

## ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ КАК МЕРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УДОБРЕНИЙ

В.Н. Башкин\*

В статье рассмотрена проблема энергоэффективности в цепочке от производства удобрений до их логистики, применения, производства и утилизации отходов на основании накопленного за последние годы огромного массива данных о выбросах парниковых газов (ПГ), в первую очередь CO<sub>2</sub> и метана. Показано, что выбросы углекислого газа происходят, прежде всего, при сжигании топлива, а также при использовании метана и CO<sub>2</sub> в качестве прекурсоров для азотных удобрений. При этом выбросы ПГ можно рассматривать как меру энергоэффективности при оценке жизненного цикла минеральных удобрений. Соответствующие примеры приведены в тексте статьи.

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

**Ссылка для цитирования:** Башкин В.Н. Эмиссия парниковых газов как мера энергоэффективности при оценке жизненного цикла удобрений // Жизнь Земли. Т. 46, № 1. С. 20–32. DOI: 10.29003/m3771.0514-7468.2024\_46\_1/20-32.

Поступила 15.12.2023 / Принята к публикации 21.02.2024.

## GREENHOUSE GAS EMISSIONS AS A MEASURE OF ENERGY EFFICIENCY IN ASSESSING THE LIFE CYCLE OF FERTILIZERS

V.N. Bashkin, Dr. Sci (Biol.)

IPCBPSS RAS, Pushchino, Moscow Region

The article examines the problem of energy efficiency in the chain from the production of fertilizers to their logistics, application, and waste production and disposal based on the huge amount of data accumulated in recent years on greenhouse gas (GHG) emissions (primarily CO<sub>2</sub> and methane). Carbon dioxide emissions are shown to occur primarily from fuel combustion, as well as from the use of methane and CO<sub>2</sub> as precursors for nitrogen fertilizers. GHG emissions can be considered as a measure of energy efficiency when assessing the life cycle of mineral fertilizers. Relevant examples are given.

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

**For citation:** Bashkin, V.N., «Greenhouse gas emissions as a measure of energy efficiency in assessing the life cycle of fertilizers», *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 46, no 1, 20–32 (2023) (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m3771.0514-7468.2024\_46\_1/20-32.

**Введение.** При производстве минеральных удобрений к основным загрязняющим веществам (поллютантам), выбрасываемым в атмосферу, относятся NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CO, соединения фтора, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Производство аммиака, минеральных удобрений

\* Башкин Владимир Николаевич – д.б.н., профессор, гл.н.с., Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Московская область, г. Пушкино, vladimirbashkin@yandex.ru.

и неорганических кислот требует больших затрат энергии, получаемой обычно за счёт сжигания органического топлива с выделением значительных объёмов парниковых газов (ПГ), в первую очередь  $\text{CO}_2$  и метана. При этом некоторые предприятия (к примеру, по производству карбамида) частично используют образующийся  $\text{CO}_2$  в качестве исходного сырья, что позволяет уменьшить эмиссию диоксида углерода.

Следует при этом отметить, что при производстве минеральных удобрений может увеличиваться выброс  $\text{CO}_2$ , но это компенсируется за счёт высоких урожаев. Сельское хозяйство – одна из областей производства, значительно влияющая на выброс ПГ, а также потребляющая большое количество энергии. При этом энергопотребление и выбросы ПГ зачастую связаны прямо пропорциональной зависимостью. Следовательно, наиболее важным путём снижения выбросов ПГ является увеличение энергоэффективности сельского хозяйства [7, 14].

Целью данной статьи является анализ сопряжённых процессов потребления энергии и выбросов ПГ 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 является одной из наиболее энергоёмких отраслей и может играть решающую роль в реализации обязательств по энергосбережению и сокращению выбросов. Необходимо изменение структуры топливного баланса химической отрасли с целью перехода на топливо, выделяющее меньшее количество ПГ при сжигании. В ряде регионов мира это потребует, например, перехода химических предприятий с нефти и угля на газ. Ещё одним фактором, определяющим энергоэффективность производства минеральных удобрений и снижение выбросов ПГ, является учёт климатических рисков. При этом следует подчеркнуть, что в настоящее время климатические изменения происходят, прежде всего, за счёт природных процессов (изменение солнечной активности, колебание угла наклона орбиты Земли, вулканическая активность и пр.). Антропогенные процессы играют подчинённую роль [13].

В качестве примера можно привести ряд мероприятий по повышению энергоэффективности в ПАО «ФосАгро». В 2021 г. осуществлён ввод в действие 1-го комплекса из двух 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  $\text{CO}_2$ -экв. к 2028 г. по охвату 1 (собственно производство) и до 893,3 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв. по охвату 2 (поставка товаров со стороны) [4]. Как результат, удельное потребление энергии на единицу производимой продукции и полуфабрикатов снизилось с 2,40 ГДж/т в 2020 г. и составляло в 2022 г. 2,33 ГДж/т.

Рассмотрим ещё несколько примеров российских предприятий, производящих минеральные удобрения. Так, ПАО «Минеральные удобрения» (г. Пермь, РФ) является одним из крупнейших производителей азотных удобрений Урала и Западной Сибири. Для этого предприятия было предложено строительство фотозлектрической солнечной электростанции на его территории [3]. При производстве азотных удобрений выполнен сбор данных о материальных потоках [16]. Установлено, что в год производство образует 2,433 млн т  $\text{CO}_2$ . Согласно расчётным данным, на 1 т аммиака приходится 2,027 т  $\text{CO}_2$ , что удовлетворяет требованиям критериев проектов устойчивого (в т. ч. «зелёного») развития в РФ – совокупный выброс ниже 2,104 т  $\text{CO}_2$  на 1 т аммиака. Но для уточнения величины совокупного выброса требуется более детальное рассмотрение источников электроэнергии, а также анализ косвенных выбросов  $\text{CO}_2$  на 1 т аммиака (охват 2).

Резюмируя приведённые материалы можно заключить, что в настоящее время производство минеральных удобрений вследствие технологических процессов, даже с использованием наилучших доступных технологий (НДТ), связано с эмиссией ПГ. Однако повышение энергоэффективности производства влечёт за собой неминуемое сокращение выбросов ПГ.

**Логистика удобрений.** Транспортная логистика – это оптимизация управления транспортировкой товарных партий минеральных удобрений от производителей к потребителям с целью снижения энергозатрат на физическое товародвижение, вплоть до поля.

Рассмотрим пример оценки влияния конструкции тракторов на выбросы ПГ. В **табл. 1** приведены сравнительные расчёты по использованию топлива и техническим параметрам различных тракторов при выполнении транспортных работ: тракторов Doutz-FahrAgrotron L720 и «Беларус 2022» с прицепом ПСТ-12, тракторов JohnDeer 6110B и «Беларус 82.1» с прицепом 2ПТС-6 в пределах фермерского хозяйства. Тракторы Doutz-FahrAgrotron 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 JohnDeer 6110B, она имеет 4 диапазона по 6 передач, что способствует более рациональному использованию эксплуатационных свойств по сравнению с трактором «Беларус 82.1» [5].

**Таблица 1.** Показатели, характеризующие транспортные агрегаты и выбросы ПГ  
**Table 1.** Indicators characterizing transport units and GHG emissions

Основные показатели	Транспортные агрегаты			
	Беларус 82,1 + 2ПТС-6	JohnDeer 6110B + 2ПТС-6	Беларус 2022 + ПСТ-12	Doutz-FahrAgrotronL720 + ПСТ-12
Грузоподъёмность, 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 одну перевезённую тонну, кг/т	2,62	2,08	2,7	1,73
Выбросы CO <sub>2</sub> на одну перевезённую тонну, кг/т	8,216	6,522	8,446	5,425

Представленные расчёты говорят о том, 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<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, так и негативного воздействия

на почву – переуплотнение, эрозия, необоснованное применение средств защиты растений и др.

Рассмотрим также сравнение транспортных параметров, определяющих расход энергии и выбросы ПГ при двух различных системах выращивания пшеницы [21]. В табл. 2 приведено потребление первичной энергии (Дж) и потенциал глобального потепления (ПГП, измеряемый в г CO<sub>2</sub>-эquiv., 100-летний период времени) при оптимизированной системе производства и доставке пшеницы в количестве 670 г, необходимых для 1 кг буханки хлеба. Оценены традиционная система выращивания пшеницы с использованием минеральных удобрений и органическая система.

Из данных табл. 2 можно заключить, что, хотя органическая система выращивания пшеницы требует несколько меньшего использования энергии и сопровождается меньшими значениями ПГП, эти различия в целом незначительны. Показано, что ПГП буханки органического пшеничного хлеба весом 1 кг примерно на 30 г CO<sub>2</sub>-эquiv. меньше,

**Таблица 2.** Оценка величин использования энергии и потенциала глобального потепления при двух системах выращивания пшеницы

**Table 2.** Estimated energy use and global warming potential values for two wheat growing systems

Процесс	Традиционная (контроль)		Органическая (сравнение)	
	Использование энергии (J)	Потенциал глобального потепления, ПГП (г CO <sub>2</sub> -эquiv.)	Использование энергии (J)	Потенциал глобального потепления, ПГП (г CO <sub>2</sub> -эquiv.)
Производство удобрений:	820	46	21	1,7
Азотные	770	42	0,0	0,0
Фосфорные	50	3,8	21	1,7
Производство пестицидов	22	1,6	0,0	0
Транспорт удобрений и пестицидов	29	2,1	31	2,2
Использование энергии	22	1,5	25	1,8
Производство энергии	7,0	0,5	5,4	0,4
Выращивание пшеницы	490	36	650	48
Вспашка	450	32	600	42
Производство энергии	37	4,4	49	5,8
N <sub>2</sub> O эмиссия из почв	n.a.	96	n.a.	96
ПГП от хранения навоза	n.a.	n.a.	n.a.	5,1
Производство оборудования	85	7,3	85	7,3
Сумма	1400	190	790	160
Транспортировка муки (2000 км)	1900	140	1900	140
Использование энергии	1600	110	1600	110
Производство топлива	310	25	310	25
<b>Всего</b>	<b>3300</b>	<b>330</b>	<b>2700</b>	<b>300</b>

чем у обычной буханки. Однако необходимо учитывать и транспортное плечо. Так, при более длинных транспортных маршрутах доставки зерна пшеницы (более 420 км) различия между двумя сравниваемыми системами выращивания практически исчезают. Кроме того, важное значение имеют другие факторы, например, накопление углерода в почве и выбросы закиси азота из двух систем.

**Применение удобрений в агроэкосистемах.** В последние годы энергоёмкость сельхозпроизводства снижалась, но доля энергозатрат в себестоимости неуклонно возрастала. Так, стоимость потреблённых энергоресурсов в себестоимости основных видов сельхозпродукции в среднем составляла 26–35 % (в 1985–1990 г. 7–15 %) [15].

Существенными источниками выбросов в сельском хозяйстве России выступают прямой выброс закиси азота из сельскохозяйственных почв (52 557,0 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв.) и выбросы  $\text{CH}_4$  при внутренней ферментации домашних животных (39 090,4 тыс. т  $\text{CO}_2$ -экв.), при этом по сравнению с 1990 г. их объёмы соответственно сократились на 38,4 и 62,8 %. В 2019 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы составил 59,6 %,  $\text{CH}_4$  – 39,5 %,  $\text{CO}_2$  – около 0,8 % [1].

Наиболее энергоёмким технологическим процессом является обработка почвы, на которую в среднем расходуется 30–40 % потребляемой энергии [12]. 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.

На основании многолетних исследований был оценён баланс углекислого газа в севооборотах с сахарной свёклой [10]. Основные агроприёмы возделывания культуры (запашка ботвы и растительных остатков, известкование, внесение навоза и минеральных удобрений) способствуют эмиссии в атмосферу порядка 8,7–11,7 т/га  $\text{CO}_2$  в год, при этом происходит связывание в органическом веществе почвы (при условии внесения навоза) порядка 4,4–11,2 т/га  $\text{CO}_2$  в год. Снижение минерализации запасов гумуса, органических удобрений, растительных остатков с помощью рациональной обработки почв, внесения научно обоснованных доз удобрений, оптимизации почвенной кислотности способно снизить эмиссию  $\text{CO}_2$  в почвах свекловичных севооборотов. По предварительным расчётам баланс ПГ при возделывании и переработке сахарной свёклы в ЦЧР является близким к равновесному.

Значительное количество исследований выполнено по оценке влияния различных энергоэффективных агротехнологий и улучшенных «зелёных» удобрений на эмиссию парниковых газов из почвы в агроэкосистемах. Так, 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 [20].

Детальный обзор ретроспективного применения удобрений в Китае приведён в [19]. 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. усреднённые дозы азота под пшеницу и кукурузу на высокогорных полях Китая были 222 и 197 кг/га, соответственно. При этом в целом было внесено под эти культуры 12,63 млн т в год. В масштабе страны выбросы парниковых газов, связанные с производством минеральных азотных удобрений, оценивались в 41,44 и 59,71 млн т  $\text{CO}_2$  в год для рассматриваемых культур. В то же время при внесении этих удобрений эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  вследствие процессов денитрификации, по оценкам авторов, составили

35,82 и 69,44 Gg/год. Авторы делают 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. Применение современных технологических приёмов (например, внесение стабилизированного азотного удобрения в сочетании со свиным навозом) позволяет управлять урожайностью риса и выбросами закиси азота ( $N_2O$ ) и метана ( $CH_4$ ) [27].

Выявлено, что эмиссия  $N_2O$  из агрозёмов никогда не превышала 5 мг  $N_2O$ -N/га в день, если почва содержала менее 10 мг доступного минерального азота на 1 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 (КРС), что было связано не только с поступлением в почвы большого количества доступного азота, но также и с поступлением доступного углерода и влаги [11].

Резюмируя этот раздел, следует подчеркнуть, что в современной литературе накоплен огромный массив данных по оценке эмиссии ПГ при выращивании различных культур в различных регионах мира. В рамках данной статьи 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 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 внесённого азота минеральных удобрений, так и минерализуемого азота ПОВ. В рисовых агроэкосистемах выбросы этих ПГ дополняются эмиссиями 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 всём 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, основанного 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 (см., например, [23]).

На примере системы накопления сельскохозяйственных отходов в провинции Цзянси (Китай) было исследовано, в какой степени данные по оценке потоков ресурсов и показатели, характеризующие снижение выбросов парниковых газов, могут быть применены для выработки политических мер в области устойчивого использования агроотходов [29]. Авторы показали, что, когда процент 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  $16,44 \times 10^6$  т  $CO_2$ -экв. в этой провинции.

Сельскохозяйственные отходы в значительной мере связаны с биоразлагаемым бытовым мусором, где 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  $6,45 \times 10^6$  т/г, соответственно.



Запасы азота в этих отходах составляли  $65,31 \times 10^4$ ,  $6,80 \times 10^4$  и  $3,81 \times 10^4$  т/г, причём в пищевых отходах было 86 % от общего объёма азота. Это равно 11 % от поглощения азота из минеральных удобрений ( $6,20 \times 10^6$  т-год<sup>-1</sup>) сельскохозяйственными растениями в Китае [26].

Ещё одной важной проблемой является рециклинг животноводческих отходов. Для этого важны оценки содержания азота и фосфора в твёрдом органическом удобрении, получаемом из навоза КРС, например, на северо-западе России [18]. При этом необходимы исходные данные по поголовью скота. Расчёты были проведены для животноводческой фермы, в которой имеется 6 тыс. голов КРС [6]. Расчётным способом определена эмиссия метана от систем хранения биомассы отходов КРС на животноводческой ферме, которая составила 27 600 кг/год  $\text{CH}_4$ .

Основной вклад в образование отходов в России создают пищевая и перерабатывающая промышленность. При анализе данных Министерства сельского хозяйства за 2015–2017 гг. выявлено, что на 15 635 тыс. т продукции сельскохозяйственных культур приходится около 335 тыс. т первичных и вторичных отходов, получаемых в результате технологических процессов преобразования сырья в пищевую продукцию [9]. Сжигание 1 т растительного сырья (соломистые остатки) соответствует сжиганию  $424 \text{ м}^3$  природного газа. При этом показано, что дополнительное использование каталитических добавок положительно влияет на процесс горения и снижает эмиссию ПГ [25]. Применение этих добавок ( $\text{CaO}$ ,  $\text{KMnO}_4$ ) значительно повышает среднюю температуру в камере сгорания, делает процесс горения более эффективным и полным с уменьшением выбросов  $\text{CO}$  до 45 %. Ещё одним примером рециклинга является производство биочара из агроотходов, например, по технологии микроволновой торрефикации, представляющей собой новый метод нагрева органической массы, который позволяет теплу равномерно проникать в сырьё [25].

**Обсуждение.** Установлено, что агроэкосистемы являются чистым источником эмитируемых ПГ [8]. Современные агротехнологии возделывания пропашных культур ответственны за примерно 5 % выбросов парниковых газов в Соединенных Штатах и Европейском Союзе. В ряде стран (Россия, Китай, Индия и др.) эти величины даже выше. Чтобы сократить выбросы ПГ, значительные усилия сосредоточены на внедрении таких приёмов, как no-tillage (система нулевой обработки почвы), внесение больших доз органических и «зелёных» удобрений, в целом – на переходе к органическому низкоуглеродному земледелию. При этом энергоэффективность, как правило, не рассматривалась в качестве ключевого процесса управления эмиссиями ПГ. По оценкам [23], благодаря сочетанию инноваций в цифровом сельском хозяйстве, генетике сельскохозяйственных культур и микробов, а также рекультивации, возможно сокращение выбросов парниковых газов на 71 % ( $1744 \text{ кг CO}_2\text{-экв./га}$ ) при выращивании пропашных культур в течение следующих 15 лет (рис. 1). Технические усовершенствования способствуют сильному снижению выбросов ПГ при производстве зерна. Цифры указаны в килограммах  $\text{CO}_2\text{-экв.}$  на гектар 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, а технологии этапа реорганизации – через 5–15 лет.

Важно подчеркнуть, что рост величин энергоэффективности будет сопровождаться сокращением выбросов ПГ. При этом основополагающей стратегией проведения исследований по эмиссии углекислого газа как мере энергоэффективности на всех

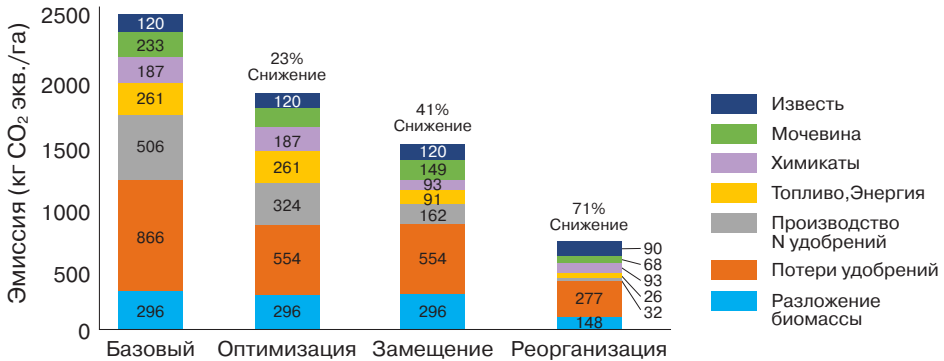


Рис. 1. Эмиссия ПГ в зависимости от энергоэффективности производственных факторов.  
Fig. 1. GHG emission vs. the energy efficiency of production factors.

этапах для системы удобрений «производство – логистика – внесение – утилизация отходов» является оценка жизненного цикла как энергии, так и эмиссии ПГ (рис. 2). Атмосферный азот ( $N_2$ ) соединяется с водородом с использованием энергии, получаемой из ископаемого топлива. Полученный  $NH_3$  реагирует с  $CO_2$ , азотной кислотой, соляной или фосфорной кислотой с получением различных удобрений. Эти удобрения транспортируются различными способами перед внесением на пахотные земли. На рис. 2 сплошная линия представляет расход материалов и азота удобрений, пунктирная линия – обмен ПГ между цепочкой производства и использования удобрений, включая переработку агроотходов, и атмосферой.

Рассмотрим жизненный цикл и коэффициенты выбросов ПГ и использования различных источников энергии в системе «производство – логистика – внесение – утилиза-

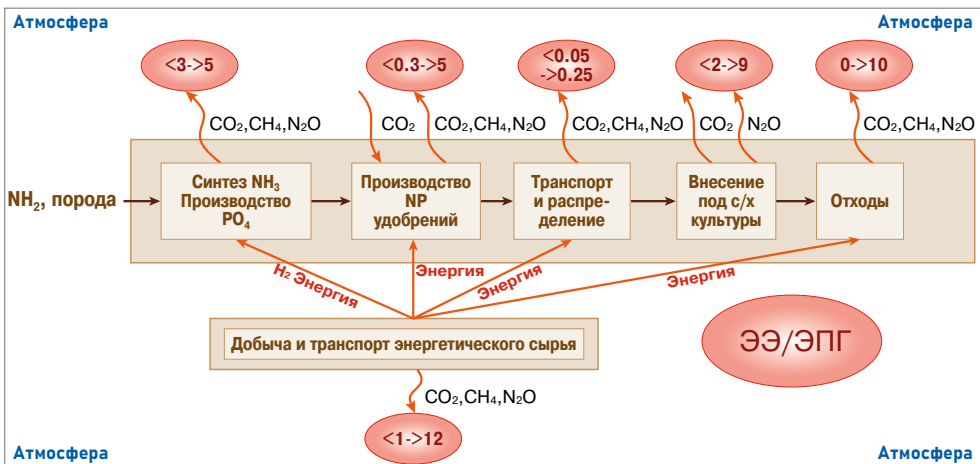


Рис. 2. Оценка жизненного цикла выбросов парниковых газов при производстве и использовании азотных и фосфорных удобрений и взвешенные коэффициенты выбросов для основных процессов (пояснения даны в основном тексте).

Fig. 2. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from the production and use of nitrogen and phosphorus fertilizers and weighted emission factors for key processes (explanations are given in the text).



ция отходов». Так, на основании данных [28], на каждую тонну азота, произведённого и используемого на пахотных землях в Китае как в составе простых удобрений (мочевина), так и сложных (например, диаммофос), выбрасывается в среднем 13,5 т  $\text{CO}_2$ -экв. При этом наибольшие величины эмиссии ПГ наблюдаются в технологических процессах синтеза аммиака. Это связано с энергоёмким характером процесса производства минеральных удобрений, а также в целом с химической промышленностью, где технологические процессы требуют высоких температуры и давления. Кроме того, важное значение имеет энергоёмкость исходных теплоисточников. Например, уголь, используемый в ряде стран как основной источник энергии, имеет низкую энергоэффективность. Установки, работающие на угле, имеют коэффициент выбросов  $>5$  т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{NH}_3\text{-N}^{-1}$  по сравнению с  $<3$  т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{NH}_3\text{-N}^{-1}$  для установок, работающих на природном газе [24, 28]. Также имеет значение и масштаб производства. Например, при использовании того же источника энергии крупномасштабные установки выделяют несколько меньше ПГ на единицу азота, чем средне- или мелкомасштабные. Следующий этап включает блок «производство удобрений», направленный на преобразование аммиака и фосфатов в различные азотно-фосфорные удобрения; процессы имеют взвешенный коэффициент выбросов 0,9 т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$ , но широкий диапазон: от 0,3 до  $>6$  т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$  (см., например, [4, 17]).

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  $\text{CO}_2$ -экв.  $\text{МДж}^{-1}$  ( $10^6$  Дж) по сравнению с  $<2$  г  $\text{CO}_2$ -экв.  $\text{МДж}^{-1}$  при использовании природного газа или нефти [28].

Взвешенный коэффициент выбросов может составлять 2,2 т  $\text{CO}_2$ -экв.  $\text{т}^{-1}$  удобрений при добыче и транспортировке ископаемого топлива, используемого в промышленности по производству минеральных удобрений (включая 1,8 т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$  от добычи энергии, используемой для синтеза аммиака, и 0,4 т  $\text{CO}_2$ -экв.  $\text{т}^{-1}$  при его использовании для производства, например, азотно-фосфорных удобрений). Для условий Китая это составляет 16 % от общего объёма выбросов 13,5 т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$  [32]. С учётом различных источников сырья эти величины могут широко варьировать:  $<1\text{--}12$  т  $\text{CO}_2$ -экв. на тонну произведённых и использованных удобрений.

В процессе логистики и при транспортировке азотных и фосфорных удобрений коэффициенты эмиссии составляют в среднем 0,1 т  $\text{CO}_2$ -экв.  $\text{т}^{-1}$  (разброс значений от  $<0,05$  до  $>0,25$ ).

Оценки эмиссии ПГ при выращивании сельскохозяйственных культур значительно варьируют ( $<2\text{--}9$  т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$ ). Так, размеры денитрификации азота могут быть в пределах от 5 до 90 % от содержания минерального азота в почвах агроэкосистем [8]. Значительно варьируют также выбросы аммиака на щелочных почвах, размеры вымывания нитратов и величины сухих и влажных выпадений. Для условий Китая коэффициент эмиссии составляет 5,2 т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$ , включая прямые выбросы  $\text{N}_2\text{O}$  (4,3 т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$ ) в результате нитрификации и денитрификации в почве и косвенные выбросы (0,9 т  $\text{CO}_2$ -экв. т  $\text{N}^{-1}$ ).

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, см. рис. 1). Следовательно, величины эмиссии ПГ являются мерилем энергоэффективности в системе жизненного цикла минеральных удобрений «производство – логистика – внесение – утилизация отходов».

**Заключение.** В контексте глобального изменения климата и с учётом увеличения антропогенных выбросов парниковых газов устойчивость сельскохозяйственных систем может быть повышена за счёт повышения эффективности использования энергоресурсов [2]. Рассматриваются различные агротехнологические приёмы сокращения выбросов ПГ и увеличения секвестрации углерода, при этом потенциалом сокращения выбросов в значительной степени пренебрегали. Энергоэффективность также не всегда рассматривалась в качестве ключевого процесса управления эмиссиями ПГ.

Приведённые в статье 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 счёт 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 ПГ. Следует особо подчеркнуть, что снижение потенциала эмиссии ПГ при производстве удобрений зависит от источника используемой энергии, и перевод энергоустановок с угля на газ, а тем более ВИЭ, будет наиболее значимым. При выращивании продукции очень 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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ахметшина Л.Г.* Возможности российского сельского хозяйства в снижении выбросов парниковых газов и адаптации к климатическим изменениям // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2022. № 1 (4). С. 5–14 (<https://vaael.ru/ru/article/view?id=2129>).
2. *Булаткин Г.А.* Экологические и энергетические основы воспроизводства почвенного плодородия и увеличение продуктивности агроэкосистем // Автореф. дис. ... доктора биол. наук. Москва, 2007. 48 с.
3. *Гильманова Р.Б., Осинцев К.В.* Разработка тригенерационного цикла на химических предприятиях по производству азотных удобрений // Молодой исследователь. Материалы 2-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. С. 166–170. ISBN 978-5-696-04703-4/166-170.
4. Интегрированный годовой отчёт ПАО ФосАгро за 2022, 2023 гг. 407 с. ([www.phosagro.ru](http://www.phosagro.ru)).
5. *Иовлев Г.А., Голдина И.И.* Сельское хозяйство, транспорт и углеродные проблемы // Транспорт. Транспортные средства. Экология. 2022. № 1. С. 25–35. DOI: 10.15593/24111678/2022.01.04.
6. *Колосова Н., Монах С.* Оценка выбросов парниковых газов при хранении отходов животноводческих ферм // Инженерные системы и техногенная безопасность. 2015. Вып. 5 (115). С. 49–52.
7. *Колпаков А.Ю.* Энергоэффективность: роль в сдерживании выбросов углекислого газа и определяющие факторы // Проблемы прогнозирования. 2020. № 6. С. 141–154. DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153.
8. *Кудеяров В.Н.* Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15. DOI: 10.1134/S000218811912007X.

9. Матасов А.В., Макарова А.С., Авдеенкова Т.С. Количественная оценка выбросов парниковых газов технологий переработки отходов сельского хозяйства // Вестник МАСИ. Информатика, экология, экономика. 2019. Т. 21. С. 21–25 (<https://cat.gpntb.ru/?id=EC/ShowFull&irbDb=ESVODT&bid=db97600f33fa0376581c4b176dc37b42>).
10. Минакова О.А., Косякин П.А. Баланс CO<sub>2</sub> при возделывании сахарной свёклы в Российской Федерации (обзор) // Сахар. 2022. № 3. С. 32–37. DOI: 10.24412/2413-5518-2022-3-32-37.
11. Рижиа Е.Ю., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Балаиов Е.В. Долгосрочный мониторинг прямой эмиссии закиси азота из суглинисто-песчаных дерново-подзолистых почв // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. СПб: ФГБНУ АФИ, 2019. С. 117–122.
12. Семёнова Е.И., Семёнов Ф.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2020. № 3 (60). С. 86–91. DOI: 10/33938/203-85.
13. 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.
14. Тихомиров А.В. Концепция развития систем энергообеспечения и повышения энергоэффективности использования ТЭР в сельском хозяйстве // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 11–17.
15. Тихомиров А.В., Маркелова Е.А., Уханова В.Ю. Топливо-энергетические ресурсы на основе энергосберегающих технологий и технических средств в сельском хозяйстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. № 5. 2015 ([www.vim.ru](http://www.vim.ru)).
16. Шатаева А.Л., Ташикина И.Н. Оценка эмиссий парниковых газов производства аммиака и выявление направлений разработки и реализации климатических проектов // Химия. Экология. Урбанистика. Пермь: Изд-во ППУ, 2022. Т. 1. С. 146–150 ([https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2022/06/Himiya.-Ekologiya.-Urbanistika.-Tom\\_1.pdf](https://ceu.pstu.ru/wp-content/uploads/2022/06/Himiya.-Ekologiya.-Urbanistika.-Tom_1.pdf)).
17. Bashkin V., Alekseev A., Levin B., Mescherova E. Biogeochemical technologies for managing CO<sub>2</sub> flows in agroecosystems // Adv. Environ. Eng. Res. 2023. V. 4, N 1: 012. DOI: 10.21926/aer.2301012.
18. 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 // Agricultural and Food Science. 2021. V. 30. P. 44–52 (<https://doi.org/10.23986/afsci.99191>).
19. Chai R., Ye X., Ma C., Wang Q., Tu R., Zhang L., Gao H. Greenhouse gas emissions from synthetic nitrogen manufacture and fertilization for main upland crops in China // Carbon Balance Management. 2019. 14:20 (<https://doi.org/10.1186/s13021-019-0133-9>).
20. 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 Greenhouse Gas Emission // Agriculture. 2022. № 12. P. 448 (<https://doi.org/10.3390/agriculture12040448>).
21. 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. С. 222–230. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.009.
22. 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 // Process. Materials. 2022. V. 15. P. 3526 (<https://doi.org/10.3390/ma15103526>).
23. 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>).
24. Samsonov R.O., Kazak A.S., Bashkin V.N. Master plan methodology for gas industry development. Moscow: Scientific World Publishing House, 2007. 304 p.
25. 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. of Renewable Materials (JRM). 2022. V. 10, № 2. DOI: 10.32604/jrm.2022.018146.
26. 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. 10:e12621 DOI: 10.7717/peerj.12621.
27. 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 N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions as affected by combined application of stabilized nitrogen fertilizer and pig manure in rice fields // Plant Soil Environ. 2019. № 65. P. 497–502.

28. 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. 8375–8380.

29. 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. 126380. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126380.

## REFERENCES

1. Akhmetshina, L.G., “Possibilities of Russian agriculture in reducing greenhouse gas emissions and adapting to climate change”, *Bull. of the Altai Academy of Economics and Law* **1**, no 4, 5–14 (2022) (<https://vael.ru/ru/article/view?id=2129>) (in Russian).

2. Bulatkin, G.A., “Ecological and energy bases for the reproduction of soil fertility and increasing the productivity of agroecosystems”, *Abstract of the dissertation for ... Doctor of Biological Sciences* (Moscow, 2007) (in Russian).

3. Gil'manova, R.B., Osintsev, K.V., “Development of a trigeneration cycle at chemical plants for the production of nitrogen fertilizers”, *Molodoj Issledovatel* (Chelyabinsk: SUSU Publishing Center, 2015). ISBN 978-5-696-04703-4166-170 (in Russian).

4. *Integrated annual report of PJSC PhosAgro 2022, 2023* ([www.phosagro.ru](http://www.phosagro.ru)) (in Russian).

5. Iovlev, G.A., Goldina, I.I., “Agriculture, transport, and carbon issues”, *Transport. Vehicles. Ecology* **1**, 25–35 (2022). DOI: 10.15593/24111678/2022.01.04(in Russian).

6. Kolosova, N., Monakh, S., “Assessment of greenhouse gas emissions during storage of waste from livestock farms”, *Engineering systems and technogenic safety* **5**, no 115, 49–52 (2015) (in Russian).

7. Kolpakov, A.Yu., “Energy efficiency: role in curbing carbon dioxide emissions and determining factors”, *Forecasting problems* **6**, 141–154 (2020). DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153(in Russian).

8. Kudeyarov, V.N., “Agrogeochemical cycles of carbon and nitrogen in modern agriculture in Russia”, *Agrochemistry* **12**, 3–15 (2019). DOI: 10.1134/S000218811912007X (in Russian).

9. Matasov, A.V., Makarova, A.S., Avdeyenkova, T.S., “Quantitative assessment of greenhouse gas emissions from agricultural waste processing technologies”, *Bull. of MASI. Informatics, ecology, economics* **21**, 21–25 (2019) (<https://cat.gpntb.ru/?id=EC/ShowFull&irbDb=ESVODT&bid=db97600f-33fa0376581c4b176dc37b42>) (in Russian).

10. Minakova, O.A., Kosyakin, P.A., “CO<sub>2</sub> balance during sugar beet cultivation in the Russian Federation (review)”, *Sakhar* **3**, 32–37 (2022). DOI: 10.24412/2413-5518-2022-3-32-37 (in Russian).

11. Rizhiya, E.Yu., Buchkina, N.P., Mukhina, I.M., Balashov, E.V., “Long-term monitoring of direct emission of nitrous oxide from loamy-sandy soddy-podzolic soils”, *Trends in the development of agrophysics: from current problems of agriculture and crop production to future technologies* (St. Petersburg: FGBNU AFI, 2019) (in Russian).

12. Semyonova, E.I., Semyonov, F.V., “Energy saving and increasing energy efficiency”, *Economics, labor, management in agriculture* **3**, no 60, 86–91 (2020). DOI: 10/33938/203-85 (in Russian).

13. Snakin, V.V., “Dynamics of global natural processes and V.I. Vernadsky's teaching of the biosphere”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **45**, no 1, 27–38 (2023). DOI: 10.29003/m3147.0514-7468.2023\_45\_1/27-38(in Russian).

14. Tikhomirov, A.V., “Concept for the development of energy supply systems and increasing the energy efficiency of using fuel and energy resources in agriculture”, *Vestnik VIESKh* **1**, no 22, 11–17 (2016) (in Russian).

15. Tikhomirov, A.V., Markelova, E.A., Ukhanova, V.Yu., “Fuel and energy resources based on energy-saving technologies and technical means in agriculture”, *Agricultural machines and technologies* **5** (2015) ([www.vim.ru](http://www.vim.ru)) (in Russian).

16. Shatayeva, A.L., Tashkinova, I.N., “Assessment of greenhouse gas emissions from ammonia production and identification of directions for the development and implementation of climate projects”, *Chemistry. Ecology. Urbanism* (Perm: PPU Publ. House, 2022. T. 1. P. 146–150) (in Russian).

17. Bashkin, V., Alekseyev, A., Levin, B., Mescherova, E., “Biogeochemical technologies for managing CO<sub>2</sub> flows in agroecosystems”, *Adv. Environ. Eng. Res.* **4**, no 1 (2023). DOI: 10.21926/aer.2301012.

18. 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”, *Agricultural and Food Science* **30**, 44–52 (2021), <https://doi.org/10.23986/afsci.99191>.

19. Chai, R., Ye, X., Ma, C., Wang, Q., Tu, R., Zhang, L., Gao, H., "Greenhouse gas emissions from synthetic nitrogen manufacture and fertilization for main upland crops in China", *Carbon Balance Management* **14**:20 (2019), <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0133-9>.
20. 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 Greenhouse Gas Emission", *Agriculture* **12**, 448. (2022), <https://doi.org/10.3390/agriculture12040448>.
21. 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.* **17**, 222–230 (2009) (10.1016/j.jclepro.2008.04.009).
22. 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", *Process. Materials* **15**, 3526 (2022), <https://doi.org/10.3390/ma15103526>.
23. 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* **118**, no 28 (2021), e2022666118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2022666118>.
24. Samsonov, R.O., Kazak, A.S., Bashkin, V.N., *Master plan methodology for gas industry development* (Moscow: Scientific World Publishing House, 2007).
25. 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. of Renewable Materials (JRM)* **10**, no 2 (2022), DOI: 10.32604/jrm.2022.018146.
26. 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). 10:e12621, DOI: 10.7717/peerj.12621.
27. 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 N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions as affected by combined application of stabilized nitrogen fertilizer and pig manure in rice fields", *Plant Soil Environ* **65**, 497–502 (2019).
28. 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* **110** (21), 8375–8380 (2013).
29. 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* **265** (2023). DOI: 10.1016/j.energy.2022.126380.