

УДК 631.89:504.7

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180



Ссылки для цитирования:

Занилов А.Х. Влияние минеральных и органо-минеральных систем удобрения в Геосети многолетних опытов на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 125. С. 157-180. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180

Cite this article as:

Zanilov A.H., The influence of mineral and organo-mineral fertilizer systems in the Geonet of long-term experiments on the formation of carbon balance in the agroecosystem, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 125, pp. 157-180, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-125-157-180

Благодарность:

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, мнемокод FZZR-2023-0010.

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, mnemonic code FZZR-2023-0010.

Влияние минеральных и органо-минеральных систем удобрения в Геосети многолетних опытов на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме

© 2025 г. А. Х. Занилов

*Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова, Россия,
360004, Кабардино-Балкарская Республика,
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.*

*Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра
Российской академии наук,*

*360024, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Кирова, 224,
<https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>, e-mail: amiran78@inbox.ru.*

*Поступила в редакцию 18.11.2024, после доработки 24.01.2025,
принята к публикации 16.09.2025*

Резюме: Целью работы являлась оценка влияния минеральной и органо-минеральной систем удобрения озимой пшеницы (2021–2024 гг.) в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской республики (Терский район, с. Опытное) на участке многолетних опытов, входящих в Геосеть (№ 037), на баланс парниковых газов (CO_2 и N_2O) в агроэкосистеме. Почва участка представлена черноземом обыкновенным мицеллярно-карбонатным. Расчет баланса диоксида углерода производился в соответствии с методическими рекомендациями Минприроды России (Приказ № 371 от 22.05.2022 г.). Объемы выбросов закиси азота определялись в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Сопоставлением данных баланса CO_2 -экв. в агроэкосистеме и CO_2 -экв., соответствующего объему эмитированного N_2O , сформированного за счет содержащегося в растительных остатках и удобрениях азота, а также минерализуемого азота почвы, установлена наиболее благополучная с климатической точки зрения (углерод-секвестрирующая способность) система питания растений – органо-минеральная. Объем CO_2 -экв., накопленного в системе “почва–растение”, в среднем за 4 года при органо-минеральной системе удобрения составил 98.5 т/га и 28.7 т/га при минеральной системе. Данные показатели отражают разницу углеродного баланса по отношению к контрольному варианту, в котором не использовались какие-либо удобрения. Основной сток CO_2 обеспечивался накоплением органического вещества в почве как в пахотном, так и подпахотном горизонтах (0–40 см). При органо-минеральной системе накопление углерода в почве составило 25.2 т/га (92.2 т/га CO_2 -экв.), при минеральной – 7.3 т/га, или 26.7 т/га CO_2 -экв.

Ключевые слова: минеральные удобрения; органические удобрения; парниковые газы; углеродный баланс; Геосеть многолетних опытов; климатический проект.

The influence of mineral and organo-mineral fertilizer systems in the Geonet of long-term experiments on the formation of carbon balance in the agroecosystem

© 2025 A. Kh. Zanirov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov”,
173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004,
Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation.*

*The Institute of Agriculture – a branch of the Kabardino-Balkarian
Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
224 Kirov Str., Nalchik 360024,
Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation,
<https://orcid.org/0009-0002-8635-6501>, e-mail: amiran78@inbox.ru.*

Received 18.11.2024, Revised 24.01.2025, Accepted 16.09.2025

Abstract: The purpose of the work was to assess the effect of mineral and organo-mineral fertilizer systems on the balance of greenhouse gases (CO_2 and N_2O) in the agroecosystem while winter wheat producing. The experiment was conducted 2021–2024 in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic (Tersky District, Opytnoye Village) on a site of long-term experiments included in the Geosystem (No. 037). The soil of the site is represented by ordinary micellar-carbonate chernozem. The calculation of the carbon dioxide balance was carried out in accordance with the methodological recommendations of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (Order No. 371 dated May 22, 2022). The volumes of nitrous oxide emissions were determined in accordance with the recommendations of the Intergovernmental Panel on Climate Change. By comparing the CO_2 -eq balance data in the agroecosystem and the CO_2 -eq corresponding to the amount of N_2O emitted from the nitrogen contained in plant residues and fertilizers, as well as the mineralizable nitrogen in the soil, the most climate-friendly (carbon sequestration capacity) system was identified. The average amount of CO_2 -eq accumulated in the “soil–plant” system over 4 years under the organo-mineral fertilizer system was 98.5 t/ha, compared to 28.7 t/ha under the mineral system. These figures reflect the difference in carbon balance compared to the control option, which did not use any fertilizers. The main absorber of CO_2 was the soil, both in the topsoil and in the subsoil (0–40 cm). In the organic-mineral system, the accumulation of carbon in the soil was 25.2 t/ha (92.2 t/ha CO_2 -eq). In the mineral system, it was 7.3 t/ha or 26.7 t/ha CO_2 -eq.

Keywords: mineral fertilizers; organic fertilizers; greenhouse gases; carbon balance; long-term experiments; Geonet.

ВВЕДЕНИЕ

Климатическая повестка, призванная снизить антропоген-

ные выбросы парниковых газов стала одним из ключевых катализаторов технологических преобразований в мировой экономике. Несмотря на наличие противоположных взглядов на происхождение парниковых газов, факт роста их концентрации в атмосфере не вызывает сомнений ни у одной из сторон дискуссии, а темпы распространения механизмов углеродного регулирования и формирования соответствующей нормативно-правовой основы свидетельствуют о прохождении точки невозврата к привычной экономической модели развития.

Для повышения конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной продукции на международных рынках рекомендуется озаботиться сокращением выбросов парниковых газов, четверть из которых приходится на сельское хозяйство (Gebrewahid, 2018) и модернизировать современное агропроизводство за счет внедрения углероднакопительных технологий (Столбовой, 2024).

Ключевыми факторами, формирующими углеродный след продукции растениеводства, считается дегумификация плодородного слоя почвы, сопровождающаяся чрезмерными выбросами диоксида углерода в атмосферу и нерациональное использование азотсодержащих синтетических и натуральных удобрений, ответственных за выбросы закиси азота. Оценка полного цикла производства зерновых культур показывает, что на долю минеральных удобрений может приходиться до 25% общего углеродного следа (Абдо, 2024), а в структуре углеродного следа конечного продукта (1 кг пшеничного хлеба) доля минеральных удобрений может достигать 15% (Башкин, 2024).

Учитывая прогнозы роста численности населения и во избежание образования глобального дефицита продовольствия, при традиционной системе земледелия в краткосрочной перспективе нельзя отказаться от использования минеральных удобрений, обеспечивающих, по данным мировой статистики, 40% прироста производства агропродукции (Save, Grow, 2011). Альтернативная же система земледелия в России – органическая, не допускающая использования синтетических средств производства, – находится на начальной стадии своего формирования, занимая не более 1.2% (~1 млн га) от всей площади сельскохозяйственных земель Рос-

сийской Федерации.

Выходом из сложившейся ситуации может быть создание агроэкологически, экономически и климатически обоснованных систем земледелия, преимущественно в части оптимизации систем питания культурных растений. Это позволит, с одной стороны, вести экономически эффективную производственную деятельность, стабилизировать получение более высоких урожаев с возможностью компенсации 30–40% потерь углерода почвами (Романенков, 2011) и снизить эмиссию N_2O при использовании азотных удобрений. В зависимости от вида и доз азотсодержащих удобрений эмиссионный фактор ($ЭФ_{N_2O}$) может превышать 1.5–2.0% (Charles, 2017) при установленном МГЭИК усредненном значении 1% (Klemedtsson, 1997).

В настоящее время системные исследования эффективности различных видов и доз удобрений проводятся на участках многолетних наблюдений, входящих в единую географическую сеть. Геосеть опытов с удобрениями была утверждена приказом Наркомзема СССР № 18 от 14 января 1941 г. (Романенков, 2012).

Значение длительных экспериментов в последнее время подвергается переосмыслению, что связано не только с изменением экономических факторов (диспаритет цен на минеральные удобрения и зерно), но и с актуализацией климатической проблематики и возрастающей ролью почвенных ресурсов как компонента агроэкосистем с высоким потенциалом поглощения парниковых газов (Сычев, 2022; 2021). Переход к биосферной парадигме природопользования (Киришин, 2023) в России соответствует общемировому тренду (Paustian, 2000; Körshens, 2018).

При оценке климатического воздействия отрасли растениеводства инвентаризации подлежат в основном источники выбросов двух парниковых газов – диоксида углерода (CO_2) и закиси азота (N_2O), обладающие различным потенциалом глобального потепления (ПГП). Потенциал глобального потепления 1 кг диоксида углерода используется в качестве эталонного значения и равен единице. Концентрация закиси азота в атмосфере в 1 200 раз ниже, чем углекислого газа (WMO, 2019), но его ПГП в 298 раз (IPCC, 2013), по другим данным (Hanson, 1996), в 310 раз выше, что подчеркивает актуальность задач по осуществлению монито-

ринга его выбросов. Вклад N_2O в парниковый эффект оценивается в 6% (ВМО, 2019). В силу необходимости обеспечения населения планеты продовольствием прогнозируется рост выбросов парниковых газов, связанных с увеличением доз минеральных азотных удобрений (Кудеяров, 2020). Анализ данных в отдельных регионах страны подтверждает сохранение тенденций увеличения объемов используемых минеральных удобрений (Завалин, 2023).

Целью исследования являлась оценка климатической целесообразности использования рекомендуемых доз минеральных и органо-минеральных удобрений в условиях естественного влагообеспечения на экспериментальном участке, входящем в Геосеть многолетних опытов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на стационаре № 037 (Институт сельского хозяйства КБНЦ РАН, г. Нальчик), входящем в географическую сеть многолетних опытов, заложенных в 1947-1948 гг. Простаковым П.Е. для изучения влияния различных систем удобрения и орошения на динамику пищевого и водного режимов почвы, а также продуктивность пашни (рис. 1).

Почва участка классифицировалась как чернозем обыкновенный мицеллярно-карбонатный, тяжелосуглинистый, иловато-пылеватый. Содержание гумуса на момент закладки опыта составляло 3.50–3.65%, валовый запас азота, фосфора и калия в пахотном горизонте находился в пределах 0.20–0.28%; 0.13–0.19% и 2.00–2.50% соответственно (Фиापшев, 1971).

Севооборот участка 10-польный, пространственно-временной и сформирован 4 культурами (табл. 1).

Исследования проводились на озимой пшенице, занимающей в севообороте место после люцерны 2-го года посева. Период исследований – 2021–2024 гг. Рекомендованные системы удобрения представлены в таблице 2.

Расчеты по оценке влияния систем удобрения на выбросы парниковых газов в случае с диоксидом углерода проводились с использованием формул, утвержденных Приказом Минприроды России № 371 от 27.05.2022 г. “Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и по-

глошений парниковых газов” (Приказ МПР).

Для оценки баланса CO_2 в системе “почва–растение” учитывался депонированный объем углерода в товарной части продукции. Разница значений CO_2 , эквивалентных объему органического вещества почвы в сравниваемых вариантах, использовалась для конечной климатической оценки рассматриваемых систем удобрения озимой пшеницы.

$$\Delta C_{\text{мин.}} = (C_{\text{fert}} + C_{\text{plant}}) - C_{\text{resp}}, \quad (1)$$

где: $\Delta C_{\text{мин.}}$ – изменения запасов углерода в пуле почвенного углерода, тонн С в год;

C_{fert} – поступление углерода с органическими и минеральными удобрениями при фотосинтезе, тонн С в год;

C_{plant} – поступление углерода с растительными остатками, тонн С в год;

C_{resp} – потери почвенного углерода с дыханием почв, тонн С в год.

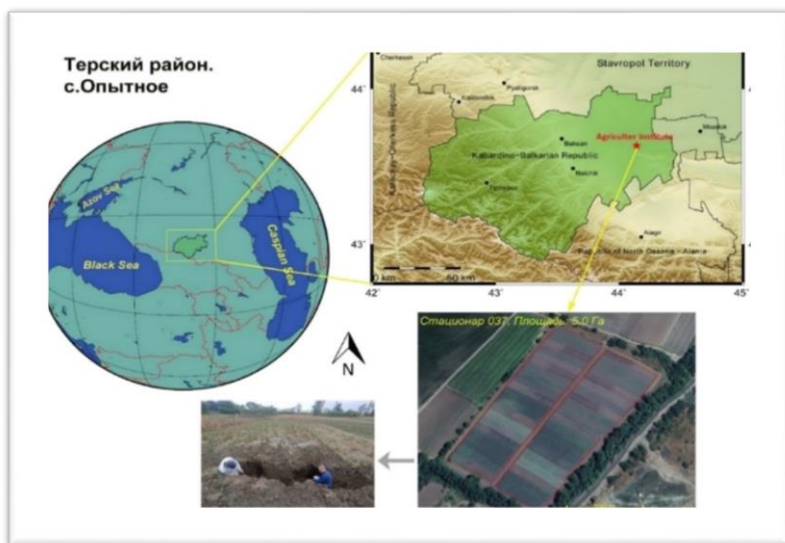


Рис. 1. Месторасположение опытного участка Геосети № 037.

Fig. 1. Location of Geoset experimental site No. 037.

Таблица 1. Ротационная таблица севооборота. Стационар № 037
Table 1. Crop rotation on experimental site No. 037

Годы	Номер поля									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2018	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2
2019	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.
2020	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К
2021	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П	К
2022	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.	П
2023	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К	О.п.
2024	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К	К
2025	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.	К
2026	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1	О.п.
2027	О.п.	К	К	О.п.	П	К	К	О.п.	Л2	Л1

Примечание. Л1 – люцерна 1-го года, Л2 – люцерна 2-го года, К – кукуруза, О.п. – озимая пшеница.
Note. Л1 – 1st year alfalfa, Л2 – 2nd year alfalfa, К – corn, О.п. – winter wheat.

Таблица 2. Рекомендуемая система удобрения озимой пшеницы, кг/га
Table 2. Recommended fertilization system for winter wheat, kg/ha

Контроль	Навоз, т/га	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Минеральная				
-	-	90	90	60
Органо-минеральная				
-	10	60	60	30

Переменные в выше приведенной формуле, в свою очередь, высчитываются с использованием соответствующих коэффициентов:

$$Cfert = \sum i(Орг_i \times Cорг_i) + \sum i(Мин_j \times Cмин_j), \tag{2}$$

где: **Cfert** – поступление С с органическими и минеральными удобрениями, тонн С в год;

Орг_i – количество органических удобрений в расчете на физический вес (i – вид удобрений), тонн в год;

Сорг_i – содержание углерода в сыром веществе органических удобрений (i – вид удобрений), тонн С/тонн органического удобрения (*содержание углерода в сыром веществе подстилочного навоза соответствует 12.07%*);

Мин_j – количество минеральных удобрений (j – вид минеральных удобрений), тонн действующего вещества минеральных удобрений в год;

Смин_j – содержание углерода в разных видах минеральных удобрений, тонн С/тонн действующего вещества минеральных удобрений (коэффициенты для расчета содержания углерода в азотных, фосфорных и калийных удобрениях равны 0.130; 0.015 и 0.017 соответственно).

$$C_{\text{plant}} = C_{\text{ab}} + C_{\text{un}}, \quad (3)$$

где: **Cab** и **Cun** – масса углерода, поступающего в почвы с пожнивными и корневыми остатками культурных растений определенного вида, тонн С в год.

Расчет количества углерода, поступающего в почву с растительными остатками, проводится с использованием дифференцированных коэффициентов по уровню урожайности озимой пшеницы по формулам, представленным в таблице 3.

$$C_{\text{resp}} = \sum i(\text{Area}_i \times \text{AC}_{\text{CO}_2i} \times \text{Veg} \times 0.6 \times 1.43) / 100 \times 12/44, \quad (4)$$

где: **Cresp** – потери почвенного углерода с дыханием почв, тонн С в год;

Area_i – площадь соответствующего типа почв пахотных земель, га;

AC_{CO₂i} – средний коэффициент по дыханию микрофлоры почвы пахотных земель, мг СО₂ в час (среднее значение по всем типам почв принято 204 мг СО₂/м²/ч);

Veg – продолжительность вегетационного периода, часы (в Кабардино-Балкарской республике Veg равен 5 124 ч.);

0.6 – коэффициент для исключения дыхания корней;

1.43 – коэффициент для включения в расчет дыхания почв в течение холодного периода года;

12/44 – коэффициент для пересчета из единиц CO₂ в углерод.

Таблица 3. Масса поступающего с растительными остатками углерода, ц/га

Table 3. Carbon mass supplied with plant residues, centner/ha

Урожайность, ц/га	Пожнивные остатки	Корневые остатки
10–25	$= (0.4 \times Y + 2.6) \times 48.5/100$	$= (0.9 \times Y + 5.8) \times 48.5/100$
26–40	$= (0.1 \times Y + 8.9) \times 48.5/100$	$= (0.7 \times Y + 10) \times 48.5/100$

Расчеты выбросов закиси азота проводились в соответствии с рекомендациями Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) с использованием усредненных значений коэффициента эмиссионного фактора (ЭФ_{N₂O}), равное 0.0126. Данный коэффициент оказался ниже коэффициента, рекомендованного Минприроды России (Методические рекомендации, 2015), и выше коэффициента, дифференцированного с учетом возделываемых культур (Кудяров, 2011; Завалин, 2023).

Методика позволяет оценить выбросы N₂O, связанные с использованием минеральных и органических удобрений, а также образовавшиеся в результате деструкции органического вещества почвы под влиянием ее механизированной обработки. Данная методика пригодна для проведения сравнительных оценок климатического влияния различных агротехнических приемов и почвоудобрительных средств. Формула расчета годовых прямых выбросов представлена в методиках (Методические рекомендации, 2015):

$$N_2O - N_{\text{поступл.}} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_L, \quad (5)$$

где: N₂O – N_{поступл.} – общее поступление закиси азота в атмосферу, кг в год;

F_{SN} – годовое количество азота минеральных удобрений,

внесенных в почвы, кг N/год;

F_{ON} – годовое количество азота навоза, внесенного в почвы, кг N/год;

F_{CR} – годовое количество азота в растительных остатках (надземных и подземных) культурных растений, в том числе от азотфиксирующих культур, кг N/год (расчет по формулам, приведенным в табл. 3);

F_{SOM} – годовое количество азота в минеральных почвах, которое минерализуется в связи с потерей углерода из почвенного органического вещества в обрабатываемых почвах, кг N/год (по умолчанию используется коэффициент для всех полей, равный 30 кг N/га).

EF_1 – коэффициент выбросов N_2O от антропогенного внесения азота в почвы, кг N_2O – N/кг поступающего N (0.0126).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируемые в исследовании системы удобрения в различной степени повлияли на урожайность озимой пшеницы, что в итоге сказалось и на балансе парниковых газов (табл. 4).

Из произведенных расчетов в таблице видно, что суммарное поступление углерода в почву зависело от системы удобрения и урожайности озимой пшеницы. Так, минеральная система удобрения способствовала накоплению в почве 2.18 т/га углерода, что больше, чем в контрольном варианте, на 17.1% (0.32 т/га). Органо-минеральная система обеспечивала поступление 3.38 т/га, что выше на 80.7% (1.21 т/га).

В используемых методических рекомендациях потери органического углерода (**Cresp**) оцениваются с применением справочных данных без дифференциации по используемым системам удобрения. Расчеты показали, что с учетом рассматриваемых статей поступления и потерь углерода при производстве зерна озимой пшеницы отрицательный баланс сложился в контрольном варианте (-0.58 т/га) и в меньшей степени в варианте с минеральной системой удобрения (-0.26 т/га). Органо-минеральная система обеспечивала накопление 0.93 т/га углерода.

Таблица 4. Изменение запасов углерода в пуле почвенного углерода, т/га в год

Table 4. Change in carbon stocks in the soil carbon pool, t/ha per year

Система удобрения	Cfert, т/га				*Cplant, т/га		Cfert + Cplant	Cresp, т/га	ΔCмин
	N		P ₂ O ₅	K ₂ O	По- жив- ные	Кор- невые			
	Орг.	Мин.							
Контроль	-	-	-	-	0.57	1.3	1.87	2.45	-0.58
Минеральная	-	0.12	0.014	0.01	0.57	1.48	2.19	2.45	-0.26
Органо-минер.	1.21	0.08	0.01	0.005	0.58	1.49	3.38	2.45	+0.93

Для оценки конечного углеродного баланса, сформировавшегося при производстве озимой пшеницы, полученные данные необходимо сопоставить с изменившимся объемом углерода в почве (табл. 5) и накопленным в товарной части урожая.

Конечный углеродный баланс оценивается по формуле:

$$\Delta C_{\text{общ}} = (C_{\text{гумус}} + C_{\text{урожай}}) + \Delta C_{\text{мин}} \quad (6)$$

где: $\Delta C_{\text{общ}}$ – окончательный углеродный баланс, тонн С в год;

$C_{\text{гумус}}$ – содержание углерода в общем запасе гумуса, т/га;

$C_{\text{урожай}}$ – масса углерода, аккумулированного в товарной части урожая, т/га;

$\Delta C_{\text{мин}}$ – изменение запасов углерода в пуле почвенного углерода, т/га. (табл. 4).

Расчет, проведенный по представленной формуле, говорит о возрастающем влиянии системы удобрения на формирование углеродного баланса в агроэкосистеме. Для демонстрации влияния почвоудобрительных средств в таблице 6 приведены данные об изменении содержания почвенного углерода в профиле 0–40 см. Академик В.Р. Вильямс отмечал, что никакой прогресс в сельскохозяйственном производстве не мыслим при мощности пахотного слоя менее 20 см (Баздырев, 2023).

Целесообразность учета запаса углерода в более глубоких горизонтах связана со способностью почв к секвестрации углерода не только повышением относительного содержания органического вещества в почве, но и увеличением гумусового горизонта почвы. В абсолютном выражении с учетом запаса углерода в профиле 0–40 см под действием минеральных и органо-минеральных удобрений формируется его положительный баланс – 7.94 т/га и 27.03 т/га соответственно.

Особенностью расчетов объемов закиси азота как парникового газа является то, что в формулы закладываются только показатели эмиссии N_2O (табл. 7), несмотря на наличие научных данных, свидетельствующих о способности почвы поглощать закись азота (Климова, 2019).

Таблица 5. Запасы С, накопленного в органическом веществе почвы и в товарной части урожая, т/га
Table 5. Carbon accumulated in soil organic matter and in the commercial part of the crop, t/ha

№	Фон	Горизонт, см	Органическое ве- щество, %	Плотность, г/см ³	Масса ОВ, т/га	Масса С, т/га	Масса С в горизонте 0–40 см ^ т/га	Урожайность, т/га	Масса С в урожае, т/га
1	Без удобрений	0–20	2.47	1.19	58.8	34.1	70.4	2.28	1.11
		20–40	2.56	1.22	62.5	36.3			
2	Рекомендуемая минеральная система	0–20	2.93	1.19	69.7	40.4	77.7	2.94	1.43
		20–40	2.70	1.20	64.3	37.3			
3	Рекомендуемая органо- минеральная система	0–20	3.79	1.18	89.4	51.9	95.6	2.95	1.43
		20–40	3.11	1.21	75.3	43.7			

Примечание. НСР_{0.5} по горизонту 0–20 см – 0.26, по горизонту 20–40 см – 0.19.

Note. The smallest average difference (0.5) in 0–20 cm layer is 0.26, in 20–40 cm layer – 0.19.

Таблица 6. Баланс углерода с учетом его содержания в органическом веществе почвы и в урожае, тонн С в год
Table 6. Carbon balance taking into account its content in soil organic matter and in the crop yield, tons of C per year

№	Фон	Слой почвы, см	Масса С в почве, т/га	Масса С в урожае, т/га	С _{гумус} + С _{урожай}	$\Delta C_{\text{мин}}$	$\Delta C_{\text{общ}}$ т/га
1	Без удобрений	0–40	70.4	1.11	71.51	-0.58	70.93
3	Минеральная система	0–40	77.7	1.43	79.13	-0.26	78.87
5	Органо-минеральная система	0–40	95.6	1.43	97.03	+0.93	97.96

Отсутствие статьи поглощения может быть связано либо с незначительным количеством поглощенной закиси азота, которым в расчетах можно пренебречь, либо с методологическими сложностями при определении ее поглощения.

Таблица 7. Влияние систем удобрения на поступление в атмосферу N_2O-N , кг/га

Table 7. The impact of fertilization systems on atmospheric emissions of N_2O-N , kg/ha

№	Фон	F_{ON}	F_{SN}	$*F_{CR}$	F_{SOM}	EF_1	$N_2O-N_{\text{по-ступл.}}$
1	Без удобрений	-	-	17.1	30	0.0126	0.59
3	Рекомендуемая минеральная система	-	90	19.1	30	0.0126	1.75
5	Рекомендуемая органо-минеральная система	45	60	19.2	30	0.0126	1.94

Примечание. * – содержание азота в растительных остатках рассчитывалось, исходя из сформировавшейся биомассы и концентрации азота в них, равной 0.45%.

Note. * – the nitrogen content of plant residues was calculated based on the formed biomass and the nitrogen concentration in them, equal to 0.45%.

Вклад удобрений в поступление закиси азота в атмосферу оказался более существенным, чем вклад суммы N_2O , формирующегося из азота, находящегося в растительных остатках, и минерализованного органического вещества почвы. Рекомендованные минеральная и органо-минеральная системы удобрения повлияли на поступление 1.75 и 1.94 кг/га закиси азота в атмосферу, что больше, чем в контрольном варианте, на 197 и 228% соответственно.

Сопоставлением полученных данных по накопленному углероду в системе “почва–растение” (CO_2 -экв. высчитывается с ис-

пользованием коэффициента 3.66) и по выбросу закиси азота (CO_2 -экв. высчитывается с использованием коэффициента ПГП = 298) можно провести сравнительную оценку климатического влияния исследуемых систем удобрения (табл. 8). Для этого данные контрольного варианта используются в качестве базовых значений, по отношению к которым будет производиться оценка.

Полученные в результате расчетов данные свидетельствуют о влиянии минеральных удобрений и их сочетания с органическими на возможность ведения более благополучного с климатической точки зрения земледелия. При этом органо-минеральная система способствует накоплению CO_2 -экв. в агроэкосистеме в 3.4 раза больше по сравнению с использованием только минеральных удобрений.

Максимальная эффективность органо-минеральной системы удобрения ранее была установлена основателем отечественной школы агрохимии Д.Н. Прянишниковым (Прянишников, 1929) и подтверждена экономическими расчетами (Глуховченко, 2019).

В современных условиях глобальной переоценки значимости промышленных технологий задачи достижения устойчивости земледелия актуализируются в свете климатической парадигмы, что должно быть учтено и российским АПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение статей углеродного баланса в системе “удобрение–почва–растение” с использованием методик Минприроды России и рекомендаций МГЭИК свидетельствует о преимущественной роли почвы как о резервуаре углерода, на долю которого в общей системе “почва–растение” приходится 84.7% секвестрированного диоксида углерода при минеральной системе и 95% – при органо-минеральной системе удобрения.

Учет в изменении содержания органического вещества почвы в глубоких горизонтах позволяет дать более объективную оценку климатической целесообразности использования различных систем удобрения. Это подтверждается увеличением запасов гумуса в почвенном горизонте до 40 см.

Таблица 8. Итоговый расчет баланса CO₂-экв., сформированного под влиянием систем удобрения
Table 8. Final calculation of the CO₂-eq balance formed under the influence of various fertilization systems

№	Фон	ΔСобщ,			N ₂ O-N _{поступл.}			ΔС _{общ} -N ₂ O-N _{поступл.}
		т/га	Накоп- ление, т/на	CO ₂ - экв	кг/га	Накоп- ление, кг/га	CO ₂ - экв., т/га	т CO ₂ -экв/га
1	Без удобрений	70.93	-	-	0.59	-	-	-
3	Рекомендуемая минеральная система	78.87	7.94	29.06	1.75	1.16	0.346	28.71
5	Рекомендуемая органо-минеральная система	97.96	27.03	98.93	1.94	1.35	0.402	98.53

При этом научного внимания заслуживает особенность методики Минприроды России, в которой вклад дыхания почвы рассматривается в качестве потока CO_2 , в то время как в научной литературе изобилует информация о тесной корреляционной зависимости дыхания почвы с содержанием в ней органического вещества.

Несмотря на отдельные противоречия в методологии расчетов, полученные данные с их использованием могут быть полезны при разработке почвенно-климатических проектов, где в качестве базовой линии рассматриваются консервативные способы земледелия, а проектный сценарий, в свою очередь, предусматривает модификацию системы питания культурных растений посредством включения в нее органических удобрений.

Подтверждение климатической целесообразности сочетания минеральных и органических удобрений наряду с их положительным влиянием на агроэкологические и экономические параметры производства позволяет рассматривать данную систему в качестве универсального приема для достижения устойчивости земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдо Ай, Сунь Д., Янг К., Ли У., Ши З., Абдалла В.Е., Эль-Собки ЕАОС, Вэй Х., Чжан Дж., Кузяков Ю. Углеродный след синтетического азота под основными культурами: первый анализ от начала до конца // Глобальная биология. 2024. № 30(4). e17277. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17277>.
2. Башкин В.Н. Эмиссия парниковых газов как мера энергоэффективности при оценке жизненного цикла удобрений // Жизнь Земли. 2024. Т. 46. № 1. С. 20–32.
3. Баздырев Г.И., Лошаков В.Г., Пупонин А.И., Рассадин А.Я., Сафонов А.Ф., Туликов А.М. Земледелие. М.: Изд-во “Колос”, 2000. 549 с.
4. Глуховченко А.Ф. Агрохимическое обоснование продуктивности кукурузы на зерно при разных дозах удобрений и способах обработки почвы: Дис. ... к. с.-х. н. Белгород, 2019. 166 с.
5. Завалин А.А., Духанина Т.М., Такаева М.А. Оценка эмиссии закиси азота в земледелии Чеченской Республики // Плодородие. 2023. № 1. С. 34–39.
6. Кирюшин В.И. Задачи и программа научно-инновационного обеспечения земледелия и землепользования (методические

рекомендации). М.: ООО “Издательство МБА”, 2023. 96 с.

7. *Климова А.Ю., Степанов А.Л., Манучарова Н.А.* Особенности трансформации соединений азота и углерода в олиготрофной торфяной почве // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1198–1202.

8. *Кудеяров В.Н.* Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1192–1205.

9. *Кудеяров В.Н.* Эмиссионный фактор азота при применении азотных удобрений в земледелии России // Агрохимия. 2021. № 11. С. 3–15.

10. Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объемов выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации. Минприроды России. 2015. 30 с.

11. *Простаков П.Е.* Наблюдения над динамикой водного и пищевого режима в 10-польном травопольном севообороте на предкавказских карбонатных черноземах при орошении. Отчет Южного института гидротехники и мелиорации. Ч. 1. Новочеркасск, 1950. 72 с.

12. *Прянишников Д.Н.* О сравнении действия навоза и минеральных удобрений // Ежемес. науч.-техн. журн. комитета по химизации НХ СССР. 1929. № 1. С. 35–42.

13. *Романенков В.А.* Агрохимические опыты в системе исследований Геосети: прошлое, настоящее и будущее // Известия ТСХА. 2012. № 3. С. 54–61.

14. *Романенков В.А.* Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов): Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 2011. 47 с.

15. *Столбовой В.С., Гребенников А.М., Шилов П.М., Духанин Ю.А.* Развитие национальной модели управления бюджетом гумуса (углерода) в почвах агроэкосистем Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120). С. 6–47. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.

16. *Сычев В.Г., Налиухин А.Н.* Изучение потока углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // Плодородие. 2021. № 6. С. 38–41.

17. *Сычёв В.Г., Налиухин А.Н., Ерегин А.В., Шарапова Н.Р., Демидов Д.В.* Углерод-секвистрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии CO₂ в длительном полевом опыте // Плодородие. 2022. № 6. С. 73–77.

18. *Фиатишев Б.Х., Хачетлов Р.М., Шхацева С.Х.* О влиянии длительного удобрения на элементы плодородия обыкновенного мицелярно-карбонатного остаточно-лугового (предкавказского террасового)

чернозема // Материалы конференции “Научные основы рационального использования почв Северного Кавказа и пути повышения их плодородия”. 1969. Нальчик, 1971. С. 31–325.

19. Charles A., Rochette P., Whalen J.K., Angers D.A., Chantigny M.H., Bertrand N. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis // *Agriculture. Ecosystems and Environment*. 2017. Vol. 236. P. 88–98.

20. Gebrewahid Y., Gebre-Egziabhier T.B. Carbon stock potential of scattered trees on farmland along an altitudinal gradient in Tigray, Northern Ethiopia // *Ecological Processes*. 2018. Vol. 7. No. 1. P. 2–8.

21. Hanson R.S., Hanson T.E. Methanotrophic bacteria // *Microbiological reviews*. Vol. 60. 1996. No. 2. P. 439–471.

22. IPCC, 2013. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F. et al. N.Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

23. Klemetsson L., Klemetsson A.K., Moldan F. Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition // *Biol. Fertil. Soils*. 1997. Vol. 25. P. 290–295.

24. Körshens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments / Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12. Oktober 2018 in UFZ Leipzig”. 2018. 12 p.

25. Paustian K., Six J., Elliot E.T., Hunt H.W. Management options for reducing CO₂ emission from agricultural soils // *Biochemistry*. 2000. Vol. 48. P. 147–163.

26. Save and Grow. A policymaker’s guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. FAO, Rome. 2011. 116 p.

27. WMO Greenhouse Gas Bulletin. 15–25 November 2019.

REFERENCES

1. Abdo Aj, Sun' D., Jang K., Li U, Shi Z., Abdalla VE, Jel'-Sobki EAOS, Vvej H., Chzhan Dzh., Kuzjakov Ju., Uglerodnyj sled sinteticheskogo azota pod osnovnymi kul'turami: pervyj analiz ot nachala do konca (Carbon footprint of synthetic nitrogen under major crops: a first end-to-end analysis), *Global'naja biologija*, 2024, No. 30(4), e17277, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17277>.

2. Bashkin V.N., Jemissija parnikovyh gazov kak mera jenergojeffektivnosti pri ocenke zhiznennogo cikla udobrenij (Greenhouse gas emissions as a measure of energy efficiency in fertilizer life cycle assessment), *Zhizn' Zemli*,

2024, Vol. 46, No. 1, pp. 20–32.

3. Bazdyrev G.I., Loshakov V.G., Puponin A.I., Rassadin A.Ja., Safonov A.F., Tulikov A.M., *Zemledelie* (Agriculture), M.: Izd-vo “Kolos”, 2000, 549 p.

4. Gluhovchenko A.F., *Agrohimicheskoe obosnovanie produktivnosti kukuruzy na zerno pri raznyh dozah udobrenij i sposobah obrabotki pochvy*: Diss. ... kand. s.-kh. nauk (Agrochemical substantiation of grain corn productivity with different fertilizer rates and tillage methods, Cand. Agri. Sci. thesis), Belgorod, 2019, 166 p.

5. Zavalin A.A., Duhanina T.M., Takaeva M.A., *Ocenka jemissii zakisi azota v zemledelii Chechenskoj Respubliki* (Assessment of nitrous oxide emissions in agriculture of the Chechen Republic), *Plodorodie*, 2023, No.1, pp. 34–39.

6. Kiryushin V.I., *Zadachi i programma nauchno-innovatsionnogo obespecheniya zemledeliya i zemlepol'zovaniya (metodicheskiye rekomendatsii)* (Objectives and program of scientific and innovative support for agriculture and land use (methodological recommendations)), Moscow: OOO “Izdatel'stvo MBA”, 2023, 96 p.

7. Klimova A.Ju., Stepanov A.L., Manucharova N.A., *Osobennosti transformacii soedinenij azota i ugleroda v oligotrofnoj torfjanoj pochve* (Features of the transformation of nitrogen and carbon compounds in oligotrophic peat soil), *Pochvovedenie*, 2019, No. 10, pp. 1198–1202.

8. Kudejarov V.N., *Emissija zakisi azota iz pochv v usloviyah primeneniya udobrenij (analiticheskij obzor)* (Nitrous oxide emission from soils under conditions of fertilizer application (analytical review)), *Pochvovedenie*, 2020, No. 10, pp. 1192–1205.

9. Kudejarov V.N., *Emissionnyj faktor azota pri primenenii azotnyh udobrenij v zemledelii Rossii* (Nitrogen emission factor during the application of nitrogen fertilizers in agriculture in Russia), *Agrohimija*, 2021, No. 11, pp. 3–15.

10. *Methodological recommendations for conducting a voluntary inventory of greenhouse gas emissions in the constituent entities of the Russian Federation*. Ministry of Natural Resources of Russia, 2015, 30 p.

11. Prostakov P.E., *Nabljudeniya nad dinamikoj vodnogo i pishhevogo rezhima v 10-pol'nom travopol'nom sevooborote na predkavkazskih karbonatnyh chernozemah pri oroshenii* (Observations on the dynamics of the water and food regime in a 10-field grassland crop rotation on irrigated Ciscaucasian carbonate chernozems), Report of the Southern Institute of Hydroengineering and Land Reclamation, Part 1, Novocherkass, 1950, 72 p.

12. Prjanishnikov D.N., *O sravnenii dejstviya navoza i mineral'nyh udobrenij* (On the comparison of the effects of manure and mineral fertilizers), *Ezhemes. nauch.-tehn. zhuri. komiteta po himizacii NH SSSR* (Monthly scientific and

technical journal of the committee on chemicalization of the USSR National Economy), Moscow: 1929, No. 1, pp. 35–42.

13. Romanenkov V.A., *Agrohimicheskie opyty v sisteme issledovanij Geoseti: proshloe, nastojashhee i budushhee* (Agrochemical experiments in the Geonet research system: past, present, and future), *Izvestija TSHA*, 2012, No. 3, pp. 54–61.

14. Romanenkov V.A., *Dinamika zapasov pochvennogo ugleroda v agrocenozah evropejskoj territorii Rossii (po dannym dlitel'nyh agrohimicheskikh opytov): Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Dynamics of soil carbon reserves in agrocenoses of the European territory of Russia (based on long-term agrochemical experiments): Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2011, 47 p.

15. Stolbovoy V.S., Grebennikov A.M., Shilov P.M., Dukhanin Yu.A., Towards a national model of humus (carbon) budget management in soils of agroecosystems in the Russian Federation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, Vol. 120, pp. 6–47, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-120-6-47>.

16. Sychev V.G., Naliuhin A.N., *Izuchenie potok ugleroda i azota v dlitel'nyh polevyh opytah Geoseti s cel'ju snizhenija vybrosov parnikovyh gazov i povyshenija deponirovaniya dioksida ugleroda agrocenozami* (Study of carbon and nitrogen flux in long-term field experiments of the Geonet to reduce greenhouse gas emissions and increase carbon dioxide sequestration by agrocenoses), *Plodorodie*, 2021, No. 6, pp. 38–41.

17. Sychev V.G., Naliuhin A.N., Eregina A.V., Sharapova N.R., Demidov D.V., *Uglerod-sekvestirujushhaja ocenka razlichnyh sistem udobrenija i opredelenie jemissii CO₂ v dlitel'nom polevom opyte* (Carbon sequestration assessment of various fertilization systems and determination of CO₂ emissions in a long-term field experiment), *Plodorodie*, 2022, No. 6, pp. 73–77.

18. Fiapshev B.H., Hachetlov R.M., Shhaceva S.H., *O vlijanii dlitel'nogo udobrenija na jelementy plodorodija obyknovennogo miceljarno-karbonatnogo ostatochno-lugovatogo (predkavkazskogo terrasovogo) chernozema* (On the influence of long-term fertilization on the fertility elements of ordinary micellar-carbonate residual-meadow (Ci-Caucasian terrace) chernozem), *Materialy konferencii "Nauchnye osnovy racional'nogo ispol'zovanija pochv Severnogo Kavkaza i puti povyshenija ih plodorodija"* (Proc. of the conf. "Scientific foundations of rational use of soils of the North Caucasus and ways to increase their fertility"), 1969, Nal'chik, 1971, pp. 31–325.

19. Charles A., Rochette P., Whalen J.K., Angers D.A., Chantigny M.H., Bertrand N., Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, Vol. 236, pp. 88–98.

20. Gebrewahid Y., Gebre-Egziabhier T.B., Carbon stock potential of scattered trees on farmland along an altitudinal gradient in Tigray, Northern Ethiopia, *Ecological Processes*, 2018, Vol. 7, No. 1, pp. 2–8.
21. Hanson R.S., Hanson T.E., Methanotrophic bacteria, *Microbiological reviews*, Vol. 60, 1996, No. 2, pp. 439–471.
22. Stocker T.F. et al. (Eds.), IPCC, 2013. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, N.Y.: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
23. Klemmedtsson L., Klemmedtsson A.K., Moldan F., Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition, *Biol. Fertil. Soils*, 1997, Vol. 25, pp. 290–295.
24. Körshens M., Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of long-term field experiments, Vortrag zum 2. Symp. “Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12. Oktober 2018 im UFZ Leipzig”, 2018, 12 p.
25. Paustian K., Six J., Elliot E.T., Hunt H.W., Management options for reducing CO₂ emission from agricultural soils, *Biochemistry*, 2000, Vol. 48, pp. 147–163.
26. Save and Grow, A policymaker’s guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. FAO, Rome, 2011, 116 p.
27. WMO Greenhouse Gas Bulletin, 15–25 November 2019.