

## **ИЗУЧЕНИЕ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ ГЕОСЕТИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ПОВЫШЕНИЯ ДЕПОНИРОВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА АГРОЦЕНОЗАМИ**

**В.Г. Сычёв, ак. РАН, А.Н. Налиухин, д. с.-х. н.,  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии  
имени Д.Н. Прянишникова»  
127434, ул. Прянишникова, 31а, Москва, Россия, E-mail: naliuhin@yandex.ru**

Основные запасы углерода сосредоточены в органическом веществе почвы – гумусе. Поэтому баланс почвенного органического углерода ( $C_{орг}$ ) в земледелии может служить одним из главных критериев оценки эмиссии и депонирования  $CO_2$  агроценозами. Ввиду природной устойчивости  $C_{орг}$  к трансформации, оценка медленно изменяющегося во времени содержания  $C_{орг}$  может быть проведена только в длительных полевых опытах. Показано, что в опытах Географической сети можно оценить потоки углерода и азота в зависимости от систем удобрения на основных типах почв в различных природно-сельскохозяйственных зонах страны. Выявлено, что органоминеральные системы удобрения в 50% длительных опытов способствуют увеличению содержания  $C_{орг}$  в сравнении с исходным уровнем. В вариантах без применения удобрений отмечено существенное снижение содержания и запасов гумуса, что свидетельствует о том, что они являются абсолютным источником  $C-CO_2$ . В лугово-пастбищных агроценозах происходит накопление органического вещества даже без внесения удобрений за счёт большого поступления легкоразлагаемого органического вещества в составе поукосно-корневых остатков. В то же время применение удобрений увеличило запасы  $C_{орг}$  более чем в 2,5 раза по сравнению с контролем. Почвы, азотные и органические удобрения служат основным источником поступления закиси азота в атмосферу. Научно обоснованное сочетание минерального и биологического азота, применение медленнодействующих азотных удобрений, а также ингибиторов нитрификации способствуют существенному снижению эмиссии  $N_2O$ . На сегодняшний день требуется уточнение потерь количества и форм азота с помощью опытов с применением стабильного изотопа азота  $^{15}N$  и современного изотопного масс-спектрометрического оборудования. Таким образом, длительные полевые опыты с удобрениями Геосети являются уникальными мониторинговыми экспериментами, в которых можно проводить исследования по достижению углеродной нейтральности и снижению эмиссии закиси азота, а также других парниковых газов.

**Ключевые слова:** парниковые газы, длительные полевые опыты, углеродная нейтральность, минеральный и биологический азот.

Для цитирования: Сычёв 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.

Вопросы взаимосвязи роста концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере с увеличением глобальной температуры были рассмотрены в предыдущей публикации [12]. В настоящей работе показывается возможность использования длительных полевых опытов с удобрениями Географической сети для изучения вопросов сокращения выбросов парниковых газов ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  и др.) и увеличения депонирования диоксида углерода агроценозами.

Наибольшее влияние на потоки диоксида углерода и его концентрацию в атмосфере оказывают растительность и органическое вещество почв, в которых сосредоточены основные запасы углерода. При этом доля почвенного органического углерода ( $C_{орг}$ ) значительно больше наземной биомассы и составляет в слое 0-100 см 1500 ГтС. Так, по данным В.Н. Кудеярова [5], в почвенном покрове России сосредоточено около 20% мировых запасов  $C_{орг}$ , при этом площадь России составляет лишь 1/8,5 часть суши Земли. По данным этого автора, углерод органического вещества почв превышает

биомассу растительности в мире в 3 раза, а в России, занимающей большую часть площади Северной Евразии – в 7,5 раз [5, 6]. Именно поэтому почва является главным консерватором углерода атмосферы. Наземная фитомасса (урожай) ввиду быстрой переработки становится источником  $CO_2$  после 1-2-годичного использования и не может рассматриваться в виде устойчивого пула углерода.

Баланс гумуса (почвенного органического углерода) и азота в земледелии – наиважнейший критерий эффективности ведения земледелия с учётом стремления к углеродной («парниковой») нейтральности. Вполне естественно учёт потоков ПГ на землях сельскохозяйственного назначения не может быть произведен в краткосрочных экспериментах, что связано с природной устойчивостью гумуса почвы к воздействию антропогенных факторов, длительностью его формирования и сложностью строения [16]. Именно поэтому конкретные данные об изменении гумусового состояния почв и оценке их углеродсеквестрирующей способности можно получить только

в длительных полевых опытах с удобрениями, которые координирует Географическая сеть при Всероссийском НИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова.

Возможности управлением секвестрацией С можно проиллюстрировать на примере, изложенном в работах [16, 18]. Предполагая, что валовая первичная продуктивность составляет 10 тС/га в год, можно ожидать, что 5 тС/га войдет в состав сухого вещества, а 5 тС/га будет возвращено в атмосферу в результате дыхания растений. Почвенные микроорганизмы, мезо- и макрофауна способствуют гумификации отмерших пожнивных и поукосно-корневых остатков растений, приводящей к секвестрации углерода и его длительному связыванию в составе  $S_{орг}$ . Так, если бы 10% углерода, фиксированного растениями, было преобразовано в  $S_{орг}$ , тогда 0,5 тС/га в год могут включиться в состав гумуса. Приведённая величина соответствует усреднённой коэффициенту секвестрации С для пахотных почв [16, 18]. В то же время, если 20% углерода, фиксируемого растениями, была бы переведена в  $S_{орг}$ , можно депонировать в почве до 1,0 тС/га в год.

В ранее опубликованной работе [13], приведены три сценария изменения содержания и запасов почвенного органического вещества: снижения, сохранения и увеличения  $S_{орг}$  по сравнению с исходным уровнем.

В большинстве полевых и зернопропашных севооборотов с насыщенностью органическими удобрениями не более 10 т/га наблюдается уменьшение содержания  $S_{орг}$  в сравнении с исходным уровнем. Недостаточное восполнение органического вещества почв, которое не компенсирует затраты углерода на микробное дыхание приводит к тому, что чистая экосистемная продукция очень мала и практически не компенсирует расход углерода биомной продукцией на минерализацию [13]. Такие технологии возделывания сельскохозяйственных культур являются источником  $CO_2$ . Запахивание соломы, поукосно- и пожнивных-корневых остатков растений, сидерация позволяют сделать возделывание культур в интенсивных севооборотах углерод-нейтральным, при поддержании квазистационарного содержания гумуса в почве.

Обратная тенденция – увеличение содержания  $S_{орг}$ , отмечается на лугово-пастбищных угодьях. Так, в длительном опыте ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, в пастбищной агроэкосистеме спустя 66 лет, во всех вариантах опыта отмечено увеличение содержания почвенного органического вещества, ежегодный прирост которого составлял от 0,14 до 0,3 т/га [8, 13].

Без применения удобрений во всех длительных стационарных опытах наблюдалось снижение исходных запасов гумуса (за исключением пастбищного ценоза). Внесение минеральных удобрений способствовало приросту почвенного органического вещества только в 14% опытов, навоза – в 25, их сочетание в органоминеральных системах – в 50% длительных экспериментов [13].

Таким образом, уровень накопления  $S_{орг}$  в почвах (или, по крайней мере, достижение агроценозами устойчивого состояния) во многом определяется видом севооборота, научно обоснованными системами удобрения и интенсивностью обработки почвы. При распашке луговых ценозов – сенокосов и пастбищ, в результате интенсивной минерализации органического

вещества почв, накопленный почвенный органический углерод через некоторое время опять оказывается в атмосфере, что подтверждается работами [5]. При забрасывании сельскохозяйственных земель происходит увеличение секвестрации углерода в почве, а в дальнейшем – идёт его накопление в древесных растениях. В то же время, по мере достижения экосистемой климатического состояния, сток углерода прекращается, а в дальнейшем она становится источником  $CO_2$ . В то же время парадигма «углерод нейтральности» старовозрастных лесов во многих случаях не находит подтверждения. Исследования показывают продолжающееся накопление углерода в лесах и на поздних стадиях сукцессий [7].

Поэтому особенное внимание нужно уделять вопросам сокращения эмиссии диоксида углерода, метана, закиси азота и других климатически активных газов за счёт адаптации технологий возделывания сельскохозяйственных культур к изменению климата [20, 21]. Можно полагать, что рост концентрации диоксида углерода в Северных широтах приведёт к интенсификации фотосинтеза и росту продуктивности сельскохозяйственных культур, а значит – к дополнительному депонированию углерода в почвах. Рост продуктивности при этом возможен только при оптимизации минерального питания растений путём применения удобрений, поскольку на территории России складывается отрицательный баланс по основным биофильным элементам. Согласно расчётам учёных ВНИИ агрохимии [14], за 2011-2018 г. баланс по азоту составил – 28 кг/га, фосфору – 7, калию – 37 кг/га. Очевидно, что решение проблемы углеродной нейтральности и роста продуктивности сельскохозяйственных культур возможно только при систематическом повышении плодородия почв путем комплексного агрохимического окультуривания полей. Перевод почв из категории низкоокультуренных в повышено-окультуренные по агрохимическим показателям позволяет повысить урожайность озимой пшеницы без применения удобрений на дерново-подзолистых и серых лесных почвах в 4-5 раз, на черноземах выщелоченных – в 3,8, на черноземах карбонатных – в 3, на каштановых почвах – в 4,2 раза [14]. Поэтому без увеличения объёмов применения минеральных и органических удобрений, известкования кислых почв и гипсования засоленных, невозможно говорить о снижении выбросов  $CO_2$  агроценозами. Об этом свидетельствуют данные длительных полевых опытов с удобрениями, результаты которых, очевидно, показывают невозможность дополнительного депонирования углерода почвами России без научно разработанных систем удобрения. При этом «парниковый» след от азотных удобрений можно снизить путем оптимизации фосфатного и калийного режима почв, за счёт чего значительно увеличиваются урожайность сельскохозяйственных культур и доля корневых остатков в почве. Особенное внимание нужно уделить удобрению кормовых угодий – сенокосов и пастбищ в Нечерноземной зоне России. Приведённые исследования свидетельствуют о повышении секвестрации углерода при внесении удобрений в пастбищных ценозах. В связи с тем, что начиная с 90-х годов XX в. применение удобрений особенно резко сократилось в Нечерноземной зоне, доля кислых почв возросла с 52 до 60%, с низкой обеспеченностью подвижным калием – с 22 до 27% [14].

Поскольку значительная доля в структуре посевных площадей приходится на многолетние бобовые травы, представляется уникальная возможность обеспечить животноводство растительным белком без применения под них азотных удобрений. Усиление симбиотической азотфиксации бобовыми культурами возможно только при оптимизации реакции почвенной среды, средней и повышенной обеспеченности фосфором и калием, а также микроэлементами, в первую очередь бором, молибденом и кобальтом [15].

Исследования показали, что за счёт оптимизации питания козлятника восточного, доля фиксированного азота увеличивается с 60 до 70%, а обогащение почвы биологическим азотом за 3 года возделывания составляет 170 кг/га [4]. При возделывании клевера лугового на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой почве на фоне известкования, совместное внесение навоза и минеральных удобрений способствовало дополнительному накоплению симбиотически фиксированного азота. Расчёты показали, что при распахке клеверного пласта в почву может дополнительно поступить 100-140 кг/га биологического азота, что позволит возделывать последующую зерновую культуру без внесения азотных удобрений [9].

Таким образом, возделывание бобовых трав при оптимальных агрохимических показателях почвы, позволяет правильно сочетать минеральный и биологический азот [15], значительно уменьшить риски дополнительной эмиссии закиси азота вследствие денитрификации, а также выделения  $\text{CO}_2$  при использовании в качестве азотных удобрений карбамида.

С агрохимической и экологической точек зрения особенно важно снизить газообразные потери азота при внесении азотных удобрений. Учёными ВНИИ агрохимии проведены серьёзные фундаментальные и прикладные исследования по изучению трансформации азота удобрений в системе почва-растение-удобрения-атмосфера с использованием стабильного изотопа  $^{15}\text{N}$  [1-3]. Установлено, что сельскохозяйственные культуры используют 35-51% азота минеральных удобрений и 14-22% азота органических удобрений, газообразные потери азота составляют 22-33 и 17-32% соответственно [3]. Локализация применения удобрений повышает использование азота в 1,3-1,5 раза и является альтернативой применению ингибиторов нитрификации. Выявлена генетическая детерминированность в интенсивности поглощения и использовании азота растениями. Установлено, что водная эрозия и подкисление почв повышают газообразные потери азота удобрения в 1,3-1,8 раза и в 1,4-1,5 раза почвенного азота [3]. Для снижения потерь азота применяют ингибиторы нитрификации, используют медленнодействующие удобрения, гранулы которых покрыты биоразлагаемыми полимерами [1].

По данным расчётов, представленных в «Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов...», эмиссия  $\text{N}_2\text{O}$  в сельскохозяйственном производстве в 2017 г. составляла 32,6 тыс. т, из которых 17% приходилось на прямые выбросы от внесения минеральных азотных удобрений, 19,1 – органических удобрений, 34% – из торфяных и торфяно-болотных почв [10]. Оценка выбросов закиси азота от внесённых азотных удобрений дана с учётом уточнённых национальных коэффициентов [19], которые установлены на основе

анализа данных литературы по определению газообразных потерь азота в виде  $\text{N}_2\text{O}$  в полевых и лабораторных опытах на разных типах почв [19]. Несомненно, таких данных в настоящее время недостаточно. Несмотря на обширный экспериментальный материал, такие исследования необходимо проводить при оценке вклада азотных удобрений в суммарные выбросы парниковых газов, что позволит более точно оценить эмиссионный след от удобрений. Необходимо определение газообразных потерь из разных форм азотных удобрений с учётом агрохимических свойств почв, их гранулометрического состава, вида возделываемых сельскохозяйственных культур. Для этого используют современные масс-спектрометрические методы.

Следует отметить, что в последнее время к России предъявляют большие претензии к якобы слабым темпам перехода экономики на «зелёную энергетику». Однако на сегодняшний день всё обстоит по-другому. По мнению члена Президиума ВЭО России, академика РАН Б.Н. Порфирьева [11] «В контексте сказанного выше широко обсуждаемая на международной арене и внутри страны проблема огромного отставания России от стран-лидеров климатической политики видится уже в ином свете. Не говоря уже о достигнутом к настоящему времени уровне снижения выбросов парниковых газов, который составляет 51% от уровня базового (1990) года и является наилучшим достижением среди ведущих экономик мира; о роли российских лесов как одного из мировых эколого-климатических доноров; о более чем 35%-ной доле низкоуглеродных источников в структуре производства электроэнергии (а с учётом более экологичного, по сравнению с углем, природного газа – эта доля возрастает до 87%), речь должна идти в терминах концепции и политики устойчивого развития, поскольку обсуждается стратегия развития. Только такой комплексный подход увязывает «зеленую» повестку дня с решением ключевых социально-экономических проблем в рамках интегральной стратегии развития» [11].

Таким образом, все усилия по выходу экономики страны на «углеродную нейтральность» должны увязываться с возрастанием роли науки, её вкладом в разработку мер адаптации народного хозяйства к изменению климата путём экономически и экологически обоснованного сокращения выбросов парниковых газов с одномоментным увеличением депонирования.

#### Литература

1. Верниченко И.В. Ассимиляция аммонийного и нитратного азота и эндогенное образование нитратов (исследования с  $^{15}\text{N}$ ). – М.: РГАУ-МСХА, 2017. – 248 с.
2. Гамзиков Г.П. Состояние и перспективы исследований в длительных стационарных опытах с удобрениями в Сибири // Плодородие. – 2016. – №5. – С. 6-9.
3. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Развитие агрохимических исследований с изотопом  $^{15}\text{N}$  в России // Плодородие. – 2021. – № 3 (120). – С. 56-62. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.10.
4. Капустин Н.И., Налухин А.Н., Ладухин А.Г., Соболева Н.М., Ханова Н.А. Влияние микроудобрения Аквамикс-т и ризоторфина на продуктивность козлятника восточного // Агрохимический вестник. – 2007. – № 3. – С. 14-16.
5. Кудяров 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. Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В. и др. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. – М.: Наука, 2007. – 315 с.

7. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В. и др. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе восстановительных сукцессий // Почвоведение. – 2019. – № 7. – С. 803-816. DOI: 10.1134/S0032180X19070086.

8. Кулаков В.А., Алтухин Д.А. Эффективность длительного (69 лет) применения минеральных и органических удобрений на суходольных пастбищах Нечерноземной зоны // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями. Мат-лы Всерос. сов. – М.: ВНИИА, 2016. – С. 148–153.

9. Налиухин А.Н., Рыжакова А.А. Азотфиксация клевера лугового при применении удобрений и известковании // Агрохимия. – 2021. – № 11. – С. 65-71. DOI: 10.31857/S0002188121110090.

10. НДК. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2017 г. Ч. 1. – М., 2019. – 471 с.

11. Порфирьев Б.Н. О «зеленом» векторе стратегии социально-экономического развития России // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2021. – Т. 227. – № 1. – С. 128-136.

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

13. 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:

результаты длительных полевых оптов Географической сети России // Почвоведение. – 2020. – № 12. – С. 1521-1536. DOI: 10.31857/S0032180X20120138.

14. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 3-13. DOI: 10.31857/S0002188120060125.

15. Треначев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. – М.: Агроконсалт, 1999. – 532 с.

16. Шевцова Л.К., Хайдуков К.П., Алиев А.М. Влияние длительного применения удобрений и химических средств защиты растений на содержание активных компонентов и качественный состав гумуса дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // Агрохимия. – 2013. – № 11. – С.3-9.

17. Franzluebbers A.J. Soil organic carbon in managed pastures of the southeastern United States of America // Integrated Crop Management, 2010. Vol. 11. P. 163-175.

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

19. Romanovskaya A.A., Gytarsky M.L., Karaban' R.T., Konyushkov D.E., Nazarov I.M. (2002). Ni-trous oxide emission from agricultural lands in Russia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Vol.7. No. 1. P. 31-43.

20. Schlesinger W.H., Andrews J.A. Soil respiration and global carbon cycle // Biogeochemistry. 2000. Vol. 48. P. 7-20.

21. WMO Greenhouse Gas Bulletin. 2021. No.17. Geneva, WMO, P. 3.

# STUDY OF FLOWS OF CARBON AND NITROGEN IN LONG-TERM FIELD EXPERIMENTS OF THE GEOSOT WITH THE PURPOSE OF REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND INCREASING THE DEPOSITION OF CARBON DIOXIDE BY AGROCENOSSES

V.G. Sychev, A.N. Naliukhin  
Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
Pryanishnikov ul. 31a, 127434 Moscow, Russia, E-mail: naliukhin@yandex.ru

*The main reserves of carbon are in the composition of soil organic matter. That is why the soil organic carbon (SOC) balance in agriculture can serve as one of the main criteria for assessing the emission and deposition of CO<sub>2</sub> by agrocenoses. In view of the natural resistance of soil organic matter to transformation, the assessment of the slowly varying content of SOC over time can be carried out only in long-term field experiments. It is shown that in the experiments of the Geographic Network, it is possible to estimate the fluxes of carbon and nitrogen depending on fertilization systems on the main types of soils in various natural-agricultural zones of the country. It was revealed that organo-mineral fertilization systems in 50% of long-term experiments contribute to an increase in the content of SOC in comparison with the initial level. In variants without the use of fertilizers, a significant decrease in the content and reserves of humus is noted, which indicates that they are an absolute source of C-CO<sub>2</sub>. In meadow-pasture agrocenoses, the accumulation of organic matter occurs even without fertilization due to the large influx of readily decomposable organic matter in the composition of the cut-root residues. At the same time, the use of fertilizers increased SOC reserves by more than 2.5 times compared to the control. Soils, nitrogen, and organic fertilizers are the main source of nitrous oxide into the atmosphere. Scientifically substantiated combinations of mineral and biological nitrogen, the use of slow-acting nitrogen fertilizers, as well as nitrification inhibitors contribute to a significant reduction in N<sub>2</sub>O emissions. At present, it is necessary to clarify the losses of the amount and forms of nitrogen using experiments using the stable nitrogen isotope <sup>15</sup>N and modern isotope mass spectrometric equipment. Thus, long-term field experiments with Geographic Network fertilizers are unique monitoring experiments in which studies can be carried out to achieve carbon neutrality and reduce emissions of nitrous oxide, as well as other greenhouse gases.*

*Key words: greenhouse gases, long-term field experiments, carbon neutrality, mineral and biological nitrogen.*

УДК 631.17:631.4

DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.11

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПРИБАВКИ УРОЖАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ОТ ДОЗ АЗОТА И ЕГО ОКУПАЕМОСТЬ

### Сообщение 2

О.В. Волюнкина, к.с.-х.н.  
ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук»  
641325, г. Екатеринбург, с. Садовое, Кетовский р-н, Курганская обл., ул. Ленина 9, Россия,  
E-mail: kniish@ketovo.zaoral.ru

*Показаны результаты 40-летнего стационарного эксперимента, проведённого на Шадринском опытном поле Курганского НИИСХ. В зернопаровом севообороте пар-3 пшеницы испытано действие одного фосфорного удобрения и трёх уровней насыщения азотом пашни N<sub>40-80-120</sub> на фоне P<sub>30</sub>. Действие P<sub>30</sub> на урожайность 1-й пшеницы было невысоким (+1,6 ц/га), так как содержание подвижного фосфора в почве участка выше среднего – 74 мг/кг. Закономерность слабого влияния фосфорного удобрения сохранилась в остальных полях севооборота и на бес-*