

## УГЛЕРОД-СЕКВЕСТРИРУЮЩАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ N<sub>2</sub>O В ДЛИТЕЛЬНОМ ПОЛЕВОМ ОПЫТЕ

В.Г. Сычёв<sup>1</sup>, ак. РАН, А.Н. Налиухин<sup>2</sup>, д.с.-х.н., А.В. Ерегин<sup>3</sup>,  
Н.Р. Шарапова<sup>4</sup>, Д.В. Демидов<sup>4</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup>ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии  
им. Д.Н. Прянишникова»

127550, ул. Прянишникова 31а, Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

127550, ул. Тимирязевская, 6/17, Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный центр агрохимической службы «Вологодский»

160555, ул. Студенческая, 11, Молочное, Вологда, Россия

<sup>4</sup>Группа ФосАгро, ОПАО «Апатит»

119333, Ленинский проспект, 55/1, стр. 1, Москва, Россия, E-mail: naliuhin@yandex.ru

В стационарном полевом опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в звене севооборота: вико-овсяная смесь – озимая пшеница – ячмень – клевер – овёс изучено влияние систем удобрения (органической, минеральной, органоминеральной) и известкования на секвестрацию углерода и эмиссию закиси азота. При учёте всех статей баланса депонирование диоксида углерода при минеральной системе на фоне известкования увеличивается на 2,3 т СО<sub>2</sub>/га/год, достигая 2,9 т. Смешанная органоминеральная система, основанная на внесении половинных доз органических и минеральных удобрений, обеспечивает дополнительную секвестрацию СО<sub>2</sub> до 5,3-6,6 т СО<sub>2</sub>/га/год. Внесение полных доз на известкованном фоне практически удваивает депонирование диоксида углерода как за счёт накопления его в органическом веществе почвы (30% общей секвестрации), так и в составе товарной части урожая. Дополнительная эмиссия N-N<sub>2</sub>O за счёт известкования равна 0,001 (контроль) – 0,039 (при внесении N<sub>30</sub>P<sub>24</sub>K<sub>45</sub>) кг/га/год. Эмиссионный фактор составил при этом 0,07-0,08, а при внесении навоза КРС и минеральных удобрений – 0,08-0,09. Совместное применение органических и минеральных удобрений в половинных дозах несколько уменьшило эмиссионные потери закиси азота при известковании, которые колебались в пределах 0,08-0,09 и были сопоставимы с минеральной системой удобрения. Следует отметить, что продуктивность полевого севооборота при органоминеральной системе удобрения была на 10% выше – 45-50 ц з.е./га.

Ключевые слова: секвестрация, эмиссия, диоксид углерода, закись азота, почва, системы удобрения, длительный полевой опыт.

Для цитирования: В.Г. Сычёв<sup>1</sup>, ак. РАН, А.Н. Налиухин<sup>2</sup>, д.с.-х.н., А.В. Ерегин<sup>3</sup>, Н.Р. Шарапова<sup>4</sup>, Д.В. Демидов. Углерод-секвестрирующая оценка различных систем удобрения и определение эмиссии N<sub>2</sub>O в длительном полевом опыте// Плодородие. – 2022. – №6. – С. – 73-77. DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.19.

Длительные полевые опыты не только позволяют изучать закономерности изменения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур при применении удобрений во времени и пространстве, но и являются уникальными агрохимическими экспериментами, с помощью которых возможны динамическое моделирование выбросов и поглощения углерода. О том, что стационарные опыты могут рассматриваться как источники независимых данных по оценке потоков углерода и азота, говорят исследования российских и зарубежных учёных [1, 11, 18, 20, 23].

Органическое вещество почв является главным консерватором СО<sub>2</sub> атмосферы: содержание в нём углерода превышает биомассу растительности в мире в 3 раза, а в России, занимающей большую часть площади Северной Евразии, в 7,5 раз [5]. Именно поэтому, баланс гумуса и азота в земледелии является наиважнейшим критерием эффективности ведения земледелия с учётом стремления к углеродной («парниковой») нейтральности [13].

Следует отметить, что игнорирование депонирования СО<sub>2</sub> в биомассе растений может привести к серьёзным просчётам. Так, по данным [19], средний период

существования углерода в атмосфере составляет 5 лет, в то время как в связанном растениями виде – 10 лет. При этом среднее время пребывания углерода в составе органического вещества почвы – до 35 лет [19].

Закись азота (N<sub>2</sub>O) – один из самых долгоживущих парниковых газов, оказывающих, к тому же, отрицательное влияние на разрушение озонового слоя. Считается, что основные потери азота из почвы обусловлены преимущественно биологической денитрификацией, которая вызывается денитрифицирующими микроорганизмами, а также хемоденитрификацией, т. е. восстановлением образующихся в почве нитритов в результате ряда химических реакций. Денитрифицирующие микроорганизмы при окислении органического вещества почвы до СО<sub>2</sub> используют в качестве акцептора водорода нитраты, восстанавливая их до закиси азота (N<sub>2</sub>O) и молекулярного азота (N<sub>2</sub>) [10]. Именно поэтому очень важно выявить факторы, снижающие эмиссионные потери закиси азота и установить реальные потери N<sub>2</sub>O из азотных, органических удобрений, поукосно-корневых, растительных остатков и почвы.

Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, англ. – IPCC) введена различной степени детализация коэффициентов закиси азота от множества факторов [15]. Назрела острая необходимость количественно оценить вклад удобрений в суммарные выбросы парниковых газов для уточнения национальных коэффициентов [2-6].

В ранее опубликованных работах [12, 13] рассмотрены основные подходы к использованию результатов, полученных в длительных полевых опытах с удобрениями, для изучения потоков углерода и азота в агроэкосистемах, на основе которых необходимо разработать современные агротехнологии с минимальным углеродным следом.

**Цель исследований** - изучить потоки углерода и азота для определения размеров эмиссии и депонирования диоксида углерода в составе биомассы растений и почвенного органического вещества (гумуса) за полную ротацию пятипольного зернотравяного севооборота и рассчитать эмиссию  $N_2O$  для различных систем удобрения при известковании.

**Методика.** Полевой опыт заложен в 2015 г. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в звене севооборота: 1 – вико-овсяная смесь; 2 – озимая пшеница; 3 – ячмень; 4 – клевер; 5 – овёс. В качестве систем удобрения изучали: органическую, минеральную и органоминеральную с внесением минеральных и органических удобрений (навоза КРС) в половинных ( $N_{150}P_{120}K_{225}$ ) и полных ( $N_{300}P_{240}K_{450}$ ) дозах (табл. 1). В качестве контроля выступал вариант без удобрений. Системы удобрения изучали на фоне известкования (по 1,0 Нг) и без него [7]. Известкование было проведено один раз под первую культуру севооборота – вико-овсяную смесь на 1/2 части опыта, с созданием близкой к нейтральной реакции почвенной среды –  $pH_{KCl}$  5,8. На другой части – известняковую муку не вносили,  $pH$  солевой вытяжки до закладки опыта и в течении эксперимента колебался в пределах 5,0-5,2. В своей работе пересчёт углерода в гумус не проводили и представляли данные в виде содержания почвенного органического вещества –  $C_{орг.}$ , что характерно для большинства исследований [8, 9].

**1. Почвенная эмиссия и депонирование углерода при различных системах удобрения и известкования (за ротацию пятипольного севооборота)**

Системы удобрения (фактор В), вариант опыта	Известкование (фактор А)			
	$\Delta C_{орг.}/год, \%$		$\Delta \text{запасов } C_{орг.}, \text{ т/га в год}$	
	б/и	с/и	б/и	с/и
1. Контроль (без удобрения)	0,000	<b>-0,018</b>	<b>-0,3</b>	<b>-0,8</b>
2. Навоз, 50 т / га	0,034	<b>-0,004</b>	0,7	<b>-0,4</b>
3. NPK, экв.2 вар.	<b>-0,012</b>	<b>-0,016</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,8</b>
4. Навоз, 25 т / га + 1/2 NPK	0,040	0,008	0,8	<b>-0,1</b>
5. Навоз, 50 т / га + NPK	0,028	0,054	0,5	1,2
Среднее по фактору А (изв.)	0,018	0,004	0,2	<b>-0,2</b>

*Примечание.* б/и – без известкования, с/и – с известкованием (здесь и в табл. 2-4).

На основе экспериментальных данных была рассчитана скорость изменения запасов  $C_{орг.}$  ( $\Delta t$  С/га в год), позволяющая определить количественные величины секвестрации и сохранности углерода в составе  $C_{орг.}$ .

Для вычисления суммарного эмиссионного фактора был рассчитан баланс азота за полную ротацию севооборота. Отдельно определяли размеры по-

терь/иммобилизации азота при известковании. Для установления эмиссии  $N_2O$  в зависимости от доз минеральных и органических удобрений (с учётом содержащегося в них азота) использовали модель Щербака и др. [22]:

$$\Delta N_2O = (0,001N \cdot [6,49 + 0,0187N]),$$

где  $\Delta N_2O$  – приращение эмиссии  $N-N_2O$ , кг/га, N – доза удобрения, кг/га.

Статистическую оценку результатов эксперимента проводили по модели двухфакторного дисперсионного анализа.

**Результаты и их обсуждение.** Как видно из приведённых данных, почва агроценозов без внесения удобрений является чистым источником  $CO_2$  (см. табл. 1).

Запас  $C_{орг.}$  перед закладкой опыта в 2015 г. составлял 45 т/га в слое 0-20 см. В первые три года эксперимента наибольшее увеличение секвестрации углерода отмечалось в вариантах с применением навоза (+2,3 тС/га) [14].

Известкование, усиливая минерализацию органического вещества и мобилизацию азота (что увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур), способствует ежегодной эмиссии 0,8 т С– $CO_2$ /год. Внесение органических удобрений (навоза КРС на опилочной подстилке) способствует дополнительному вовлечению в состав почвенного органического вещества порядка 0,7 т С/год, вдвое сдерживая эмиссионные потери при известковании по сравнению с неудобренной почвой (контроль). Следует отметить, что средние минерализационные потери гумуса в дерново-подзолистых почвах составляют 1,0 т/га (-0,58т С– $CO_2$ /год) под зерновыми культурами и – 0,8 т/га (-0,46 С– $CO_2$ /год) под многолетними травами. С учётом поступления ОВ с поукосно-корневыми остатками культур, баланс гумуса (углерода –  $C_{орг.}$ ) в неудобренных вариантах составляет порядка -0,4 т/год (-0,23 С– $CO_2$ /год) под зерновыми и около +0,6 т/га (+0,35 С– $CO_2$ /год) под многолетними травами. Без поступления ОВ с навозом, баланс гумуса в севооборотах с 1 полем многолетних трав складывается отрицательный и составляет  $\approx -0,2$  т/га в год, или – 0,12 т С– $CO_2$ /год, что весьма схоже с полученными данными [14].

При внесении комплексных минеральных удобрений увеличивается потребление азота почвенного органического вещества по сравнению с контролем за счёт усиления минерализационных процессов. В зависимости от культуры, растения при внесении азотных удобрений могут дополнительно усваивать 30-50% азота почвы. По данным [11], при систематическом внесении минеральных удобрений ежегодно минерализовалось 4-5% исходного органического азота. Если принять содержание азота в почве, равным 0,1% (2,5 т/га), то можно предположить, что ежегодно может минерализоваться до 100-120 кг N/га, или 0,58-0,70 т  $C_{орг.}$ /га (с учётом соотношения N:C, равного 1:10 и пересчётного коэффициента углерода в гумус 1,724), что и подтверждают исследования. Таким образом, использование минеральных удобрений без внесения органических и заправки соломы, поукосно-корневых остатков растений, может служить дополнительным источником  $CO_2$ .

Внесение половинных доз навоза (25 т/га) совместно с NPK позволяет полностью перекрыть минерализацию гумуса за счёт гумификации навоза. По расчётам с внесением 25 и 50 т/га навоза поступает 6,25 и 12,5 т/га сухого вещества. При коэффициенте гумификации навоза 0,2 образуется 1,25 и 2,50 т/га гумуса, или 0,73-

1,46 т С–СО<sub>2</sub>. Заделка соломы позволяет удвоить поступление углерода в состав органического вещества почв и довести его до 0,3-0,6 т С–СО<sub>2</sub>/год, что также подтверждают исследования (0,5 т С/год на известкованном фоне в 5-м варианте).

С учётом разной насыщенности полевых севооборотов удобрениями представляют интерес средние данные, полученные в ходе исследований. Ежегодное депонирование углерода в состав почвенного органического вещества составляет на известкованных почвах порядка 0,2 т С–СО<sub>2</sub>/год. Примечательно, что известкование меняет знак, а значит и направленность процессов секвестрации/минерализации в сторону минерализации С<sub>орг.</sub>.

Как показали исследования, возделывание сельскохозяйственных культур в севообороте обеспечивает накопление С–СО<sub>2</sub> от 1,2-1,5 т/га/год на контроле (без удобрений) до 3,5-4,5 т/га/год при органоминеральной системе удобрения (табл. 2).

## 2. Влияние различных систем удобрения на депонирование углерода в товарной части урожая и почвенном органическом веществе

Фактор В – системы удобрения, № варианта	Фактор А – известкование	Урожайность, т з.е/га	Накопление С-СО <sub>2</sub> , т/га/год		Баланс С-СО <sub>2</sub> , т/га	Депонирование СО <sub>2</sub> , т/га/год	
			в с.-х. культурах	в почве		Всего	За счёт систем удобрения, Δ
1	б/и	3,42	1,8	-0,3	1,5	5,6	-
	с/и	3,70	2,0	-0,8	1,2	4,4	-
	+/-	0,28	0,2	-0,5	-0,3	-1,2	-
2	б/и	4,28	2,2	0,7	2,9	10,8	5,2
	с/и	4,51	2,5	-0,4	2,1	7,8	3,4
	+/-	0,23	0,3	-1,1	-0,8	-3,0	-1,8
3	б/и	4,28	2,4	-0,7	1,7	6,2	0,6
	с/и	4,78	2,8	-0,8	2,0	7,3	2,9
	+/-	0,50	0,4	-0,1	0,3	1,1	2,3
4	б/и	4,54	2,5	0,8	3,3	12,2	6,6
	с/и	5,05	2,8	-0,1	2,7	9,7	5,3
	+/-	0,51	0,2	-0,9	-0,7	-2,5	-1,3
5	б/и	5,16	3,0	0,5	3,5	12,9	7,3
	с/и	5,73	3,3	1,2	4,5	16,6	12,2
	+/-	0,57	0,3	0,7	1,0	3,8	5,0
В среднем		4,55	2,5	0,0	2,5	9,3	5,4

Исходя из полученных расчётов можно отметить, что депонирование диоксида углерода при минеральной системе увеличивается при известковании на 2,3 т СО<sub>2</sub>/га/год, достигая 2,9 т. Смешанная органо-минеральная система, основанная на внесении половинных доз органических и минеральных удобрений обеспечивает дополнительную секвестрацию СО<sub>2</sub> до 5,3-6,6 т СО<sub>2</sub>/га/год. Внесение полных доз на известкованном фоне практически удваивает депонирование диоксида углерода как за счёт накопления его в органическом веществе почвы (30% общей секвестрации), так и в составе товарной части урожая.

Следует подчеркнуть, что почва – труднорегулируемый источник эмиссии СО<sub>2</sub>, при этом искусственное ограничение минерализации почвенного органического вещества может привести к дефициту элементов минерального питания, ослаблению продукционного процесса растений и уменьшению фотосинтетической фиксации СО<sub>2</sub> [19]. Именно поэтому нужно не ограничивать эмиссию СО<sub>2</sub> из почвы, а увеличивать содержание в почве органического углерода (С<sub>орг.</sub>) [21].

Для вычисления суммарного эмиссионного фактора был рассчитан баланс азота за полную ротацию севооборота с учётом следующих источников (табл. 3):

1. Удобрения (органические + минеральные);
2. Солома, которую запахивали на делянках и с поля, не отчуждалась;
3. Симбиотически фиксированный азот под однолетними и многолетними травами – викоовсяной смесью и клевером луговым.

## 3. Баланс азота в зернотравяном севообороте

Фактор В – системы удобрения, № варианта	Фактор А – известкование	Вынос, кг/га	Возмещение выноса, %			Общее поступление	Баланс
			с удобрениями	с соломой	за счёт азот-фиксации		
1	б/и	457,2	0	26	27	238,8	-218,4
	с/и	502,5	0	23	24	239,9	-262,6
	+/-	45,3	0	-3	-3	1,1	-44,2
2	б/и	558,4	27	25	25	429,1	-129,3
	с/и	629,5	24	23	24	446,1	-183,4
	+/-	71,1	-3	-2	-1	17,0	-54,1
3	б/и	599,4	25	26	23	443,7	-155,7
	с/и	696,0	22	23	23	471,7	-224,3
	+/-	96,6	-3	-3	0	28,0	-68,6
4	б/и	630,1	24	24	23	446,6	-183,5
	с/и	687,9	22	21	24	461,1	-226,8
	+/-	57,8	-2	-3	1	14,5	-43,3
5	б/и	753,8	40	23	28	688,0	-65,8
	с/и	835,0	36	20	26	687,6	-147,4
	+/-	81,2	-4	-3	-2	-0,4	-81,6

Далее определяли дополнительное количество азота, мобилизованного за счёт известкования. Эти величины варьировали от 44 кг/га (разностный метод) на контроле до 43-68 кг/га при одинарных дозах удобрения и 82 кг/га N – при двойных.

Для установления эмиссии N<sub>2</sub>O, в зависимости от доз минеральных и органических удобрений (с учётом содержащегося в них азота), использовали модель Щербака и др. [22].

Эта модель, по мнению В.Н. Кудярова (2020) [6], является наиболее гибкой, так как учитывает дозы вносимого азота, а отсюда и более объективной, чем стандарт IPCC, который построен на прямолинейном отношении эмиссия N<sub>2</sub>O : доза N. По данным того же автора, коэффициент IPCC одинаков для всех источников азота, будь то азот самой почвы, азот растительных остатков или различных азотсодержащих удобрений.

Согласно расчётам, соотношение азота, поступающего с органическими и минеральными удобрениями, составляло 1:1, причём действие органических удобрений продолжалось даже на 5-й год после внесения. При этом внесенный азот органических соединений должен пройти стадию минерализации, а затем уже подвергнуться нитрификации и денитрификации. В данном случае допускаем, что величина ЭФ в почве при таком соотношении внесенного минерального и органического азота будет зависеть в большей степени от суммарного количества азота. Поэтому для расчета ЭФ с определенной долей условности можно использовать модель Щербака и др. [22] для расчёта суммарного ЭФ при совместном внесении органических и минеральных удобрений (табл. 4).

**4. Расчетные данные эмиссии N<sub>2</sub>O в зерноотрапном севообороте (за полную ротацию, 5 лет)**

Фактор В – системы удобрения, № варианта	Фактор А – известкование	Суммарная эмиссия N-N <sub>2</sub> O, кг/га за ротацию севооборота (5 лет)	Эмиссия N-N <sub>2</sub> O, кг/га/год	ЭФN <sub>2</sub> O
1	б/и	2,616	0,523	-
	с/и	2,633	0,527	-
	+/-	0,007	0,001	-
2	б/и	6,228	1,246	0,722
	с/и	6,617	1,323	0,797
	+/-	0,116	0,023	0,074
3	б/и	6,561	1,312	0,789
	с/и	7,222	1,444	0,918
	+/-	0,196	0,039	0,129
4	б/и	6,628	1,326	0,802
	с/и	6,968	1,394	0,867
	+/-	0,098	0,020	0,065
5	б/и	13,317	2,663	2,140
	с/и	13,304	2,661	2,134
	+/-	-0,003	-0,001	-0,006

Дозы азота, которые вносили в среднем за 5 лет составляли 30-60 кг/га. Расчет эмиссии N-N<sub>2</sub>O по модели Щербака и др. [22] дает результат 0,523–2,663 кг/га. Дополнительная эмиссия N-N<sub>2</sub>O за счёт известкования составила 0,001 (контроль) – 0,039 (при ежегодном внесении N<sub>30</sub>P<sub>24</sub>K<sub>45</sub>) кг/га/год. Эмиссионный фактор при округлении равен 0,07-0,08 при внесении навоза КРС (0,7-0,8%), минеральных удобрений – 0,08-0,09 (0,8-0,9%).

Совместное применение органических и минеральных удобрений в половинных дозах несколько уменьшило эмиссионные потери при известковании, которые колебались в пределах 0,08-0,09 (0,8-0,9%) и было сопоставимо с минеральной системой удобрения. При этом следует отметить, что продуктивность полевого севооборота при органоминеральной системе удобрения была на 10% выше – 45-50 ц з.е/га.

Применение полных доз навоза и NPK увеличило непроизводительные потери азота в 2,5 раза, а величину ЭФ до 0,21 (2,1% N-N<sub>2</sub>O), при том, что урожайность по сравнению с минеральной системой возросла только в 1,2 раза и составила 51-57 ц з.е/га.

**Заключение.** Таким образом, с учётом накопления углерода в товарной части продукции, депонирование диоксида углерода при минеральной системе увеличивается при известковании на 2,3 т CO<sub>2</sub>/га/год, достигая 2,9 т. Смешанная органоминеральная система обеспечивает дополнительную секвестрацию CO<sub>2</sub> до 5,3-6,6 т CO<sub>2</sub>/га/год. Внесение полных доз на известкованном фоне практически удваивает депонирование диоксида углерода за счёт накопления его как в органическом веществе почвы (30% общей секвестрации), так и в составе товарной части урожая.

Данные отчётливо свидетельствуют, что научно обоснованные системы удобрения в зерноотрапных севооборотах, при которых сочетается внесение навоза с применением минеральных удобрений в дозе 30 кг N/га в год (без учёта поступления биологического азота) и 60 кг N/га (с учётом биологического азота), позволяют получать урожайность на уровне 50 ц з.е/га, что в 3 раза выше, чем в среднем по Нечернозёмной зоне и в 1,5-2,0 раза – по сравнению с передовыми сельхозпредприятиями. При этом в среднем за 5-летний период ЭФ N<sub>2</sub>O был 0,80-0,87 и значительно более низким, чем тот, который использовали для расчетов кадастра парнико-

вых газов по методике МГЭИК. В документе IPCC от 2019 г. допускается дифференциация стандартных величин ЭФ в зависимости от климатических условий: умеренного и бореального поясов (при избыточном увлажнении), за стандарт принимается ЭФ = 1,6% от внесенного в почву количества N минеральных удобрений. Для других источников азота (пожнивные остатки, почвенный органический азот) принимается ЭФ = 0,6% [6, 16].

В целом, при оценке ЭФ можно выявить следующие закономерности:

1. Эмиссия N-N<sub>2</sub>O из почвы в результате денитрификации в неудобренных вариантах составляет 0,52-0,53 кг/га/год;
2. Наименьший эмиссионный фактор (ЭФ=0,07-0,08) оказался при внесении органических удобрений;
3. Применение минеральных удобрений и совместное внесение их с органическими в половинных по действующему веществу дозах, увеличивает ЭФ на 0,1-0,09%.

4. Применение полных доз навоза КРС и NPK приводит к экспоненциальному росту величины ЭФ до 2,13-2,14%;

5. Известкование, увеличивая урожайность на 10%, повышает величину ЭФ на 1-10% в зависимости от системы удобрения;

6. Для достоверного расчёта величины ЭФ необходимо рассчитывать её за полную ротацию севооборота, а не за 1 год. При этом необходимо учитывать не только поступление азота с минеральными азотными удобрениями, но и дополнительный приход азота с соломой (в случае её запашки на поле), биологическим азотом многолетних трав, а также поступление азота с органическими удобрениями.

*Литература*

1. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // Почвоведение. – 2022. – № 8. – С. 1046-1055. DOI: 10.31857/S0032180X22080160.
2. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для земледелия России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021. – Вып. 107. – С. 5-32. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-323.
3. Козут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2020. – Вып. 102. – С. 103–124.
4. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумификация и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3–13. DOI: 10.31857/S0002188121050070
5. Кудеяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. – 2015. – №9. – С. 1049–1060. DOI:10.7868/S0032180X15090087.
6. Кудеяров В.Н. Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) // Почвоведение. – 2020. – № 10. – С. 1192-1205. DOI: 10.31857/S0032180X20100X.
7. Налиухин А.Н., Власова О.А., Силуянова О.В. Эффективность биологической модификации гранул органоминеральных удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур // Роль молодых учёных в решении актуальных задач АПК: сборник науч. трудов межд. научно-практ. конф. СПбГАУ. – СПб., 2016. – С. 67-70.
8. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Т.В., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и секвестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. – 2008. – № 7. – С. 819-832.
9. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. – М.: ГЕОС, 2015. – 233 с.
10. Смирнов П.М. Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с <sup>15</sup>N). – М.: ТСХА, 1982. – 74 с.
11. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: ре-

зультаты длительных полевых опытов географической сети России // Почвоведение. – 2020. – № 12. – С. 1521-1536. DOI: 10.31857/S0032180X20120138.

12. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изменение климата и углеродная нейтральность: современные вызовы перед аграрной наукой // Плодородие. – 2021. – № 5. – С. 3-7. DOI: 10.25680/S19948603.2021.122.01

13. Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах Геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами/Плодородие.– 2021. – №6.– С.38 – 41. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.10

14. Тулина А.С., Налиухин А.Н. Минерализация органического вещества и секвестрация углерода в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве полевого опыта с удобрениями // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Агрохимия в XXI веке». – М.: МГУ, 2018. – С. 167-172.

15. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.

16. IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y.,

Shermanau P. and Federici S. (eds). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>.

17. Janzen H.H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? // Soil Biology and Biochem. 2006. V. 38. P. 419-424.

18. Körschens 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 im UFZ Leipzig". 2018. 12 p.

19. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food Security // Science. 2004. Vol. 304. P. 1623-1627.

20. Paul E.A., Kravchenko A., Grandy A.S., Morris S. Soil organic matter dynamics: Controls and management for sustainable ecosystem functioning / S.K. Hamilton, J.E. Doll, G.P. Robertson (Eds) // The Ecology of Agricultural Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. New York: Oxford University Press, 2015. P. 104-134.

21. Paustian K., Six J., Elliott E.T., Hunt H.W. Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 147-163.

22. Shcherbak I., Millar N., Robertson G.P. Global metaanalysis of nonlinear response of soil nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions to fertilizer nitrogen // PNAS. 2014. V. 111. P. 9199–9204.

23. Smith P., Smith J.U., Powlson D.S. (Ed.). Global change and terrestrial ecosystems. Soil Organic Matter Network (SOMNET): 1996 model and experimental metadata. Report no. 7, GCTE task 3.3.1. Wallingford, 1996.

#### CARBON SEQUESTERING EVALUATION OF VARIOUS FERTILIZER SYSTEMS AND DETERMINATION OF N<sub>2</sub>O EMISSIONS IN LONG-TERM FIELD EXPERIENCE

V.G. Sychev<sup>1</sup>, A.N. Naliukhin<sup>2\*</sup>, A.V. Eregin<sup>3</sup>, N.R. Sharapova<sup>4</sup>, D.V. Demidov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Pryanishnikov ul. 31a, 127434 Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Pryanishnikova ul. 6, 127550 Moscow, Russia

<sup>3</sup>State center of agrochemical service "Vologodskiy", Studencheskaya ul. 11, 160555 Molochnoe, Vologda, Russia

<sup>4</sup>PhosAgro Group, SE JSC Apatii, Leninsky prospect, 55/1, building I, 119333 Moscow, Russia

\*E-mail: naliukhin@yandex.ru

*In a stationary field experiment on soddy-podzolic light loamy soil in the crop rotation link: vetch-oat mixture – winter wheat – barley – clover – oats, the effect of fertilizer systems (organic, mineral, organo-mineral) and liming on carbon sequestration and nitrous oxide emission was studied. When all balance items are taken into account, the deposition of carbon dioxide in the mineral system against the background of liming increases by 2.3 t CO<sub>2</sub>/ha/year, reaching 2.9 t. up to 5.3-6.6 t CO<sub>2</sub>/ha/year. The introduction of full doses on a limed background practically doubles the deposition of carbon dioxide both due to its accumulation in the organic matter of the soil (30% of the total sequestration) and in the composition of the marketable part of the crop. Additional emission of N-N<sub>2</sub>O due to liming was 0.001 (control) – 0.039 (when applying N30P24K45) kg/ha/year. In this case, the emission factor was 0.07-0.08, and when cattle manure and mineral fertilizers were applied, it was 0.08-0.09. The combined use of organic and mineral fertilizers in half doses somewhat reduced the emission losses of nitrous oxide during liming, which ranged from 0.08 to 0.09 and were comparable to the mineral fertilizer system. It should be noted that the productivity of the field crop rotation with the organo-mineral fertilizer system was 10% higher – 45-50 cw/ha.*

*Key words: sequestration, emissions, carbon dioxide, nitrous oxide, soil, fertilizer systems, long field experience.*

УДК 631.816.12:631.417.8

DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.20

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЫШЕНИИ ТОЛЕРАНТНОСТИ КУКУРУЗЫ К НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМУ СТРЕССУ

О.А. Шаповал, д.с.-х.н., М.Т. Мухина, к.б.н., Р.А. Боровик, к.б.н., И.П. Можарова, к.с.-х.н.,  
ВНИИ агрохимии

127434, Москва, ул. Прянишникова, 31А, Россия, [elgen@mail.ru](mailto:elgen@mail.ru)

*В условиях вегетационного опыта в фитотроне проведено изучение влияния листовой обработки кукурузы хелатами редкоземельных элементов на рост, содержание питательных элементов и физиолого-биохимических параметров в условиях краткосрочного низкотемпературного стресса. Растения кукурузы выращивались в условиях контролируемого программируемого температурного режима. Дважды проводилась обработка растворами ЭДТА La, Y, Er в двух концентрациях. После воздействия на растения пониженными температурами были изучены их биометрические параметры, физиолого-биохимические показатели-маркеры стресса, элементный состав надземной биомассы, интенсивность протекания фотосинтеза. Установлено, что обработки растений растворами хелатов РЗЭ имеют разнонаправленное влияние на растения, повышая их устойчивость к пониженным температурам. Характер и степень влияния зависят от применяемого редкоземельного элемента и его концентрации в рабочем растворе.*

*Ключевые слова: кукуруза, некорневая подкормка, лантаноиды, хелатная форма, низкотемпературный стресс.*