

5. Kursakova V.S. Vliianie diazotrofnnykh bakterii na fotosinteticheskuiu aktivnost i produktivnost iarovoi tverdoi pshenitsy v usloviakh Priobskoi lesostepi / V.S. Kursakova, L. A. Stupina, N.V. Chernetsova // Cutting-Edge Science: Materials of the XII International Research and Practice Conference (April 30 – May 7, 2016). – Sheffield. – 2016. – Vol. 11. – P. 33-37.

6. Starikova M.V. Vliianie preparata «Gumina-trin» na effektivnost razlichnykh sortov iachmenia / M.V. Starikova // Vestnik molodezhnoi nauki Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta: sbornik nauchnykh trudov. – Barnaul: RIO Altaiskogo GAU, 2021. – № 2. – S.19-22.

7. Bocharnikova E.A. Effektivnost kremnevnykh udobrenii / E.A. Bocharnikova, V.V. Matychenkov // Doklady RASKhN. – 2010. – No. 6. – S. 37-39.

8. Bocharnikova E.A. Kremnii pitaet rasteniia / E.A. Bocharnikova, V.V. Matychenkov, V.V. Khodyrev // Nauka i zhizn. – 2015. – No. 8. – S. 28-31.

9. Biel K.Y., Matichenkov V.V., Fomina I.R. (2008). Protective role of silicon in living systems. In *Functional Foods for Chronic Diseases. Advances in the Development of Functional Foods* (Martirosyan D.M., ed.). Richardson, Texas: Copyright © by D&A Inc., V. 3, pp. 208-231.

10. Kosachev I. A. Vliianie kremniisoderzhashchego preparata «Nanokremnii» na rost, razvitie i produktivnost selskokhoziaistvennykh kultur v usloviakh Altaiskogo kraia / I. A. Kosachev,

V. N. Chernyshkov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 9 (167). – S. 23-28.

11. Kosachev I.A. Izuchenie effektivnosti primeneniia biologicheskii aktivnykh udobrenii na iarovoi pshenitse v usloviakh proizvodstva / I. A. Kosachev, V. N. Chernyshkov // Agrarnaia nauka – selskomu khoziaistvu: sbornik materialov: v 2 kn. / XVII Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia (9-10 fevralia 2022 g.). – Barnaul: RIO Altaiskogo GAU, 2022. – Kn. 1. – S. 247-250.

12. Zhidkii guminovyi kontsentrat NaturAgro EcoGrow: Rezhim dostupa URL: <https://ruseco.org/naturagro-stg>.

13. Tepper E.Z. Praktikum po mikrobiologii: uchebnoe posobie dlia vuzov / E.Z. Tepper, V.K. Shilnikova, G.I. Pereverzeva; pod red. V.K. Shilnikovoi. – Moskva: Drofa, 2004. – 256 s.

14. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniia selskokhoziaistvennykh kultur / pod obshch. red. M.A. Fedina. – Moskva, 1985. – Vyp. 1. – 267 s.

Работа поддержана Грантом Губернатора Алтайского края в форме субсидий для разработки качественно новых технологий, создания инновационных продуктов и услуг в сферах переработки и производства пищевых продуктов, фармацевтического производства и биотехнологий (СОГЛАШЕНИЕ от 20.04.2023 № 3).



УДК 631.417.1

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-231-1-37-44

**А.Е. Кудрявцев, Е.С. Ваганов,
С.В. Канунников, В.А. Локтионов
A.E. Kudryavtsev, E.S. Vaganov,
S.V. Kanunnikov, V.A. Loktionov**

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СЕКВЕСТРАЦИЮ, ДЕПОНИРОВАНИЕ, ЭМИССИЮ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АГРОЦЕНОЗАХ

FACTORS DETERMINING SEQUESTRATION, DEPOSITION, AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS IN AGROCENOSSES

Ключевые слова: углекислый газ, агроценозы, фотосинтез, секвестрация, депонирование, эмиссия, круговорот углерода, углеродный сток, природные и антропогенные факторы.

Проведенные исследования позволили установить влияние природных и антропогенных факторов, опреде-

ляющих процессы секвестрации, депонирования и эмиссии углерода в агроценозах. К природным факторам следует относить фотосинтетически активную радиацию, фотосинтез, погодные условия, плодородие агропочв, элементы биофилы, микробиологическую активность почв, соответствующую процессу почвообразования, рельеф. Процесс секвестрации считаем начальным этапом

круговорота углерода в агроценозе, на него оказывают влияние вышеобозначенные природные условия и антропогенные, такие как возделываемая сельскохозяйственная культура, потенциал сорта или гибрида, норма высева семян, ширина междурядий, минеральные удобрения, применяемые пестициды, севообороты, техника и технологии, система земледелия, покровные культуры, бинарные посевы, внесение органических удобрений и биологических препаратов. Депонирование углерода в агропочву, как и секвестрация, зависит от природных и антропогенных факторов. Однако последовательность их воздействия несколько иная, поскольку часть биологической продукции выносятся с урожаем, а оставшаяся на поверхности и в почве преобразуется в органический углерод, каждая по своему сценарию. Депонирование углерода не может происходить без эмиссии углекислого газа, поскольку на этом этапе преобразуется оставшаяся в поле мортмасса. Эмиссию углерода следует рассматривать как самостоятельный процесс, при котором углекислый газ из почвы в атмосферу высвобождается в результате деятельности микроорганизмов, дыхания корней и микробного разложения. Функциональный ряд эмиссии углекислого газа в агроценозах имеет свою последовательность и зависит от вышеперечисленных факторов, в естественных условиях он определяется почвообразовательным процессом, а в агроценозах мы его активизируем или тормозим. Таким образом, регулирование процессов секвестрации, депонирования и эмиссии углерода в агроценозах позволяет решить не только экологическую проблему круговорота углерода, но и оптимизировать сохранение и воспроизводство плодородия. Каждый из вышеперечисленных факторов необходимо анализировать и дифференцировать для создания оптимальных условий ведения карбонового земледелия.

Keywords: carbon dioxide, agroecosystems, sequestration, deposition, emission, carbon cycle, carbon sink, natural and anthropogenic factors.

The conducted studies revealed the influence of natural and anthropogenic factors determining the processes of sequestration, deposition and carbon emission in agroecosystems. The natural factors should include photosynthetically active radiation, photosynthesis, weather conditions, fertility of agrosoils, biophile elements, soil microbiological activity corresponding to the pedogenic process, and relief. The sequestration process is considered to be the initial stage of the carbon cycle in the agroecosystem; it is influenced by the above-mentioned natural and anthropogenic conditions as the cultivated crop, the potential of the variety or hybrid, seeding rate, row spacing, mineral fertilizers, pesticides used, crop rotations, machinery and technologies, the farming system, cover crops, binary crops, application of organic fertilizers and biological products. Carbon deposition into the agro-soil, as well as sequestration, depends on natural and anthropogenic factors. However, the sequence of their effects is somewhat different since part of the biological products is taken out with the harvest, and the remaining on the surface and in the soil is converted into organic carbon, each according to its own scenario. Carbon deposition cannot occur without carbon dioxide emission since at this stage the remaining morthmass in the field is converted. Carbon emission should be considered as an independent process when carbon dioxide is released from the soil into the atmosphere as a result of the activity of microorganisms, root respiration and microbial decomposition. The functional range of carbon dioxide emissions in agroecosystems has its own sequence and depends on the above factors, under natural conditions it is determined by the soil-forming process, and in agroecosystems we activate or inhibit it. Thus, the regulation of sequestration, deposition and carbon emission processes in agroecosystems makes it possible to solve not only the ecological problem of the carbon cycle, but also to optimize the preservation and reproduction of fertility. Each of the above factors should be analyzed and differentiated to create optimal conditions for carbon farming.

Кудрявцев Андрей Ермолаевич, д.б.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: kae5959@mail.ru.

Ваганов Евгений Сергеевич, врио директора, ФГБУ САС «Алейская», г. Алейск, Алтайский край, Российская Федерация, e-mail: agrohimp_22_2@mail.ru.

Канунников Сергей Владимирович, гл. агроном, ООО «Дубровское», Алейский район, Алтайский край, Российская Федерация, e-mail: kanun1@mail.ru.

Локтионов Виктор Александрович, гл. агроном, глава, КФХ Локтионов П.В., Шипуновский район, Алтайский край, Российская Федерация, e-mail: loktionov.petr@mail.ru.

Kudryavtsev Andrey Ermolaevich, Dr. Bio. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: kae5959@mail.ru.

Vaganov Evgeniy Sergeevich, Acting Director, Agrochemical Service Station "Aleyskaya", Aleysk, Altai Region, Russian Federation, e-mail: agrohimp_22_2@mail.ru.

Kanunnikov Sergey Vladimirovich, Chief Agronomist, ООО "Dubrovskoe", Aleyskiy District, Altai Region, Russian Federation, e-mail: kanun1@mail.ru.

Loktionov Viktor Aleksandrovich, Chief Agronomist, Head, KFKh Loktionov P.V., Shipunovskiy District, Altai Region, Russian Federation, e-mail: loktionov.petr@mail.ru.

Введение

Мировое сообщество находится в поиске утилизации парниковых газов, которые формируют климатические изменения, обусловленные всевозрастающей скоростью поступления их в атмосферу [1]. Углекислый газ в парниковом эффекте является основополагающим, его вы-

бросы в атмосферу стали превышать скорость связывания этого вещества в биосфере, поэтому для управления выбросами углерода консервации и утилизации необходимы разработки. Технологии с доказанной эффективностью декарбонизации существуют, например, геологическая консервация CO₂ [2]. По мнению ученых,

это одно из перспективных, но затратных направлений, которое позволяет закачивать углекислый газ в нефтяные и газовые скважины, угольные пласты, подземные водоносные горизонты, создавая так называемые углеродные «ловушки». Значимый вклад в это вносят разработки по обращению с бытовыми и производственными отходами, где применяют замкнутые циклы с максимальной утилизацией, что позволяет контролировать не только кругооборот ресурсов, но и выбросы парниковых газов [3]. Разрабатываются и технологии на основе биоэнергетики, позволяющие связывать и хранить углерод, используя микроорганизмы, способные выдерживать и поглощать очень высокие концентрации CO_2 [4].

Значимая роль процессов связывания углекислого газа принадлежит лесам, торфяникам и болотам. По мнению Л.Н. Рожкова, в фитомассе лесов планеты связано 296 млрд т С-эквивалента углерода, что составляет 52,2% от его массы в атмосфере [5]. Роль болот в связывании углекислого газа примерно в 5 раз больше, чем у леса, и в 500 раз больше, чем у океанов, хотя они занимают около 2% поверхности Земли, а хранят более 20% всего углекислого газа, поглощаемого экосистемами нашей планеты. Торфяники не менее крупное биогенное хранилище углерода на суше, но их площади еще меньше, чем болот, в то же время они накапливают больше углерода, чем все другие типы растительности, включая леса [6, 7].

В педосфере биосеквестрация углекислого газа лесами, болотами, торфяниками неоспорима, но и в этих экосистемах есть свои нюансы, которые не могут сдерживать надвигающееся глобальное потепление климата. Так, площади лесов сокращаются и в то же время горят, болота и торфяники при потеплении начинают активизировать эмиссию парниковых газов и многое другое. Существуют и другие методы, сдерживающие выбросы углекислого газа, например, карбоновое земледелие. Разработка системы биосеквестрации углекислого газа агроценозами позволит решать не только экологическую задачу круговорота углерода, но и активизирует процессы сохранения и воспроизводства плодородия. Для Алтайского края это весьма перспективное направление, поскольку в нём находятся самые большие площади пашни в Российской Федерации [8]. Цель исследований – установить факторы, способствующие процессу консерва-

ции углекислого газа в агроценозах. В задачи входило изучение процессов секвестрации, депонирования и эмиссии, что в будущем позволит создать цифровую модель для разработки мониторинга карбонового земледелия.

Объекты и методы

Объектами исследований послужили факторы, определяющие процессы биосеквестрации углекислого газа в агроценозах. Связывание углекислого газа растением – это естественный процесс, который называют фотосинтезом. В агроценозах, в отличие от естественных экосистем, его регулируют с помощью технологических приемов, которые встраивают в систему земледелия, рассматривая их как последовательные многоступенчатые операции, определяющие развитие агроценозов. Для проведения исследований были организованы полигоны наблюдений в зонах черноземов засушливой, умеренно-засушливой и сухой степи Алтая. Изучение процессов стока углерода и его преобразования в углеродный пул проводили в агроценозах яровой пшеницы, льна масличного, рапса ярового, возделываемых разноплановыми системами земледелия, такими как традиционная и no-till. Система земледелия в проведенных исследованиях рассматривается как инструмент по созданию продукционной массы возделываемых культур на почвенных ресурсах, в котором есть звено, определяющее эффективность процесса фотосинтеза, депонирования и эмиссии углекислого газа. Для изучения природных факторов использовали архивные материалы и результаты собственных исследований, в том числе данные, получаемые с программно-аппаратного комплекса (ПАК). Разработанное техническое устройство позволит создать цифровую базу данных для построения оценочных моделей карбонового земледелия, используя такие свойства, как реакция среды, влажность, температура почвы по горизонтам, содержание водорастворимого азота, фосфора, калия, из погодных характеристик – температура, влажность воздуха, осадки, скорость, направление ветра, фотосинтетически активная радиация. Для дистанционного зондирования исследуемых объектов использовали космоснимки Landsat и GPS, которые позволяли контролировать уровень развития наблюдаемых агроценозов с помощью индексов NDVI. Сопряженно с дистанционными наблюдениями проводили полевые и

лабораторные исследования, позволяющие фиксировать агрохимические, микробиологические, фенологические, фитосанитарные, морфологические, физиологические показатели. Почвенную диагностику осуществляли в лаборатории кафедры почвоведения и агрохимии, агрохимическую – в аккредитованной лаборатории САС «Алейский» по общепринятым методикам. В основные фазы развития культурных растений, три раза за вегетацию, проводили функциональную диагностику, которая позволяла оценить физиологические процессы фотосинтеза и происходящие в клетке растений изменения, фиксирующие недостаток или избыток 14 элементов. Для расчета массы поглощенного агроценозом углекислого газа из атмосферы использовали правило вычисления соотношения реагирующих веществ и их молекулярных масс, участвующих в химической реакции фотосинтеза. При вычислении учитывалась надземная и подземная фитомассы, сформированные агроценозами в основные фазы развития растений. Оценку депонирования углерода в агропочвах проводили, используя архивные материалы ОАО «АлтайНИИГипрозем» 1989-2000 гг. и результаты собственных исследований.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальная часть исследований основывалась на закладке производственного опыта, что позволило установить значимость природных и антропогенных факторов, участвующих в секвестрации, депонировании, эмиссии углекислого газа в вышеперечисленных агроценозах. Конверсию и утилизацию углекислого газа определяет совокупность природных (биотических и абиотических) и антропогенных факторов. Значимость природных факторов человек не может изменить, а вот антропогенными он управляет. Функциональный ряд природных факторов (ПрФ), оказывающих влияние на круговорот углерода в агроценозах, предлагаем выстроить в следующей последовательности: $ПрФ = f(ФАР, ФС, ПУ, П, Ахп, ПБК, Р)$, где ФАР – фотосинтетически активная радиация, ФС – фотосинтез, ПУ – погодные условия, которые для агроценозов слагаются из таких показателей, как осадки, солнечная радиация, вегетационный период, гидротермический коэффициент, высота снежного покрова и др. Значимое влияние на поведение парниковых газов оказывает почва (П), которая, как природное тело, характеризу-

ется совокупностью физических, химических, водных, воздушных, тепловых, общих физических свойств, определяющих рост и развитие растений. В отдельный атрибут предлагаем выделять биофильные элементы агропочв (Ахп), созданные природой, такие как водорастворимые соединения азота, фосфора, калия, мезо- и микроэлементов. К природным факторам, определяющим круговорот углерода, относим почвенно-биологический комплекс (ПБК), соответствующий процессу почвообразования, а также рельеф (Р), характеризующий крутизну склона, его экспозицию, длину, часть склона, перераспределение солнечной радиации, тепла, влаги и в целом плодородие почв, обуславливающие процессы углеродного баланса.

Перечисленные природные факторы в совокупности устанавливают интенсивность круговорота углерода в агроценозах. Если создавать цифровую модель оценки секвестрации, депонирования и эмиссии, то необходимо учитывать совокупность всех этих явлений и формировать атрибутивы на каждый конкретный элемент. Безусловно, шаблонно использовать представленную модель не совсем правильно и не эффективно, поскольку каждая отдельно взятая территория характеризуется конкретными природными условиями, отзывчивостью культуры к вышеперечисленным факторам. Природные факторы предопределяют антропогенные действия (А) при возделывании той или иной сельскохозяйственной культуры, активизируя процесс круговорота углерода.

По мнению Б.М. Когута, секвестрация – это процесс перевода атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растением с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество [9]. В этом процессе участвует огромное количество сопутствующих факторов. Планирование, прогнозирование и управление круговоротом углерода в агроценозах предусматривают построение цифровой модели, позволяющей определить поведение явления при определенной значимости набора факторов.

В процессе секвестрации (Св) основную роль выполняет фотосинтез (ФС), который можно рассматривать как природный фактор, так и антропогенный [10]. Так, биометрические показатели сорта или гибрида будут предопределять активизацию фотосинтеза, по этой причине значимую роль следует отводить возделываемой

сельскохозяйственной культуре (СхК). Безусловно, зерновые, масличные или другие культуры будут иметь разные возможности усвоения углекислого газа, у них разные биометрические показатели. В свою очередь, селекция и семеноводство активизируют генетически предопределенные способности сорта или гибрида (СГ) в усвоении CO_2 через связь с листовым аппаратом, наличием хлорофилла и в итоге формированием надземной массы. Процесс секвестрации будет определяться и нормой высева семян (Нв) в зависимости от ширины междурядий (Шм), поскольку эти факторы формируют количество растений, их массу, площадь поверхности листового аппарата как отдельного растения, так и всего поля. В этом аспекте уместно заявить и об агрохимических, минеральных удобрениях (АхЭП), которыми оптимизируют питательный режим, регулируют производственный процесс, либо оставляют его на откуп природного потенциала. Немаловажное влияние на активизацию производственных процессов в агроценозах оказывают пестициды (ХСЗР), которые позволяют контролировать наличие и распространение болезней, вредителей и сорных растений, тем самым давая возможность полноценному росту культурных.

Влияние севооборота (СОБ) на производственные процессы хорошо изучено, оно предполагает чередование культур в пространстве и во времени, непосредственно с его помощью регулируют баланс углерода в агропочве. При этом учитывают, что углерод накапливается в почвах тогда, когда складывается положительный азотно-углеродный баланс в севообороте, т.е. наряду с приходом азота (биологического или удобрений) поступает в соответствующих количествах и органический углерод. Важно то, что поступление азота должно превышать его отчуждение урожаем. У каждой культуры различные способности к питанию, процессу фотосинтеза, депонированию и, как следствие, формированию органической массы.

Значимым фактором, определяющим производственные процессы в агроценозах, является выбор техники и технологий (ТТ), которые позволяют организовать систему земледелия (Сз), что активизирует или сдерживает углеродный цикл и, как следствие, агроэкономический эффект. Наиболее перспективной системой земледелия, позволяющей увеличить темпы перевода углерода из атмосферы в растения и почву, счи-

тают нулевую обработку, или no-till. Поскольку верхний слой почвы не нарушается, такая система земледелия может служить неплохим депо для углерода. Кроме этого она позволяет решать экологические проблемы, препятствуя развитию водной и ветровой эрозии. Однако для того, чтобы применение нулевой технологии было успешным, её необходимо дифференцировать в зависимости от почвенно-климатических условий хозяйства и поля, наличия материально-технической базы.

Важным фактором, участвующим в процессе секвестрации углерода, следует считать возделывание покровных культур (Пк), которые удлиняют вегетационный период растений в агроценозах. Управлять процессом возможно и за счет введения в севообороте бинарных посевов (Бп), которые активизируют производственные процессы, полнее используя плодородие почвы за счет разной ярусности возделываемых культур и глубины проникновения корневой системы. Это позволяет им в достатке получать солнечную энергию, а почва лучше укрывается растительным материалом, что сдерживает эрозионные процессы, контролируется водный режим, сорные растения, микробиологическая активность почв, и, безусловно, это позитивно оказывает влияние на процесс депонирования углерода.

Корректировать процесс секвестрации углерода возможно и за счет так называемого очеса (Оч), при котором в процессе уборки урожая стеблестой растений остается на корню, а производственная масса очёсывается и вывозится с поля. Такой способ уборки создает определенные условия как послеуборочного периода, так и для последующей культуры. Он позволяет активизировать процесс снегозадержания, весной оптимизирует тепловые, водные, воздушные, питательные, микробиологические свойства почв и, как следствие, поддерживает углеродный баланс.

Потенциал круговорота углерода за счет внесения органических удобрений (Оу) имеет место. Органические удобрения положительно влияют на физико-химические, общие физические, водно-воздушные свойства, структурно-агрегатный состав, микробиологическую активность почв. Безусловно, органическое вещество не только активизирует производственные процессы, но и может служить составляющим звеном секвестрации и депонирования углерода [11].

По праву почву считают особым биокосным телом природы, где непрерывно совершается синтез органического вещества, круговорот биогенных элементов, что в совокупности обеспечивает формирование надземной массы. В агроценозах значимая роль принадлежит почвенно-биотическому комплексу (ПБК), который представляет большую и многочисленную группу организмов, в том числе микроорганизмов. При их участии происходит разложение органических веществ, они обуславливают круговорот веществ и энергии в природе, от их деятельности зависит плодородие почв, микроорганизмы участвуют в выветривании горных пород и прочих природных процессах. Безусловно, они дышат, поглощая кислород и выделяя углекислый газ, при разложении органических остатков активизируют процесс эмиссии. В аграрном секторе мы научились частично управлять почвенно-биотическим комплексом, позволяющим тормозить или активизировать тот или иной процесс посредством обработки семенного материала, внесения штаммов микроорганизмов в почву, химической обработки растений, что позволяет создавать здоровье агропочв, улучшать качество сельскохозяйственной продукции и состояние окружающей среды.

В процессе секвестрации фотосинтез является начальным этапом круговорота углерода в агроценозе, который можно представить в следующей последовательности:

$$S_v = f(\text{ФС, СхК, СГ, Нв, Шм, АхЭП, ХСЗР, СОБ, ТТ, Сз, ПБК, Пк, Бп, Оч, Оу}) \times \text{ПрФ.}$$

В совокупности с природными факторами, которые оказывают влияние на процесс круговорота углерода, создан функциональный ряд, позволяющий судить об активности секвестрации и возможности организации карбонового земледелия. Каждый из вышеперечисленных факторов необходимо анализировать и дифференцировать для создания его оптимальных условий.

Антропогенные факторы определяют и процесс депонирования (Деп), ассимиляцию углерода. Этот процесс рассматривается как совокупность биохимической и физико-химической трансформации продуктов разложения органи-

ческих остатков в гумусовые кислоты, что принято называть гумификацией. Закрепление органического вещества в почве в форме новых продуктов, устойчивых к микробиологическому разложению, является аккумулялирующим процессом запасов энергии и элементов питания. Исходя из приведенной модели секвестрации углерода, можно обозначить факторы, определяющие процесс депонирования, учитывая наиболее значимые и второстепенные, опосредованно влияющие на этот процесс:

$$\text{Деп} = f(\text{ТТ, Сз, АхЭП, ХСЗР, СОБ, Оч, Оу}) \times \text{ФС, СхК, СГ, Нв, Шм, ПБК, Бп,)} \times \text{ПрФ.}$$

При определенных природных условиях «второстепенные» факторы могут становиться ведущими в процессе депонирования. Это позитивное явление, определяющее задержание углерода в почве, и в то же время оно не может происходить без эмиссии углекислого газа (E_{CO_2}). Эмиссию углерода следует рассматривать как самостоятельный процесс, при котором высвобождается углекислый газ из почвы в атмосферу в результате деятельности микроорганизмов, дыхания корней и микробного разложения корневых ризодепозитов (ферменты, высокополимерные слизи белкового происхождения, куски тканей, корневые волоски, летучие органические вещества и прочее) [12]. Эмиссию углекислого газа в агроценозах, в зависимости от факторов, ее определяющих, функционально можно отобразить в следующей последовательности:

$$E_{CO_2} = f(\text{ПБК, ТТ, Сз, АхЭП, ХСЗР, Оу, Бп}) \times \text{СОБ, Оч, ФС, СхК, СГ, Нв, Шм,)} \times \text{ПрФ.}$$

В круговороте углерода эмиссия углекислого газа зависит от вышеперечисленных факторов. Они в естественных условиях формируются в результате почвообразовательного процесса, а в агроценозах как дополнение к технологическим операциям, внесению минеральных удобрений, многофункциональных биопрепаратов и многое другое.

Заключение

Исследования позволили установить влияние природных и антропогенных факторов, определяющих процессы секвестрации, депонирования

и эмиссии углерода в агроценозах. Наиболее значимыми природными факторами являются фотосинтетически активная радиация, фотосинтез, погодные условия, плодородие агропочв. Фотосинтез, секвестрацию, депонирование и эмиссию углекислого газа следует рассматривать как самостоятельные процессы, на которые можно оказывать влияние антропогенными действиями. Значимыми факторами в управлении процессом фотосинтеза следует считать возделываемую культуру, генетический потенциал сорта, гибрида, норму высева семян. Процесс депонирования углерода многоступенчатый, как и фотосинтез, зависит от рассматриваемых факторов. Однако последовательность их воздействия несколько иная, поскольку часть биологической продукции выносится с урожаем, а оставшаяся на поверхности и в почве преобразуется в органический углерод, каждая по своему сценарию. Наибольшее влияние на этот процесс оказывает избранная система земледелия и ее элементы. Депонирование углерода не может происходить без эмиссии углекислого газа, поскольку на этом этапе оставшаяся в поле мортмасса превращается в углеродсодержащие органические соединения за счет деятельности микроорганизмов. Влияние антропогенных факторов на этот процесс позволяет активизировать совокупность биохимических и физико-химических процессов, гумификацию или минерализацию, за счет технологических процессов, изменения почвенно-биологического комплекса, активность и численность которого определяют системой земледелия.

Библиографический список

1. Cheng, D., Li, X., Yuan, Y., Zhao, Q. (2020). Kinetic model for effects of simulated flue gas onto growth profiles of *Chlorella* sp. AE10 and *Chlorella* sp. Cv. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 67 (5), 783–789. <https://doi.org/10.1002/bab.1829>.
2. Николаенко, С. В. Актуальность декарбонизации деятельности промышленных предприятий на территории Волгоградской области / С. В. Николаенко, Н. Е. Степанова. – Текст: электронный // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 155-160. – DOI 10.18500/1819-7663-2023-23-3-155-160. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/333980> (дата обращения: 28.10.2023).
3. Кальченко, О. А. Институциональное развитие экономики замкнутого цикла в России и Санкт-Петербурге / О. А. Кальченко, Ю. Р. Нурулин, И. В. Скворцова. – Текст: электронный // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. – № 1. – С. 275-281. – ISSN 2226-910X. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/321017> (дата обращения: 01.11.2023). – Режим доступа: Электронно-библиотечная система Лань; для авториз. пользователей.
4. Solovchenko, A., Khozin-Goldberg, I. (2013). High-CO₂ tolerance in microalgae: possible mechanisms and implications for biotechnology and bioremediation. *Biotechnology Letters*, 35 (11), 1745–1752. <https://doi.org/10.1007/s10529-013-1274-7>.
5. Рожков, Л. Н. Годичная абсорбция углекислого газа сосновых древостоев в связи с возрастом / Л. Н. Рожков. – Текст: непосредственный // Труды БГТУ. Серия № 1: Лесное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 64-68.
6. Инишева, Л. И. Роль торфяных ресурсов в стратегии устойчивого развития / Л. И. Инишева, С. Г. Маслов. – Текст: непосредственный // Труды Инсторфа. – 2013. – № 8 (61). – С. 3-10.
7. Бабилов, Б. В. Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболочивания / Б. В. Бабилов, К. И. Кобак. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2016. – № 1 (349). – С. 6-36.
8. Экологические аспекты эволюции плодородия при интенсивном использовании почвенных ресурсов аграрных территорий / А. Е. Кудрявцев, Г. Гуггенбергер, П. Иллигер [и др.]. – Текст: непосредственный // Агрехимический вестник. – 2020. – № 1. – С. 14-24.
9. Когут, Б. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом / Б. М. Когут, В. М. Семенов – DOI 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124. – Текст: непосредственный // Бюллетень

Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2020. – № 102. – С. 103-124. – EDN URHRGP.

10. Смашевский, Н. Д. Экология фотосинтеза / Н. Д. Смашевский. – Текст: непосредственный // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 2 (28). – С. 165-180.

11. Кудеяров, В. Н. Влияние удобрений и системы земледелия на секвестрацию углерода в почвах / В. Н. Кудеяров. – DOI 10.31857/S0002188122120092. – Текст: непосредственный // Агрохимия. – 2022. – № 12. – С. 79-96.

12. Глаголев, М. В. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири / М. В. Глаголев, Е. А. Головацкая, Н. А. Шнырев. – Текст: непосредственный // Сибирский экологический журнал. – 2007. – Т. 14, № 2. – С. 197-210.

References

1. Cheng, D., Li, X., Yuan, Y., Zhao, Q. (2020). Kinetic model for effects of simulated flue gas onto growth profiles of *Chlorella* sp. AE10 and *Chlorella* sp. Cv. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 67 (5), 783–789. <https://doi.org/10.1002/bab.1829>.

2. Nikolaenko, S. V. Aktualnost dekarbonizatsii deiatelnosti promyshlennykh predpriatii na territorii Volgogradskoi oblasti / S. V. Nikolaenko, N. E. Stepanova // *Izvestiia Saratovskogo universiteta. Novaia seriia. Seriia Nauki o Zemle*. – 2023. – Т. 23, No. 3. – С. 155-160. – DOI 10.18500/1819-7663-2023-23-3-155-160. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/333980> (data obrashcheniia: 28.10.2023).

3. Kalchenko, O.A. Institutsionalnoe razvitie ekonomiki zamknutogo tsikla v Rossii i Sankt-Peterburge / O. A. Kalchenko, Iu. R. Nurulin, I. V. Skvortsova // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. – 2022. – No. 1. – С. 275-281. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/321017> (data obrashcheniia: 01.11.2023).

4. Solovchenko, A., Khozin-Goldberg, I. (2013). High-CO₂ tolerance in microalgae: possible mechanisms and implications for biotechnology and bioremediation. *Biotechnology Letters*, 35 (11), 1745–1752. <https://doi.org/10.1007/s10529-013-1274-7>.

5. Rozhkov, L.N. Godichnaia absorbtsiia uglekislogo gaza osnovnykh drevostoev v sviazi s vozrastom / L.N. Rozhkov // *Trudy BGTU. Lesnoe khoziaistvo*. – 2020. – No. 2. – С. 64-68.

6. Inisheva, L. I. Rol torfianykh resursov v strategii ustoichivogo razvitiia / L. I. Inisheva, S. G. Maslov // *Trudy Instorfa*. – 2013. – No. 8 (61). – С. 3-10.

7. Babikov, B.V. Pogloshchenie atmosfernogo uglekislogo gaza bolotnymi ekosistemami territorii Rossii v golotsene. *Problemy zabolachivaniia / B.V. Babikov, K.I. Kobak // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*. – 2016. – No. 1 (349). – С. 6-36. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9.

8. Kudriavtsev A.E., Guggenberger G., Illiger P., Stetsov G.Ia., Iurov V.V. Ekologicheskie aspekty evoliutsii plodorodiia pri intensivnom ispolzovanii pochvennykh resursovaridnykh territorii / A. E. Kudriavtsev, G. Guggenberger, P. Illiger, G.Ia. Stetsov, V.V. Iurov // *Agrokhimicheskii vestnik*. – 2020. – No. 1. – С. 14-24.

9. Kogut, B.M. Otsenka nasyshchennosti pochvy organicheskim uglerodom / B. M. Kogut, V. M. Semenov // *Biulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. – 2020. – No. 102. – С. 103-124. – DOI 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124. – EDN URHRGP.

10. Smashevskii, N. D. Ekologiya fotosinteza / N. D. Smashevskii // *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniia*. – 2014. – No. 2 (28). – С. 165-180.

11. Kudeiarov, V. N. Vliianie udobrenii i sistemy zemledeliia na sekvestratsiiu ugleroda v pochvakh / V. N. Kudeiarov // *Agrokhimiia*. – 2022. – No. 12. – С. 79-96. – DOI 10.31857/S0002188122120092.

12. Glagolev, M. V. Emissiia parnikovyykh gazov na territorii Zapadnoi Sibiri / M. V. Glagolev, E. A. Golovatskaia, N. A. Shnyrev // *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. – 2007. – Т. 14, No. 2. – С. 197-210.

Работа выполнена при финансовой поддержке МСХ РФ за счет средств федерального бюджета в 2023 г. в соответствии с доп. соглашением № 082-03-2023-240/1 от 16 марта 2023 г.

