

УДК 631.433.5:631.81

ЭМИССИЯ CO₂ КАК МЕРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. В. Н. Башкин*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия***E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

Принимая во внимание накопленный за последние годы огромный массив данных о выбросах парниковых газов (в первую очередь CO₂, метана, или парниковых газов (ПГ)), можно рассмотреть проблему энергоэффективности (выбросы углекислого газа происходят, прежде всего, при сжигании топлива, а также метана и CO₂ в качестве прекурсоров для азотных удобрений) в цепочке от производства удобрений до их логистики, применения, производства и утилизации отходов. При этом выбросы ПГ можно рассматривать как меру энергоэффективности при оценке жизненного цикла минеральных удобрений. Соответствующие примеры приведены в обзоре.

Ключевые слова: производство удобрений, выбросы углерода, азота, энергоэффективность, оценка жизненного цикла, логистика, внесение удобрений, переработка сельскохозяйственных отходов.

DOI: 10.31857/S0002188124060109, **EDN:** CWTKCI

ВВЕДЕНИЕ

В производстве минеральных удобрений к основным загрязняющим веществам (поллютантам), выбрасываемым в атмосферу, относятся NO_x, CH₄, SO₂, SO₃, H₂SO₄, CO, соединения фтора, NH₄NO₃. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот требует больших затрат энергии, получаемой обычно за счет сжигания органического топлива с выделением значительных объемов парниковых газов. При этом некоторые предприятия (например, по производству карбамида) частично используют образующийся CO₂ в качестве исходного сырья, что позволяет уменьшить эмиссию диоксида углерода. Тем не менее работа большинства предприятий сопровождается выбросами в атмосферу, связанными со сжиганием природного газа, угля или дизельного топлива в турбинах, котлах, компрессорах и других системах для выработки энергии и тепла. При этом размеры эмиссии поллютантов зависят от используемого сырья и вида топлива, которые и определяют в большей степени технику и технологию получения энергии.

При этом одним из важнейших факторов является энергоэффективность. Например, в России длительный этап восстановления и модернизации производственных мощностей отрасли минеральных удобрений, введенных в эксплуатацию в 1970–1980-х гг., завершился к концу 2010 г. Дальнейшее увеличение действующих мощностей и более глубокая модернизация сопряжены с резким

увеличением капитальных затрат. Что касается энергоэффективности, то основные принципы регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности заложены в Федеральном законе от 23 ноября 2009 г. № 261 ФЗ “Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации” и ГОСТ Р ИСО 50001-2012.

Потребление энергоресурсов неразрывно связано с проблемой экологического воздействия на окружающую среду, которое оказывают выработка энергии и транспорт, а также с выбросами парниковых газов (ПГ) в результате сжигания углеводородного топлива. При производстве азотных удобрений расходуется значительная часть энергии, в частности, на связывание атмосферного азота, необходимого для производства аммиака. При производстве нитрата аммония, азотной кислоты из аммиака, серной кислоты из серы вырабатываются полезные энергоресурсы, которые можно использовать для производства электроэнергии, применяя для этого паровые турбины. Для выпуска фосфорсодержащих удобрений требуется энергия для производства фосфорной кислоты, ее дальнейшей переработки в готовые продукты. Несмотря на то что в промышленности по производству удобрений всегда расходуется большое количество энергии в процессах, которые проходят при высоких температурах и давлении, эти производства стали более энергосберегающими благодаря

усовершенствованию применяемых технологий. Предприятия по выпуску аммиака, построенные в 1990 г., потребляли приблизительно на 30% меньше энергии на 1 т азота по сравнению с теми, которые были введены в эксплуатацию в 1970 г.

Среди предприятий рассматриваемой отрасли промышленности, те предприятия, которые выпускают серную кислоту (из серы) и азотную кислоту, являются поставщиками энергоресурсов, таких как пар высокого, среднего или низкого давления или горячая вода. Если, при рассмотрении идеализированного варианта, всю тепловую энергию преобразовать в электроэнергию посредством паровой турбины, тогда поставки на сторону полезных энергоресурсов значительно сократятся, но при этом выработанная электроэнергия будет использована непосредственно в производстве. Это уже рассматривается как один из путей повышения энергоэффективности.

Например, крупнейший российский производитель минеральных удобрений — ПАО «ФосАгро» к 2028 г. планирует снизить выбросы парниковых газов на 14% по сравнению с 2018 г. Для этого у него есть программа энергоэффективности для энергосбережения, сокращения потребления и потерь энергии [1].

Следует при этом отметить, что при производстве минеральных удобрений может увеличиваться выброс CO_2 , но это компенсируется за счет высоких урожаев. Сельское хозяйство — одна из областей производства, значительно влияющая на выброс парниковых газов, а также потребляющая большое количество энергии. При этом энергопотребление и выбросы парниковых газов зачастую связаны прямо пропорциональной зависимостью. Следовательно, наиболее важным путем снижения выбросов ПГ является увеличение энергоэффективности сельского хозяйства.

По данным [2], проведение в России энергосберегающей политики, совершенствование и реализация новых энергоэкономных технологий, энергоэффективного оборудования и техники, рациональное использование энергоресурсов позволят снизить удельные энергозатраты при производстве сельхозпродукции, т.е. снизить энергоемкость производства и выйти на запланированный уровень ее снижения — к 2030 г. — на 60 и к 2035 г. — на 65%.

Можно выделить 4 направления энергосбережения в сельском хозяйстве:

- абсолютное сокращение объемов потребляемой энергии за счет рационализации методов хозяйствования, повышения интенсификации, внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий производства;

- замещение дорогостоящих и дефицитных энергоресурсов менее дефицитными;
- расширение области использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- изменение системы управления организацией, построение и внедрение в практику организационно-экономического механизма энергосбережения.

Принимая во внимание огромный массив данных, накопленных за последние годы о выбросах парниковых газов (в первую очередь CO_2 и метана), можно рассмотреть проблему энергоэффективности (выбросы углекислого газа происходят, прежде всего, при сжигании топлива, а также при переработке метана как сырья для азотных удобрений) в цепочке от производства удобрений до их логистики, применения, образования и утилизации отходов.

Поскольку подавляющая часть выбросов ПГ обусловлена процессами энергопотребления, рост энергоэффективности играет определяющую роль в воздействии на уровень эмиссии. За период 1990–2017 гг. энергоемкость ВВП России снизилась на 30%, энергоемкость мирового ВВП — на 35%. Это было ключевым фактором сдерживания выбросов CO_2 , тогда как вклад процесса снижения углеродоемкости потребляемой энергии (зависит от топливной структуры) пока остается существенно менее значимым. В перспективе ведущая роль фактора энергоэффективности сохранится [3].

Цель работы — анализ сопряженных процессов потребления энергии и выбросов парниковых газов в системе «производство минеральных удобрений — транспортировка — внесение в агроэкосистемах — утилизация агроотходов» и оценка факторов энергоэффективности. При этом размеры выбросов ПГ на всех этапах жизненного цикла можно рассматривать как меру энергоэффективности.

ПРОИЗВОДСТВО УДОБРЕНИЙ

Производство минеральных удобрений, как часть химической промышленности (и в то же время тяжелой промышленности), является одной из наиболее энергоемких отраслей и может играть решающую роль в реализации обязательств по энергосбережению и сокращению выбросов. Показано, что среди факторов, которые могут привести к снижению выбросов CO_2 в тяжелой промышленности Китая, должны учитываться структура промышленности, инвестиции в основной капитал и исторически сложившиеся размеры эмиссии поллютантов. При этом энергоэффективность является ключевым фактором сокращения

выбросов углекислого газа. Реализация политики обязательного сокращения выбросов может снизить выбросы CO₂ [4].

На долю химической промышленности в России приходится $\approx 2\%$ потребления первичных энергоресурсов страны и 2.5% общего объема выбросов парниковых газов, из которых 60% составляют выбросы от производственных процессов и сжигания топлива. Оставшиеся 40% относятся к косвенным выбросам, связанным с потреблением электроэнергии и тепла. Ожидается, что на протяжении 2-х ближайших десятилетий отрасль продолжит быстрый рост, и для ограничения роста энергопотребления ей необходимо будет внедрять рентабельные меры по энергосбережению. При реализации всех выявленных мер в 2030 г. выбросы парниковых газов могут быть меньше сегодняшнего уровня. Однако в отсутствие указанных изменений выбросы возрастут приблизительно на 85%.

Повышение энергоэффективности предполагает установку более энергоэффективного оборудования на химических заводах, оптимальное использование катализаторов и применение более эффективных технологий, снижающих энергопотребление. Самой высокой рентабельностью и наиболее значительным потенциалом отличается комплекс мер по повышению энергоэффективности оборудования химических предприятий (двигателей конвейеров, смесительных машин и др.). С их помощью можно добиться экономии энергоресурсов в размере 6.3 млн т условного топлива (у.т.) и сократить выбросы на 6.5 млн т CO₂-экв/год в 2030 г. Также необходима реализация целого ряда мер по совершенствованию производственных процессов и катализаторов, которые помогут снизить интенсивность выбросов в химических процессах. Важнейшим представляется улавливание и/или разрушение закиси азота (N₂O) в отходящих газах при производстве азотной кислоты. С помощью определенных технологий фильтрации (каталитического разложения или каталитического восстановления) удастся ускорить разложение N₂O в отходящих газах. Реализация этой меры, хотя и позволит сократить выбросы, но является высоко затратной. Далее, необходимо изменение структуры топливного баланса химической отрасли с целью перехода на топливо, выделяющее меньшее количество парниковых газов при сжигании. В ряде регионов мира это потребует перехода химических предприятий с нефти и угля на газ. Можно также рассматривать внедрение технологии улавливания и хранения углекислого газа. Это развивающаяся технология, которая, как ожидается, позволит улавливать углекислый газ, выделяющийся при сгорании топлива и в ходе производственных процессов на химических предприятиях (например, при производстве аммиака).

Еще одним фактором, определяющим энергоэффективность производства минеральных удобрений и снижение выбросов ПГ, является учет климатических рисков. К ним относятся риски, связанные с изменениями в природных процессах и явлениях в результате изменения климата (физические факторы). Также они связаны с принятием политических, экономических, финансовых и иных решений правительствами, международными организациями, финансовыми структурами, объединениями производителей и потребителей, другими общественными организациями с целью снижения темпов климатических изменений. Это может быть обеспечено на основе сокращения выбросов парниковых газов путем введения углеродного регулирования, ограничений на использование ископаемого топлива и потребление электроэнергии, полученной из невозобновляемых источников энергии (переходные факторы). При этом следует подчеркнуть, что в настоящее время климатические изменения происходят прежде всего за счет природных процессов (изменение солнечной активности, изменения угла наклона орбиты Земли, вулканическая активность и пр.). Антропогенные процессы играют подчиненную роль [5].

В ПАО “ФосАгро” в 2020 г. на основании принципов устойчивого развития, опубликованных в Кодексе поведения контрагента, была разработана система оценки поставщиков по ESG-критериям, включающим вопросы охраны окружающей среды, социальной ответственности и управления качеством. Оценка основывается на данных анкеты “Показатели устойчивого развития по закупкам”, содержащей 61 ESG-показатель, и механизме учета этих показателей в зависимости от категории поставщиков/подрядчиков. Данная система оценки включает в себя критерии/требования для 6-ти основных направлений устойчивого развития, что позволяет оценить деятельность контрагентов с разных сторон: экологии, охраны труда, управления персоналом, разрешительной документации, контроля качества, качества управления.

Увеличение использования “зеленой” электроэнергии является частью климатической стратегии ПАО “ФосАгро”, в рамках которой только для парниковых газов к 2028 г. планируется снижение эмиссии на 14% от базового уровня 2018 г. во всех 3-х охватах. При этом удельная эмиссия парниковых газов первого охвата уже снижена за период с 2018 по 2021 г. на 16%, в то время как валовая эмиссия за этот период сократилась почти на 4% при непрерывном росте производства.

В состав мероприятий по повышению энергоэффективности ПАО “ФосАгро” также входит поэтапный переход к возобновляемым источникам энергии. В 2021 г. осуществлен ввод в действие

1-го комплекса из 2-х солнечных электростанций по 40 кВт. В настоящее время обеспеченность электроэнергией собственного производства достигла 40.3%. Компания планирует снизить выбросы ПГ до 794.7 тыс. т CO₂-экв к 2028 г. в охвате 1 и до 893.3 тыс. т CO₂-экв в охвате 2 [1].

Стратегией энергоэффективности определены следующие цели (табл. 1):

- сокращение выбросов парниковых газов при увеличении производства продукции;
- повышение энергетической и экологической эффективности основных технологических процессов;
- снижение энерго- и углеродоемкости выпускаемой продукции;
- выход на новые формирующиеся рынки зеленой продукции.

Как результат, удельное потребление энергии на единицу производимой продукции и полуфабрикатов снизилось с 5.58 ГДж/т в 2018 г. и составляло в 2021 г. 5.06 ГДж/т. При этом произошло снижение потребления всех видов природного топлива, даже потребление наиболее экологически чистого природного топлива — метана снизилось за этот период до 0.075 м³/т продукции.

В 2022 г. Кировский филиал ПАО «ФосАгро» (г. Киров, Россия) увеличил объем «зеленой» электроэнергии, используемой в производстве, до 300 млн кВт ч. Таким образом, 17.8% его продукции в прошлом году было выпущено с использованием «зеленой» электроэнергии, выработанной на гидроэлектростанциях ТГК-1. ПАО «ФосАгро» последовательно работает над снижением углеродного следа своей продукции. В том числе это касается требований к поставщикам товаров и услуг.

Рассмотрим еще несколько примеров российских предприятий, производящих минеральные удобрения. Например, ПАО «Минеральные удобрения» (г. Пермь, Россия) является одним

из крупнейших производителей азотных удобрений Урала и Западной Сибири. Оно производит аммиак безводный сжиженный, аммиак водный технический, карбамид, а также жидкую низкотемпературную двуокись углерода и жидкую двуокись углерода высокого давления.

Для этого предприятия было предложено строительство фотоэлектрической солнечной электростанции на его территории, которая предназначена для генерации электрического тока с последующим его использованием в пределах внутренней электросети предприятия. Эта электростанция может устанавливаться как на крыше здания, так и на поверхности свободных земельных участков. Возможна установка аккумуляторных батарей, которые обеспечат стабильную работу резервированной нагрузки в случае отключения внешнего питания [6].

Другой пример направлен на оценку входящих и выходящих продуктов. На одном из крупнейших производителей азотных удобрений в Пермском регионе выполнен сбор данных о материальных потоках производства аммиака [7]. Расчет углеродного следа производства аммиака на рассматриваемом предприятии выполнен в соответствии с методическими указаниями, утвержденными в России (Приказ Минприроды РФ № 300 от 30 июня 2015 г.). Согласно данному документу, обязательному учету на производстве аммиака подлежит такой парниковый газ, как диоксид углерода (CO₂). Установлено, что в год производство образует 2.433 млн т CO₂. Согласно расчетным данным, на 1 т аммиака приходится 2.027 т CO₂, что удовлетворяет требованиям критериев проектов устойчивого (в том числе «зеленого») развития в РФ — совокупный выброс меньше 2.104 т CO₂/т аммиака. Но для уточнения величины совокупного выброса требуется более детальное рассмотрение источников электроэнергии, а также анализ косвенных выбросов CO₂ на 1 т аммиака (охват 2). В табл. 2 показано, что расход природного газа на 1 т аммиака

Таблица 1. Перечень и основные характеристики действующих метрик, которые были введены для мониторинга показателей деятельности в рамках климатической стратегии ПАО «ФосАгро»

Наименование метрик, единица измерения	Годы			
	2018	2019	2020	2021
Объем общих глобальных выбросов (охват 1 + 2) на единицу валюты общей выручки, т CO ₂ -экв/млн долл. США	1552.3	1467.1	1621.6	975.5
Объем общих глобальных выбросов (охват 1 + 2) на эквивалент одного сотрудника на полную ставку, т CO ₂ -экв.	331.0	321.6	319.6	304.0
Закупаемая электроэнергия на единицу производимой продукции и полуфабрикатов, тыс. кВт ч/т	0.071	0.069	0.068	0.066
Затраты на повышение энергоэффективности, млн руб.	Нет данных	82.0	10 500.0	17.4
Доля поставщиков сырья, предоставивших необходимые исходные данные о выбросе парниковых газов (охват 3), %	Нет данных		4.0	2.7

Таблица 2. Материальные потоки при производстве 1 т аммиака (АО “Азот” ОХК “Уралхим”, г. Березники) [8]

Входящие потоки			Выходящие потоки		
наименование	единица измерения	на 1 т аммиака	наименование	единица измерения	на 1 т аммиака
Природный газ	м ³	1275	Выбросы NO _x	кг	1.86
Азот	м ³	38	Выбросы CO ₂	кг	1.45
Электроэнергия	кВт ч	159			
Подпиточная вода	м ³	3.65			

составляет 1275 м³, при этом выбросы CO₂ равняются 1.45 кг, что меньше требуемого показателя.

По результатам оценки выбросов CO₂, а также согласно анализу технологии и данным об основных материальных потоках получения аммиака, выявлены основные направления разработки “зеленых” проектов, позволяющие снизить углеродный след от производства аммиака на рассмотренном предприятии:

- переработка извлеченной фракции CO₂ (например, вовлечение в процесс производства карбамида, использование для создания защитной среды при сварке металлов, для сушки литейных форм, для пожаротушения);
- разработка и внедрение технологий, позволяющих снижать потребление сырья при производстве аммиака (например, установка выделения горючих газов из фракции CO₂ в отделении очистки от CO₂, реконструкция компрессора синтезгаза и паровой турбины);
- повышение энергоэффективности как следствие отмеченных выше факторов.

Резюмируя приведенные в этом разделе материалы можно заключить, что в настоящее время производство минеральных удобрений вследствие технологических процессов даже с использованием нормативно-технической документации (НДТ) связано с эмиссией ПГ. Однако повышение энергоэффективности производства влечет за собой неминуемое сокращение выбросов ПГ.

ЛОГИСТИКА УДОБРЕНИЙ

Транспортная логистика — это оптимизация управления транспортировкой грузов, т.е. выполнения операций перемещения и хранения сырья, полуфабрикатов, объектов незавершенного производства, готовой продукции из мест происхождения в места потребления. К примеру, при перемещении товарных партий минеральных удобрений от производителей и коммерческих посредников

к потребителям используют комбинацию автомобильного, железнодорожного и водного видов транспорта (специализированные вагоны и транспортные средства). Основная цель транспортной логистики в АПК, как и логистики в целом, — снижение затрат на физическое товародвижение. Эта цель достигается путем соблюдения следующих основополагающих принципов: максимально полное использование грузоподъемности или грузоместимости транспортных средств, организация доставки грузов без складов (по технологии кросс-докинга), кратность транспортной единицы груза единицам заказа, отправки и складирования (например, использование контейнера), стандартизация тары, экономия от масштаба и дальности перевозки грузов, т.к. в этом случае расходы на 1 т-км минимальны, концентрация грузопотоков на отдельных каналах распределения товаров и отказ от неэкономичных каналов, доставка грузов по технологии “точно в срок”. Реализация этих принципов на практике позволяет добиться максимальной экономической эффективности для транспортного, производственного или торгового предприятия. Это также определяет энергоэффективность транспорта минеральных удобрений и оптимизирует выбросы ПГ.

Автомобильный транспорт производит значительное количество выбросов ПГ, таких, как диоксид углерода (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O). Расчеты выбросов от транспортных средств основаны на данных об общем потреблении топлива. Удельная теплота сгорания и коэффициенты выбросов для каждого типа топлива должны быть рассчитаны с учетом специфики используемого топлива. С учетом протяженности перемещения минеральных удобрений оценивают как энергопотребление, так и выбросы ПГ.

Методика расчета выбросов от сжигания топлива от автомобильного транспорта подразделяется на 2 части: оценка эмиссий двуокиси углерода и оценка эмиссий других газов. Оценка выбросов CO₂ лучше всего рассчитывается на основе количества и типа сгораемого топлива и содержания углерода в нем. Количество окисленного углерода практически не варьирует в зависимости

от применяемой технологии сжигания топлива. Оценка выбросов других газов с парниковым эффектом более сложна, т.к. зависит от типа автомобиля, топлива, характеристик эксплуатации транспортного средства, типа технологии контроля за выхлопными газами.

Оценка выбросов диоксида углерода от сжигания топлива автомобильным транспортом. Расчет выбросов диоксида углерода от сжигания топлива в двигателях внутреннего сгорания рекомендуют проводить на основе учета видов топлива и типов двигателя. Выбросы углекислого газа по этому методу оценивают следующим образом. Сначала оценивают потребление каждого вида топлива по типам транспорта (легковой, грузовой, автобусы, спецмашины), затем – общие выбросы CO_2 путем умножения количества потребленного топлива на фактор выбросов для каждого типа топлива и типа транспорта по формуле:

$$E = M \times K1 \times \text{ТНЗ} \times K2 \times 44/12,$$

где E – годовой выброс CO_2 в весовых единицах (т/год); M – фактическое потребление вида топлива за год (т/год); $K1$ – коэффициент окисления углерода в топливе (показывает долю сгоревшего углерода) (табл. 3); ТНЗ – теплотворная нетто-величина (Дж/т) (табл. 3); $K2$ – коэффициент выбросов углерода (т С/Дж) (табл. 3); $44/12$ – коэффициент для пересчета выбросов углерода C в двуокись углерода CO_2 .

На основании этих данных рассмотрим пример оценки влияния конструкции тракторов на выбросы ПГ. В табл. 4 приведены сравнительные расчеты при выполнении транспортных работ в составе тракторов Doutz-Fahr Agrottron L720 и “Беларус 2022” с прицепом ПСТ-12, тракторов John Deere 6110В и “Беларус 82.1” с прицепом 2ПТС-6 в пределах фермерского хозяйства. Тракторы Doutz-Fahr Agrottron L720 и “Беларус 2022” одного тягового класса, отличаются более совершенной коробкой перемены передач (КПП) у зарубежного аналога, способной реализовать высокие эксплуатационные свойства. Также более совершенна КПП у трактора John Deere 6110В, она имеет 4 диапазона по 6 передач, что способствует более рациональному использованию эксплуатационных свойств по сравнению с трактором “Беларус 82.1” [9].

Представленные расчеты показывают, что на выброс ПГ существенное влияние оказывает система

машин в целом, а также отдельно взятые тракторы, зерно- и кормоуборочные комбайны и другие энергетические средства. При этом очень важное значение имеет правильное комплектование агрегатов как с точки зрения снижения расхода топлива, снижения выбросов CO_2 , CH_4 , NO_x , так и негативного воздействия на почву – переуплотнение, эрозия, необоснованное применение СЗР и др.

Рассмотрим также сравнение транспортных параметров, определяющих расход энергии и выбросы ПГ, при 2-х различных системах выращивания пшеницы [10]. Известно, что оптимизированную оценку жизненного цикла проводят для сравнения потенциала глобального потепления (ПГП) и использования первичной энергии при производстве и доставке пшеницы, выращиваемой по традиционной и органической технологии в США. Оценивают различия в воздействии сельскохозяйственных ресурсов, выращивания зерна и транспортных процессов.

Оценка логистики и детальный анализ транспортных цепей с учетом расстояний были проведены с помощью интернет-интерфейса указания маршрутов по шоссе. В табл. 5 приведено потребление первичной энергии (Дж) и потенциал глобального потепления (ПГП, измеряемый в г CO_2 -экв/100-летний период времени) при оптимизированной системе производства и доставки пшеницы в количестве 670 г, необходимых для 1 кг буханки хлеба. Оценены традиционная система выращивания пшеницы с использованием минеральных удобрений и органическая система.

Поэтому можно заключить, что хотя органическая система выращивания пшеницы требует несколько меньшего использования энергии и сопровождается меньшими показателями ПГП, эти различия в целом не существенны. Показано, что ПГП буханки органического пшеничного хлеба весом 1 кг примерно на 30 г CO_2 -экв меньше, чем у обычной буханки. Однако необходимо учитывать и транспортное плечо. Так при более длинных транспортных маршрутах доставки зерна пшеницы (>420 км) различия между 2-мя сравниваемыми системами выращивания практически исчезают. Кроме того, важное значение имеют другие факторы, например, накопление углерода в почве и выбросы закиси азота из двух систем.

Таблица 3. Коэффициенты для пересчета сожженного топлива в выбросы CO_2 для автотранспорта

Виды топлива	Теплотворная нетто-величина низшая (ТНЗ), ТДж/тыс. т	Коэффициент выбросов углерода (K2), т С/ТДж	Фракция окисленного углерода (K1)
Бензин	44.21	19.13	0.995
Дизельное топливо	43.02	19.98	0.995
СНГ	47.17	17.91	0.99
Природный газ	34.78	15.04	0.995

Таблица 4. Показатели, характеризующие транспортные агрегаты и выбросы ПГ

Основные показатели	Транспортные агрегаты			
	Беларус 82.1 + 2ПТС-6	John Deer 6110B + 2ПТС-6	Беларус 2022 + ПСТ-12	Doutz-Fahr Agrotron L720 + ПСТ-12
Грузоподъемность, кН	60.02	60.02	86.05	86.05
Средняя скорость движения, км/ч	22.7	25.1	26.2	27.7
Коэффициент использования скорости движения	0.77	0.77	0.77	0.77
Тяговое сопротивление прицепа с грузом, кН	4.35	4.35	6.06	6.06
Часовая производительность, т/ч	4.86	5.38	8.3	8.95
Сменная производительность, т	34	37.6	58.1	62.6
Расход топлива на перевезенную 1 т, кг/т	2.62	2.08	2.7	1.73
Выбросы CO ₂ на перевезенную 1 т, кг/т	8.216	6.522	8.446	5.425

Таблица 5. Оценка величин использования энергии и глобального потенциала потепления при применении 2-х систем выращивания пшеницы

Процесс	Традиционная (контроль)		Органическая (сравнение)	
	Использование энергии (J)	Глобальный потенциал потепления, ПГП (г CO ₂ -экв)	Использование энергии (J)	Глобальный потенциал потепления, ПГП (г CO ₂ -экв)
Производство удобрений азотных	820	46	21	1.7
фосфорных	770	42	0.0	0.0
Производство пестицидов	50	3.8	21	1.7
Транспорт удобрений и пестицидов	22	1.6	0.0	0
Использование энергии	29	2.1	31	2.2
Производство энергии	22	1.5	25	1.8
Выращивание кукурузы	7.0	0.5	5.4	0.4
Вспашка	490	36	650	48
Производство энергии	450	32	600	42
N ₂ O эмиссия из почв	37	4.4	49	5.8
ГПП от хранения навоза	п.а.	96	п.а.	96
Производство оборудования	п.а.	п.а.	п.а.	5.1
Сумма	85	7.3	85	7.3
Транспортировка муки (2000 км)	1400	190	790	160
Использование энергии	1900	140	1900	140
Производство топлива	1600	110	1600	110
Всего	310	25	310	25
	3300	330	2700	300

ПРИМЕНЕНИЕ УДОБРЕНИЙ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

В последние годы энергоемкость сельхозпроизводства снижалась, но доля энергозатрат в себестоимости неуклонно возрастала. Например, стоимость потребленных энергоресурсов в себестоимости основных

видов сельхозпродукции в среднем составляла 26–35% (в 1985–1990 г. – 7–15%). Высокие показатели энергозатрат свидетельствуют об опережающем росте стоимости энергоносителей и низкой эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, что отрицательно сказывается на себестоимости продукции (табл. 6).

Таблица 6. Энергоемкость производства сельхозпродукции в России [11]

Вид продукции	Электроэнергия, кВт ч/ц	Топливо (теплота), кг у.т./ц	Суммарные энергозатраты (энергоемкость), кг у.т./ц	Доля энергозатрат в себестоимости продукции, %
Молоко	34	19	23	34.5
Свинина	250	190	220	26.5
Говядина	170	80	100	12.0
Яйца (1000 шт.)	95	28	38	34.0
Зерновые	13	12	14	31.5

Существенными источниками выбросов в сельском хозяйстве России выступают прямой выброс закиси азота из сельскохозяйственных почв (52 557.0 тыс. т CO_2 -экв) и выбросы CH_4 при внутренней ферментации домашних животных (39 090.4 тыс. т CO_2 -экв), при этом по сравнению с 1990 г. их объемы соответственно сократились на 38.4 и 62.8%. В 2019 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы составил 59.6, CH_4 – 39.5, CO_2 – $\approx 0.8\%$ (табл. 7) [12].

Экологически безопасным и устойчивым методом ведения сельского хозяйства выступает органическое сельское хозяйство, ключевыми особенностями которого являются использование технологий вторичной переработки органического углерода в питательные вещества: прямая переработка навоза, эффективное компостирование, утилизация остатков. Применение органических удобрений исключает выбросы парниковых газов при внесении минеральных удобрений и при их производстве.

Благоприятно сказываются на энергоэффективности и выбросах ПГ такие агротехнологии как мульчирование, уменьшение эрозии почв и повышение их плодородия, увеличение оборота углерода за счет рециркуляции питательных веществ. В животноводстве смягчить выбросы ПГ может использование энергетически насыщенных кормов в рационе питания, изменение продолжительности, времени и места приема пищи и питья животных. Однако при органических системах земледелия, как правило, снижается производство товарной продукции по сравнению с традиционными системами, использующими минеральные удобрения.

В целом, ресурсосберегающее земледелие базируется на таких принципах, как минимальная механическая обработка почвы, предшествующая высадке семян, а также при внесении удобрений, уборке урожая и других операциях; сохранение растительных остатков на поверхности почвы (мульчирование), позволяющее защитить почву

Таблица 7. Источники выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве России в 1990–2019 гг., млн т CO_2 -экв

Категория источников	Газ	Год						Динамика сокращения (2019/1990), %
		1990	2000	2010	2017	2018	2019	
Внутренняя ферментация сельскохозяйственных животных	CH_4	105.2	51.2	40.5	39.4	39.4	39.1	37.2
	CH_4	13.4	5.6	4.5	5.3	5.4	5.4	40.3
Системы сбора, хранения, использования навоза и помета	Прямой выброс N_2O	8.5	4.1	4.0	4.0	3.9	3.6	42.4
	Косвенный выброс N_2O	7.0	3.2	3.1	3.3	3.4	3.2	45.7
Выращивание риса	CH_4	0.9	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	66.7
	Прямой выброс N_2O	85.3	46.4	43.5	51.2	50.8	52.6	61.7
Выбросы от сельскохозяйственных земель	Косвенный выброс N_2O	17.1	6.8	6.6	8.5	8.4	8.7	50.9
	CO_2	10.2	1.0	0.8	0.8	1.0	0.9	8.8
Известкование почв и внесение мочевины	CO_2	10.2	1.0	0.8	0.8	1.0	0.9	8.8
Всего		247.5	118.8	106.2	113.1	112.9	114.2	46.1

от водной и ветровой эрозии, повысить ее продуктивность, улучшить физические, химические и биологические свойства почвы; использование дифференцированных севооборотов для борьбы с сорняками, болезнями и вредителями, улучшения продуктивности земель под воздействием отдельных культур; эффективное управление пастбищными угодьями и др. Комплексное управление почвой, водными и биологическими ресурсами способствует сохранению, улучшению и повышению эффективности их использования.

Наиболее энергоемким технологическим процессом является обработка почвы, на которую в среднем расходуется 30–40% потребляемой энергии [13]. Снижение этих затрат, например, использование разработанного авторами предплужника, кинематически связанного с поворотной рамой плуга, позволяет уменьшить как энергетические затраты, так и выбросы ПГ на 10% при проведении вспашки.

Исследования по влиянию обработок почвы на запасы гумуса, проведенные в черноземной зоне Сибири (Россия), показали, что оптимальной является дифференцированная обработка почвы, при которой содержание гумуса в слое 0–30 см за 39 лет изменилось с 8.12 до 8.56%. Использование постоянной отвальной обработки почвы приводило к снижению содержанию гумуса в слое 20–30 см с 7.73 до 7.23%, однако его увеличение отмечено в слое 0–20 см с 8.38 до 8.52%. Безотвальная и нулевая обработки приводили к повышению содержания гумуса в слое 0–10 см, однако привели к снижению содержания гумуса в слоях почвы как в 0–20 см, так и в 0–30 см. Исходя из этого, можно сделать вывод, что переход на технологии No-Till в этой зоне для усиления секвестрации углерода в черноземной почве является малоэффективным приемом, хотя это и способствует энергоэффективности вследствие снижения затрат на пахоту [14–18].

Снижению выбросов парниковых газов способствует также сокращение потребления ископаемых топливно-энергетических ресурсов, применение возобновляемых источников энергии в органическом сельском хозяйстве, прежде всего солнечной и ветряной энергии. Использование жидкого биотоплива (биодизеля из масличных культур) или в смеси с обычным топливом однозначно имеет преимущества по сравнению с обычным топливом по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу. Кроме того, с одной стороны, углекислый газ поглощается при выращивании самих масличных культур, но, с другой стороны, их возделывание приводит к прямым и косвенным выбросам парниковых газов. Важное значение имеет фактор смены землепользования. Поэтому масличные культуры в умеренном климате также нужно выращивать с применением органических технологий

для удовлетворения собственных энергетических потребностей.

Аналогичные данные получены при оценке эмиссии N₂O и CO₂ на плантациях тропической масличной пальмы. Установлено существенное влияние почвенных условий выращивания, при этом применение удобрений не всегда приводило к увеличению эмиссии ПГ [19].

На основании многолетних исследований был оценен баланс углекислого газа в севооборотах с сахарной свеклой [20]. Авторы рассчитали, что этот показатель складывался из поглощения CO₂ основной и побочной продукцией, растительными остатками, а также закрепления при гумификации навоза, фиксации карбонатами почвы, поступления с осадками из атмосферы (приходные статьи); разложения растительных остатков и гумуса, дыхания почвы (увеличивались при внесении минеральных удобрений), известкования, разложения части навоза, выноса поверхностными и подземными водами, минерализации гумуса (расходные статьи). Сухое вещество сахарной свеклы при урожайности 55.0–60.0 т/га в условиях ЦЧР (Россия) способно связывать основной продукцией (корнеплодами) ≈24.8–28.5 т CO₂/га. Основные агроприемы возделывания культуры (запашка ботвы и растительных остатков, известкование, внесение навоза и минеральных удобрений) способствуют эмиссии в атмосферу порядка 8.7–11.7 т CO₂/га/год, при этом происходит связывание в органическом веществе почвы (при условии внесения навоза) порядка 4.4–11.2 т CO₂/га/год (по разным оценкам). Снижение минерализации запасов гумуса, органических удобрений, растительных остатков с помощью рациональной обработки почв, внесения научно обоснованных доз удобрений, оптимизации почвенной кислотности способно снизить эмиссию CO₂ в почвах свекловичных севооборотов. По предварительным расчетам, баланс углекислого газа при возделывании и переработке сахарной свеклы в ЦЧР является либо отрицательным (т.к. большое количество CO₂ связывается продукцией), либо близким к равновесному, т.е. свекловодство не является загрязнителем атмосферы выбросами CO₂, а при определенных условиях оно, возможно, соответствует требованиям карбонового земледелия.

Значительное количество исследований выполнено для оценки влияния различных энергоэффективных агротехнологий и улучшенных “зеленых” удобрений на эмиссию парниковых газов из почвы в агроэкосистемах. Например, применение азотных удобрений с добавлением гуминовой кислоты приводит к контролируемому высвобождению азота, что сопровождается повышением урожайности и усвояемости азота, повышением эффективности

использования азота и сокращением выбросов парниковых газов [21].

Детальный обзор ретроспективного применения удобрений в Китае приведен в работе [22]. Была проведена количественная оценка выбросов ПГ при производстве и внесении азотных минеральных удобрений при выращивании пшеницы и кукурузы в различных провинциях и сельскохозяйственных регионах Китая. Авторами показано, что в период 2015–2017 гг. усредненные дозы азота под пшеницу и кукурузу на высокогорных полях Китая были равны 222 и 197 кг/га соответственно. При этом в целом было внесено под эти культуры 12.63 млн т/год. В масштабе страны выбросы парниковых газов, связанные с производством минеральных азотных удобрений, оценивались в 41.44 и 59.71 млн т CO_2 /год для изученных культур. В то же время при внесении этих удобрений эмиссия N_2O вследствие процессов денитрификации, по оценкам авторов, составила 35.82 и 69.44 Gg/год. Сделан вывод, что производство и применение минеральных азотных удобрений для пшеницы и кукурузы на китайских пахотных землях является важным источником выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве.

Был также проведен полевой эксперимент для изучения влияния стабилизированного азотного удобрения в сочетании со свиным навозом на урожайность риса и выбросы закиси азота (N_2O) и метана (CH_4) [23]. Были изучены 4 способа применения различных комбинаций минеральных и органических удобрений: мочевины (U), свиной навоз (PM), $PM + U$, $PM +$ стабилизированное азотное удобрение (мочевина + 1% NBPT (N -(n -бутил) тиофосфорный триамид), 1% PPD (фенилфосфородиамидат) и 2% DMPP (3,4-диметилпиразолфосфат)) или $PM + U + I$. Показано, что по сравнению с вариантом PM , вариант $PM + U$ значительно увеличивал совокупные выбросы N_2O , но при внесении $PM + U + I$ не выявлено существенных отличий от PM по кумулятивным выбросам N_2O . Это свидетельствовало, что применение стабилизированного азотного удобрения в сочетании с PM эффективно снижало выбросы N_2O . Суммарная эмиссия CH_4 при внесении $PM + U + I$ была меньше, чем при внесении PM и $PM + U$. Следовательно, стабилизированное азотное удобрение в сочетании с PM может эффективно снижать и выбросы CH_4 . Урожайность риса в вариантах $PM + U$ и $PM + U + I$ существенно не отличалась от урожайности в вариантах внесения U и PM . Соответственно, сделан вывод, что местное традиционное внесение азота и возврат PM могут обеспечить достаточное количество азота для роста риса. Суммарный размер эмиссии ПГ в масштабе производства (yield-scaled emissions, YSE) в варианте PM был самым высоким, в то время

как в варианте $PM + U + I$ произошло значительное снижение величин YSE .

Выявлено, что эмиссия N_2O из агроземов никогда не превышала 5 мг N_2O /га/сут, если почва содержала <10 мг доступного $N_{\text{мин}}$ /кг почвы. Внесение в почвы азота с удобрениями практически всегда приводило к увеличению кумулятивного потока N_2O из почв. Максимально большие кумулятивные потоки N_2O из почв были отмечены при внесении навоза крупного рогатого скота, что было связано не только с поступлением в почвы большого количества доступного N , но также и с поступлением доступного C и влаги. Внесение в почвы навоза приводило к увеличению пространственной неоднородности эмиссии N_2O из почв, что существенно увеличивало ошибку измерений. Эмиссионный фактор (Φ), рассчитанный как доля азота, потерянного в форме N_2O , в % от общего количества азота, внесенного с удобрениями, для дерново-подзолистой супесчаной почвы в разные годы исследования был наибольшим для почв, получающих высокие дозы N с минеральными удобрениями (от $N90$) и варьировал в разные годы от 0.5–1.8%. При внесении зеленых или органических удобрений Φ в проведенных экспериментах не превышал 0.62% [24].

Резюмируя этот раздел, следует подчеркнуть, что в современной литературе накоплен огромный массив данных оценки эмиссии ПГ при выращивании различных культур в различных регионах мира. В рамках данного обзора можно отметить, что рациональное внесение минеральных удобрений так же, как и их различных комбинаций с органическими, приводит к увеличению урожаев выращиваемых культур и росту продуктовой безопасности. В то же время применение удобрений приводит практически повсеместно к во многом неизбежному росту эмиссии различных парниковых газов. Например, при внесении азотных удобрений происходит увеличение углерод- и азотминерализующей способности почвенного органического вещества ($ПОВ$). Это сопровождается ростом эмиссии как углекислого газа, так и оксидов азота. Аналогичный эффект проявляется при денитрификации как внесенного азота минеральных удобрений, так и минерализуемого азота $ПОВ$. В рисовых агроэкосистемах выбросы этих ПГ дополняются эмиссией метана. В целом агроэкосистемы являются чистым источником CO_2 . Поэтому вопрос о связи величин выбросов ПГ и энергоэффективности в агроэкосистемах обязательно должен рассматриваться в контексте роста урожайности выращиваемых культур.

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ

Во всем мире ежедневно образуется большое количество сельскохозяйственных отходов (*AWs*) в связи с ростом населения, численность которого в 2022 г. превысила 8 млрд. Необходимо разработать стратегию их своевременного использования. Это также повысит устойчивость сельского хозяйства и продовольственную безопасность. *AWs* генерируются из различных источников, среди которых растительные остатки, агропромышленный комплекс, животноводство и аквакультура. Основным компонентом растительных остатков и агропромышленных отходов является целлюлоза (наиболее распространенный биополимер), лигнин и гемицеллюлоза (лигноцеллюлозная биомасса). Отходы и их переработка являются глобальной проблемой. Необходимо решение, основанное на рециклинге. При этом рециклинг может быть направлен либо на получение энергии, либо на возврат в биогеохимический круговорот биофильных элементов, накопленных в отходах. Это будет способствовать как энергоэффективности сельского хозяйства в целом, так и снижению выбросов ПГ [25].

Используя в качестве примера систему накопления сельскохозяйственных отходов в провинции Цзянси (Китай), было исследовано, в какой степени данные оценки потоков ресурсов и показатели, характеризующие снижение выбросов парниковых газов, могут быть использованы для выработки политических мер в области устойчивого использования агроотходов [26]. Показано, что, когда доля агроотходов увеличивается с 4.41 до 8.61%, текущий потенциал снижения выбросов парниковых газов впоследствии увеличивается примерно в 3.3 раза. При этом максимальный потенциал снижения выбросов ПГ может составлять 16.44×10^8 т CO₂-экв в этой провинции.

Сельскохозяйственные отходы в значительной мере связаны с биоразлагаемым бытовым мусором. В этом мусоре запасается большое количество азота. Было отмечено, что биоразлагаемый бытовой мусор, например, в Китае в основном включал пищевые отходы, макулатуру и древесную щепу в количестве 31.56, 29.55 и 6.45×10^6 т/год соответственно. Поэтому запасы азота в Китае в этих отходах составляли 65.31×10^4 , 6.80×10^4 и 3.81×10^4 т/год. Запасы азота в пищевых отходах давали 86% от общего объема запасов азота в биоразлагаемом бытовом мусоре, что эквивалентно 11% от объема фактического поглощения минеральных азотных удобрений (6.20×10^6 т/год) сельскохозяйственными растениями в Китае [27].

Еще одной важной проблемой является рециклинг животноводческих отходов. Для этого важны оценки содержания азота (N) и фосфора (P) в твердом органическом удобрении, получаемом

из навоза крупного рогатого скота, например, на Северо-Западе России [28]. В исследовании сравнивали следующие подходы: нормативные показатели для России, данные, рассчитанные методом баланса массы, средние экспериментальные данные содержания N и P в навозе крупного рогатого скота, анализ содержания азота и фосфора в органическом удобрении. Рассматривали выбранный животноводческий комплекс с 1250 головками и выходом навоза 70 т/сут. Установлена разница между расчетными и экспериментальными данными, которая составляла максимум 10%, но экспериментальные данные и установленные нормы отличались более чем на 15%. Следовательно, даже увеличение содержания питательных веществ в органическом удобрении на 10% позволяет увеличить площади удобряемых сельскохозяйственных угодий с 451 до 526 га.

Для проведения расчета выбросов парниковых газов от животноводческих ферм необходимы исходные данные о поголовье скота. Расчеты были проведены для животноводческой фермы, в которой имеется 6 тыс. голов КРС [29]. Расчетным способом определена эмиссия метана от систем хранения биомассы КРС на животноводческой ферме, которая составила 27 600 кг CH₄/год. В пересчете на CO₂-экв эмиссия метана была равна 579.6 т/год. Эмиссия N₂O при хранении и использовании биомассы для изученной животноводческой фермы была равна 845.17 N₂O кг/год. В пересчете на CO₂-экв это составило 262.0 т/год. Сумма выбросов CH₄ и N₂O в CO₂-экв от систем сбора и хранения биомассы для этой фермы составила 841.6 т CO₂-экв/год.

По разработанной авторами программе расчета выхода биогаза из отходов животноводческих ферм рассчитано суточное производство биогаза. Для данной животноводческой фермы суточный выход биогаза составил 9850 м³/сут или 3.4 млн м³/год.

Переработка органических отходов в сельском хозяйстве способствует циркулярной экономике, возвращая в почву питательные вещества и уменьшая потребность в удобрениях на минеральной основе [30]. Также использование навоза позволяет создавать органические системы с регулируемым и оптимизируемым потоком ПГ [31]. В табл. 8 показаны коэффициенты ПГ для пастбищных экосистем.

Основной вклад в образование отходов в России создают пищевая и перерабатывающая промышленности. При анализе данных Министерства сельского хозяйства за 2015–2017 гг. выявлено, что на 15 635 тыс. т сельскохозяйственных культур приходится ≈ 335 тыс. т первичных и вторичных отходов, получаемых в результате технологических процессов преобразования сырья в пищевую

Таблица 8. Коэффициенты выбросов парниковых газов (ПГ) для пастбищных экосистем, ед. CO₂-экв/кг

Приход	ед. CO ₂ -экв/кг	ПГП, кг CO ₂ -экв/ед.	Источник
Трудозатраты	ч	0.36	[32]
Механизмы	МДж	0.071	[33]
Электричество	кВт	0.608	[24]
Топливо			
Дизель	л	2.76	[33]
Удобрения			
навоз	кг	0.040–0.063	[35–37]
муниципальные компосты	кг	0.031	[38]
азот (N)	кг	5.29	[39]
фосфор (P ₂ O ₅)	кг	0.52	[39]
калий (K ₂ O)		0.38	[39]
Средства защиты растений			
инсектициды	кг	5.1	[40]
фунгициды	кг	3.9	[41]
гербициды	кг	6.3	[41]
Оросительная вода	м ³	0.27	[32]
Пластиковые трубы	кг	2.2	[42]

Таблица 9. Количество энергии, образующейся при сжигании разных видов растительного сырья

Вид растительного сырья	Масса отходов, млн т/год	Теплота сгорания, МДж/т	Количество образующейся энергии при сгорании общей суммы отходов, млн ГДж/год
Лузга подсолнечника	7.1	17 000	12.08
Лузга рисовая	1.9	13 300	25.92
Остатки кукурузы	2.6	14 650	38.18
Солома	41.4	15 700	65.09
Хлопчатник	7.7	14 530	1.118
Зернобобовые	65.1	14 650	9.54
Итого			151.93

продукцию [43]. Авторами приведены данные расчетов и подбора оптимального варианта использования отходов сельского хозяйства с получением наибольшей энергоэффективности и минимальными показателями углеродного следа.

Одним из альтернативных вариантов использования отходов является сжигание сухого остатка в качестве топливных палет. Были рассмотрены физические свойства солоmistых остатков. Плотность солоmistого остатка массой 400 кг и объемом в 1 м³ будет составлять 0.4 кг/л. При этом масса сухого вещества составит 100 кг. Были найдены данные теплоты сгорания (МДж/т) для представленных видов остатков растительного сырья. Коэффициент пересчета выбросов CO₂ при сжигании древесных отходов составляет 0.068 т CO₂/т древесных отходов [44]. На основе расчетов показано, что

суммарное количество образующейся энергии при сгорании общей суммы отходов может составить 151.93 млн ГДж/год (табл. 9).

Применив полученные данные, можно рассчитать, что сжигание 1 т растительного сырья (солоmistых остатков) соответствует сжиганию 424 м³ природного газа — невозобновимого ископаемого топлива. Авторами проведен пересчет в энергетические единицы на основе коэффициентов выбросов диоксида углерода для разных видов сжигаемого топлива (табл. 10).

Стоит учесть, что сжигание отходов сельского хозяйства дает нулевой ПГП, т.к. CO₂, поступивший в воздух при горении, ранее был поглощен из атмосферы в процессе роста.

Еще одним из возможных методов переработки отходов сельского хозяйства является анаэробное

Таблица 10. Сравнительная оценка выбросов CO₂ при сжигании природного газа и растительного сырья с учетом коэффициентов выбросов

	Количество отходов, т	Природный газ, м ³
Ед. измерения	1	424
Коэффициент выброса CO ₂ (т/ед.)	100	54.4
Общее количество выбросов CO ₂ , т	100	23 065

сбраживание. Данный процесс представляет собой уменьшение исходного объема отходов с использованием биологической переработки в условиях безвоздушного пространства с последующим образованием биогаза. Анаэробное сбраживание зачастую связано с рекуперацией метана (CH₄) и сжиганием с целью получения энергии.

Таким образом, на 200 млн т отходов сельского хозяйства приходится 1739.7 млн МВт/ч/год чистой энергии (с учетом обслуживания самого комплекса теплом и электроэнергией, а также возможностью продажи потребителю). Средняя выработка ТЭЦ составляет порядка 3.5 млрд кВт ч/год [44]. Следовательно, показатели выработки электроэнергии меньше в 4 раза для биокомплекса, однако в генерации энергии участвует растительное сырье, а не ископаемое топливо, что позволяет в значительной мере использовать объем отходов сельскохозяйственного сырья. Проведенные расчеты показали, что наиболее энергоэффективными способами являются сжигание топливных брикетов из отходов (≈ 152 ПВт ч/год), а также генерация биотоплива (1740 ГВт ч/год).

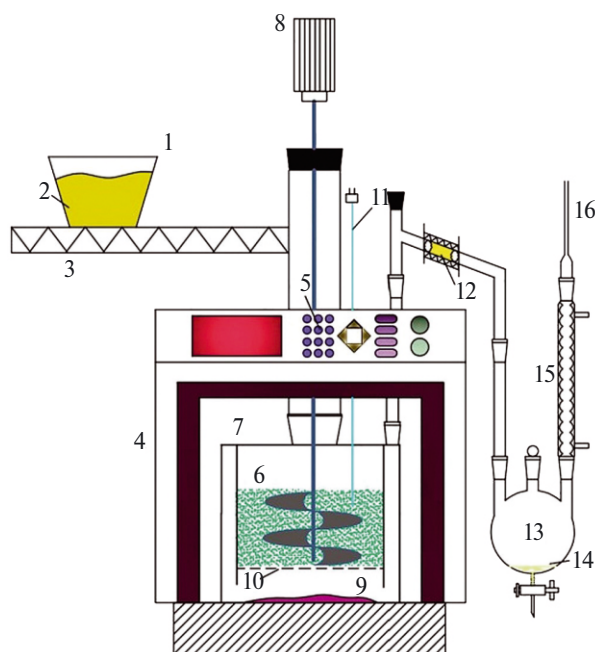
При этом показано, что можно дополнительно использовать каталитические добавки, и это положительно влияет на процесс горения, а также снижает эмиссии поллютантов [45]. Авторы исследования рассчитали, что применение предлагаемых каталитических добавок (СаО и KMnO₄) значительно повышает среднюю температуру в камере сгорания, делает процесс горения более эффективным и более полным с уменьшением выбросов оксидов углерода. В лучшем варианте добавление СаО уменьшило выбросы СО на 41%, и аналогичным образом добавление KMnO₄ в гранулы из биомассы уменьшило выбросы СО на 45%.

Еще одним примером рециклинга является производство биочара из агроотходов. Рассмотрим один из многочисленных примеров. Например, технология микроволновой торрефикации представляет собой новый метод нагрева органической массы, который позволяет теплу равномерно проникать в сырье [46].

Солома, навоз и другие сельскохозяйственные отходы, обрабатываемые с использованием процессов торрефикации, могут быть использованы в качестве сырья для производства биоугля. В свою очередь различные виды биоугля имеют широкий спектр применения, начиная от ремедиации загрязненных почв и заканчивая созданием новых удобрений на его основе. Это представляет энергоэффективным приемом снижения эмиссии ПГ.

Типичная экспериментальная система для микроволновой торрефикации показана на рис. 1.

Система включает в себя микроволновую печь, реактор, конденсатор, питатель, устройство подачи газа, термопару и жидкостный фракционирующий [47]. Перед запуском процесса исходное сырье добавляют в реактор, через который продувают газ-носитель для удаления воздуха из устройства. В других модификациях инертный газ продувает пиролизный пар в конденсатор газа. Процесс легко контролируется и не требует устройств для смешивания или псевдооживления. Кроме того, технология микроволновой торрефикации обладает высокой масштабируемостью и подходит для переработки многих видов биомассы в больших объемах [48, 49].

**Рис. 1.** Принципиальная схема системы торрефикации с использованием микроволновой печи [50].

ОБСУЖДЕНИЕ

Производительность сельского хозяйства основана на процессе фотосинтеза, который формирует первичную продукцию. В производственной сельскохозяйственной сфере считается, что сочетание технологий по сокращению выбросов и увеличению накопления углерода в почве может позволить этому сектору достичь чистых отрицательных выбросов при сохранении высокой производительности. Однако установлено, что агроэкосистемы являются чистым источником эмитируемых ПГ [51, 52]. Современные агротехнологии возделывания пропашных культур ответственны за $\approx 5\%$ выбросов парниковых газов в США и ЕС. В ряде стран (Россия, Китай, Индия и др.) эти величины даже больше. Чтобы сократить выбросы ПГ, значительные усилия сосредоточены на внедрении таких приемов как No-tillage, внесении больших доз органических и “зеленых” удобрений и в целом — на переходе к органическому низкоуглеродному земледелию. При этом потенциалом сокращения выбросов в значительной степени пренебрегали. Энергоэффективность также не всегда рассматривали в качестве ключевого процесса управления эмиссиями ПГ. По оценкам [53], а также других исследователей [54–58], благодаря сочетанию инноваций в цифровом сельском хозяйстве, генетике сельскохозяйственных культур и микробов, а также рекультивации возможно сокращение выбросов парниковых газов на 71% (1744 кг CO_2 -экв/га) при выращивании пропашных культур в течение следующих 15 лет (рис. 2).

Важно подчеркнуть, что рост величин энергоэффективности будет сопровождаться сокращением выбросов ПГ. Такая стратегия может снизить барьер

для широкого внедрения, пройдя несколько этапов со значительными улучшениями. В конечном итоге это будет способствовать поддержке сельским хозяйством своей важнейшей социальной функции обеспечения общества продовольствием, в то же время принося экологические выгоды.

Одной из важнейших практик реализации такого подхода является производство и широкое применение необходимого ассортимента комплексных удобрений для сельского хозяйства [59]. Основные преимущества новых форм комплексных удобрений заключаются в первую очередь в сбалансированности минерального питания растений, которую очень трудно обеспечить при использовании простых, стандартных форм минеральных удобрений. Во-вторых, обеспечивается снижение энергозатрат на 65–70% на внесение удобрений в почву за счет уменьшения проходов технических средств по полю. Это особенно актуально в весенний период, т.к. при этом существенно снижается переуплотнение почвы, неизбежно возникающее при использовании энергонасыщенных тракторов и машин для внесения удобрений. Кроме этого, обеспечивается более высокая равномерность распределения удобрений по поверхности почвы, что определяет лучшие условия минерального питания растений. Переход в аграрной отрасли на широкомасштабное применение новых форм комплексных минеральных удобрений позволит вывести растениеводческую отрасль сельского хозяйства на новый, более высокий и качественный уровень развития и обеспечит дальнейшее повышение продуктивности сельскохозяйственных культур без увеличения в целом потребности в удобрениях. Важным фактором при этом является повышение энергоэффективности агроэкосистем в целом.

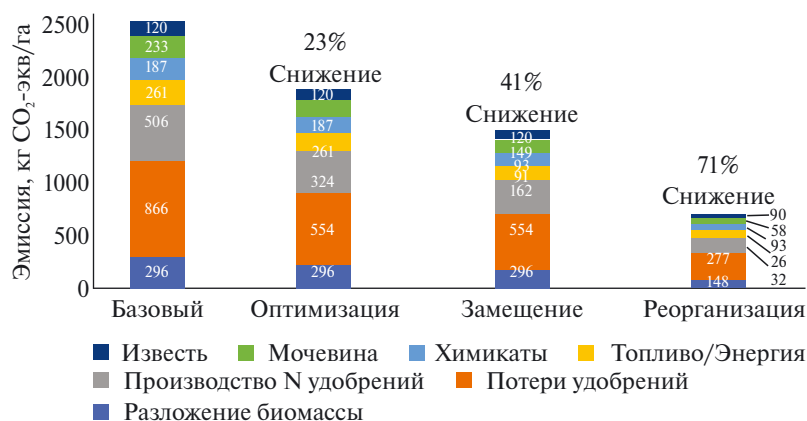


Рис. 2. Технические усовершенствования способствуют сильному снижению выбросов ПГ при производстве зерна. Числа — кг CO_2 -экв/га и разделены источником выбросов. Этапы (оптимизация, замещение и реорганизация) различаются по технической готовности стимулирующих инноваций. Реализация этапа оптимизации в значительной степени возможна с использованием существующих технологий, в то время как технологии этапа замещения могут быть доступны через 2–5 лет, технологии этапа реорганизации — через 5–15 лет.

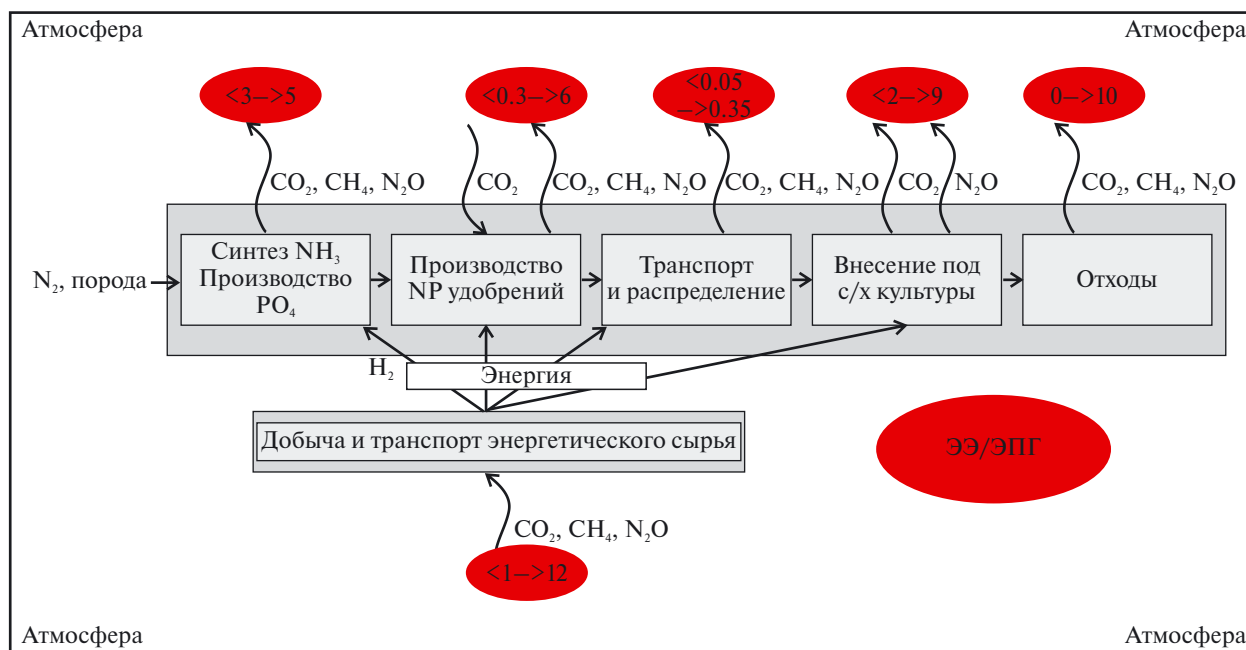


Рис. 3. Оценка жизненного цикла выбросов парниковых газов при производстве и использовании азотных и фосфорных удобрений и взвешенные коэффициенты выбросов для основных процессов. Атмосферный азот (N_2) соединяется с водородом с использованием энергии, получаемой из ископаемого топлива. Полученный NH_3 реагирует с CO_2 , азотной, соляной или фосфорной кислотой с получением различных удобрений. Эти удобрения транспортируются различными способами перед внесением на пахотные земли. Сплошная линия – расход материалов и N-удобрений, пунктирная – обмен ПГ между цепочкой производства и использования удобрений, включая переработку агроотходов, и атмосферой.

При этом основополагающей стратегией проведения исследований эмиссии углекислого газа как мере энергоэффективности на всех этапах для системы удобрений “производство – логистика – внесение – утилизация отходов” является оценка жизненного цикла как энергии, так и эмиссии ПГ (рис. 3).

Рассмотрим жизненный цикл, коэффициенты выбросов ПГ и использования различных источников энергии в системе “производство – логистика – внесение – утилизация отходов”. На основании данных [60], на каждую 1 т азота, произведенного и используемого на пахотных землях в Китае как в составе простых удобрений (мочевина), так и сложных (например, диаммофоса), выбрасывается в среднем 13.5 т CO_2 -экв. При этом наибольшие величины эмиссии ПГ наблюдают в технологических процессах синтеза аммиака. Это связано с энергоемким характером процесса производства минеральных удобрений, так же и в целом с химической промышленностью, где технологические процессы требуют высоких температуры и давления. Кроме того, важное значение имеет энергоемкость исходных теплоисточников. Например, уголь, используемый в ряде стран как основной источник энергии, имеет низкую энергоэффективность. Установки, работающие на угле, имеют коэффициент выбросов >5 т CO_2 -экв/т NH_3 - N^{-1}

по сравнению с <3 т CO_2 -экв/т NH_3 - N^{-1} для установок, работающих на природном газе [60–63]. Также имеет значение и масштаб производства. Например, при использовании того же источника энергии крупномасштабные установки выделяют несколько меньше ПГ на единицу N, чем средне- или мелкомасштабные установки. Следующий этап включает блок “производство удобрений”, направленный на преобразование аммиака и фосфатов в различные N-P-удобрения; процессы имеют взвешенный коэффициент выбросов 0.9 т CO_2 -экв/т N^{-1} , но широкий диапазон от 0.3 до >6 т CO_2 -экв/т N^{-1} [1, 52].

Даже в современных условиях уголь обеспечивает 86% энергии, потребляемой в вышеуказанных процессах. Выбросы метана, связанные с добычей угля, оказывают эффект глобального потепления в размере 11.4 г CO_2 -экв/МДЖ (10^6 Дж) по сравнению с <2 г CO_2 -экв/МДЖ при использовании природного газа или нефти [60, 62].

Взвешенный коэффициент выбросов может составлять 2.2 т CO_2 -экв/т удобрений при добыче и транспортировке ископаемого топлива, используемого в промышленности по производству минеральных удобрений (включая 1.8 т CO_2 -экв/т N^{-1} от добычи энергии, используемой для синтеза аммиака, и 0.4 т CO_2 -экв/т N^{-1} при его использовании

для производства, например, N-P-удобрений). Для условий Китая это составляет 16% от общего объема выбросов $13.5 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$ [60]. С учетом различных источников сырья эти величины могут широко варьировать: $<1\text{--}>12 \text{ т CO}_2\text{-экв/т произведенных и использованных удобрений}$.

В процессе логистики и при транспортировке азотных и фосфорных удобрений коэффициенты эмиссии составляют в среднем $0.1 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$ (разброс величин — от $<0.05\text{--}>0.25$).

Оценки эмиссии ПГ при выращивании сельскохозяйственных культур значительно варьируют ($<2\text{--}>9 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$). Например, размеры денитрификации азота могут быть в пределах от 5 до 90% от содержания минерального азота в почвах агроэкосистем [51]. Значительно варьируют также выбросы аммиака из щелочных почв, размеры вымывания нитратов и величины сухих и влажных выпадений. Для условий Китая коэффициент эмиссии составляет $5.2 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$, включая прямые выбросы N_2O ($4.3 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$) в результате нитрификации и денитрификации в почве и косвенные выбросы ($0.9 \text{ т CO}_2\text{-экв/т N}^{-1}$) [60].

В конце цепочки находятся выбросы парниковых газов при переработке и/или использовании агроотходов. Как отмечено выше, на переработку отходов существенно влияют используемые технологические процессы, имеющие очень большой разброс величин их энергоэффективности. Это сказывается и на величинах относительной эмиссии ПГ (от практически отсутствия до высоких величин (рис. 3)). Следовательно, величины эмиссии ПГ являются мерилем энергоэффективности в системе жизненного цикла минеральных удобрений “производство — логистика — внесение — утилизация отходов”.

В контексте глобального изменения климата и с учетом увеличения антропогенных выбросов парниковых газов устойчивость сельскохозяйственных систем может быть повышена за счет повышения эффективности использования энергоресурсов [64, 65]. Рассматриваются различные агротехнологические приемы сокращения выбросов ПГ и увеличения секвестрации углерода. При этом потенциалом сокращения выбросов в значительной степени пренебрегали. Энергоэффективность также не всегда рассматривали в качестве ключевого процесса управления эмиссиями ПГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в обзоре материалы свидетельствуют о ключевой роли энергоэффективности на протяжении всего жизненного цикла в системе “производство — логистика — внесение — утилизация отходов”. Величины эмиссии ПГ при этом выступают лишь в качестве меры данной энергоэффективности.

Далее, переработка агропромышленных отходов и сырья с помощью различных процессов (компостирование, производство биоэнергии, биоуглей, биогеохимическое рециклирование питательных элементов) может также дать существенное снижение эмиссии ПГ. Это также может потенциально привести к выбросам парниковых газов в результате процессов компостирования и транспортировки материалов. Однако эти процессы дают положительный эффект как непосредственно за счет связывания углерода, так и косвенно благодаря предотвращению последствий удаления отходов, улучшению качества почвы и минимизации потерь почвы.

В целом увеличение энергоэффективности в рассматриваемом жизненном цикле удобрений от производства до утилизации агроотходов может существенно снизить роль сельскохозяйственного производства в эмиссии парниковых газов (ПГ). Следует особо подчеркнуть, что снижение потенциала эмиссии ПГ при производстве удобрений зависит от источника используемой энергии, и перевод энергоустановок с угля на газ, и тем более на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), будет наиболее значимым. При выращивании сельскохозяйственной продукции большую роль играют факторы, связанные с применением современных систем земледелия, основанных на точном внесении удобрений, использовании электронных почвенных карт и повышении эффективности использования удобрений, в частности, азота и фосфора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Integrated Annual report of PJSC PhosAgro for 2021. 2022. 360 p. Available from: www.phosagro.ru
2. Тихомиров А.В. Концепция развития систем энергообеспечения и повышения энергоэффективности использования ТЭР в сельском хозяйстве // Вестн. ВИЭСХ. 2016. № 1(22). С. 11–17.
3. Колпаков А.Ю. Энергоэффективность: роль в сдерживании выбросов углекислого газа и определяющие факторы // Пробл. прогнозирования. 2020. № 6. С. 141–154. DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153
4. Ouyang X., Fang X., Cao Y., Sun C. Factors behind CO₂ emission reduction in Chinese heavy industries: Do environmental regulations matter? // Energy Policy. October 2020. № 145. 111765. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111765>
5. Снакин В.В. Динамика глобальных природных процессов и учение о биосфере В.И. Вернадского // Жизнь Земли. 2023. Т. 45. № 1. С. 27–38. DOI: 10.29003/m3147.0514-7468.2023_45_1/27-38
6. Гильманова Р.Б., Осинцев К.В. Разработка триггерационного цикла химических предприятий

- тиях по производству азотных удобрений // Молодой исследователь: Мат-лы 2-й научн. выстав-ки-конф. научн.-техн. и творч. работ студентов. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. 515 с. ISBN 978-5-696-04703-4/166-170
7. *Шатаева А.Л., Ташкинова И.Н.* Оценка эмиссий парниковых газов производства аммиака и выявление направлений разработки и реализации климатических проектов // Химия. Экология. Урбанистика: мат-лы Всерос. научн.-практ. конф. (с междуна-род. участием). В 4-х т. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2022. Т. 1. С. 146–150. URL: https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2022/06/Himiya.-Ekologiya.-Urbanistika.-Tom_1.pdf
8. Информационно-технический справочник по наи-лучшим доступным технологиям 2–2019 “Производ-ство аммиака, минеральных удобрений и неоргани-ческих кислот”. 2019. URL: <http://burondt.ru/index/its-ndt.html> (дата обращения: 08.03.2022).
9. *Иовлев Г.А., Голдина И.И.* Сельское хозяйство, транс-порт и углеродные проблемы // Транспорт. Транс-порт. средства. Экол. 2022. № 1. С. 25–35. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.04
10. *Meisterling K., Samaras C., Schweizer V.* Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat // J. Clean Prod. 2009. № 17. P. 222–230. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.009
11. *Тихомиров А.В., Маркелова Е.А., Ухано-ва В.Ю.* Топливо-энергетические ресурсы на ос-нове энергосберегающих технологий и технических средств в сельском хозяйстве // Сел.-хоз. машины и технол. 2015. № 5. С. 43–48.
12. *Ахметишина Л.Г.* Возможности российского сельско-го хозяйства в снижении выбросов парниковых газов и адаптации к климатическим изменениям // Вестн. Алтай. акад. эконом. и права. 2022. № 1(4). С. 5–14. URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=2129> (дата об-ращения: 13.12.2022).
13. *Семенова Е.И., Семенов Ф.В.* Энергосбереже-ние и повышение энергетической эффективно-сти // Эконом., труд, управл.-е в сел. хоз-ве. 2020. № 3(60). С. 86–91. DOI: 10/33938/203-85
14. *Демина О.Н., Еремин Д.И.* Влияние минеральных удобрений на микрофлору пахотного чернозема ле-состепной зоны Зауралья // Вестн. КрасГАУ. 2020. № 2(155). С. 63–71. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-2-63-71
15. *Еремин Д.И., Ахтямова А.А.* Минерализация гуму-са в пахотном черноземе при использовании мине-ральных удобрений // Земледелие. 2018. № 7. С. 16–18. DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10704
16. *Еремин Д.И., Груздева Н.А., Еремина Д.В.* Изменение гумусового состояния серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато под действием длитель-ной распашки // Почвоведение. 2018. № 7. С. 826–835. DOI: 10.1134/S0032180X18070110
17. *Рзаева В.В., Еремин Д.И.* Влияние основной обра-ботки почвы на содержание гумуса в черноземе вы-щелоченном // АгроФорум. 2021. № 6. С. 38–40.
18. *Еремин Д.И., Фисунов Н.В.* Гумусовое состояние чер-нозема при использовании систем основной обра-ботки почвы // Эпоха науки. 2020. № 24. С. 37–45. DOI: 10.24411/2409-3203-2020-12408
19. *Sakata R., Shimada S., Arai H., Yoshioka N., Yoshioka R., Aoki H., Kimoto N., Sakamoto A., Melling L., Inubushi K.* Effect of soil types and nitrogen fertilizer on nitrous ox-ide and carbon dioxide emissions in oil palm planta-tions // Soil Sci. Plant Nutr. 2014. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.2014.960355>
20. *Минакова О.А., Косякин П.А.* Баланс CO₂ при возде-лывании сахарной свеклы в Российской Федерации (обзор) // Сахар. 2022. № 3. С. 32–37. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2022-3-32-37>
21. *Guo Y., Ma Z., Ren B., Zhao B., Liu P., Zhang J.* Effects of humic acid added to controlled-release fertilizer on summer maize yield, nitrogen use efficiency and green-house gas emission // Agriculture. 2022. № 12. P. 448. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040448>
22. *Chai R., Ye X., Ma C., Wang Q., Tu R., Zhang L., Gao H.* Greenhouse gas emissions from synthetic nitro-gen manufacture and fertilization for main upland crops in China // Carbon Balance Manag. 2019. V. 14. 20. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0133-9>
23. *Wu K.K., Gong P., Zhang L.L., Wu Z.J., Xie X.S., Yang H.Z., Li W.T., Song Y.C., Li D.P.* Yield-scaled N₂O and CH₄ emissions as affected by combined application of stabilized nitrogen fertilizer and pig manure in rice fields // Plant Soil Environ. 2019. № 65. P. 497–502.
24. *Рижия Е.Ю., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Балашов Е.В.* Долгосрочный мониторинг прямой эмиссии закиси азота из суглинисто-песчаных дерново-подзолистых почв // Мат-лы II Международ. научн. конф. “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”, посвящ. памяти акад. Е.И. Ермакова. СПб., 02–04 октября 2019 г. СПб.: АФИ, 2019. С. 117–122.
25. *Macura B., Johannesdottir S.L., Piniewski M., Had-daway N.R., Kvarnstrom E.* Effectiveness of ecotechnol-ogies for recovery of nitrogen and phosphorus from an-aerobic digestate and effectiveness of the recovery prod-ucts as fertilisers: a systematic review protocol // Environ. Evid. 2019. V. 8. P. 29. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0173-3>
26. *Yu B., Liu X., Ji C., Sun H.* Greenhouse gas mitigation strategies and decision support for the utilization of agricultural waste systems: A case study of Jiangxi Province, China // Energy. 2023. V. 265. № С. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126380

27. Wang L., Qin T., Zhao J., Zhang Y., Wu Z., Cui X., Zhou G., Li C., Guo L., Jiang G. Exploring the nitrogen reservoir of biodegradable household garbage and its potential in replacing synthetic nitrogen fertilizers in China // *Peer J.* 2022. V. 10. e12621. DOI: 10.7717/peerj.12621
28. Briukhanov A., Luostarinen S., Trifanov A., Shalavina E., Kozlova N., Vasilev E., Subbotin I. Revision of the total nitrogen and phosphorus content in a cattle manure-based organic fertilizer in North-West Russia // *Agricult. Food Sci.* 2021. V. 30. P. 44–52. <https://doi.org/10.23986/afsci.99191>
29. Колосова Н., Монах С. Оценка выбросов парниковых газов при хранении отходов животноводческих ферм // *Инж. сист. и техноген. безопасность.* 2015. Вып. 5(115). С. 49–52.
30. López-Cano I., Luz Cayuela M., Sánchez-García M., Sánchez-Monedero M.A. Suitability of different agricultural and urban organic wastes as feedstocks for the production of biochar. Part 2: Agronomical evaluation as soil amendment // *Sustainability.* 2018. № 10. P. 2077. DOI: 10.3390/su10062077
31. Diacono M., Persiani A., Testani E., Montemurro F., Ciaccia C. Recycling agricultural wastes and by-products in organic farming: biofertilizer production, yield performance and carbon footprint analysis // *Sustainability.* 2019. № 11. P. 3824. DOI: 10.3390/su11143824
32. Ozalp A., Yilmaz S., Ertekin C., Yilmaz I. Energy analysis and emissions of greenhouse gases of pomegranate production in Antalya province of Turkey // *Erwerbs-Obstbau.* 2018. V. 60. P. 321–329.
33. Dyer J.A., Desjardins R.L. Simulated farm fieldwork, energy consumption and related greenhouse gas emissions in Canada // *Biosyst. Eng.* 2003. V. 85. P. 503–513.
34. Khoshnevisan B., Rafiee S., Omid M., Yousefi M., Movahedi M. Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks // *Energy.* 2013. V. 52. P. 333–338.
35. Cadena E., Colón J., Artola A., Sánchez A., Font X. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment // *Inter. J. Life Cycle Assess.* 2009. V. 14. P. 401–410.
36. Fiore A., Lardo E., Montanaro G., Laterza D., Loiudice C., Berloco T., Dichio B., Xiloyannis C. Mitigation of global warming impact of fresh fruit production through climate smart management // *J. Clean Prod.* 2018. V. 172. P. 3634–3643.
37. Pergola M., Persiani A., Palese A.M., Di Meo V., Pastore V., D'Adamo C., Celano C. Composting: The way for a sustainable agriculture // *Appl. Soil Ecol.* 2018. V. 123. P. 744–750.
38. Møller J., Boldrin A., Christensen T.H. Anaerobic digestion and digestate use: Accounting of greenhouse gases and global warming contribution // *Waste Manag. Res.* 2009. V. 27. P. 813–824.
39. Smith A., Brown K., Bates J., Ogilvie S., Rushton K. Waste Management options and climate change. Final report to the European commission, DG Environment. Abingdon, UK: AEA Technology, 2001. P. 224.
40. Lal R. Carbon emission from farm operations // *Environ. Int.* 2004. V. 30. P. 981–990.
41. Graefe S., Tapasco J., Gonzalez A. Resource use and greenhouse gas emissions of eight tropical fruits species cultivated in Colombia // *Fruits.* 2013. V. 68. P. 303–314.
42. Martínez-Mate M.A., Martín-Gorriñ B., Martínez-Alvarez V., Soto-García M., Maestre-Valero J.F. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain // *J. Clean Prod.* 2018. V. 172. P. 1298–1310.
43. Матасов А.В., Макарова А.С., Авдеенкова Т.С. Количественная оценка выбросов парниковых газов технологий переработки отходов сельского хозяйства // *Вестн. МАСИ. Информатика, экология, экономика.* 2019. Т. 21. С. 21–25. URL: <https://cat.gpntb.ru/?id=EC/ShowFull&irbDb=ESVODT&bid=db97600f33fa0376581c4b176dc37b42>
44. Мировые тенденции в потреблении энергии. URL: <http://www.econews.uz> (дата обращения: 10.05.2019).
45. Najser T., Gaze B., Knutel B., Verner A., Najser J., Mikeska M., Chojnacki J., Nemcek O. Analysis of the effect of catalytic additives in the agricultural waste combustion // *Proc. Materials.* 2022. V. 15. P. 3526. <https://doi.org/10.3390/ma15103526>
46. Su K., Qin Q., Yang J., Li L., Deng S. Recent advance on torrefaction valorization and application of biochar from agricultural waste for soil remediation // *J. Renew. Mater. (JRM).* 2022. V. 10. № 2. DOI: 10.32604/jrm.2022.018146
47. Li L., Ma X., Xu Q., Hu Z. Influence of microwave power, metal oxides and metal salts on the pyrolysis of algae // *Biores. Technol.* 2013. V. 142(2). P. 469–474. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.05.080
48. Beneroso D., Bermúdez J.M., Arenillas A., Menéndez J.A. Microwave pyrolysis of microalgae for high syngas production // *Biores. Technol.* 2013. V. 144. P. 240–246. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.102
49. Hu Z., Ma X., Chen C. A study on experimental characteristic of microwave-assisted pyrolysis of microalgae // *Biores. Technol.* 2013. V. 107. P. 487–493. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.12.095
50. Zhou J., Liu S., Zhou N., Fan L., Zhang Y. Development and application of a continuous fast microwave pyrolysis system for sewage sludge utilization // *Biores. Technol.* 2018. V. 256(1). P. 295–301. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.02.034
51. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия.* 2019. № 12. С. 3–15. DOI: 10.1134/S000218811912007X

52. *Bashkin V., Alekseev A., Levin B., Mescherova E.* Biogeochemical technologies for managing CO₂ flows in agroecosystems // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2023. V. 4(1). 012. DOI: 10.21926/aeer.2301012
53. *Northrup D.L., Bassob B., Wang M.Q., Morgan C.L.S., Benfey P.N.* Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production // *PNAS*. 2021. V. 118. № 28. e2022666118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022666118>
54. *Udvardi M., Below F.E., Castellano M.J., Eagle A.J., Giller K.E., Ladha J.K., Liu X., Maaz T.M., Nova-Franco B., Raghuram N., Robertson G.P., Roy S., Saha M., Schmidt S., Tegeder M., York L.M. and Peters J.W.* A Research road map for responsible use of agricultural nitrogen // *Front. Sustain. Food Syst.* 2021. V. 5. 660155. DOI: 10.3389/fsufs.2021.660155
55. *Bashkin V.N.* Increasing the efficiency of nitrogen use: Assessing the nitrogen-mineralizing capability of soils // *Rus. Agricult. Sci.* 2022. V. 48. № 4. P. 283–289. DOI: 10.3103/S1068367422040012
56. *Башкин В.Н., Арабский А.К.* Роль природного газа в обеспечении глобальной продовольственной безопасности // *Газ. Бизнес.* 2022. № 2. С. 11–17.
57. *Bashkin V.N., Alekseev A.O.* Global food security and fundamental role of fertilizer. P. 1. Global food security and fertilizer production // *Iss. Risk Anal.* 2022. V. 19(3). P. 60–73. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-3-60-73>
58. *Bashkin V.N., Alekseev A.O.* Global food security and fundamental role of fertilizer. P. 2. Fundamental role of fertilizer in food production // *Iss. Risk Anal.* 2022. V. 19(4). P. 10–29. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-4-10-29>
59. *Лана В.В.* Система управления плодородием почв в республике Беларусь // *Мат-лы II Международ. научн. конф. “Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего”*, посвящ. памяти акад. Е.И. Ермакова. Санкт-Петербург, 02–04 октября 2019 г. СПб.: АФИ, 2019. С. 37–44.
60. *Zhang W.F., Dou Z.X., He P., Ju X.T., Powlson D., Chadwick D., Norse D., Lu Y.L., Zhang Y., Wu L., Chen X.P., Cassman K.G., Zhang F.S.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2013. V. 110. P. 8375–80.
61. *Самсонов Р.О., Башкин В.Н., Аконова Г.С.* Оценка рынка парниковых газов. М.: ИРЦ-Газпром, 2007. 80 с.
62. *Samsonov R.O., Kazak A.S., Bashkin V.N.* Master plan methodology for gas industry development. Moscow: Sci. World Publ. House, 2007. 304 p.
63. *Markelov V.A., Andreev O.P., Kobylkin D.N., Arabsky A.K., Arno O.B., Tsybulsky P.G., Bashkin V.N., Kazak A.S., Galiulin R.V.* Gas industry sustainable development. Moscow: Nedra, 2013. 211 p.
64. *Булаткин Г.А.* Экологические и энергетические основы воспроизводства почвенного плодородия и увеличение продуктивности агроэкосистем: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2007. 48 с.
65. *Bashkin V.N., Alekseev A.O.* Life cycle analyses of fertilizers: carbon emissions as a measure of energy efficiency // *Iss. Risk Anal.* 2023. V. 20(3). P. 28–49. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-28-49>

CO₂-Emissions as a Measure of Energy Efficiency in the Production and Application of Fertilizers

V. N. Bashkin[#]

*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS,
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

[#]*E-mail: vladimrbashkin@yandex.ru*

Taking into account the huge amount of data accumulated in recent years on greenhouse gas emissions (primarily CO₂, methane, or greenhouse gases (GHGs)), it is possible to consider the problem of energy efficiency (carbon dioxide emissions occur primarily during fuel combustion, as well as methane and CO₂ as precursors for nitrogen fertilizers) in the chain from the production of fertilizers to their logistics, application, production and waste disposal. At the same time, GHGs emissions can be considered as a measure of energy efficiency in assessing the life cycle of mineral fertilizers. Relevant examples are provided in the review.

Keywords: fertilizer production, carbon and nitrogen emissions, energy efficiency, life cycle assessment, logistics, fertilization, processing of agricultural waste.