиксирована при нулевой обработке (скашивании), а минимальная (9,4% и 9,3%) при наибольшей интенсивности обработки (вспашка), которая привела к потере почвенной влаги.

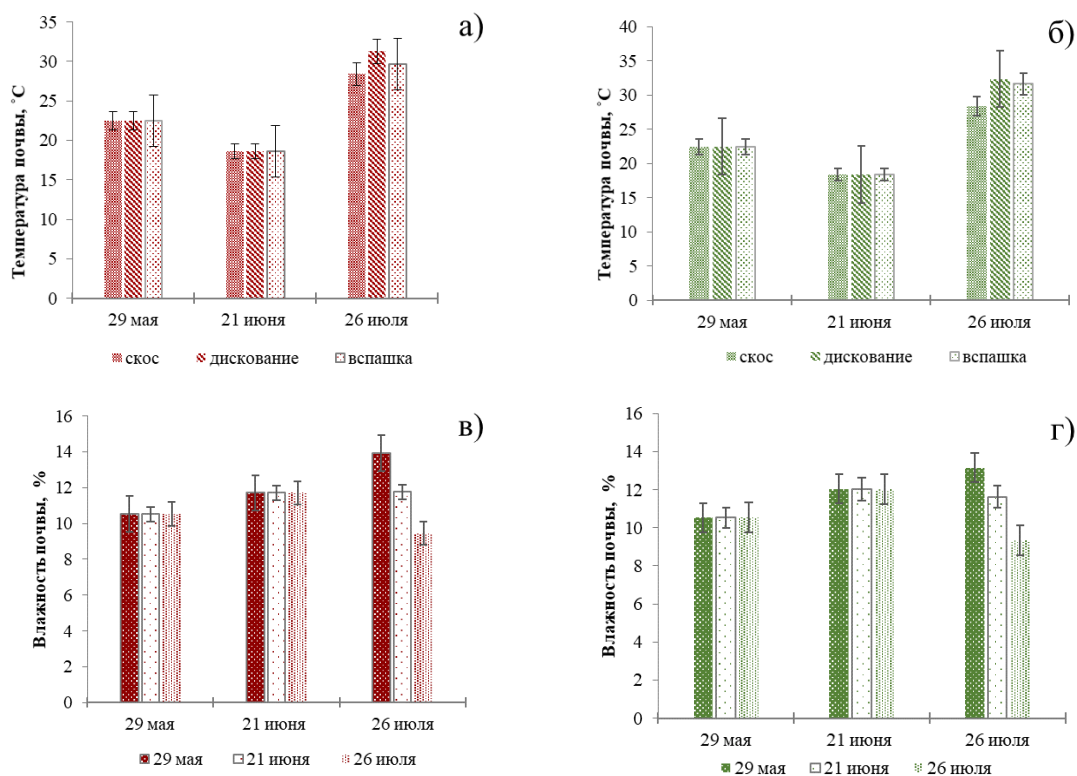


Рис. 1 – Изменение температуры и влажности почвы под редькой масличной (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) (а, в) и горчицей белой (*Sinapis alba*) (б, г) в зависимости от способа обработки

В мае до и после посева сидератов все участки обрабатывали одинаково, а в конце июля (до достижения сидератами стадии созревания семян) – по-разному: вспашка, дискование и скашивание. В связи с этим, с мая по июнь, РА всех участков достоверно не отличалась по вариантам ($p < 0,05$). В мае, в первый день отбора почвы, величины РА были выше во всех вариантах в среднем в 2,5 раза, по сравнению с отбором в июне (рис. 2). Вероятно, это связано с незначительным понижением температуры с 17 до 15 °С. Значительный рост РА отмечен в июле на всех исследуемых участках, то есть по мере увеличения температуры воздуха с 15 до 27 °С. Она заметно

возросла в вариантах, где сидерат был скошен (с 0,018 до 0,051 г/С/м²*ч), почва задискована (с 0,017 до 0,089 г/С/м²*ч) и вспашана (с 0,019 до 0,161 г/С/м²*ч). Активизация микробиологических процессов происходила в более теплых условиях.

Скашивание оказало наименьшее влияние на РА, тогда как дискование и вспашка, наоборот, приводили к увеличению РА в 1,7 и 3,2 раза соответственно. Более интенсивная обработка почвы (вспашка), в частности, привела к значительному увеличению респираторной активности (0,161 г/С/м²*ч) к концу вегетационного периода, что связано с интенсивным перемешиванием почвы и увеличением ее аэрации.

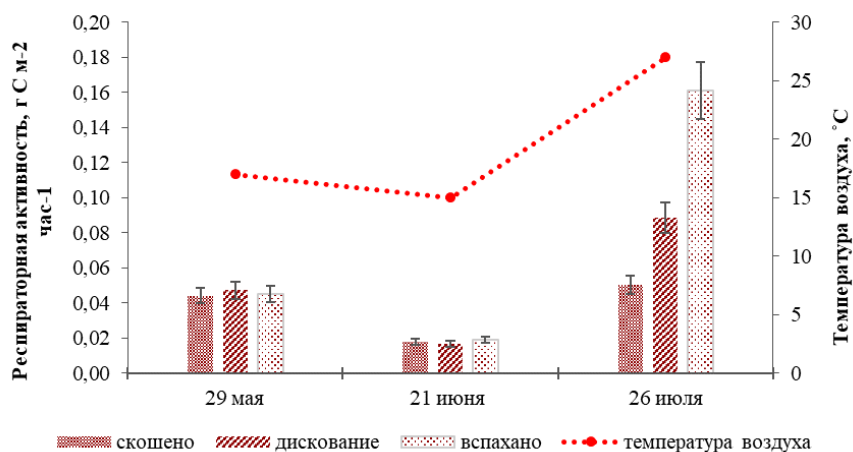


Рис. 2 – Изменение респираторной активности и влажности почвы с редькой масличной (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) в зависимости от способа обработки и температуры воздуха

Аналогичные параметры оценивали для участков, на которых росла горчица белая (рис. 3). Установлены схожие закономерности в изменении РА почвы. В мае и июне достоверных различий между участками с посевами изучаемых культур по РА не наблюдали ($p < 0,05$), увеличение влажности и снижение температуры почвы в июне привело к уменьшению РА в 1,4 раза. При этом на РА почвы оказал влияние вид растения: в июне, когда корневая система

растений была сформирована, РА почвы под горчицей белой была в 1,7...2,1 раз выше, чем под редькой масличной. В конце вегетационного сезона отмечена обратная закономерность: РА почвы под горчицей белой была в 1,2...2,3 раза ниже, чем под редькой масличной. В целом, повышение температуры воздуха в июле, как и в случае с редькой масличной, вызвало увеличение РА, которое было наиболее выражено на вспаханном поле (до 0,139 г/С/м²*ч).

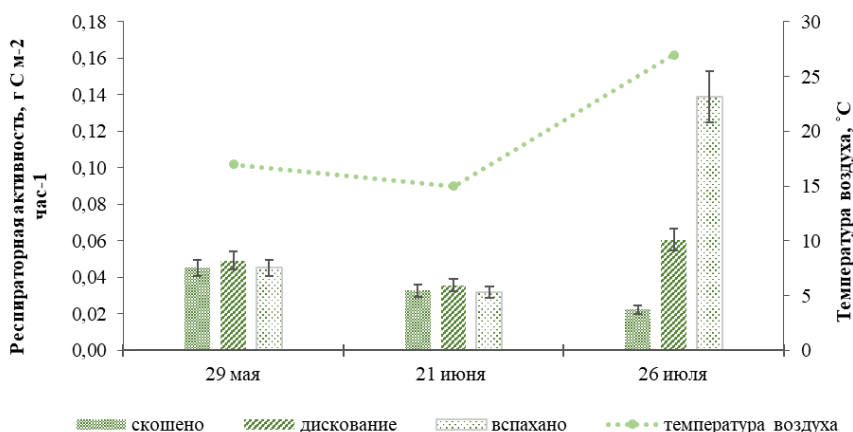


Рис. 3 – Изменение респираторной активности и влажности почвы с горчицей белой (*Sinapis alba*) в зависимости от способа обработки и температуры воздуха

Далее была определена кумулятивная респираторная активность почвы при разных способах обработки за весь вегетационный период (58 суток) (табл. 1). Несмотря на то, что различия в обработке почвы были только в конце вегетационного сезона, суммарная эмиссия CO₂ для разных вариантов заделки сидерата отличалась в

1,3 раза в варианте с дискованием и в 1,9 раза в варианте со вспашкой, по сравнению со скашиванием без обработки почвы. Суммарная эмиссия CO₂ из почвы под горчицей белой при скашивании была выше, чем в варианте с редькой масличной, на 1,9 %, при дисковании – на 6,9% и при вспашке – на 1,4%.

Таблица 1 – Кумулятивная респираторная активность микробного сообщества почвы при разных способах обработки

Культура	Кумулятивная РА, кг С на 1 га/58 суток		
	скашивание	дискование	вспашка
Редька масличная	360,82	468,66	674,41
Горчица белая	367,62	501,09	683,75

Существует два основных процесса, связанных с углеродом: эмиссия в виде выделения CO₂ в атмосферу и поглощение, при котором углерод усваивают автотрофные организмы-продуценты. В качестве поглощения углерода рассматривали его фиксацию в фитомассе растений.

Так как урожайность горчицы белой и содержание углерода в ее фитомассе были выше, чем в вариантах с редькой масличной, на 60% и 6,3% соответственно, количество углерода, зафиксированное в ее растительной биомассе, было также больше (табл. 2).

Таблица 2 – Количество углерода, которое аккумулировалось в биомассе растений за вегетационный период

Культура	Урожайность по сухой биомассе, т/га	Содержание С в фитомассе, %	Углерод, зафиксированный растительной биомассой, кг/га
Редька масличная	8,25	32 [22]	2640
Горчица белая	13,68	34 [23]	4651

Поскольку технологические операции отличались только на последнем этапе, то разница между эмиссией CO₂ при скашивании, дисковании и вспашке была не велика

– до 25 % (табл. 3). Нулевая обработка почвы (скашивание) ожидаемо сопровождалась минимальными выбросами CO₂ (0,092 кг CO₂/га), а вспашка – максимальными (0,13 кг CO₂/га).

Таблица 3 – Расчет выбросов CO₂ от различных видов агротехнических мероприятий

Показатель	Прием обработки почвы и заделки биомассы		
	скашивание	дискование	вспашка
Расход топлива на агротехнические мероприятия, л/га:			
в том числе весенняя вспашка + боронование	22	22	22
посев	6	6	6
осенняя обработка	6	9	20
Суммарный расход топлива на агротехнические мероприятия за вегетационный сезон, л/га	34	37	48
Суммарный расход топлива на агротехнические мероприятия за вегетационный сезон, т/га	0,03	0,03	0,04
Суммарные выбросы CO ₂ от сжигания топлива при проведении агротехнических мероприятий за вегетационный сезон, кг CO ₂ /га	92	100	130

Во всех вариантах ΔCO₂ был отрицательным, то есть процесс улавливания углерода в фитомассе преобладал над эмиссией CO₂ (табл. 4). В случае вспашки ΔCO₂ был наименьшим на участке и с редькой масличной, и с горчицей белой. Величина этого показателя составила -9756 кг/га и

-17791 кг/га соответственно. Максимальные ΔCO₂ для обеих культур отмечали в случае скашивания сидератов без обработки почвы (-10107 кг/га и -18145 кг/га), при этом в вариантах с горчицей белой величина показателя была выше в 1,8 раза вследствие ее большей фитомассы.

Таблица 4 – Баланс CO₂ в пахотном слое почвы, засеянной редькой масличной и горчицей белой, в течение вегетационного периода

Вид растения	Способ обработки	Выбросы CO ₂ от агротехники, CO ₂ кг/га за 58 сут	Кумулятивная РА, кг CO ₂ /1 га/58 суток	CO ₂ зафиксированный в биомассе CO ₂ кг/га за 58 сут	ΔCO ₂ кг/га за 58 сут
Редька масличная	скашивание	92	361	10560	-10107
	дискование	100	469	10560	-9991
	вспашка	130	674	10560	-9756
Горчица белая	скашивание	92	368	18605	-18145
	дискование	100	501	18605	-18004
	вспашка	130	684	18605	-17791

Выводы. Почва под горчицей белой характеризовалась более высокой влажностью и большей респираторной активностью в середине вегетации, что обусловлено более интенсивным развитием как корневой, так и наземной фитомассы горчицы белой. Выращивание горчицы белой обеспечивает в 1,8 раза большее улавливание углерода из атмосферного воздуха, чем выращивание редьки масличной. Рассчитанный с учетом эмиссии CO₂ от выбросов при работе сельскохозяйственной техники, внесения азотных удобрений и респираторной активности почвы баланс углерода в вариантах со скашиванием биомассы редьки

масличной и горчицы белой без обработки почвы был наиболее высоким – -10107 и -18145 кг/га против -9991 и -18004 кг/га при дисковании и -9756 и -17791 кг/га при вспашке соответственно. При этом наибольший вклад в снижение углеродного следа обеспечила горчица белая, благодаря формированию большей фитомассы.

Сведения об источнике финансирования. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Литература

1. Effects of agricultural practices on carbon emission and soil health / M. Galic, D. Bilandzija, A. Percin, et. al. // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2019. Vol. 7. No. 3. P. 539–552.
2. Seasonal dynamics of soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components in subtropical camphor forests / P. He, W. Yan, Y. Peng, et al. // Forests. 2023. Vol. 14. No. 12. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/12/2397> (дата обращения: 18.10.2024).
3. Cover crop effects on soil carbon dioxide emissions in a semiarid cropping system / A. Nilahyane, R. Ghimire, V. R. Thapa, et al. // Agrosystems, Geosciences and Environment. 2020. Vol. 3. No. 1. URL: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/agg2.20012> (дата обращения: 18.10.2024).
4. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А. Влияние контрастных режимов увлажнения на эмиссию CO₂ из серой лесной почвы под сеяным лугом и чистым паром // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1244–1258.
5. Warming reduces soil CO₂ emissions but enhances soil N₂O emissions: A long-term soil transplantation experiment / X. Zhu, L. Chang, Y. Hu, et al. // European Journal of Soil Biology. 2024. Vol. 121. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164556324000207> (дата обращения: 18.10.2024).
6. Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review / G. Chataut, B. Bhatta, D. Joshi et al. // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. Vol. 11. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323000406> (дата обращения: 18.10.2024).
7. Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China / Y. Liu, S. Liu, S. Wan, et al. // Agricultural and Forest Meteorology. 2016. Vol. 226–227. P. 186–198.
8. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis / I. Muhammad, U. M. Sainju, F. Zhao, et al. // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 192. P. 103–112.
9. Эседуллаев С.Т., Касаткин С.А. Использование сидеральных культур и их смесей при выращивании картофеля в Верхневолжье // Земледелие. 2021. № 6. С. 16-20.
10. Khan A., Ali N., Haider S.I. Maize productivity and soil carbon storage as influenced by wheat residue management // Journal of Plant Nutrition. 2018. Vol. 41. No. 14. P. 1868–1878.
11. Ladoni M., Kravchenko A.N., Phillip Robertson G. Topography mediates the influence of cover crops on soil nitrate levels in row crop agricultural systems // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. No. 11. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0143358&tpe=printable> (дата обращения: 18.10.2024).
12. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti / M. J. Lynch, M. J. Mulvaney, S. C. Hodges, et al. // SpringerPlus. 2016. Vol. 5. No. 1. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40064-016-2651-1> (дата обращения: 18.10.2024).
13. Wickings K., Grandy A.S., Kravchenko A.N. Going with the flow: Landscape position drives differences in microbial biomass and activity in conventional, low input, and organic agricultural systems in the Midwestern U.S. // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2016. Vol. 218. P. 1–10. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880915301407> (дата обращения: 18.10.2024).
14. Green Manure for Restoring and Improving the Soil Nutrients Quality / S. Chimouriya, J. Lamichhane, D. Gauchan, et al. // International Journal of Research. 2018. Vol. 5. No. 20. P. 1064–1074.
15. The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review /

A. Scavo, S. Fontanazza, A. Restuccia, et al. // *Agronomy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 42. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-022-00825-0> (дата обращения: 18.10.2024).

16. Гамзиков Г.П., Сулейменов С.З. Влияние биомассы растений на азотный режим серой лесной почвы и продуктивность полевых культур // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020. № 4. С. 32-36.

17. Effect of different N nutrient contents on biomass of green manure as second crop, under unfavorable climate conditions in Hungary / P. Mikó, G. P. Kovács, A. Perceze, et al. // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2016. Vol. 14. No. 3. P. 309–324.

18. Ахметшина Л. Г., Порвадов М. Г., Шангутов А. О. Оценка выбросов парниковых газов при возделывании сельскохозяйственных земель в концепте государственной экологической политики // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. № 6 (396). С. 566–571.

19. Карелин Д. В., Замолотчиков Д. Г., Краев Г. Н. Методическое руководство по анализу эмиссий углерода из почв поселений в тундре: монография. М.: Изд-во ЦЭПЛИ РАН, 2015. 64 с.

20. Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in Iowa / N. Farahbakhshazad, D. L. Dinnes, C. Li, et al. // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2008. Vol. 123. No. 1-3. P. 30–48.

21. Программа развития ООН. Пилотная методика расчета выбросов углекислого газа, разработанная с учетом национальных условий Узбекистана и ее особенности. 2022. 36 с. URL: https://esg-library.mgimo.ru/publications/pilotnaya-metodika-rascheta-vybrosov-uglekislogo-gaza-razrabotannaya-s-uchetom-natsionalnykh-usloviy/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 09.10.2024).

22. Павлова Ю.Л., Пронвич Н.А., Курынцева П.А. Баланс углерода при выращивании растений-сидератов в разных температурных режимах // *Почвы – опора России: тезисы докладов IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева*. Москва – Казань. 2024. С. 651–653.

23. Изменение содержания органического углерода в почве и продуктивности озимой пшеницы под действием сидератов, навоза и их сочетаний с биодеструктором / А. В. Сафонов, Е. Н. Кузин, А. Н. Арефьев и др. // *Сурский вестник*. 2019. Т. 4. № 8. С. 34–39.

Сведения об авторах:

Данилова Наталья Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии и природопользования, e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

Камалова Алина Ринатовна – младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии и природопользования, e-mail: akhtjamovaalina07@gmail.com

Курынцева Полина Александровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «GreenAgro» Института экологии и природопользования, e-mail: rolinazwerewa@yandex.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Сафин Радик Ильясович – доктор сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой общего земледелия, защиты растений и селекции, e-mail: radiksaf2@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

Селивановская Светлана Юрьевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий Института экологии и природопользования, e-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

ESTIMATING THE CARBON FOOTPRINT OF COVER CROPS AND VARIOUS METHODS OF ITS PROCESSING

N. V. Danilova, A. R. Kamalova, P. A. Kuryntseva, R. I. Safin, S. Yu. Selivanovskaya

Abstract. The aim of the research is to evaluate the impact of cover crops on CO₂ emissions into the atmosphere by calculating the carbon footprint during the cultivation of white mustard (*Sinapis alba* L.) and oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*), followed by incorporating the biomass into the soil. The study was conducted at the experimental field of the Agrobiotechnology park of Kazan State Agrarian University in the village of Narmonka, Laishevsky District, Kazan, from May to September 2023. The soil at the experimental site is gray forest soil, sandy loam in texture. The field experiment included growing cover crops followed by incorporating the biomass into the soil using three methods: traditional plowing, disking, and mowing without soil treatment. The total CO₂ emissions from soil respiratory activity in plots with white mustard during mowing, disking, and plowing over the growing season amounted to 361, 469, and 674 kg CO₂/ha, respectively; while for oilseed radish under the same treatments, emissions were 368, 501, and 684 kg CO₂/ha. The total CO₂ emissions from agricultural practices ranged from 93 to 130 kg CO₂/ha depending on the last treatment method used. The CO₂ captured in plant biomass significantly differed depending on the crop type: for white mustard, it was 18.605 kg CO₂/ha; for oilseed radish, it was 10.560 kg CO₂/ha. The calculated carbon balance showed that the difference in carbon dioxide emissions (Δ CO₂) when mowing white mustard was -18.145 kg/ha; for disking -18.004 kg/ha; and for plowing -17.791 kg/ha. For oilseed radish, lower values were established: -10.107 kg/ha; -9.991 kg/ha; and -9.756 kg/ha, respectively. Growing white mustard is an effective method for capturing carbon from atmospheric air. The carbon balance is most influenced by the amount of carbon captured in plant biomass and the agricultural practices applied.

Key words: cover crops, CO₂ emission, carbon footprint, respiratory activity, agricultural practices.

References

1. Galic M, Bilandzija D, Percin A. Effects of agricultural practices on carbon emission and soil health. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2019; Vol.7. 3. 539-552 p.

2. He P, Yan W, Peng Y. Seasonal dynamics of soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components in subtropical camphor forests. [Internet]. *Forests*. 2023; Vol.14. 12. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/12/2397>.

3. Nilahyane A, Ghimire R, Thapa VR. Cover crop effects on soil carbon dioxide emissions in a semiarid cropping system. [Internet]. *Agrosystems, Geosciences and Environment*. 2020; Vol.3. 1. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/agg2.20012>.

4. Lopes de Gerenyu VO, Kurganova IN, Khoroshaev DA. [The influence of contrasting moisture regimes on CO₂ emission from gray forest soil under a sown meadow and pure fallow]. *Pochvovedenie*. 2018; 10. 1244-1258 p.

5. Zhu X, Chang L, Hu Y. Warming reduces soil CO₂ emissions but enhances soil N₂O emissions: A long-term soil transplantation experiment. [Internet]. *European Journal of Soil Biology*. 2024. Vol. 121. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164556324000207>.
6. Chataut G, Bhatta B, Joshi D. Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. [Internet]. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023; Vol.11. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323000406>.
7. Liu Y, Liu S, Wan S. Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016; Vol.226-227. 186-198 p.
8. Muhammad I, Sainju UM, Zhao F. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and tillage research*. 2019; Vol.192. 103-112 p.
9. Esedullaev ST, Kasatkin SA. [Use of cover crops and their mixtures in growing potatoes in the upper Volga region]. *Zemledelie*. 2021; 6. 16-20 p.
10. Khan A, Ali N, Haider SI. Maize productivity and soil carbon storage as influenced by wheat residue management. *Journal of Plant Nutrition*. 2018; Vol.41. 14. 1868-1878 p.
11. Ladoni M, Kravchenko AN, Phillip Robertson G. Topography mediates the influence of cover crops on soil nitrate levels in a row crop agricultural systems. [Internet]. *PLoS ONE*. 2015; Vol.10. 11. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0143358&tpe=printable>.
12. Lynch MJ, Mulvaney MJ, Hodges SC. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti. [Internet]. *SpringerPlus*. 2016; Vol.5. 1. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40064-016-2651-1>.
13. Wickings K, Grandy AS, Kravchenko AN. Going with the flow: Landscape position drives differences in microbial biomass and activity in conventional, low input, and organic agricultural systems in the Midwestern U.S. [Internet]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2016; Vol.218. 1-10 p. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880915301407>.
14. Chimouriya S, Lamichhane J, Gauchan D. Green manure for restoring and improving the soil nutrients quality. *International Journal of Research*. 2018; Vol.5. 20. 1064-1074 p.
15. Scavo A, Fontanazza S, Restuccia A. The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review. [Internet]. *Agronomy for Sustainable Development*. 2022; Vol.42. [cited 2024, October 18]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-022-00825-0>.
16. Gamzikov GP, Suleymenov SZ. [Effect of plant biomass on the nitrogen regime of gray forest soil and productivity of field crops]. *Rossiiskaya selskokhozyaystvennaya nauka*. 2020; 4. 32-36 p.
17. Miko P, Kovacs GP, Percze A. Effect of different N nutrient contents on biomass of green manure as second crop, under unfavorable climate conditions in Hungary. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2016; Vol.14. 3. 309-324 p.
18. Akhmetshina LG, Porvadov MG, Shangutov AO. [Assessment of greenhouse gas emissions from the cultivation of agricultural land in the concept of state environmental policy]. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2023; 6 (396). 566-571 p.
19. Karelin DV, Zamolodchikov DG, Kraev GN. Metodicheskoe rukovodstvo po analizu emissii ugleroda iz pochv poselenii v tundre: monografiya. [Methodological guidelines for the analysis of carbon emissions from soils of settlements in the tundra: monograph]. Moscow: Izd-vo TsEPL RAN. 2015; 64 p.
20. Farahbakhshzad N, Dinnes DL, Li C. Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in Iowa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2008; Vol.123. 1 3. 30-48 p.
21. United Nations Development Program. Pilot methodology for calculating carbon dioxide emissions, developed taking into account the national conditions of Uzbekistan and its features. 2022; 36 p. [cited 2024, October 09]. Available from: https://esg-library.mgimo.ru/publications/pilotnaya-metodika-rascheta-vybrosov-uglekislogo-gaza-razrabotannaya-s-uchetom-natsionalnykh-usloviy/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com.
22. Pavlova YuL, Pronovich NA, Kuryntseva PA. Balans ugleroda pri vyrashchivanii rasteniy-sideratov v raznykh temperaturnykh rezhimakh. Pochvy – opora Rossii: tezisy dokladov IX sezda Obshchestva pochvedov im.V.V. Dokuchaeva. [Carbon balance when growing green manure plants under different temperature conditions. Soils are the support of Russia: abstracts of reports of the IX Congress of V.V.Dokuchaev Soil Science Society]. Moscow – Kazan. 2024; 651-653 p.
23. Safonov AV, Kuzin EN, Arefev AN. [Changes in the content of organic carbon in the soil and the productivity of winter wheat under the influence of green manure, manure and their combinations with a biodestructor]. *Surskiy vestnik*. 2019; Vol.4. 8. 34-39 p.

Authors:

Danilova Natalya Viktorovna – Ph.D. of Biological Sciences, Senior Researcher of Educational and Scientific Laboratory of Agro- and Ecobiotechnology Center of Institute of Ecology and Environmental Management, e-mail: natasha-danilova91@mail.ru

Kamalova Alina Rinatovna – Junior Researcher, Educational and Scientific Laboratory of Agro- and Ecobiotechnology Center of Institute of Ecology and Environmental Management, e-mail: akhtjamovaalina07@gmail.com

Kuryntseva Polina Aleksandrovna – Ph.D. of Biological Sciences, Senior Researcher of “GreenAgro” Research Laboratory of Institute of Ecology and Environmental Management, e-mail: polinazwerewa@yandex.ru

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Safin Radik Ilyasovich – Doctor of Agricultural Sciences, Head of General agriculture, plant protection and breeding Department, e-mail: radiksaf2@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

Selivanovskaya Svetlana Yurievna – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of Educational and Scientific Laboratory of Agro- and Ecobiotechnology Center of Institute of Ecology and Environmental Management, e-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia