

БИОЛОГИЗАЦИЯ СЕВООБОРОТОВ ЧЕРЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ КАК ФАКТОР СЕКВИСТРАЦИИ УГЛЕРОДА

Жлоба Л.Д.*

zhlobal@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3676-1752>

Кунанбаев К.К., кандидат биологических наук

kai-82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9069-8558>

Жлоба Г.П., магистр агрохимии и почвоведения

galinka_forever@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9117-6268>

Журик С.А., магистр агрономии

zhurik-sergej@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7155-9771>

ТОО «Научно-производственный центр зернового хозяйства им. А.И. Бараева», п. Научный, Казахстан

Аннотация. В условиях глобальных климатических изменений и деградации почвенного покрова поиск эффективных методов секвестрации углерода в агроценозах становится приоритетной задачей. Биологизация севооборотов через использование многокомпонентных растительных смесей рассматривается как перспективный инструмент восстановления углеродного баланса почв. Цель исследования - оценить влияние сидеральных смесей и паровых вариантов на содержание общего гумуса и активных фракций углерода в чернозёме южном карбонатном тяжёлосуглинистом. Полевой опыт выполнен в 2024–2025 гг. на стационарах ТОО «НПЦЗХ им. А.И. Бараева» и включал 5 вариантов: пар традиционный, пар нулевой и три сидеральные смеси (горох+овёс, горох+горчица, овёс+горчица) с приёмами подкашивание + щелевание (25–27 см). Оценивали гумус, содержание углерода лёгкой фракции (Слов), лабильного (Слаб) и водорастворимого углерода (Свод) по данным 4 сроков отбора (весна/осень 2024 и 2025 гг.). В среднем за период наблюдений варианты с сидеральными смесями превосходили паровые по обеспеченности органическим веществом и активными запасами углерода: максимальные значения гумуса, Слов и Слаб отмечены на злаково-масличной смеси ($3,13 \pm 0,16$; $0,146 \pm 0,007$; $0,66 \pm 0,033\%$ соответственно), тогда как на традиционном пару показатели были ниже ($2,50 \pm 0,13$; $0,091 \pm 0,004$; $0,47 \pm 0,023\%$). Наибольшее среднее содержание водорастворимого углерода получено при бобово-масличной смеси ($0,105 \pm 0,005\%$). Полученные результаты подтверждают, что включение сидеральных смесей (особенно злаково-масличной) способствует повышению доли “быстрых” фракций углерода и поддержанию гумусового состояния почвы, создавая предпосылки для усиления процессов гумификации и секвестрации углерода.

Ключевые слова: сидеральные смеси, легкоразлагаемое органическое вещество, лабильный углерод, водорастворимый углерод, общий гумус, щелевание, подкашивание

Введение. Углеродный состав почвы - это совокупность всех форм углерода, содержащихся в почвенном слое, он является ключевым индикатором здоровья почвы и плодородия [1]. В составе общего углерода почвы выделяют динамичную органическую фракцию (биомасса, растительно-животные остатки и долгоживущие гуминовые соединения) и стабильную минеральную (неорганическую) фракцию. Если первая определяет биологическую продуктивность и чувствительна к землепользованию, то вторая аккумулирует преимущественно в почвах засушливых регионов и обладает высокой инертностью к внешним воздействиям. Углерод улучшает структуру почвы, помогает удерживать влагу и служит источником питательных веществ (азота, фосфора), тем самым улучшает плодородие почвы. Почва - крупнейшее наземное хранилище углерода. Она содержит его больше, чем атмосфера и вся растительность планеты вместе взятые [2,3,4].

На углеродный состав почвы влияют как природные, так и антропогенные факторы, определяющие баланс поступления и органических потерь. Температура и влажность воздуха напрямую регулируют процессы фотосинтеза и разложения органических веществ с выделением CO_2 , высокая температура ускоряет минерализацию, а оптимальная влажность способствует его накоплению за счет микробной активности, корневая биомасса растений,

подстилка и микробы (бактерии, грибы) приводят к попаданию в почву посредством фотосинтеза и экссудатов, а их воздействие образует гумус [5,6]. Растения играют центральную роль в углеродном цикле земли, выдвигая на первый план результаты получения органического урожая и регулирования его баланса посредством фотосинтеза и корневой деятельности. Процесс, когда растения получают CO₂ из атмосферы во время фотосинтеза, преобразуя его в углевод, который затем частично передается в почву через опавшие листья, стебли и корневые экссудаты, образуя органическое вещество с периодом полного разложения (минерализации) на долгое время, понимается как секвестрация углерода [7,8].

Биомасса бобово-злаковой, злаково-масличной, бобово-масличной смесей после разложения в почве становится легкоусвояемым удобрением, обогащая почву органикой, гумусом и азотом (благодаря гороху), а также помогает оздоравливать почву и бороться с некоторыми болезнями и вредителями. Растительные остатки бобовых имеют благоприятное соотношение углерода к азоту (C:N), что стимулирует активность почвенных микроорганизмов и способствует формированию гумуса [9]. Зерновые при определенных условиях могут приводить к снижению запасов органического углерода из-за меньшего объема остающихся в почве пожнивных остатков. Масличные культуры в смесях дополняют бобовые за счет глубокой корневой системы, что улучшает структуру почвы и способствуют накоплению углерода в более глубоких слоях.

Однако для полной реализации потенциала секвестрации углерода, заложенного в биологических особенностях данных смесей, необходима оптимизация водно-физических свойств почвы. В условиях твердых почв или сложного рельефа (склоновых земель) биологический фактор накопления углерода дополняется направленными агротехническими приемами [10]. В частности, такие методы, как подкашивание и щелевание, выступают необходимыми инструментами управления почвенной средой. Если смеси масличных и бобовых культур работают на накопление органического вещества "изнутри" за счет экссудатов и корневых систем, то щелевание обеспечивает "внешнюю" поддержку: оно улучшает аэрацию и влагообеспечение, предотвращая эрозию и физическую деградацию гумусового горизонта. Применение этих приемов в комплексе с посевом смесей позволяет не только зафиксировать углерод в глубоких слоях, но и защитить его от потерь, вызванных смывом грунта или поверхностным окислением.

Применение подкашивания и щелевание не только стабилизирует водный режим, но и регулирует процесс поступления органического вещества на поверхность и в верхние горизонты почвы. В результате этих приемов формируется значительный объем отмерших растительных остатков, которые становятся основой для образования детрита [11]. Детрит выступает критически важным промежуточным звеном в цикле секвестрации углерода: он представляет собой полуразложившуюся органику, которая уже утратила клеточную структуру растений, но еще не превратилась в стабильный гумус. Именно через фракцию детрита, обогащенную за счет бобово-масличных, злаково-масличных, бобово-злаковых остатков, происходит активный приток энергии для почвенной микрофлоры. В дальнейшем, под воздействием микробного метаболизма, углерод из состава детрита закрепляется на минеральных частицах почвы, завершая процесс долгосрочной секвестрации.

Целью данного исследования стала оценка эффективности различных типов растительных смесей (бобово-злаковой, злаково-масличной, бобово-масличной) в качестве биологизации для стабилизации общего гумуса почвы и его углеродного состава, с применением минимальной технологии возделывания.

Материалы и методы исследования. Наши исследования проводились в 2024-2025 году на полевых стационарах лаборатории биологического земледелия ТОО «НПЦЗХ имени А.И. Бараева» Изучалось направление влияния различных систем парования и сидерации на формирование и последствие почвенного агрономического фона, на черноземе южном карбонатном тяжелосуглинистого механического состава.

Первый год формировался агрономический фон, который включал традиционный пар,

нулевой пар, выращивание и заделку сидеральных культур. На второй год на тех же участках была высеяна пшеница. Контролем выступал пар традиционный, который включал три обработки на 10-12 см и одну обработку на 25-27 см и нулевой пар с тремя химическими обработками. Сроки посева, норма высева и глубина заделки семян – рекомендованные для зоны черноземов южных карбонатных.

В качестве объектов исследования в системе опытов рассматривались бобово-злаковая (горох + овес), бобово-масличная (горох + горчица) и злаково-масличная (овес + горчица) сидеральные смеси, с обработкой почвы подкашивание плюс щелевание на глубину 25-27 см. Органическое вещество определяли по методу Тюрина в модификации ЦИНАО ГОСТ 26213-91, методом который основан на окислении органического вещества раствором двуххромовокислого калия в серной кислоте и последующем определении трехвалентного хрома, эквивалентного содержанию органического вещества, на спектрофотометре [12].

Лабильный углерод определяли пирофосфатным методом по М.М. Кононовой и Н.П. Бельчиковой, в основе которого лежит метод И.В.Тюрина, основанный на выделении в раствор различных групп гумусовых веществ, которые извлекают смесью раствора пирофосфата натрия и щелочи, с дальнейшим определением лабильного углерода титрованием.

Определение легкоразлагаемого органического вещества (детрита) проводили по Н.Ф. Ганжаре и Б.А. Борисову с использованием тяжелой жидкости (насыщенный раствор йодистого калия с плотностью 1,8 г/см³), и за тем по И.В. Тюрину, способом титрования.

Определение водорастворимых гумусовых веществ проводили по методике описанной в методических рекомендациях А.К. Куришбаева, А.И.Иогранского, суть которой извлечение этих веществ, непосредственно водой в соотношении 1:5, и определение водорастворимого углерода по методу Тюрина, титрованием.

Статистическую обработку показателей (гумус, Слов, Слаб, Свод) выполняли в R v.4.5.1: результаты представлены как Mean ± SE (SE = SD/√n);

Относительную долю фракций в составе гумуса (D, %) рассчитывали по формуле:

$$D = (C_{\text{фр}} / C_{\text{гум}}) \times 100 \quad (1)$$

где, D — относительная доля фракции в составе гумуса, %; C_{фр} — содержание соответствующей фракции углерода, %; C_{гум} — содержание общего гумуса, %.

Результаты и обсуждения. На рисунках 1-4 представлены сезонно-межгодовые изменения гумуса и трёх фракций углерода (лёгкая фракция углерода (Слов), лабильный углерод (Слаб), водорастворимый углерод (Сн₂о) в пяти вариантах землепользования, за четыре срока отбора (2024 весна, 2024 осень, 2025 весна, 2025 осень).

Содержание Слов в целом по вариантам составило в среднем 0,118% и варьировало от 0,057 до 0,180% (рисунок 1). Наиболее высокие значения отмечены в 2025 году весной на варианте со злаково-масличной смесью (овёс+горчица) (0,180 ± 0,009 %), а наименьшие - у пара традиционного в 2025 году осенью (0,057 ± 0,0029 %). Можно заметить различия по годам по всем вариантам в 2024 году от весны (средний показатель 0,110%) к осени (0,136%) увеличивается, в 2025 году от весны (0,130%) к осени (0,094%) уменьшается. Подобная динамика, вероятно, обусловлена тем, что в 2024 году заделка сидеральных смесей произошла в середине вегетации, из-за чего к осени они разложились лишь частично. В следующем же году наблюдалась интенсификация процессов минерализации. Так же содержание Слов различалось между вариантами со смесями и парами. На вариантах со смесями было накоплено больше Слов, чем на вариантах с парами в среднем на 0,029%.

Детрит - это своего рода «перевалочный пункт» углерода на пути из живого организма в долговечный гумус. Трансформация детрита в почве является динамическим процессом, в ходе которого сложные органические полимеры расщепляются до более простых соединений [12].

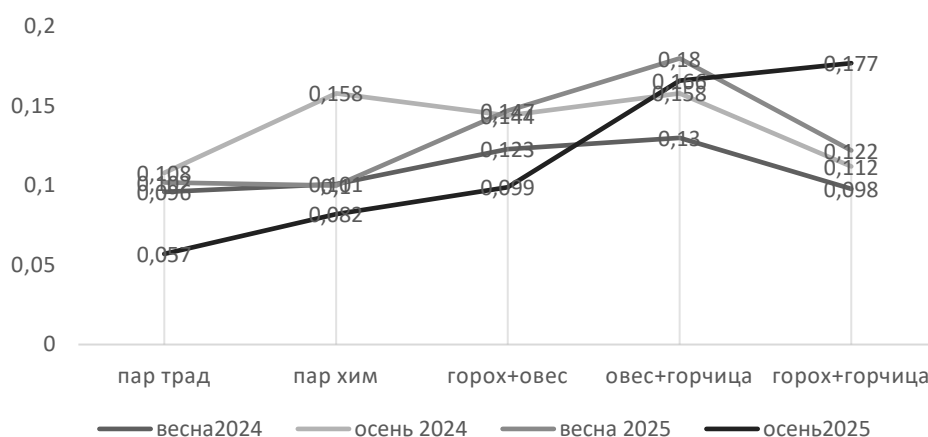


Рисунок 1 – Среднее содержание Слов (детрита), %

Этот процесс ведет к формированию запаса лабильного углерода - наиболее активной и биологически доступной части органического вещества почвы, которая разлагается микроорганизмами очень быстро (от нескольких дней до пары лет).

В отличие от инертного гумуса, лабильный углерод обладает высокой скоростью оборачиваемости и чутко реагирует на введение различных смесей в севооборот. Именно эта фракция служит основным индикатором текущего здоровья почвы: она не только обеспечивает немедленное питание микробному сообществу, но и выступает "строительным материалом" для синтеза более стабильных углеродных соединений. Таким образом, содержание лабильного углерода в системе биологизированного земледелия становится ключевым параметром, определяющим потенциал перехода органического вещества из кратковременного в долгосрочное хранилище (секвестрацию).

Содержание лабильного углерода в среднем по вариантам и по годам составило 0,56% (рисунок 2). Более высокое значение в среднем по вариантам и годам было на варианте с злаково-масличной смесью и составило 0,66%. Содержание лабильного углерода на парах в среднем составило 0,50% и было не значительно в сравнении с вариантами с сидеральными смесями.

Лабильный углерод – самая хрупкая часть почвы. Она стремительно исчезает при интенсивной обработке почвы, что и наблюдается на традиционном пару, где проводились три обработки за сезон, кислород заставляет микробов «съедать» этот запас лабильного гумуса слишком быстро [13,14]. Значения лабильного углерода варьировали в пределах 0,37–0,83 % и демонстрировали наиболее заметную динамику между сроками отбора. В большинстве вариантов фиксировалось снижение от 2024 года весна к последующим срокам, однако величина и направление изменений различались. Наибольшие значения были зарегистрированы в 2024 году весной у вариантов с внесением злаково-масличной смеси (овёс+горчица) ($0,83 \pm 0,042$ %) и бобово-злаковой (горох+овёс) ($0,80 \pm 0,040$ %). Минимум отмечен у пара традиционного в 2025 году весной ($0,37 \pm 0,019$ %).

Наиболее динамичной и экологически значимой частью лабильного углерода является водорастворимый гумус. Если общий запас лабильного углерода характеризует энергетический потенциал почвы, то его водорастворимая фракция определяет непосредственную миграционную способность органических соединений и их доступность для биохимических реакций в почвенном растворе. Водорастворимые органические соединения играют двоякую роль: с одной стороны, они являются легкоусвояемым субстратом для почвенной биоты, а с другой – выступают в роли активных комплексообразователей.

Взаимодействуя с минеральной частью почвы, водорастворимый гумус способствует образованию устойчивых органо-минеральных связей, что является фундаментальным механизмом закрепления углерода в глубоких горизонтах, куда он проникает вместе с нисходящими потоками влаги по каналам, созданным корневой системой масличных культур и приемами щелевания.

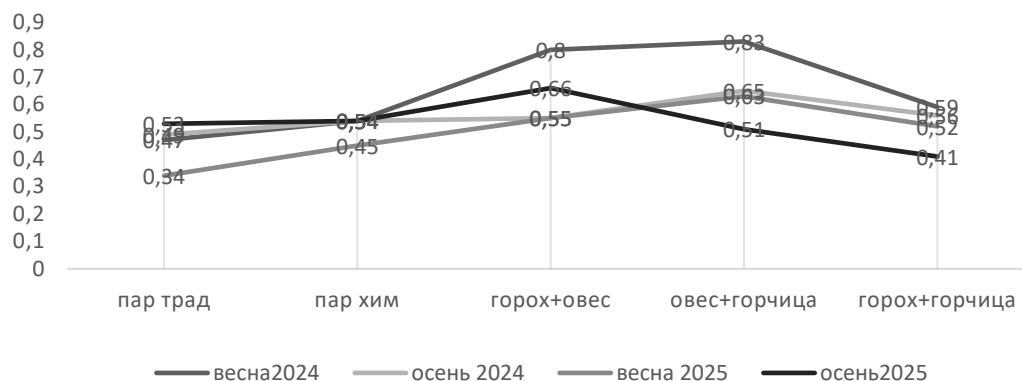


Рисунок 2 – Среднее содержание лабильного углерода (C_{слаб}), %

При использовании различных смесей концентрация водорастворимого углерода заметно возрастает к весне 2025 года. Это обусловлено не только интенсивным разложением нежных растительных остатков, но и активным выделением корневых экссудатов. На варианте с запахиванием бобово-масличной смеси в среднем за два года было наибольшее содержание водорастворимого углерода и составило 0,105% (рисунок 3). Содержание на парах в среднем было на 0,032% меньше и составило 0,073%. Показатель водорастворимого углерода изменялся в диапазоне 0,042–0,147 % и отличался выраженными пиками в отдельных вариантах и сроках. Наибольшее значение отмечено у варианта с бобово-масличной смесью (горох+горчица) в 2025 году весной (0,147 ± 0,0074 %), тогда как минимальное – у бобово-злаковой смеси (горох+овёс) в 2025 году весной (0,042 ± 0,0021 %). Вариабельность по сезонам и годам была неодинаковой между вариантами, что подчёркивает зависимость реакции данного показателя от сочетания условий года и сезона.

Несмотря на высокую значимость лабильных и водорастворимых фракций как индикаторов текущих изменений, интегральным показателем эффективности биологизации остается содержание общего гумуса. Именно этот показатель отражает долгосрочный результат взаимодействия растительного сообщества и почвенной микрофлоры [15]. Общий гумус – это «золотой запас» почвы. Если лабильный углерод - быстрый и доступный, то общий гумус - это основной капитал, который формирует структуру, цвет и долгосрочное плодородие земли. Это сложная смесь органических соединений, которые прошли процесс гумификации (глубокого разложения) и прочно закрепились в почве.

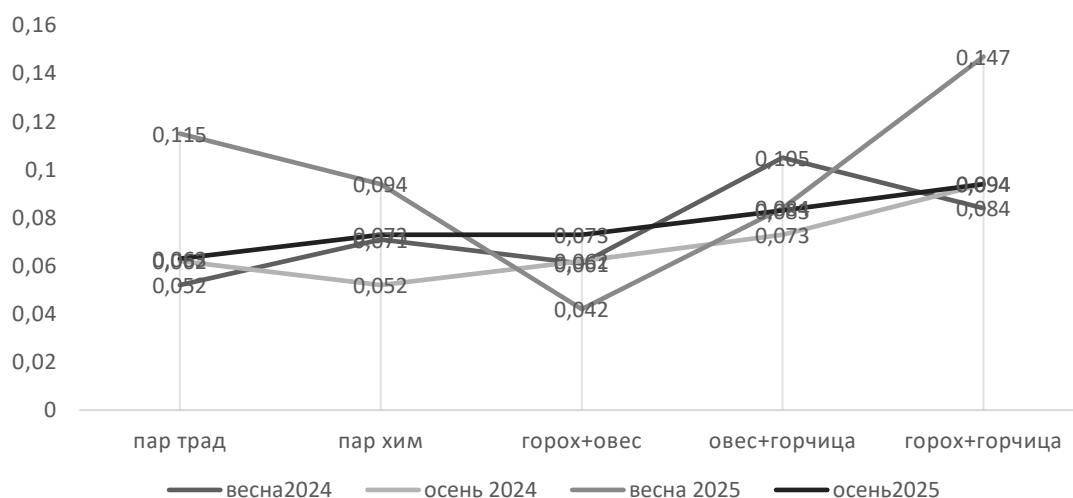


Рисунок 3 – Среднее содержание водорастворимого углерода (C_{в20}), %

Во всех вариантах значения гумуса находились в диапазоне 2,18–3,54 %, при этом выраженность сезонных изменений зависела от варианта (рисунок 4). Для ряда вариантов отмечалось снижение к 2024 году осень - 2025 году весна с последующим повышением к 2025 году осень. Максимальное значение гумуса зарегистрировано на варианте бобово-злаковой смеси (горох+овёс) в 2025 году осень ($3,54 \pm 0,18$ %), тогда как минимальное - у пара традиционного в 2024 году осень ($2,18 \pm 0,11$ %).

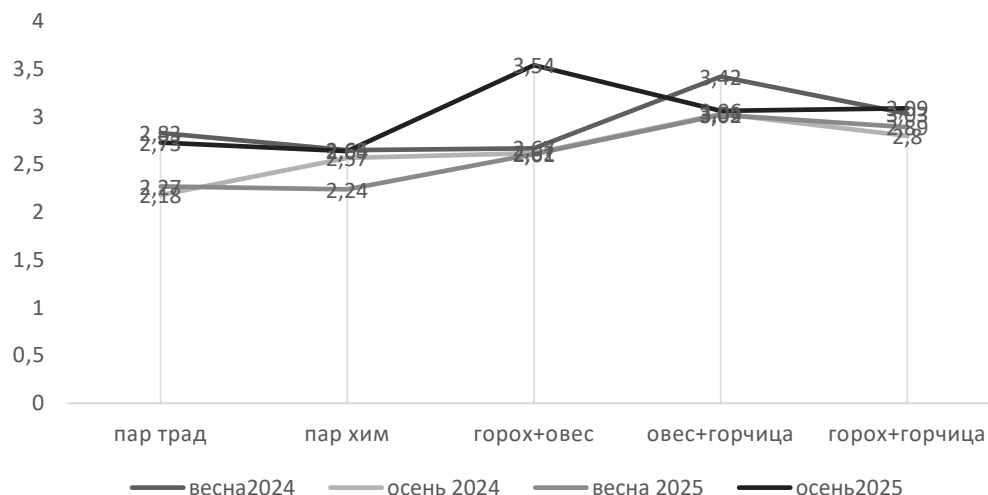


Рисунок 4 – Среднее содержание гумуса, %

В целом, визуальный анализ рисунков 1-4 показывает, что фракции углерода (Слов, Слаб, Свод) изменяются более динамично, чем гумус, а характер сезонной и межгодовой динамики существенно различается между вариантами, что согласуется с наличием выраженных эффектов взаимодействий.

Наибольшее среднее содержание гумуса отмечено в варианте с злаково-масличной смесью ($3,13 \pm 0,16$ %), далее следуют бобово-масличная ($2,95 \pm 0,15$ %) и бобово-злаковая ($2,86 \pm 0,14$ %) (Таблица 1). Минимальные значения зафиксированы в вариантах пар традиционный ($2,50 \pm 0,13$ %) и пар нулевой ($2,53 \pm 0,13$ %), что указывает на более высокую обеспеченность органическим веществом в вариантах с посевными культурами по сравнению с паровыми.

Таблица 1 – Среднее значение за 2024-2025 годы по всем сезонам и годам, %

Вариант	Гумус, %	Слов, %	Слаб, %	Сн2о, %
Пар традиционный	$2,50 \pm 0,13$	$0,091 \pm 0,004$	$0,47 \pm 0,023$	$0,073 \pm 0,004$
Пар нулевой	$2,53 \pm 0,13$	$0,110 \pm 0,005$	$0,52 \pm 0,026$	$0,073 \pm 0,004$
Бобово-злаковая	$2,86 \pm 0,14$	$0,128 \pm 0,006$	$0,64 \pm 0,032$	$0,060 \pm 0,003$
Злаково-масличная	$3,13 \pm 0,16$	$0,146 \pm 0,007$	$0,66 \pm 0,033$	$0,086 \pm 0,004$
Бобово-масличная	$2,95 \pm 0,15$	$0,112 \pm 0,006$	$0,52 \pm 0,026$	$0,105 \pm 0,005$

Максимальная доля Слов, характерна для варианта со злаково-масличной смесью ($0,146 \pm 0,007$ %), несколько ниже - у бобово-злаковой ($0,128 \pm 0,006$ %). Минимальные значения отмечены на пару традиционном ($0,091 \pm 0,004$ %), что подчёркивает меньшую выраженность «быстрообновляемого» запаса углерода при паровом режиме.

Наиболее высокие средние значения лабильного углерода выявлены в вариантах со злаково-масличной смесью ($0,66 \pm 0,033$ %) и бобово-злаковой ($0,64 \pm 0,032$ %). Наименьшее значение отмечено в варианте пар традиционный ($0,47 \pm 0,023$ %). Варианты пар нулевой и бобово-масличная смесь имеют сопоставимые уровни ($0,52 \pm 0,026$ %).

По показателю Сн2о максимальное среднее значение зарегистрировано на варианте с

бобово-масличной ($0,105 \pm 0,005$ %), далее - злаково-масличной смесями ($0,086 \pm 0,004$ %). Минимальные значения характерны для бобово-злаковой системы ($0,060 \pm 0,003$ %), тогда как оба паровых варианта имеют одинаковый средний уровень ($0,073 \pm 0,004$ %).

В целом, усреднённые данные показывают, что варианты с посевными культурами, в частности злаково-масличными смесями, характеризуются более высоким уровнем гумуса и активными фракциями углерода (Слов и Слаб) по сравнению с паровыми вариантами. При этом динамика водорастворимого углерода носит специфический характер и не в полной мере коррелирует с общим накоплением гумуса в исследуемых системах.

В таблице 2 представлены усреднённые по четырём срокам отбора (2024 год весна/осень, 2025 год весна/осень), соотношения фракций углерода к гумусу (%), рассчитанные по формуле Доля, в %, ((Фракция / Гумус) $\times$ 100). Эти показатели характеризуют относительную долю более «активных» пулов углерода по отношению к более стабильному гумусовому резервуару.

Доля Слов варьировала от 3,73% до 4,69%. Минимальное значение отмечено у пара традиционного (3,73%), тогда как максимальные значения характерны для вариантов с культурами, прежде всего злаково-масличными (4,69%) и бобово-злаковыми (4,63%). Пар нулевой занимает промежуточное положение (4,38%), что указывает на относительно более высокую долю лёгкой фракции по сравнению с традиционным паром.

Таблица 2 – Соотношения фракций к гумусу (%)

Вариант	Слов/гумус, %	Слаб/гумус, %	Cn2o/гумус, %
Пар традиционный	3,73	18,70	3,01
Пар нулевой	4,38	20,48	2,92
Бобово-злаковая	4,63	22,67	2,08
Злаково-масличная	4,69	20,81	2,74
Бобово-масличная	3,81	17,68	3,56

Доля Слаб демонстрировала более широкий диапазон (17,68–22,67%), подчёркивая различия вариантов по обновлению «быстрых» форм углерода. Наибольшая доля зафиксирована в варианте бобово-злаковой смеси (22,67%), далее следуют злаково-масличная (20,81%) и пар нулевой (20,48%). Минимальные значения отмечены в варианте бобово-масличной (17,68%) и у пара традиционного (18,70%).

Для показателя Cn2o доля по отношению к гумусу изменялась от 2,08% до 3,56%. Минимальное значение наблюдалось у бобово-злаковой системы (2,08%), тогда как максимальное – у варианта с бобово-масличной смесью (3,56%). Оба паровых варианта имели близкие значения (3,01% у традиционного и 2,92% у нулевого пара), а злаково-масличная смесь занимала промежуточную позицию (2,74%).

В целом, относительные показатели показывают, что варианты с посевными культурами (особенно бобово-злаковая и злаково-масличная смеси) характеризуются повышенной долей Слов и Слаб по отношению к гумусу, что может указывать на более выраженное обновление органического вещества. При этом доля Cn2o демонстрирует иной профиль: максимальные относительные значения характерны для бобово-масличного варианта, тогда как бобово-злаковая смесь имеет минимальную долю Cn2o при максимальной доле лабильного углерода.

Заключение. Таким образом, по результатам наблюдений 2024-2025 гг. установлено, что включение сидеральных смесей в паровое звено повышает обеспеченность чернозёма органическим веществом и активными запасами углерода по сравнению с паровыми вариантами. Наиболее выраженный эффект получен при использовании злаково-масличной смеси, где за период исследования зафиксированы максимальные средние значения гумуса ($3,13 \pm 0,16$ %), Слов ($0,146 \pm 0,007$ %) и Слаб ($0,66 \pm 0,033$ %). Одновременно водорастворимый углерод демонстрировал специфическую реакцию: его среднее значение было максимальным в варианте бобово-масличной смеси ($0,105 \pm 0,005$ %), а минимальным - в

бобово-злаковой ($0,060 \pm 0,003\%$). Относительные показатели (доля фракций к гумусу) подтверждают, что варианты с посевными культурами характеризуются более высокой долей “быстрообновляемых” фракций Слов и Слаб (например, Слов/гумус до 4,69%, Слаб/гумус до 22,67%), что указывает на более интенсивное обновление органического вещества по сравнению с паром. При этом доля Свод/гумус варьировала в диапазоне 2,08–3,56% и достигала максимума в бобово-масличном варианте, что подчёркивает зависимость запаса водорастворимого углерода от состава смеси и условий сезона/года. В целом, биологизация севооборота посредством сидеральных смесей (особенно злаково-масличной) может рассматриваться как эффективный приём поддержания гумусового состояния и активных углеродных фракций в краткосрочном периоде.

Благодарность. Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования при финансовой поддержке Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан BR22885719 «Разработать и внедрить устойчивые системы земледелия для рентабельного производства сельскохозяйственной продукции в условиях изменяющегося климата для различных почвенно-климатических зон Казахстана» (годы реализации 2024-2026).

Литература :

- [1] **Minasny, B.**, Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K. et al. Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- [2] **Lal R.** Soil carbon sequestration to mitigate climate change // *Geoderma*. 2004. Vol. 123. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- [3] **Lal, R.** Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security // *BioScience*. 2010. Vol. 60. P. 708–721.
- [4] **Cotrufo, M.F.**, Soong J.L., Horton A.J., Campbell E.E., Haddix M.L., Wall D.H., Parton W.J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, P. 776–779.
- [5] **Сычев, В.Г.**, Налиухин А.Н. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой// *Плодородие*, 2021. – №5. – С.3-7.
- [6] **Meyer, N.**, Bornemann L., Welp G., Schiedung H., Herbst M., Amelung W., Carbon saturation drives spatial patterns of soil organic matter losses under long-term bare fallow, *Geoderma*, 2017, Vol. 306, pp. 89–98
- [7] **Когут, Б.М.**, Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020. – Вып. 102. – С. 103-124.
- [8] **Franzluebbers, A.J.** Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality// *Soil Till Res*, 2002.– V.66. 2. – P.95-106
- [9] **Жукова, И.В.**, Жуков З.С. Аккумуляция биогенных элементов в растительных остатках на агрочерноземах Красноярской лесостепи//*Вестник КрасГАУ*, 2016. – №11. – С.78-85
- [10] **Шарков, И.Н.**, Данилова А.А. Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах// *Агрохимия*.-2010.-№12.-С. 72-81
- [11] **Панов, А.А.**, Коротких Е.В., Несмеянова М.А. Динамика детрита под культурами севооборота при различных способах повышения плодородия почв в ЦЧР //Вестник ОрелГАУ.-1(58).- 2016.- С.62-69
- [12] *Практикум по Агрохимии: Учебное пособие. – 2-е изд., /Под ред. Академика РАСХН В.Г. Минеева [Текст]. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 689 с.*
- [13] **Дедов, А.В.**, Несмеянова М.А. Лабильное органическое вещество почв и приемы его регулирования// *Материалы Российской научно-практической конференции «Ландшафтное планирование и управление агробиоценозами*, 2017. – С.8-10
- [14] **Гамкало, З.Г.**, Бедерничек Т.Ю. Лабильное органическое вещество почвы как индикатор ее экологического качества в разных условиях землепользования// *Экосистемы, их оптимизация и охрана*, 2014. – Вып.10. – С.193-200
- [15] **Семенов, В.М.**, Ходжаева А.К. Агроэкологические функции растительных остатков в почве//*Агрохимия*, 2006. – №7. – С.63-81

Literatura :

- [1] **Minasny, B.**, Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K. et al. Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- [2] **Lal R.** Soil carbon sequestration to mitigate climate change // *Geoderma*. 2004. Vol. 123. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- [3] **Lal, R.** Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security // *BioScience*. 2010. Vol. 60. P. 708–721.
- [4] **Cotrufo, M.F.**, Soong J.L., Horton A.J., Campbell E.E., Haddix M.L., Wall D.H., Parton W.J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, R. 776–779.
- [5] **Sychev, V.G.**, Naliuhin A.N. Izmenenie klimata i uglerodnaja nejtral'nost': sovremennye vyzovy pered agrarnoj naukoj// *Plodorodie*, 2021. – №5. – S.3-7.
- [6] **Meyer, N.**, Bornemann L., Welp G., Schiedung H., Herbst M., Amelung W., Carbon saturation drives spatial patterns of soil organic matter losses under long-term bare fallow, *Geoderma*, 2017, Vol. 306, pp. 89–98
- [7] **Kogut, B.M.**, Semenov V.M. Ocenka nasyshhennosti pochvy organicheskim uglerodom // *Bjulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*. 2020. – Vyp. 102. – S. 103-124. [in Russian]
- [8] **Franzluebbers, A.J.** Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality// *Soil Till Res*, 2002.– V.66. 2. – P.95-106
- [9] **Zhukova, I.V.**, Zhukov Z.S. Akkumuljacija biogennyh jelementov v rastitel'nyh ostatkah na agrochernozeмах Krasnojarskoj lesostepi//*Vestnik KrasGAU*, 2016. – №11. – S.78-85 [in Russian]
- [10] **Sharkov, I.N.**, Danilova A.A. Vlijanie agrotehnicheskikh priemov na izmenenie sodержanija gumusa v pahotnyh pochvah// *Agrohimija*, 2010. – №12. – S. 72-81 [in Russian]
- [11] **Panov, A.A.**, Korotkih E.V., Nesmejanova M.A. Dinamika detrita pod kul'turami sevooborota pri razlichnyh sposobah povyshenija plodorodija pochv v CChR // *Vestnik OrelGAU*.-1(58).- 2016.- S.62-69
- [12] *Praktikum po Agrohimii: Uchebnoe posobie. – 2-e izd., /Pod red. Akademika RASHN V.G. Mineeva [Tekst]. – M.: Izd-vo MGU, 2001. – 689 s. [in Russian]*
- [13] **Dedov, A.V.**, Nesmejanova M.A. Labil'noe organicheskoe veshhestvo pochv i priemy ego regulirovaniya// *Materialy Rossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Landshaftnoe planirovanie i upravlenie agrobiocenozi, 2017. – S.8-10[in Russian]*
- [14] **Gamkalo, Z.G.**, Bedernichek T.Ju. Labil'noe organicheskoe veshhestvo pochvy kak indikator ee jekologicheskogo kachestva v raznyh uslovijah zemlepol'zovanija// *Jekosistemy, ih optimizacija i ohrana*, 2014. – Vyp.10. – S.193-200[in Russian]
- [15] **Semenov, V.M.**, Hodzhaeva A.K. Agrojekologicheskie funkicii rastitel'nyh ostatkov v pochve//*Agrohimija*, 2006. – №7. – S.63-81[in Russian]

КӨМІРТЕГІ СЕКВИСТРИЗАЦИЯСЫНЫҢ ФАКТОРЫ РЕТІНДЕ ӨСІМДІК ҚОСПАЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ АУЫСПАЛЫ ЕГІСТЕРДІ БИОЛОГИЗАЦИЯЛАУ

Жлоба Л.Д.*,

Құнанбаев Қ.К., биология ғылымдарының кандидаты

Жлоба Г.П., агрохимия және топырақтану магистрі

Журик С.А., агрономия магистрі

*«А.И. Бараев атындағы астық шаруашылығы ғылыми-өндірістік орталығы», ЖШС, Научный центр,
Қазақстан*

Аннотация: Әлемдік климаттың өзгеруі және топырақтың деградациясы жағдайында агроценоздарда көміртекті секвестрлеудің тиімді әдістерін іздеу басымдыққа ие болуда. Көп компонентті өсімдік қоспаларын пайдалану арқылы ауыспалы егісті биологизациялау топырақтағы көміртек балансын қалпына келтірудің перспективалы құралы болып саналады. Зерттеудің мақсаты жасыл тыңайтқыш қоспалары мен тыңайтқыш нұсқаларының оңтүстік карбонатты ауыр сазды қара топырақтағы жалпы гумус пен белсенді көміртек фракцияларының құрамына әсерін бағалау болды. Далалық тәжірибе 2024–2025 жылдары А.И. Бараев атындағы Ауыл шаруашылығы ғылыми-практикалық орталығында жүргізілді және бес нұсқаны қамтыды: дәстүрлі тыңайтқыш, нөлдік

тыңайтқыш және үш жасыл тыңайтқыш қоспасы (бұршақ және сұлы, бұршақ және қыша, сұлы және қыша) шабу және кесу әдістерімен (25–27 см). Гумус, жеңіл фракциялы көміртек (LFC), тұрақсыз көміртек (Lab) және суда еритін көміртек (WSC) төрт іріктеу кезеңінің (2024 және 2025 жылдар көктем/күз) деректері негізінде бағаланды. Орташа есеппен, бақылау кезеңінде жасыл тыңайтқыш қоспасының нұсқалары органикалық заттардың мөлшері мен белсенді көміртегі қоры бойынша тыңайтқыш қоспаларынан жоғары болды: ең жоғары гумус, LFC және WSC мәндері дәнді-майлы дақылдар қоспасында тіркелді (сәйкесінше $3,13 \pm 0,16$; $0,146 \pm 0,007$; $0,66 \pm 0,033\%$), ал дәстүрлі тыңайтқыш үшін мәндер төмен болды ($2,50 \pm 0,13$; $0,091 \pm 0,004$; $0,47 \pm 0,023\%$). Суда еритін көміртегінің ең жоғары орташа мөлшері бұршақ-майлы дақылдар қоспасында алынды ($0,105 \pm 0,005\%$). Алынған нәтижелер жасыл тыңайтқыш қоспаларын (әсіресе дәнді-майлы дақылдарды) қосу «жылдам» көміртегі фракцияларының үлесін арттыруға және топырақтың гумус күйін сақтауға ықпал ететінін, гумификация мен көміртегіні сіңіру процестерін күшейтуге алғышарттар жасайтынын растайды.

Тірек сөздер: жасыл тыңайтқыш қоспалары, оңай ыдырайтын органикалық заттар, тұрақсыз көміртек, суда еритін гумус, жалпы гумус, кесу, шабу.

BIOLOGIZATION OF CROP ROTATIONS THROUGH THE USE OF PLANT MIXTURES AS A FACTOR OF CARBON SEQUESTRATION

Zhloba L.D.*

Kunanbaev K.K., PhD in Biology

Zhloba G.P., Master of Agrochemistry and Soil Science

Zhurik S.A., Master of Agronomy

*A.I. Barayev Scientific and Production Center for Grain Farming, LLC,
Nauchnyy Settlement, Republic of Kazakhstan*

Abstract: In the context of global climate change and soil degradation, the search for effective methods of carbon sequestration in agrocenoses is becoming a priority. Biologization of crop rotations through the use of multicomponent plant mixtures is considered a promising tool for restoring the soil carbon balance. The objective of the study was to evaluate the effect of green manure mixtures and fallow variants on the content of total humus and active carbon fractions in southern carbonate heavy loamy chernozem. The field experiment was conducted in 2024–2025 at the A.I. Barayev Scientific and Practical Center for Agricultural Agriculture and included five variants: traditional fallow, zero fallow, and three green manure mixtures (peas and oats, peas and mustard, and oats and mustard) with mowing and slitting techniques (25–27 cm). Humus, light fraction carbon (LFC), labile carbon (Lab) and water-soluble carbon (WSC) were estimated based on data from four sampling periods (spring/autumn 2024 and 2025). On average, over the observation period, the green manure mixture variants were superior to the fallow ones in terms of organic matter content and active carbon reserves: the highest humus, LFC and WSC values were recorded for the cereal-oilseed mixture (3.13 ± 0.16 ; 0.146 ± 0.007 ; $0.66 \pm 0.033\%$, respectively), while the values were lower for traditional fallow (2.50 ± 0.13 ; 0.091 ± 0.004 ; $0.47 \pm 0.023\%$). The highest average water-soluble carbon content was obtained for the legume-oilseed mixture ($0.105 \pm 0.005\%$). The obtained results confirm that the inclusion of green manure mixtures (especially cereal-oilseed) contributes to an increase in the proportion of “fast” carbon fractions and the maintenance of the humus state of the soil, creating the preconditions for enhancing the processes of humification and carbon sequestration.

Keywords: green manure mixtures, readily decomposable organic matter, labile carbon, water-soluble humus, total humus, slitting, mowing.