

УДК 9.929+57.557+50.502/504

СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ: ФАКТЫ И ПРОБЛЕМЫ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

© 2022 г. В. Н. Кудеяров^{1, 2, *}

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ФИЦ “Пушкинский научный центр биологических исследований РАН”, Пушкино, Московская обл., Россия

²Институт фитопатологии РАН, пос. Большие Вязёмы, Московская обл., Россия

*e-mail: vnikolaevich2001@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

Представленная работа посвящена оценке секвестрации углерода в зависимости от приемов обогащения почвы органическими материалами. Уровень дополнительной секвестрации в почвах необходимо определять при учете затрат чистой первичной (NPP) и экосистемной (NEP) продукции фотосинтеза на величину нового стока устойчивого к минерализации органического углерода – чистой биомассной продукции (NBP). Сток углерода в легко минерализуемые формы NEP определяет краткосрочную секвестрацию углерода. Средне- и долговременная секвестрация представляет собой накопление углерода в почве в NBP-пуле. Трансформация органического углерода в системе NPP–NEP–NBP-пулов является длительным процессом гумификации и сопровождается потерей углерода в атмосферу в виде CO₂.

Ключевые слова: почва, секвестрация, круговорот и баланс углерода, органические удобрения, дыхание почвы

DOI: 10.31857/S0042132422060047

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире ярко обозначились проблемы, без срочного решения которых невозможно дальнейшее развитие человеческого общества. С одной стороны, ограниченность земельных ресурсов, несмотря на выдающиеся успехи мирового земледелия, лимитирует производство продовольствия для населения Земли. С другой – хозяйственная деятельность человека становится причиной нарушения не только благополучного состояния среды обитания человека, но и фактором изменения климата на Земле. Считают, что главной причиной изменения климата является нарастание парникового эффекта атмосферы Земли за счет растущих эмиссий парниковых газов (CO₂, CH₄ и N₂O). Человечество стоит перед лицом глобальной проблемы, как при продолжающемся росте мирового производства и энергопотребления снизить эмиссию парниковых газов. Производство сельскохозяйственной и промышленной продукции не откажется от традиционных видов энергии, хотя сокращение их потребления неизбежно. При этом для снижения парникового эффекта необходимы не только значительное сокращение выбросов парниковых газов в атмо-

сферу, но и новые технологии отъема из нее CO₂ (секвестрация).

Для разрешения проблемы секвестрации CO₂ взоры обращаются, прежде всего, на возможность увеличения абсорбции углекислоты почвенно-растительными экосистемами, поскольку почва является основным хранилищем углерода и ей принадлежит главная роль в секвестрации CO₂ атмосферы. Время пребывания углерода в гумусе почв может достигать 4000 лет и более. В то время как в древесной растительности углерод пребывает, в основном, немногим более 100 лет.

Отношение гетеротрофного дыхания почв к общим запасам в ней органического углерода (C_{орг}) – наиболее важный фактор в оценке уровня секвестрации углерода в почвах. Так, проанализированы (Tian H. et al., 2015) десять моделей, описывающих вековое изменение (1901–2010 гг.) соотношений изменения запасов почвенного органического вещества и R_h (soil heterotrophic respiration) – гетеротрофного дыхания почв. Все десять моделей показали, что установленные мировые запасы почвенного органического вещества находились в интервале от 425 до 2111 Гт С с медианой 1158 Гт С для 2010 г. Оцененные величины запасов углерода в почвах Земного шара имеют

большой разброс. Некоторые исследователи полагают, что запасы $C_{\text{орг}}$ в почвенной толще многолетней мерзлоты, занимающей около 18% от всего почвенного покрова Земли, составляют 1466 Гт (Tarnocai et al., 2009). По данным IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) на 2013 г. (IPCC, 2013), почвенный резервуар планеты в метровом горизонте содержит 1500 Гт $C_{\text{орг}}$. Эта величина принята в качестве официальной при расчетах глобального баланса углерода. В наземной растительности углерода в 3–4 раза меньше, чем в почвенной толще. В российских почвах (слой 0–100 см) находится около 300 Гт $C_{\text{орг}}$ (Орлов и др., 1996), что примерно в 6–7 раз больше, чем во всей наземной растительности страны.

Модели (Tian H. et al., 2015) показали и большой разброс величин гетеротрофного дыхания почв – от 35 до 69 Гт С/год с медианой 51 Гт С/год – в течение 2001–2010 гг., и то, что R_h является доминантным путем потерь углерода из пула почвенного $C_{\text{орг}}$ и определяющим фактором MRT (mean residence time) – среднего времени его пребывания в почве. Вариация MRT $C_{\text{орг}}$ почвы с учетом R_h была определена в диапазоне 10.8–39.3 года. Авторы также установили тесную зависимость между R_h и NPP (net primary production of photosynthesis) – первичной продукцией фотосинтеза: за 100-летний период среднее отношение этих величин (R_h/NPP) составило 92%.

Несмотря на рост концентрации CO_2 в атмосфере и выпадений азотосодержащих соединений, способствующих улучшению азотного питания растений, все модели согласованно показали, что изменение климата и характера землепользования оказывали отрицательное влияние на запасы $C_{\text{орг}}$ в почвах. Весь ансамбль моделей показал, что MRT почвенного органического углерода в пуле за прошлое столетие уменьшилось на 4.4 года.

Приведенные выше данные свидетельствуют, что современная ситуация в мире, очевидно, не способствует перелому тренда изменения накопления $C_{\text{орг}}$ в почвах, поскольку с потеплением климата усиливаются азото- и углеродо-минерализационные процессы в почвах, дефляция, обезлесивание и опустынивание, что приводит к потерям гумуса и повышению эмиссии парниковых газов.

Процессы превращения азот- и углеродсодержащих веществ в почвах неразрывно связаны между собой, но судьба конечных продуктов минерализации (CO_2 и минерального азота в виде аммония NH_4^+) различается: CO_2 в основном улетучивается в атмосферу, а NH_4^+ включается в процессы ассимиляции растениями и микроорганизмами.

Значительная часть азотосодержащего органического вещества подвергается гумификации. Для органического вещества подавляющего числа почв

отношение С : N довольно стабильно – находится в пределах 10.0–11.0 и мало зависит от основных физико-химических свойств почвы. Эти показатели действительны для гумусовых горизонтов почв (0–25, 0–40 см). В более нижних горизонтах величина С : N снижается за счет увеличения содержания минерального азота в его общем пуле (в основном NH_4^+ , фиксированного глинистыми трехслойными минералами) (Kowalenko, Cameron, 1978; Kudeyarov, 1981; Soon, 1998; Morford et al., 2016; Houlton et al., 2018).

На рис. 1 приведены данные величин С : N гумуса в различных типах почв европейской и азиатской частей РФ. Выборка данных была сделана из многотомного труда “Агрохимическая характеристика почв СССР”, изданного в 1964–1968 гг. в издательстве “Наука” под редакцией чл.-кор. АН СССР А.В. Соколова (Агрохимическая..., 1962, 1963, 1964а,б, 1966, 1968, 1972).

Отношение углерода к азоту в почвах является довольно устойчивым показателем для подавляющего числа почв, независимо от типа и климатических условий. Этот факт лишь подтверждает принципиально идентичные условия формирования природных гумусовых веществ (гуминовых и фульвокислот). Показано (Кононова, 1963; Александрова, 1980), что содержание азота в гуминовых и фульвокислотах мало различается между типами почв, но состав гумуса, в первую очередь отношение гуминовых кислот к фульвокислотам, зависит от типа почв и условий почвообразования. Устойчивость показателя С : N гумуса для различных почв свидетельствует о механизме стехиометрии в почвенном органическом веществе, что подтверждается синхронностью высвобождения CO_2 и NH_4^+ при минерализации гумусовых веществ почв. Отношение С : N в гумусе можно рассматривать как матрицу устойчивости органического вещества в почве.

Органические материалы, поступающие в почву, например растительные остатки, органические удобрения (навоз, компосты, сидераты), всегда имеют более широкое отношение С : N, чем почвенный гумус. При разложении в почве вновь поступившего органического материала активизируется дыхательный процесс и возрастает эмиссия CO_2 в атмосферу. Минеральные азотные соединения под воздействием микроорганизмов вступают в новый цикл взаимодействия с органическим углеродом, образуя соединения с С : N, свойственным данной почве. Насыщение почвы органическими материалами в целом ведет к повышению содержания органического вещества в почвах, но и его минерализация также ускоряется, а С : N в гумусе почвы приближается к уровню до внесения удобрений. Об этом свидетельствуют данные многолетних полевых опытов с применением орга-

нических и минеральных удобрений (Городний, 1960; Горшков, 1960; Любарская, 1960; Соболев, Чернецкий, 1960; Шевелев, 1960; Шевцова, 1988; Хлыстовский, 1992; Rothamsted research, 2006).

Специфика биогеохимического круговорота углерода такова, что поступающее в почву органическое вещество растительного и животного происхождения быстро подвергается атаке почвенной биоты и включается в новые минерализационно-иммобилизационные циклы, которые могут повторяться в почве до 8–9 раз за сезон (Yevdokimov, Vlagodatsky, 1993).

Процесс гумификации органических остатков в почве происходит с участием биоты, и потери углерода (CO₂) в результате дыхательного процесса продолжаются непрерывно даже в том случае, когда в почву не поступают свежие порции растительного материала. Например, в погребенных под курганами почвах микробиологическая активность продолжается, хотя и очень медленно (Демкин, 1997).

Круговорот органического углерода в биосфере включает в себя следующие этапы (Mellilo et al., 1995): общая первичная продукция фотосинтеза GPP (gross primary product of photosynthesis), представляющая весь связанный в органическое вещество углерод; чистая первичная продукция фотосинтеза NPP представляет углерод, ассимилированный растениями, за вычетом дыхания растений; чистая экосистемная продукция NEP (net ecosystem production of photosynthesis) – результат годичного взаимодействия продуцентов и деструкторов экосистемы – выражается разностью между первичной продукцией NPP и дыханием R_h органотрофов: NEP = NPP – R_h. Фактически для биосферных балансовых расчетов именно эта величина имеет первостепенное значение. В NEP входит также вторичная продукция, составляющая грибную и микробную биомассу. В экосистемах NEP устанавливается как величина чистого экосистемного CO₂-газообмена NEE (net ecosystem CO₂-exchange), и эти величины равны между собой. Чистая биомная продукция NBP (net biome production) – это сумма гумусовых веществ, устойчивых к минерализации, со средним временем пребывания углерода в них десятки и сотни лет.

MRT углерода в названных пулах (ориентировочно): NPP – 1–2 года, NEP – ≈10–100 лет и NBP – ≈100 лет и дольше. По массе между пулами углерод распределяется в отношении NPP : NEP : NBP ≈ 100 : 10 : 1. В результате в почве на длительное время (>100 лет) могут закрепиться устойчивые к разложению гумусовые вещества – примерно около 1% от количества NPP-углерода, поступившего в почву с наземной и внутрипочвенной биомассой. Об этом свидетельствуют скорости роста мощности гумусового горизонта в процессе почвообразовательного про-

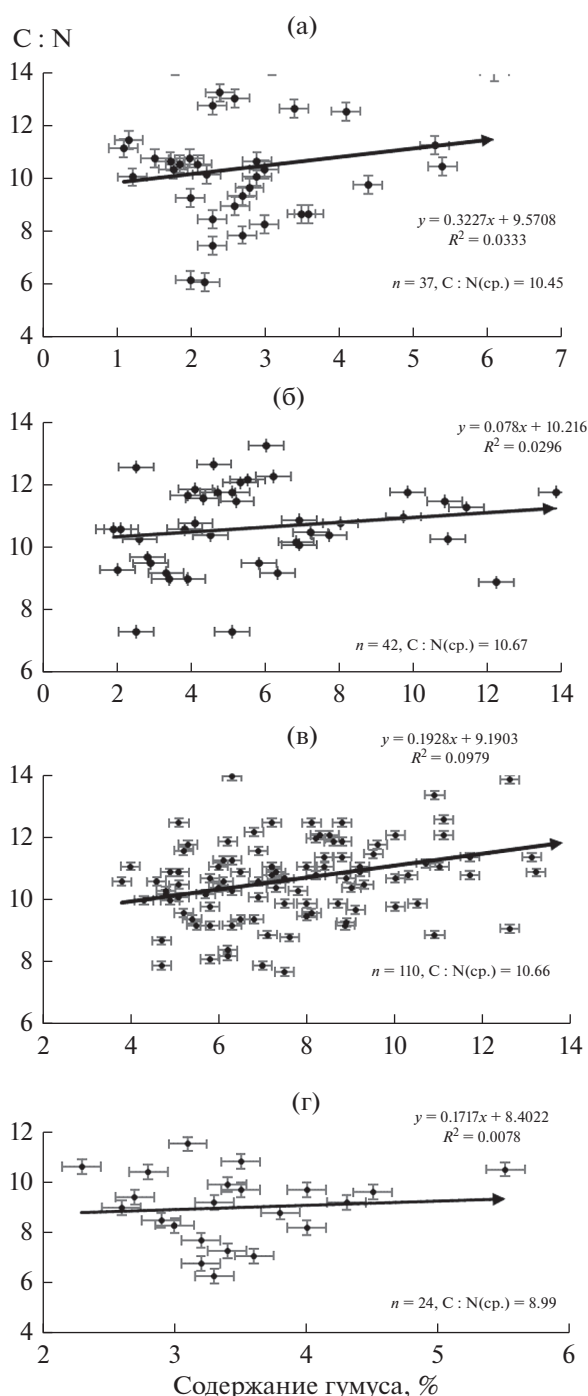


Рис. 1. Содержание в почвах гумуса (ось абсцисс) и C : N в гумусе (ось ординат). (а) – дерново-подзолистые почвы, (б) – серые лесные почвы, (в) – черноземы, (г) – каштановые; n – выборка данных из “Агрохимическая характеристика почв СССР”, тт. 1–4, 6, 9. Статистическая обработка автора.

цесса. С использованием методов археологического почвоведения показано (Иванов, Табанакова, 2003), что в черноземах Восточной Европы прирост гумусового горизонта за последние 4–5 тыс. лет оценивается в 1–3.5 см в столетие.

Это соответствует образованию в почве устойчивых к разложению гумусовых веществ — NBP — порядка 60–180 кг $C_{\text{орг}}$ /га/год. А текущая эмиссия CO_2 (гетеротрофное дыхание) из пахотных почв (например, серых лесных) в среднем составляет 2–3 т $C-CO_2$ /га/год (Kurganova, 2003; Kurganova et al., 2010). Для образования 60–180 кг C /га/год биомной продукции требуется поступление в почву углерода биомассы — NPP — порядка 6–8 т/га/год. Анализ биопродуктивности современных степных экосистем показал, что NBP черноземов может составлять около 80 кг C /га/год (Кудеяров и др., 2007).

С позиций секвестрации атмосферного CO_2 , наибольшей значимостью обладает NBP-пул, углерод которого отчуждается из биогеохимического цикла на сотни и даже тысячи лет. Поэтому сохранение и накопление в почвах углерода именно этого пула способствует уменьшению эмиссии CO_2 в атмосферу и, как следствие, снижению потенциала глобального потепления (ПГП) (WMO, 2019). Основная проблема секвестрации CO_2 , имеющая в настоящее время мировое значение, состоит в том, чтобы максимально увеличить поступление и накопление в почвах устойчивого к минерализации пула органического углерода.

Накопление органического углерода в наземном NEP-пуле (преимущественно древесная растительность) выводит CO_2 из атмосферы на период от нескольких лет до десятков и даже сотен лет и работает на снижение ПГП. Посадка лесов, залужение и зарастание бывших пахотных угодий (залежи) — наиболее распространенные пути секвестрации CO_2 . Однако накопление углерода в древесном пуле часто подвергается риску залповых выбросов CO_2 (пожары, массовые поражения вредителями и болезнями и другие катастрофические явления). Возвращение залежей в пахотные угодья также сопровождается быстрой потерей накопившегося органического углерода почвы.

Время пребывания $C_{\text{орг}}$ в почвенном NEP-пуле также недолговечно, поскольку он представлен легко минерализуемыми органическими соединениями, формирующимися из наземных и подземных растительных остатков (корней), биомассы почвенной биоты, органических удобрений, сидератов, покровных и парозанимающих культур. В процессе гумусообразования сравнительно небольшая часть углерода переходит в разряд трудно минерализуемых и негидролизуемых гумусовых веществ и пополняет NBP-пул, углерод которого является показателем долговременной секвестрации.

В литературе широко освещаются приемы секвестрации органического углерода, заключающиеся в обогащении почв органическим углеродом при использовании различных материалов (на-

воз, компосты, биоуголь и др.), а также приемы земледелия, способствующие как большему поступлению в почву растительных остатков, так и созданию условий замедления их минерализации, например минимальная обработка почв — NT (no till) (Кирюшин В., Кирюшин С., 2015; Рижия и др., 2015; Дубровина, 2021; Buchkina et al., 2013; Ding et al., 2013; Berhane et al., 2020; Wang et al., 2020; Waqas et al., 2020; Li et al., 2021; Mustafa et al., 2021). Выращивание покровных культур, сидератов или смена вида землепользования (залесение, залужение и др.) также способствуют секвестрации органического углерода. Перечисленные мероприятия имеют свои особенности и не всегда при строгом рассмотрении подходят под определение “секвестрация”.

Оценка секвестрации углерода в почвах может быть установлена по отношению гетеротрофного дыхания почв к накоплению в ней органического углерода (Tian J. et al., 2015). Увеличение содержания органического углерода в почве без учета как затрат углерода NPP-пула на это повышение, так и потерь углерода за счет эмиссии CO_2 , нельзя считать секвестрацией.

ВИДЫ СЕКВЕСТРАЦИИ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

В данном разделе приводятся примеры различных путей секвестрации углерода в почвах.

Применение навоза

Применение навоза в земледелии известно издревле как способ пополнения питательными веществами почв. Преимущество навоза перед другими видами удобрений состоит в том, что он является медленно действующим и не создает единовременно высоких концентраций легкоподвижных соединений, прежде всего нитрат- и аммоний-содержащих солей. Следовательно, положительное последствие навоза растягивается на годы.

На первый взгляд, внесение в почву навоза должно приводить к секвестрации органического углерода. Действительно, систематическое применение навоза приводит к накоплению в почвах органического углерода (Городний, 1960; Горшков, 1960; Любарская, 1960; Соболев, Чернецкий, 1960; Шевелев, 1960; Шевцова, 1988; Хлыстовский, 1992; Rothamsted research, 2006).

В настоящее время, когда остро ставится вопрос о низкоуглеродном развитии мирового сельскохозяйственного производства, накопленные в прошлом многолетние данные по изучению эффективности применения органических удобрений приобретают новую актуальность. Изначальная цель этих опытов — сравнение эффективности органических и минеральных удобрений через выявление воздействия этих удобрений на агрохимические свойства почв, включая гумус, а

Таблица 1. Баланс* $C_{орг}$ в почве (гор. 0–20 см) за 44 года в опытах ДАОС НИУИФ

Варианты	Исходное содержание в почве	Внесено с удобрениями	Поступление*** с наземными и корневыми остатками	Всего: исходное + поступление	Содержание в почве через 44 года	Потери $C_{орг}$ за 44 года		
						всего	т/га/год	
$C_{орг}$, т/га								
Контроль	31.8	0	46.2	78.0	21.3	56.7	1.29	
Навоз	31.8	40.5**	74.6	146.9	27.0	119.9	2.73	
Разность	0	40.5	28.4	68.9	5.7	63.2	1.44	

Примечание: * – представленные в таблице данные рассчитаны по результатам 6 полевых опытов из монографии (Хлыстовский, 1992). В баланс не были включены данные по утилизируемой продукции (зерно, клубни, корнеплоды свеклы, зеленая масса клевера, солома, которые вывозились с поля). Утилизируемая продукция представляла собой лишь часть NPP; ** – навоз содержал 20% сухого органического вещества. При переводе в $C_{орг}$ использовался коэффициент 0.45; *** – о судьбе части NPP, представляющей собой наземные растительные остатки и корни, сведений в книге нет. Мы восполнили этот пробел расчетными данными, выполненными на основе соответствующих коэффициентов продукции по методике Почвенного института им. В.В. Докучаева (Семенов, Когут, 2015).

также на содержание азота, фосфора, калия, кальция и др. Однако, чтобы определить, насколько возможна секвестрация органического углерода и каковы ее размеры при удобрении навозом, обратимся к данным многолетних опытов, проведенных в различных почвенно-климатических условиях, и проанализируем состояние баланса углерода в системе органические удобрения–почва–растения–атмосфера.

Материалы полевых опытов Долгопрудной агрохимической опытной станции Научно-исследовательского института по удобрениям и инсекто-фунгицидам им. Я.В. Самойлова (ДАОС НИУИФ) по сравнительному действию навоза и эквивалентной смеси минеральных удобрений представлены в книге (Хлыстовский, 1992). Опыты были заложены по инициативе акад. Д.Н. Прянишникова на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в нескольких севооборотах с набором культур: озимая рожь (пшеница), картофель, овес, пар клеверный на фоне известкования и без него. Ротация севооборота проходила на четырех полях. Это многофакторное исследование, в котором были оценены факторы: 1) удобрения: контроль – без удобрений; навоз, минеральные удобрения, то есть смесь NPK, эквивалентная количеству, вносимому с навозом; 2) влияние известкования почвы на эффективность удобрений; 3) севооборот, то есть чередование культур. Кроме того, в схеме опыта было предусмотрено определение сравнительной отзывчивости каждой культуры севооборота на удобрения и известкование. Для этого было предусмотрено ежегодное развертывание опыта на четырех полях севооборота. То есть опыт был развернут в пространстве и во времени. Результаты эксперимента учитывались и обрабатывались ежегодно по всем культурам севооборота. Для целей настоящего обзора были обработаны результаты двух вариантов опыта: контроль и навоз одиннадцати ротаций севооборота за 44 года. За каждую рота-

цию вносили 36 т навоза/га, или в среднем 9 т навоза/га/год.

Прежде всего, необходимо отметить, что на протяжении всего времени опыта отмечено достоверное снижение содержания органических углерода и азота в почве не только на контроле, но и при внесении удобрений. Содержание органического вещества в почве при внесении навоза тоже сократилось, но в меньшей степени, чем на контроле и при внесении минеральных удобрений. Отношение C : N в гумусе почвы оставалось практически неизменным, и длительное внесение удобрений не сказалось на этом показателе (рис. 2). Это свидетельствует о синхронном высвобождении CO_2 и минерального азота при минерализации гумуса.

В табл. 1 приведен примерный баланс органического углерода за 44 года, составленный нами на основе данных четырех полевых опытов (Хлыстовский, 1992), позволивший судить о возможной секвестрации углерода среднесрочного типа. Потери органического углерода из почвы – ничто иное как гетеротрофное дыхание и эмиссия CO_2 в атмосферу. При внесении навоза, по сравнению с контролем, через 44 года потери $C_{орг}$ оказались равными 63.2 т, что превышало количество $C_{орг}$, внесенного с навозом.

Остаточный $C_{орг}$ в почве навозного варианта за все годы эксперимента оставался примерно на одном уровне (рис. 3а). Данные показывают, что со временем при внесении каждой новой порции навоза минерализация и суммарные потери $C_{орг}$ увеличивались (рис. 3б). Этот факт свидетельствует о продолжавшемся процессе гумификации, о минерализации и о потерях ранее внесенного $C_{орг}$. Кроме того, вновь поступавший в почву легко минерализуемый $C_{орг}$ мог вызвать затравочный эффект и усилить минерализацию $C_{орг}$ (Tian J. et al., 2015; Wang et al., 2020).

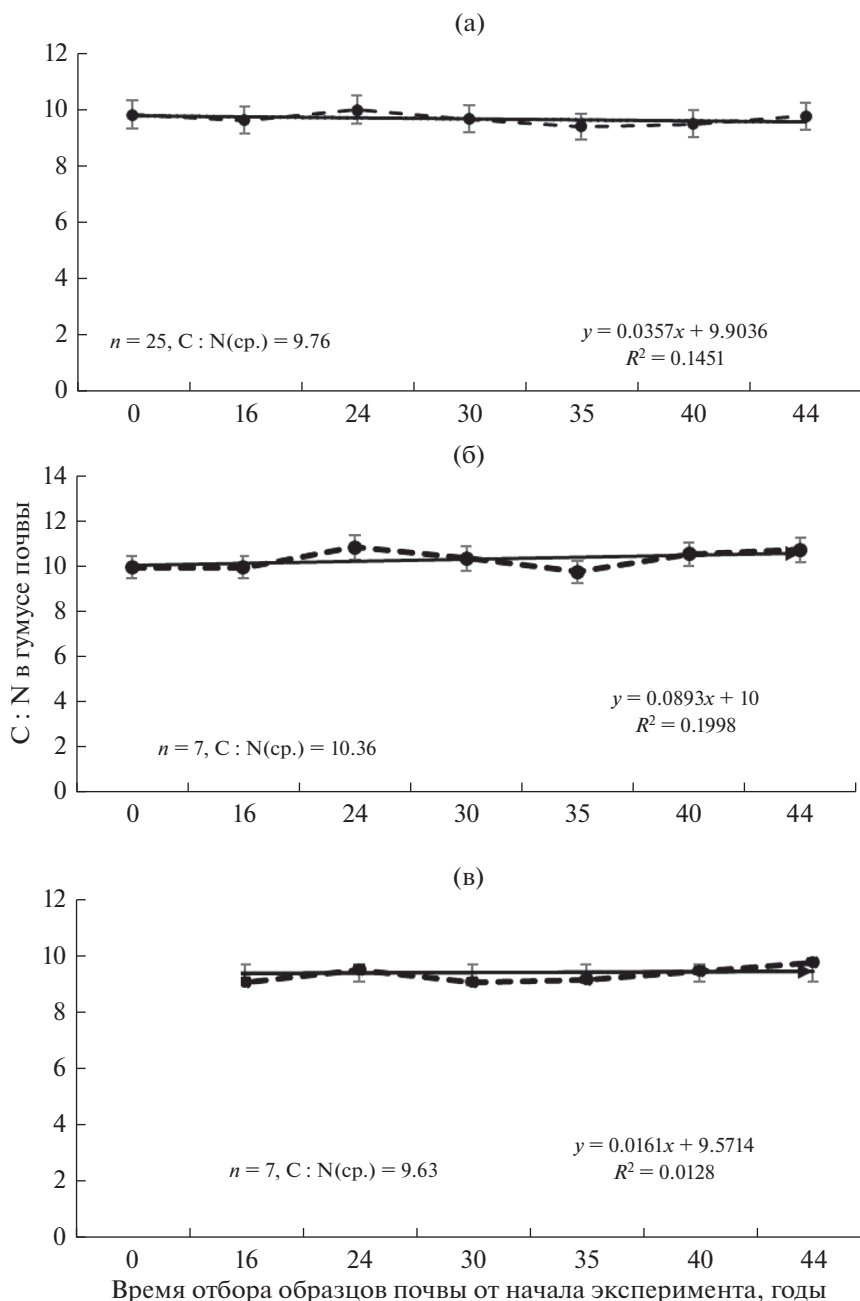


Рис. 2. Влияние органических (навоз) и минеральных удобрений на отношение C : N в гумусе дерново-подзолистой почвы многолетних опытов ДАОС НИУИФ (Хлыстовский, 1992). (а) – контроль без удобрений, (б) – внесение навоза, (в) – смесь минеральных удобрений (N, P, K, Ca); n – выборка данных.

Таким образом, за весь период проведения опыта внесение навоза не только не способствовало секвестрации углерода, а даже наоборот усилило мобилизацию почвенного $C_{\text{орг}}$ и его потери.

Данные (Хлыстовский, 1992) по продуктивности всех сельскохозяйственных культур в опытах за все годы, выраженные в зерновых единицах (з. е.), позволили рассчитать углеродный след полученной земледельческой продукции. Продуктивность в з. е. за 44-летний период составила в среднем

(ц/га/год): контроль (без удобрений) – 14.2, по навозу – 24.5. Деление потерь органического углерода почвы (т С/га) на з. е., выраженные также в т/га, дает величину затрат $C_{\text{орг}}$ на единицу полученной продукции. Расчеты показывают, что углеродный след на контроле оказался равным 0.9 т $C_{\text{орг}}$ /т зерна, а при применении навоза – 1.1 т $C_{\text{орг}}$ /т зерна.

Однако показанные выше затраты углерода на полученные урожаи – далеко не полные. Не учте-

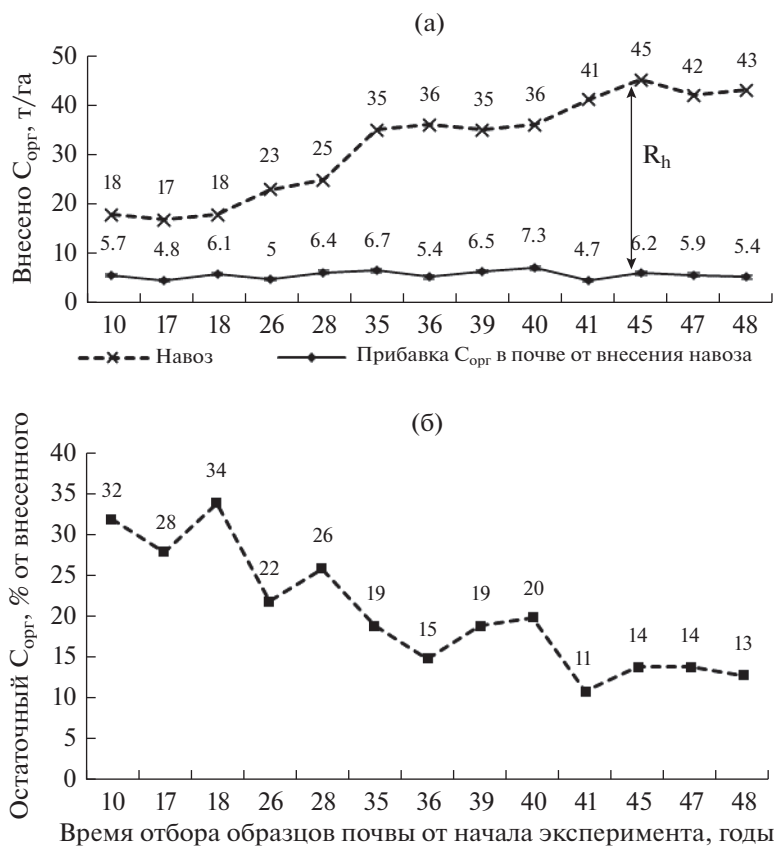


Рис. 3. Влияние длительного внесения навоза на содержание остаточного $C_{орг}$ в почве в полевых опытах ДАОС НИУИФ. Графики построены на основе данных (Хлыстовский, 1992, стр. 51, табл. 38). (а) – внесенное количество навоза и прибавка $C_{орг}$ в почве, т/га; R_h – потери $C_{орг}$ (гетеротрофное дыхание); (б) – динамика содержания остаточного $C_{орг}$ в почве в % от внесенного (гумификация).

ны энергетические затраты в углеродных единицах на обработку почвы, посев и уборку урожая. Должны быть учтены и затраты углерода кормов (NPP и NEP), участвующих в формировании экскрементов животных, и связанная с этим процессом эмиссия газов (CO_2 , CH_4), а также углерод использованной подстилки. Следует полагать, что затраты углерода на получение зерновой единицы основной продукции при удобрении навозом с учетом всех составляющих баланса будут значительно превосходить те, что приведены выше.

Результаты опыта на темно-серой слабоподзоленной легкосуглинистой почве в Сумской обл., проводившегося в 1931–1957 гг. (Городний, 1960), позволили рассчитать секвестрацию углерода навоза при его внесении в количествах 380, 640 и 1280 т/га за 27 лет. Потери углерода навоза на секвестрацию 1 т $C_{орг}$ /га в почве в зависимости от доз удобрения оказались в пределах 3.36–7.27 т С/га. Чем выше доза внесенной в почву органики, тем “дороже” единица секвестрируемого углерода. Как и в Прянишниковском опыте, повышение количества вносимого навоза увеличивало относительный уровень потерь углерода за счет эмиссии CO_2 .

На слабо выщелоченном черноземе данные многолетнего опыта (Горшков, 1960) позволили рассчитать секвестрацию углерода навоза, вносимого в четырехпольном севообороте. По прошествии 12 лет в почву было внесено 120 т/га навоза в 4 приема, что соответствовало 11.9 т $C_{орг}$ /га/год. В почве (гор. 0–20 см) прирост гумуса за 12 лет оказался равным 3.3 т $C_{орг}$ /га. Потери же составили 8.6 т $C_{орг}$ /га или 72% от его количества, внесенного с навозом. Потери $C_{орг}$ на 1 т/га секвестрированного углерода составили 3.6 т $C_{орг}$ /га.

В другом опыте тоже на слабовыщелоченном легкосуглинистом черноземе (Соболев, Чернецкий, 1960) результаты 20-летнего внесения органики позволили показать, что из 37.1 т $C_{орг}$ /га потери углерода навоза из почвы составили 28.8 т/га. Затраты углерода навоза на 1 т секвестрированного $C_{орг}$ в почве оказались почти такими же (3.5 т/га), как и в опыте, упомянутом выше.

В опыте на высокогумусном черноземе Шатиловской опытной станции (Шевелев, 1960) за 45-летний период потери углерода навоза на 1 т секвестрированного углерода в почве колебались в пределах 17.8–1.6 т/га. Максимальная величина

Таблица 2. Примерный* баланс органического углерода в почве классического опыта с бессменной озимой пшеницей за 156** лет (Rothamsted research, 2006)

Варианты	Исходное содержание в почве (1)	Внесено с навозом *** (2)	C _{орг} , всего: (1) + (2) (3)	Содержание в почве C _{орг} в 2000 г. (4)	Прибавка C _{орг} в почве от внесения навоза (секвестрация) по (4) (Н)–(К)	Потери C _{орг} , всего (3)–(4)	Секвестрация от внесенного в почву C _{орг} , %
Контроль (К)	35	0	35	34.5	нет	н/опр.	н/опр.
Навоз (Н)	35	470	505	96.6	62.1	408.4	13.2

Примечание: * – в расчеты баланса углерода не вошли данные по количеству углерода в наземных и подземных (корни) растительных остатках. C_{орг} вычислялся косвенно по содержанию общего азота и отношению C : N = 10 (Rothamsted research, 2006); ** – в 1920–1930-х гг. навоз не вносился (около 20 лет); *** – принято, что сухое вещество навоза составляет 20%. Для пересчета в C_{орг} использовался коэффициент 0.45. В 35 т/га навоза содержание C_{орг} – 3.15 т/га.

соответствовала внесению дозы навоза – 36.0 т/га в 9 лет, а минимальная – 36 т/га в 3 года. Этот факт свидетельствует о постоянно продолжавшейся и увеличивавшейся суммарной минерализации C_{орг} навоза во времени.

Весьма интересны результаты полевого опыта с самым длительным применением навоза. Это классический опыт, проводимый в Англии на Ротамстедской опытной станции “Broadbalk winter wheat experiment”. Опыт заложен в 1843 г. на тяжелосуглинистой карбонатной почве. Смесь минеральных удобрений (N, P, K, Na, Mg) сравнивалась с навозом, который вносили в дозе 35 т/га/год. В цитируемой работе (Rothamsted research, 2006) приведены данные опыта до 2000 г. Все годы уровень урожая зерна озимой пшеницы по навозному варианту и смеси N, P, K, Na, Mg, включающей дозу азота 144 кг/га, были практически одинаковыми и синхронно повышались при нововведениях в качестве общего фона: новые сорта, парование, применение гербицидов, известкование, фунгициды. В первые 80 лет урожаи зерна на навозном и минеральном вариантах оставались в пределах 2.5–3.0 т/га, а на контроле (без удобрений) были около 1 т/га. Заметный рост урожая начался с момента известкования и применения гербицидов (1960-е гг.), а с середины 1960-х гг. при внедрении интенсивных сортов пшеницы и фунгицидов рост урожая приобрел экспоненциальный характер и достиг 10 т/га. На контроле без удобрений при тех же нововведениях урожай оставался на уровне 1.0–1.5 т/га.

На основе данных (Rothamsted research, 2006) нами составлен приблизительный баланс органического углерода за время проведения эксперимента до 2000 г. (табл. 2). Почти полуторавековое внесение навоза способствовало увеличению содержания C_{орг} в почве, по сравнению с контролем, в 2.8 раза. Однако потери органического углерода из почвы в варианте с навозом составляли почти 90% от количества C_{орг}, внесенного с навозом. Потери C_{орг} – это ничто иное как гетеротроф-

ное дыхание с последующей эмиссией CO₂ в атмосферу.

Доля секвестрации углерода от внесенного количества навоза, вычисленная нами по результатам опыта за 156 лет, составила 13.2%. Эта величина характерна и для других почвенно-климатических условий и органических удобрений и представляет собой коэффициент гумификации.

По другим европейским многолетним опытам с навозом, например опыт в Гале, Германия (Любарская, 1960), за 72-летний период внесения навоза на секвестрацию в почве 1 т C_{орг}/га потери C_{орг} навоза составили 13.4 т/га, то есть почти столько же, сколько в британских экспериментах.

В приведенных исследованиях показаны неполные затраты углерода. Не учтены величины углерода в NPP (в виде кормов для животных), затраченных при формировании экскрементов у животных, и количество углерода, эмитированного при этом в виде парниковых газов.

Таким образом, результаты экспериментов с многолетним применением навоза свидетельствуют о значительных потерях C_{орг} навоза из почвы во всех без исключения случаях. При этом потери углерода делают баланс углерода в системе растение–навоз–почва–атмосфера отрицательным, что означает значительное превышение эмиссии CO₂ над накоплением в почве углерода NBP-пула. Применение навоза можно охарактеризовать как фактор, способствующий нарастанию ПГП.

Однако приведенные выше данные по отрицательному влиянию навоза на уровень секвестрации углерода в почве не должны восприниматься как факты, обосновывающие ограничение применения органических удобрений. Почва, образно выражаясь, является живым организмом, и ей свойствен дыхательный процесс, а дыхательным субстратом для почвенной микрофлоры являются легко минерализуемые органические вещества. Внесение в почву органических удобрений значительно повышает ее энергетический статус,

который способствует усилению соокисления и детоксикации множества загрязняющих почву веществ. Кроме того, внесение навоза пополняет в почве запасы легко усваиваемых питательных веществ для растений.

Компосты

Компосты широко применяются в качестве органических удобрений, и одновременно это способ утилизации различных бытовых, сельскохозяйственных и промышленных отходов. Компосты часто используются в качестве секвестра органического углерода. В большинстве работ мы видим, что под секвестрацией понимаем лишь накопление в почвах $C_{\text{орг}}$, независимо от продолжительности его пребывания в почве, а, главное, без учета складывающегося баланса между поступившим в почву $C_{\text{орг}}$ и эмиссией в атмосферу парниковых газов. Показано (Ding et al., 2013), что 18-летнее применение компоста не только увеличило содержание органического углерода в почве, но и увеличило эмиссию N_2O на 106%. Если принять во внимание, что ПГП закиси азота в 298 раз выше CO_2 , то оказывается, что эффект от секвестрации углерода с целью снижения ПГП почти полностью нивелируется дополнительными выбросами из почвы N_2O . Таким образом, обогащение почвы компостами не всегда благоприятствует сокращению выбросов парниковых газов в земледелии.

Солома и корневые остатки

Повышающиеся урожаи сельскохозяйственных культур при внедрении современных технологий способствуют увеличению поступления в почву пожнивных остатков и корневой массы, что приводит к увеличению секвестрации органического углерода в почвах (Fan et al., 2019). Размеры секвестрации $C_{\text{орг}}$ в почве при многократном возврате соломы зависят от ряда сопутствующих факторов и, прежде всего, сопутствующего внесения в почву минеральных удобрений, непременно включающих в себя азотные (Berhane et al., 2020). Это положение имеет под собой соответствующее обоснование. Внесение в почву органических материалов с широким отношением $C : N$ вызывает активизацию гетеротрофной микрофлоры с острой потребностью в усваиваемом азоте. Дефицит усваиваемого азота в почве приводит к интенсивному разложению соломы с потерей CO_2 . Показано (Berhane et al., 2020), что применение NPK (азот, фосфор, калий) и NPK + солома, а также NP и NP + солома оказались неравнозначны в накоплении в почве $C_{\text{орг}}$. Запасы $C_{\text{орг}}$ в почве при внесении NPK и NPK + солома увеличивались на протяжении более чем 20-летнего периода, при этом достижение максимальных запасов $C_{\text{орг}}$ в вариантах NP и NP + солома было ограничено периодом от 11 до 20 лет. В работе

показано, что в опытах, проведенных с многократным возвратом в почву соломы, накопление органического углерода было больше в почвах в том случае, когда к соломе добавляли минеральные удобрения с участием азота и фосфора. Добавление калия не имело преимуществ, поскольку солома сама значительно обогащена калием. Эти данные хорошо согласуются с нашими, полученными в 1990-х гг. на серой лесной почве (Кудряров, 1999).

Покровные культуры

Включение покровных культур в сельскохозяйственные севообороты может значительно увеличить почвенный $C_{\text{орг}}$. Однако получаемые результаты часто бывают противоречивы. Были собраны данные (Jian et al., 2020), в которых сравнивались системы земледелия с покровными культурами и без них. Проведено сравнение 1195 пар (покровная культура и беспокровная) в 131 эксперименте. Покровные культуры —рожь *Secale cereale* и однолетний райграс *Lolium multiflorum*. Использовались также бобовые культуры.

Большее половины (60%) данных представлено из США. Результаты сгруппированы по почвам с разным гранулометрическим составом. Так, на легких почвах включение покровных культур в севообороты значительно повышало $C_{\text{орг}}$, с общим средним увеличением на 15.5% (13.8–17.3%), по сравнению с вариантами беспокровной культуры.

Наибольший сток $C_{\text{орг}}$ был отмечен для покровных культур в севообороте кукуруза—пшеница—соя. На среднесуглинистой почве сток $C_{\text{орг}}$ на покровном варианте был на 2 т $C_{\text{орг}}$ /га выше, чем на беспокровном. Тяжелые почвы показали наибольший прирост $C_{\text{орг}}$ после включения покровных культур в севооборот.

Смеси покровных культур приводили к большему увеличению $C_{\text{орг}}$, по сравнению с моновидами покровными культурами, а использование бобовых вызвало большее увеличение $C_{\text{орг}}$, чем небобовых.

Покровное земледелие значительно увеличивает $C_{\text{орг}}$ на неглубоких почвах (≤ 30 см), по сравнению с подповерхностными горизонтами (> 30 см). Регрессионный анализ показал, что изменения $C_{\text{орг}}$ в результате покровного земледелия коррелируют с улучшением качества почвы, в частности с уменьшением эрозии и увеличением содержания минерализуемого органического вещества. На изменение углерода в почве также влияли годовая температура, количество лет после начала введения в севооборот покровных культур, географическая широта и первоначальное содержание $C_{\text{орг}}$. Наконец, полученная средняя величина связывания углерода покровными культурами во всех исследованиях составила 0.56 т C/га/год. Авторы (Jian et al., 2020) делают вывод: если бы на 15% нынешних мировых пахотных землях внедрились

покровные культуры, это привело бы к увеличению $C_{\text{орг}}$ на 0.16 ± 0.06 млн т С/год, что аналогично 1–2% текущих выбросов от сжигания ископаемого топлива.

Минимальная обработка почвы

В литературе широко обсуждаются результаты внедрения минимальной обработки NT в земледелие, в частности, данные относительно секвестрации углерода в почвах (Sperow, 2019; Cooper et al., 2021; Jia et al., 2021; Reinsch et al., 2021; Kan et al., 2021, 2022; Dewi et al., 2022). Минимальная (беспашотная) обработка почвы часто рекомендуется для уменьшения минерализации органического вещества как поверхностных растительных остатков, так и почвенного $C_{\text{орг}}$. Считается, что такая обработка почвы способствует секвестрации атмосферной углекислоты.

Темпы накопления и минерализации $C_{\text{орг}}$ в почве значительно зависят от времени, прошедшего с момента введения NT. Авторы (Kan et al., 2021) попытались установить основные факторы накопления стабильных фракций $C_{\text{орг}}$ ($\text{СФС}_{\text{орг}}$) в почве в 11-летнем полевом опыте. Полевой эксперимент показал, что, по сравнению с плужной обработкой почвы (ПО), в NT-почве доля более стабильных фракций почвенного $C_{\text{орг}}$ оказалась выше. Увеличение концентрации $\text{СФС}_{\text{орг}}$ повысилось на 12.6% на пятом году полевого эксперимента, а на одиннадцатом году – уже на 52.2%. Авторы объясняют такие результаты изменение агрегатного состава почв: фракция макроагрегатов размером 2 мм, в которых органическое вещество физически защищено, увеличивается, что способствует меньшей его минерализации.

В другой работе (Kan et al., 2022) механизмы стабилизации почвенного органического углерода изучены в их связи с глобальным углеродным циклом. NT часто используется для секвестра $C_{\text{орг}}$. Однако высказываются сомнения (Kan et al., 2021), будет ли секвестрированный $C_{\text{орг}}$ стабилизирован в долгосрочной перспективе. Авторы рассмотрели различные механизмы, влияющие на стабильность $C_{\text{орг}}$ в системах NT: прайминг-эффект PE (priming effect) (Tian J. et al., 2015; Wang et al., 2020); молекулярную структуру $C_{\text{орг}}$; защиту агрегатов; связь с почвенными минералами; микробные свойства; воздействие на окружающую среду. Хотя при NT наблюдается более устойчивая молекулярная структура $C_{\text{орг}}$, по сравнению с традиционной обработкой почвы (ТО), стабильность $C_{\text{орг}}$ может в более продолжительном времени зависеть от физической и химической защиты. В среднем NT улучшает макроагрегацию на 32.7% и снижает минерализацию $C_{\text{орг}}$ в макроагрегатах, по сравнению с ТО. Более высокая микробная активность при NT может также детерминировать усиленное производство связывающих агентов, способствующих агрегации и образованию ме-

таллоорганических комплексов. Сделан вывод о том, что $C_{\text{орг}}$, изолированный в системах NT, вероятно, будет стабилизирован в долгосрочной перспективе.

Показано (Jia et al., 2021) также преимущество NT в секвестрации углерода в почвах, которое связано с более благоприятным водно-температурным режимом, по сравнению с пашенной почвой. NT способствует изменению почвенного профиля в результате накопления в верхних горизонтах большего количества растительных остатков и формирования горизонта A_0 . Это, в свою очередь, уменьшает поверхностное испарение и увеличивает запасы влаги в почвенном профиле, а также снижает температуру почвы.

Показано, что NT вызывает увеличение численности денитрифицирующих микроорганизмов (Doran, 1980). Комбинация NT и применения азотных удобрений приводит к усилению потерь газообразного азота. Обнаружены (Palma et al., 1997) в два раза большие потери азота удобрений за счет денитрификации при NT, по сравнению с нормальной пахотой за 90-дневный период. При этом установлена весьма тесная положительная связь между количеством денитрифицирующих микроорганизмов и газообразными потерями азота.

И наконец, в статье “Пахать или не пахать в условиях умеренного климата” (Cooper et al., 2021) оценено влияние NT в течение 15 лет на секвестрацию углерода и выбросы парниковых газов. Было показано, что рассчитанный ППП оказался на 30% ниже в NT-системах за счет более низкой эмиссии CO_2 и соответствующей секвестрации углерода в почве. Сделано заключение, что NT играет важнейшую роль, с одной стороны, как способ снижения эмиссии парниковых газов, а с другой, – увеличивает секвестрацию углерода и тем самым способствует сохранению климата.

Однако в определенных условиях NT почвы может увеличить потоки закиси азота из почвы, что может свести на нет любые климатические выгоды потенциального хранения углерода в почве (Pelster et al., 2021). Чтобы исследовать, как длительное внесение различных органических удобрений взаимодействует с обработкой почвы и влияет на потоки N_2O в севообороте, с 2009 г. в Восточной Канаде проводились долгосрочные испытания. Сравнивались два типа обработки почвы: инверсионная обработка IT (inversion tillage) и NT – и два типа удобрений (свиной и коровий жидкий навоз – слари), при наличии контроля без удобрений по каждому типу обработки – IT и NT. Эксперимент заложен на двух контрастных по текстуре почвах: тяжелый и песчаный суглинки. Оценивались потоки N_2O с каждого участка посевов (апрель–ноябрь): в 2016 г. под пшеницей, в 2017 г. под кукурузой и в 2018 г. под соей. Средние кумулятивные потоки за вегетационный период варьировали: на тяжелосуглинистой почве от 0.8 кг N- N_2O /га для кукурузы (на контроле) до

7.6 кг N-N₂O/га для пшеницы (коровья навозная жижа) при NT-обработке; на песчаном суглинке – от 0.4 кг N-N₂O/га под кукурузой (контроль, IT) до 3.0 кг N-N₂O/га под кукурузой при внесении свиного слари по NT. В целом данные показали, что величина эмиссии N₂O при NT совместно с жидким навозом значительно превосходила эмиссию N₂O при обычной пахоте. При этом следует иметь в виду, что ПГП закиси азота в 298 раз выше углекислого газа. При пересчете на CO₂ максимальная эмиссия по NT-обработке составила 2265 кг/га.

Из этого следует, что на тяжелосуглинистой почве NT-обработка с применением органических удобрений не может рекомендоваться как способ борьбы с повышенной эмиссией парниковых газов.

Биоуголь (биочар)

Биоуголь, полученный из различных материалов, включая сельскохозяйственные отходы, используется в качестве мелиоративной добавки в почву. Рядом исследователей показано, что внесение в почву биоугля улучшает питательный и физический режимы почв, а также снижает эмиссию парниковых газов (CO₂, N₂O) (Рижия и др., 2011, 2015; Мухина и др., 2019; Дубровина, 2021).

Некоторые авторы рекомендуют применение биоугля в целях секвестрации углерода в почвах (Yang et al., 2019; Majumder et al., 2019; Ali et al., 2021; Oladele, Adetunji, 2021). Рассматриваются (Clark et al., 2019) результаты экспериментов с биоуглем, приготовленным из птичьего помета. Нетто-минерализация N в почве при краткосрочной инкубации была небольшая или даже отрицательная: 1.8 и –24.7 мг N/кг почвы для песчаной и суглинистой почв соответственно, что указывает на незначительную или нулевую новую минерализацию азота и углерода. Эти результаты свидетельствуют о возможном сохранении в почве углерода и азота биоугля в течение длительного времени.

Исследовался (Yang et al., 2019) NEE при добавлении биоугля (20 и 40 т/га) в условиях рисового поля. Обнаружено, что средний NEE рисового поля при внесении биоугля на 2.4 и 30.6% соответственно выше, чем на контроле. Добавление биоугля также увеличило C_{орг} за счет того, что растворенный органический углерод из отмершей микробной биомассы сорбировался биоуглем.

Проведен (Ali et al., 2021) двухлетний эксперимент с жемчужным просом на содово-засоленной почве. В этих исследованиях биоуголь добавляли в почву в пяти дозах: 0, 5, 10, 15 и 20 т/га. Биоуголь повысил уровень органического углерода в почве и улучшил доступность и поглощение N, P и K, по сравнению с контрольной почвой.

Однако в некоторых случаях внесение биоугля в почву может вызвать негативные последствия

для почвы и окружающей среды в целом (El-Naggar et al., 2019). Например, биоуголь может подавлять доступность питательных веществ в почве и снижать продуктивность сельскохозяйственных культур из-за сокращения поглощения питательных веществ растениями или уменьшения минерализации почвенного C_{орг}. Применение биоугля может также негативно повлиять на качество окружающей среды и здоровье человека из-за наличия вредных соединений, в частности полициклических ароматических углеводородов, полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов. Большие затраты энергии на получение биоугля также являются отрицательным фактором с позиции ПГП.

Смена вида землепользования

Перестройка производственных отношений в сельскохозяйственном секторе России привела к серьезным структурным изменениям аграрного землепользования. Из состава пахотных угодий за 25-летний период в залежное состояние перешло до 40 млн га. Пахотные угодья России за период 1992–2016 гг. представляли собой чистый источник C-CO₂ в размере 21–27 (в среднем 24.5) млн т C-CO₂/год (Кудеяров, 2019). Выведенные из сельскохозяйственного оборота десятки миллионов гектаров пахотных угодий перешли в разряд залежных земель, подвергшихся зарастанию луговой и древесной растительностью. Это, в свою очередь, изменило характер формирования биологической продуктивности и баланс углерода на сельскохозяйственных угодьях в целом. Исследование углеродного баланса залежей показало, что этот вид земель превратился из источника CO₂ в его абсолютный сток, то есть происходила секвестрация атмосферной CO₂. Так, средняя скорость депонирования углерода в бывших пахотных почвах РФ оценивается около 45 млн т C/год, а в целом за 1992–2016 гг. аккумулировалось около 1 млрд т углерода в органическом веществе почв и растительной биомассе выросшей за это время древесной и кустарниковой растительности (Баева и др., 2017; Kurganova et al., 2010, 2015).

Оценивая в целом изменение баланса углерода на землях сельскохозяйственного назначения за период 1992–2016 гг., можно констатировать, что в земледелии России сокращение пахотных угодий и перевод их в залежное состояние существенно изменили баланс углерода. Земледелие в целом из чистого источника C-CO₂ в начале 1990-х гг. превратилось в чистый накопитель (секвестор) C-CO₂. С позиций низкоуглеродного развития РФ можно рекомендовать сохранение залежи в составе сельскохозяйственных угодий как мощного накопителя углерода в сформировавшихся экосистемах.

Инициатива “4 промилле”

Увеличение запасов почвенного органического углерода в сельскохозяйственных почвах не только оказывает положительное влияние на качество почвы и устойчивость почвы, но также может способствовать смягчению последствий изменения климата. Инициатива “4 на 1000” (4 промилле), запущенная на Конференции ООН по изменению климата 2015 г. в Ле-Бурже, направлена на увеличение глобальных запасов $C_{\text{орг}}$ на глубине 0–40 см ежегодно на 4 части на тысячу, чтобы компенсировать увеличение антропогенных выбросов CO_2 .

Проанализирована (Wiesmeier et al., 2020) осуществимость этой цели для сельскохозяйственных почв в Баварии, Юго-Восточная Германия. Если общее количество органического углерода составляет 276 Гт, которое в настоящее время хранится в верхних 40 см сельскохозяйственных почв в Баварии (пахотные и лугопастбищные угодья), то количество 4 промилле соответствует ежегодному связыванию углерода C в размере 1.1 Гт. Анализ текущего управления почвой для конкретных участков позволил разработать пространственные сценарии связывания C , включая пять перспективных методов управления: покровное земледелие, улучшение севооборота, органическое земледелие, агролесоводство и преобразование пахотных земель в луга. Результаты показали, что цель 4/1000 – невыполнима для Баварии. Общий потенциал пяти методов секвестра C привел к увеличению на 0.3–0.4 Гт $C_{\text{орг}}$ /год, что соответствует примерно 1 части на тысячу частей (1/1000) нынешних запасов $C_{\text{орг}}$. Расширение площади покровных культур и агролесоводства определено в качестве наиболее перспективных вариантов увеличения $C_{\text{орг}}$ в сельскохозяйственных почвах. В этой ситуации в Баварии будут компенсированы только около 1.5% ежегодных выбросов парниковых газов. Но и этот результат можно считать важным вкладом в смягчение последствий изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В большинстве процитированных работ под термином “секвестрация углерода в почве” понимается накопление остаточного органического углерода в почве, чему могут способствовать некоторые приемы: внесение различных органических добавок (навоз, компосты, биоуголь и др.); выращивание покровных культур, сидератов; беспашенная система земледелия. Все перечисленные приемы имеют свои особенности и при строгом рассмотрении не всегда подходят под определение “секвестрация”.

Для оценки уровня секвестрации углерода в почвах необходимо определение баланса между эмиссией CO_2 из почвы (гетеротрофное дыхание) и величиной нового почвенного стока органиче-

ского углерода в форме NBP, то есть устойчивого к минерализации органического углерода. Сток углерода в NEP (легко минерализуемые формы углерода) определяет краткосрочную неустойчивую секвестрацию углерода. Переход органического углерода из NEP-пула в NBP-пул (иными словами, процесс гумификации) – длительный процесс, который сопровождается потерей углерода в результате гетеротрофного дыхания и эмиссии CO_2 в атмосферу.

Применение органических удобрений (прежде всего, навоза и различных компостов), являющихся чистой экосистемной продукцией, можно отнести к кратковременному типу секвестрации органического вещества. Затраты NPP и NEP (т C /га) на 1 т C /га в NBP-пуле могут колебаться от нескольких до десятков тонн C /га в зависимости от продолжительности и доз внесения органического удобрения в почву. Затраты NPP и NEP на образование NBP представляют собой потери углерода в результате дыхания почвенной биоты и эмиссии CO_2 в атмосферу. Следовательно, применение органических удобрений не обеспечивает длительную секвестрацию углерода и не служит снижению ПГП. Однако от применения навоза нельзя отказываться, поскольку он ценен не только содержанием в нем питательных веществ, но и как дыхательный субстрат для огромного количества разнообразных микроорганизмов, выполняющих очистительную функцию в почве.

Весьма перспективным приемом секвестрации атмосферной CO_2 является введение севооборотов с посевом покровных культур. По результатам метаисследований (Jian et al., 2020), на большом количестве (около 2000) экспериментов сравнения показано: если бы на 15% нынешних мировых пахотных земель внедрили покровные культуры, это привело бы к увеличению $C_{\text{орг}}$ в почвах на 0.16 ± 0.06 млн т C /год, что аналогично 1–2% текущих выбросов от сжигания ископаемого топлива.

Перспективным приемом секвестрации органического углерода в почвах может служить минимальная обработка почвы. NT способствует изменению почвенного профиля в результате накопления в верхних горизонтах большего количества растительных остатков и формирования горизонта A_0 . Это, в свою очередь, уменьшает поверхностное испарение и увеличивает запасы влаги в почвенном профиле, а также снижает температуру почвы. Однако в определенных условиях NT увеличивает потоки закиси азота из почвы, что может свести на нет любые климатические выгоды потенциального хранения $C_{\text{орг}}$ в почве (Pelster et al., 2021). Комбинация минимальной обработки почвы и применения азотных удобрений может приводить к усилению эмиссии N_2O , поскольку в гумусовом горизонте из-за слабой аэрации создаются благоприятные условия для процесса денитрификации (Palma et al., 1997).

Биоуголь, полученный из различных материалов, включая сельскохозяйственные отходы, может использоваться в качестве мелиоративной добавки в почву, улучшающей питательный и физический режимы почв. Однако пока не сложилось однозначное мнение относительно использования биоугля в качестве секвестра углерода. Кроме того, значительные энергетические затраты на получение биоугля делают его применение проблематичным в целях снижения ПГП.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием № 122040500037-6.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 1. Северные районы Европейской части РСФСР / Ред. А.В. Соколов. М.: АН СССР, 1962. 280 с.
- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 2. Районы Центрально-Чернозёмной полосы / Ред. А.В. Соколов. М.: АН СССР, 1963. 262 с.
- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 3. Районы Северного Кавказа / Ред. А.В. Соколов. М.: Наука, 1964а. 365 с.
- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 4. Районы Урала / Ред. А.В. Соколов. М.: Наука, 1964б. 328 с.
- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 6. Районы Поволжья / Ред. А.В. Соколов. М.: Наука, 1966. 360 с.
- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 9. Районы Западной Сибири / Ред. А.В. Соколов. М.: Наука, 1968. 383 с.
- Агрохимическая характеристика почв СССР. Т. 13. Центральные области нечерноземной зоны РСФСР / Ред. А.В. Соколов. М.: Наука, 1972. 272 с.
- Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 287 с.
- Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Телеснина В.М.* Содержание углерода в залежных почвах различных природно-климатических зон европейской части России // Ноосфера. 2017. № 1. С. 128–142.
- Городний Н.Г.* Действие различных доз и сочетаний навоза и минеральных удобрений в свекловичном севообороте // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов / Ред. П.Г. Найдин. М.: МСХ СССР, 1960. С. 86–125.
- Горшков П.А.* Результаты опытов по изучению системы удобрения свекловичного севооборота на слабо выщелоченном черноземе // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов / Ред. П.Г. Найдин. М.: МСХ СССР, 1960. С. 262–321.
- Демкин В.А.* Палеопочвоведение и археология: интеграция в изучении истории природы и общества. Пушкино: ПНЦ РАН, 1997. 213 с.
- Дубровина И.А.* Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1523–1534.
- Иванов И.В., Табанакова Е.Г.* Изменение мощности гумусового горизонта и эволюция черноземов Восточной Европы в голоцене (механизмы, причины, закономерности) // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1029–1042.
- Кирюшин В.И., Кирюшин С.В.* Агротехнологии. СПб: Лань, 2015. 463 с.
- Кононова М.М.* Органическое вещество почвы: его природа, свойства и методы изучения. М.: АН СССР, 1963. 314 с.
- Кудяров В.Н.* Азотно-углеродный баланс в почве // Почвоведение. 1999. № 1. С. 73–82.
- Кудяров В.Н.* Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
- Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. и др.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Любарская Л.С.* Влияние навоза и минеральных удобрений при длительном систематическом применении на урожай культур и плодородие почвы // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов / Ред. П.Г. Найдин. М.: МСХ СССР, 1960. С. 430–470.
- Мухина И.М., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П.* Влияние биоугля на эмиссию закиси азота и эффективность использования удобрений // Мат. междунар. науч.-техн. конф. “Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве” (Минск, 17–18 октября 2019 г.). Минск: Беларуская навука, 2019. С. 150–154.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 253 с.
- Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Бучкина Н.П., Панова Г.Г.* Влияние пожнивных остатков с различным отношением C/N на эмиссию закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1251–1259.
- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М. и др.* Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 211–220.
- Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Соболев Ф.С., Чернецкий А.И.* Действие различных доз и сочетаний навоза и минеральных удобрений в свекловичном севообороте // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов / Ред. П.Г. Найдин. М.: МСХ СССР, 1960. С. 126–143.

- Хлыстовский А.Д.* Плодородие почвы при длительном применении удобрений и известии. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Шевелев М.П.* Обогащение почвы навозом и фосфатами в зерновом севообороте на выщелоченном черноземе // Влияние длительного применения удобрений на плодородие почвы и продуктивность севооборотов / Ред. П.Г. Найдин. М.: МСХ СССР, 1960. С. 144–168.
- Шевцова Л.К.* Гумусное состояние и азотный фонд основных типов почв при длительном применении удобрений: Автореф. дис... докт. биол. наук. М.: МГУ, 1988. 48 с.
- Ali E.F., Al-Yasi H.M., Kheir A.M.S., Eissa M.A.* Effect of biochar on CO₂ sequestration and productivity of pearl millet plants grown in saline sodic soils // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2021. V. 21. № 2. P. 897–907. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00409-z>
- Berhane M., Xu M., Liang Z.Y. et al.* Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: a meta-analysis // *Glob. Change Biol.* 2020. V. 26. № 4. P. 2686–2701. <https://doi.org/10.1111/gcb.15018>
- Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Balashov E.V.* Soil physical properties and nitrous oxide emission from agricultural soils // *Advances in Agrophysical Research / Eds S. Grundas, A. Stepniewski. L.: IntechOpen, 2013. P. 193–220.*
- Clark M., Hastings M.G., Ryals R.* Soil carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils amended with manure-derived biochar // *J. Environ. Qual.* 2019. V. 48. № 3. P. 727–734. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.10.0384>
- Cooper H.V., Sjögersten S., Lark R.M., Mooney S.J.* To till or not to till in a temperate ecosystem? Implications for climate change mitigation // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16. P. 054022.
- Dewi R.K., Fukuda M., Takashima N. et al.* Soil carbon sequestration and soil quality change between no-tillage and conventional till soil management after 3 and 11 years of organic farming // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2022. V. 68. № 1. P. 133–148. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1997552>
- Ding W., Luo J., Li J. et al.* Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N₂O and fertilizer-induced N₂O emissions from an intensively cultivated soil // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 465. P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.020>
- Doran J.W.* Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. V. 44. P. 765–771. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400040022x>
- El-Naggar A., El-Naggar A.H., Shaheen S.M. et al.* Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, potential environmental risk: a review // *J. Environ. Manag.* 2019. V. 241. P. 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044>
- Fan J.L., McConkey B.G., Liang B.C. et al.* Increasing crop yields and root input make Canadian farmland a large carbon sink // *Geoderma.* 2019. V. 336. P. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.004>
- Houlton B.Z., Morford S.L., Dahlgren R.A.* Convergent evidence for widespread rock nitrogen sources in earth's surface environment // *Science.* 2018. V. 360. P. 58–62. <https://doi.org/10.1126/science.1257888>
- 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 T.F. Stocker et al. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
- Jia S.X., Liang A.Z., Zhang S.X. et al.* Effect of tillage system on soil CO₂ flux, soil microbial community and maize (*Zea mays* L.) yield // *Geoderma.* 2021. V. 384. P. 114813. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114813>
- Jian J.S., Du X., Reiter M.S., Stewart R.D.* A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping // *Soil Biol. Biochem.* 2020. V. 143. P. 107735. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107735>
- Kan Z.R., Liu Q.Y., Virk A.L. et al.* Effects of experiment duration on carbon mineralization and accumulation under no-till // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. Art. 104939. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104939>
- Kan Z.R., Liu W.X., Liu W.S. et al.* Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: a global synthesis and perspective // *Glob. Chang. Biol.* 2022. V. 28. № 3. P. 693–710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15968>
- Kowalenko G.G., Cameron D.R.* Nitrogen transformation in soil plant system in three years of field experiments using tracer and non-tracer methods on an ammonium-fixing soil // *Canad. J. Soil. Sci.* 1978. V. 58. № 2. P. 195–208.
- Kudeyarov V.N.* Mobility of fixed ammonium in soils. Terrestrial nitrogen cycles // *Ecol. Bull.* 1981. № 33. P. 281–286.
- Kurganova I.N.* Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems: interim report, IR-02–070. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. P. 02–070.
- Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2010. V. 62. № 5. P. 497–505. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00467.x>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena.* 2015. V. 133. P. 461–466.
- Li X.S., Zhu W.L., Xu F.Y. et al.* Organic amendments affect soil organic carbon sequestration and fractions in fields with long-term contrasting nitrogen applications // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2021. V. 322. P. 107643. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107643>
- Majumder S., Neogi S., Dutta T. et al.* The impact of biochar on soil carbon sequestration: meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages // *J. Environ. Manag.* 2019. V. 250. Art. 109466. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109466>
- Mellilo J.M., Prentice I.E., Farquhar G.D. et al.* Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate // *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses / Eds R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. P. 445–481.*
- Morford S.L., Houlton B.Z., Dahlgren R.A.* Direct quantification of long-term rock nitrogen inputs to temperate forest ecosystems // *Ecology.* 2016. V. 97 (1). P. 54–64.
- Mustafa A., Hu X., Shah S.A. et al.* Long-term fertilization alters chemical composition and stability of aggregate-associated organic carbon in a Chinese red soil: evidence from aggregate fractionation, C mineralization, and ¹³C NMR analyses // *J. Soil. Sediments.* 2021. V. 21. № 7. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03444-4>

- P. 2483–2496.
<https://doi.org/10.1007/s11368-021-02944-9>
- Oladele S.O., Adetunji A.T.* Agro-residue biochar and N fertilizer addition mitigates CO₂-C emission and stabilized organic carbon pools in a rain-fed agricultural cropland // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2021. V. 9. № 1. P. 76–86.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.09.002>
- Palma R.M., Rímolo M., Saubidet M.I., Conti M.E.* Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils // *Biol. Fertil. Soils.* 1997. V. 25. № 2. P. 142–146.
<https://doi.org/10.1007/s003740050294>
- Pelster D.E., Chantigny M.H., Royer I. et al.* Reduced tillage increased growing season N₂O emissions from a fine but not a coarse textured soil under the cool, humid climate of eastern Canada // *Soil Till. Res.* 2021. V. 206. Art. 104833.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104833>
- Reinsch T., Struck I.J.A., Loges R. et al.* Soil carbon dynamics of no-till silage maize in ley systems // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. Art. 104957.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104957>
- Rothamsted research: guide to the classical and other long-term experiments, datasets and sample archive. Harpenden Herts, UK: Lawes Agricultural Trust Co. Ltd, 2006 (reprinted 2012). 52 p.
- Soon Y.K.* Nitrogen cycling involving non-exchangeable ammonium in gray luvisol // *Biol. Fertil. Soils.* 1998. V. 27. P. 425–429.
- Sperow M.* Marginal cost to increase soil organic carbon using no-till on U.S. cropland // *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change.* 2019. V. 24. № 1. P. 93–112.
<https://doi.org/10.1007/s11027-018-9799-7>
- Tarnocai C., Canadell J.D., Schuur E.A.G. et al.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles.* 2009. V. 23. P. GB2023.
<https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
- Tian H., Lu C., Yang J. et al.* Global patterns and controls of soil organic carbon dynamics as simulated by multiple terrestrial biosphere models: current status and future directions // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2015. V. 29. № 6. P. 775–792.
<https://doi.org/10.1002/2014gb005021>
- Tian J., Pausch J., Yu G. et al.* Aggregate size and their disruption affect ¹⁴C-labeled glucose mineralization and priming effect // *Appl. Soil Ecol.* 2015. V. 90. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.014>
- Wang Y.M., Li M., Jiang C.Y. et al.* Soil microbiome-induced changes in the priming effects of ¹³C-labelled substrates from rice residues // *Sci. Tot. Environ.* 2020. V. 726. Art. 138562.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138562>
- Waqas M.A., Li Y., Lal R. et al.* When does nutrient management sequester more carbon in soils and produce high and stable grain yields in China? // *Land Degrad. Devel.* 2020. V. 31. P. 1926–1941.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3567>
- Wiesmeier M., Mayer S., Burmeister J. et al.* Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: a reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios // *Geoderma.* 2020. V. 369. P. 114333.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114333>
- WMO greenhouse gas bulletin: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2018. № 15. 2019. 8 p.
- Yang S., Sun X., Ding J. et al.* Effects of biochar addition on the NEE and soil organic carbon content of paddy fields under water-saving irrigation // *Environ. Sci. Poll. Res. Int.* 2019. V. 26. № 8. P. 8303–8311.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04326-8>
- Yevdokimov I.V., Blagodatsky S.A.* Nitrogen immobilization and remineralization by microorganisms and nitrogen uptake by plants: interactions and rate calculations // *Geomicrobiol. J.* 1993. V. 11. № 3–4. P. 185–193.
<https://doi.org/10.1080/01490459309377950>

Soil Carbon Sequestration: Facts and Challenges (Analytical Review)

V. N. Kudyarov^{a, b, *}

^a*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science,
 Russian Academy of Sciences, Pushchino Scientific Center for Biological Research,
 Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, Russia*

^b*Institute of Phytopathology, Russian Academy of Sciences,
 Bolshiye Vyazemy, Moscow Region, Russia*

*e-mail: vnikolaevich2001@mail.ru

The presented work is devoted to the assessment of carbon sequestration depending on the methods of enrichment the soil with organic materials. The level of additional sequestration in soils must be determined by taking into account the costs of net primary (NPP) and ecosystem (NEP) production of photosynthesis by the amount of the new additions of the mineralization-resistant organic carbon—net biome production (NBP). Carbon stock into easily mineralizable forms of NEP determines the short-term sequestration of carbon. Medium- and long-term sequestration is the accumulation of carbon in the soil in the NBP pool. The transformation of organic carbon in the system of NPP→NEP→NBP pools is a long process of humification and is accompanied by a loss of carbon (CO₂) into the atmosphere.

Keywords: soil, carbon sequestration, carbon cycles, carbon balance, organic fertilizers, soil respiration