

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В СЕКТОРЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Е. И. БЕРТОШ^{1), 2)}

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Бел НИЦ «Экология»,
ул. Якубова, 76, 220095, г. Минск, Беларусь

Прогнозирование выбросов парниковых газов – это ключевой аналитический инструмент, лежащий в основе разработки национальных климатических стратегий, обновления национально определяемых вкладов (ОНУВ), оценки эффективности мер по смягчению последствий изменения климата и планирования социально-экономического развития. Представлены методические основы прогнозирования выбросов парниковых газов в сельскохозяйственном секторе Республики Беларусь на период до 2035 г., разработанные в контексте подготовки третьего национально определяемого вклада в рамках Парижского соглашения. На основе международных рекомендаций и национальных данных построены три сценария развития. Обоснованы ключевые сценарные допущения, отражающие существующие тенденции в животноводстве, растениеводстве и применении удобрений, а также определен перечень приоритетных низкоуглеродных мер, включая биогазовые технологии, точное и органическое земледелие, сохранение деградированных торфяников и оптимизацию кормления крупного рогатого скота. Для каждой меры рассчитаны удельные показатели эффективности (сокращение выбросов на единицу внедрения), что позволило количественно оценить их вклад в снижение выбросов парниковых газов. Методика и результаты исследования могут быть использованы при формировании климатической политики Республики Беларусь.

Ключевые слова: парниковые газы; сельское хозяйство; сценарное моделирование; прогнозирование выбросов; определяемый на национальном уровне вклад; климатическая политика; низкоуглеродные технологии.

METHODOLOGICAL ASPECTS FOR PROJECTIONS OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE AGRICULTURAL SECTOR

E. I. BERTOSH^{a, b}

^aInter Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bBel SIC «Ecology»,
76 Jakubava Street, Minsk 220095, Belarus

Образец цитирования:

Бертош ЕИ. Методические аспекты прогнозирования выбросов парниковых газов в секторе сельского хозяйства. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;4:93–102.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-4-93-102>

For citation:

Bertosh EI. Methodological aspects for projections of greenhouse gas emissions in the agricultural sector. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;4:93–102. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-4-93-102>

Автор:

Евгения Ивановна Бертош – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента¹; заведующий отделом международного научного сотрудничества и климата².

Author:

Evgeniya I. Bertosh, graduate student at the department of environmental monitoring and management^a; head of the department of international scientific cooperation and climate^b.
ebertosh@gmail.com

Projections of Greenhouse Gas Emissions is a key analytical tool for development of National Climate Strategies, updating Nationally Determined Contributions (NDCs), assessing the effectiveness of climate mitigation measures, and planning socio-economic development. This paper presents the methodological approaches for projections of greenhouse gas emissions in the agricultural sector of the Republic of Belarus up to 2035, developed in the context of predation of the third Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement. Based on international guidelines and national data, three development scenarios were developed. Key scenario assumptions were substantiated, reflecting current trends in livestock production, crop cultivation, and fertilizer application. A list of priority low emission measures was identified, including biogas technologies, precision and organic farming, conservation of degraded peatlands, and optimization of cattle feeding practices. For each measure, specific efficiency indicators (emission reductions per unit of implementation) were calculated, enabling a quantitative assessment of their contribution to reducing greenhouse gas emissions. The methodology and results of this study can be used in mapping of climate policy in Belarus.

Keywords: greenhouse gases; agriculture; scenario modeling; emission projections; nationally determined contribution; climate policy; low-carbon technologies.

Введение

Изменение климата – одно из наиболее значимых антропогенных воздействий на климатическую систему Земли. Оно вызвано ростом концентрации парниковых газов: диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O), поступающих в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива для производства электроэнергии и тепла, потребления топлива транспортом, промышленного и сельскохозяйственного производства, а также разложения отходов.

Накопление углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O) усиливает парниковый эффект, что приводит к повышению средней глобальной температуры. Это вызывает цепную реакцию климатических изменений: меняются режимы осадков, учащаются и усиливаются экстремальные погодные явления – засухи, наводнения, штормы, наблюдаются таяние ледников, повышение уровня моря и деградация экосистем. Названные изменения также оказывают воздействие на социально-экономические системы: снижают устойчивость инфраструктуры, угрожают продовольственной и водной безопасности, увеличивают риски для общественного здоровья и способствуют росту социально-экономического неравенства [1].

На глобальном уровне проблема изменения климата решается посредством реализации положений Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), принятой в 1992 г. Согласно РКИК ООН все государства несут общую, но дифференцированную ответственность за изменение климата, при этом развитые страны обязаны играть ведущую роль как в сокращении собственных выбросов парниковых газов, так и в оказании финансовой и технологической поддержки развивающимся странам. Важно отметить, что сама конвенция не устанавливает количественных обязательств по сокращению выбросов, а создает правовую и институциональную основу для последующих соглашений [2].

Количественные обязательства по сокращению выбросов парниковых газов впервые были закреплены в Киотском протоколе, принятом в 1997 г. Его положения обязывали страны, включенные в Приложение I (развитые и с переходной экономикой), сокращать выбросы парниковых газов на протяжении двух обязательных периодов: 2008–2012 гг. и 2013–2020 гг. Протокол ввел механизмы гибкости (торговля квотами, совместное осуществление, чистое развитие), что позволяло участникам достигать целей более эффективно. Однако его охват был ограничен, поскольку обязательства носили избирательный характер и не распространялись на крупнейшие развивающиеся экономики [3].

Качественно новым этапом стало принятие в 2015 г. Парижского соглашения, которое установило универсальный режим климатических обязательств. В отличие от предыдущих документов, все страны, независимо от уровня развития, обязуются принимать меры по снижению выбросов парниковых газов и адаптации к изменению климата. Конкретные цели каждая страна определяет самостоятельно через национально определяемые вклады (ОНУВ), которые должны обновляться через пять лет и демонстрировать прогрессивное повышение амбиций [4].

Республика Беларусь является участником всех трех ключевых документов: РКИК ООН, Киотского протокола и Парижского соглашения, последовательно выполняя взятые на себя обязательства. Страна регулярно представляет национальные сообщения (1 раз в 5 лет), двухгодичные доклады (1 раз в 2 года) и ежегодные кадастры выбросов парниковых газов, обеспечивая прозрачность и подотчетность своих действий. В соответствии с Киотским протоколом Беларусь добровольно устанавливала для себя обязательство сократить выбросы парниковых газов на 5–10 % к 2020 г. относительно уровня 1990 г., что было успешно выполнено.

В рамках Парижского соглашения страна представила три национальных определяемых вклада:

– ОНУВ 1.0 (2016 г.) предусматривал снижение выбросов парниковых газов на 28 % к 2030 г. относительно 1990 г. Этот вклад не учитывал поглощение углерода в секторе ЗИЗЛХ и не предполагал привлечения международной помощи для достижения цели по сокращению выбросов [5];

– ОНУВ 2.0 (2021 г.) определял своей целью сокращение выбросов парниковых газов на 35–40 % к 2030 г. относительно 1990 г. с учетом поглощения в секторе ЗИЗЛХ и при условии получения международной финансовой и технологической поддержки для реализации дополнительных мер [6];

– ОНУВ 3.0 (2025 г.) установил безусловную цель по сокращению выбросов парниковых газов с учетом сектора ЗИЗЛХ снижение на 42 % в 2035 г. и условную цель – на 47 % соответственно [7].

Для обоснования новой цели по сокращению выбросов парниковых газов были разработаны соответствующие сценарии, отражающие траекторию выбросов парниковых газов в различных секторах экономики, включая энергетику, промышленность, сельское и лесное хозяйство, управление отходами, на перспективу до 2035 г.

Данное исследование описывает методические подходы для построения сценариев сокращения выбросов парниковых газов до 2035 г., изменения в экономике и сельскохозяйственных технологиях, а также результаты прогнозов выбросов парниковых газов, выполненных на основании разработанной методики.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование выполнено на основе международно признанных методических подходов, рекомендованных для определения выбросов парниковых газов в рамках выполнения обязательств по Рамочной конвенции ООН об изменении климата [8; 9].

В качестве исходных данных использованы актуальные сведения Государственного кадастра антропогенных выбросов и абсорбции парниковых газов Республики Беларусь [9].

Выбор приоритетных мер по сокращению выбросов основывался на анализе действующих в Республике Беларусь нормативно-правовых актов стратегического и программного характера в сфере агропромышленного производства и охраны окружающей среды, а также обзоре научной литературы отечественных и зарубежных авторов.

На основе проведенного анализа разработана адаптированная методика прогнозирования выбросов парниковых газов от сельскохозяйственной деятельности, учитывающая специфику национальных условий, структуру агропроизводства и потенциал внедрения низкоэмиссионных технологий.

Результаты исследования и их обсуждение

Методология прогнозирования выбросов парниковых газов строится на сочетании статистических данных, секторального моделирования, сценарного анализа и принятых допущений.

В сельском хозяйстве основой для оценки выбросов служат методические рекомендации Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в частности, Руководящие принципы МГЭИК для подготовки национальных инвентаризаций парниковых газов (2006 г.). Этот документ является ключевым инструментом для расчета выбросов по секторам и используется странами при подготовке национальных кадастров парниковых газов в рамках выполнения международных климатических обязательств. Методология МГЭИК обеспечивает гибкость и сопоставимость расчетов, позволяя странам выбирать уровень детализации в зависимости от доступности данных и требуемой точности оценки. Руководящими принципами предусматриваются три методических уровня оценки выбросов в сельском хозяйстве – от простых до детализированных:

Уровень 1 – базовый подход, основанный на использовании общедоступных национальных статистических данных о сельскохозяйственной деятельности и стандартных коэффициентов выбросов, приведенных в руководстве, так называемых коэффициентов по умолчанию.

Уровень 2 – предполагает применение тех же методик, что и на уровне 1, но при этом используются национальные коэффициенты или параметры, учитывающие местные условия и особенности аграрного сектора.

Уровень 3 – наиболее сложный и точный, включающий использование детализированных моделей и прямых измерений, основанных на большом массиве данных: климатические параметры, состав кормов и структура рационов для животных, типы почв, режимы землепользования и др.

Независимо от выбранного уровня расчет выбросов парниковых газов выполняется по конкретным источникам и в упрощенном виде выражается (1):

$$\text{Выбросы}_{ij} = AD_i \times EF_{ij}, \quad (1)$$

где AD_i – объем деятельности (исходные данные), характеризующий источник i (ед. изм. деятельности);

EF_{ij} – удельный коэффициент выбросов газа j на единицу деятельности i .

В Республике Беларусь расчет выбросов парниковых газов выполняется ежегодно в рамках работ по ведению Государственного кадастра парниковых газов, где используется 1 и 2 методические уровни МГЭИК. Расчет выбросов парниковых газов включает следующие источники:

- выбросы CH_4 от внутренней ферментации домашнего скота;
- выбросы CH_4 и N_2O в результате уборки, хранения и использования навоза (прямые и косвенные);
- выбросы N_2O от пахотных почв;
- выбросы CO_2 от известкования почв и внесения карбамида (мочевины).

Исходными данными для расчетов служит статистическая информация о среднегодовой численности сельскохозяйственных животных во всех хозяйствах страны, включая сельскохозяйственные организации, крестьянские (фермерские) хозяйства и хозяйства населения, продуктивность животных (надой молока, привес), использовании минеральных удобрений, валовом сборе сельскохозяйственных культур по видам, наличии осушенных торфяников в составе сельскохозяйственных земель и др. [9; 10].

В международной практике для долгосрочного прогнозирования выбросов парниковых газов, как правило, используется сценарный подход, позволяющий моделировать различные траектории социально-экономического и технологического развития страны и региона, учитывая возможные эффекты от реализации климатической политики. Такой подход позволяет оценить, как могут изменяться выбросы в зависимости от принятых или планируемых мер, а также сравнить потенциальные результаты различных стратегий декарбонизации.

Международные руководящие документы, разработанные в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) и Парижского соглашения, рекомендуют странам при подготовке прогнозов, включаемых в национальные сообщения и двухгодичные доклады, строить три основных типа сценариев:

Без мер – отражает базовую траекторию развития, при которой не принимаются никакие новые меры по ограничению выбросов парниковых газов сверх тех, что уже реализованы или законодательно закреплены на момент составления прогноза. Сценарий используется в качестве базовой линии для оценки эффективности будущих политик и мер. Он учитывает текущие тенденции в экономике, демографии, структуре производства, но не предполагает активного вмешательства для снижения выбросов парниковых газов.

С мерами – включает все уже принятые и реализуемые меры по смягчению последствий изменения климата как законодательные, так и административные, технологические и экономические. Данный сценарий показывает, как будут изменяться выбросы, если страна продолжит выполнение существующих обязательств и программ, но не предпримет дополнительных действий. Он позволяет оценить достигнутый прогресс и выявить потенциал для дальнейшего снижения выбросов.

С дополнительными мерами – моделирует ситуацию, при которой страна реализует новые запланированные, но официально не утвержденные меры, а также потенциальные мероприятия по сокращению выбросов парниковых газов, не включенные в действующие стратегии и программы. Этот сценарий используется для оценки потенциала достижения более амбициозных климатических целей, включая цели Парижского соглашения: ограничение роста глобальной температуры до 1,5–2 °C и долгосрочных стратегий низкоуглеродного развития [4; 8].

На начальном этапе при формулировании сценариев следует определиться с базовыми допущениями, которые включают факторы, определяющие динамику сельскохозяйственного производства и потребления ресурсов, уровень внедрения различных низкоуглеродных технологий и их эффект на сокращение выбросов парниковых газов.

В рамках данного исследования были сформированы ключевые параметры, прогнозирование которых выполнялось на основе анализа временных рядов с использованием корреляционно-регрессионного анализа с установлением взаимосвязи с валовой добавленной стоимостью сельского хозяйства. При прогнозировании исходных данных также учитывались ограничения, связанные с существующими производственными мощностями, целевые показатели государственных программ развития агропромышленного комплекса, экспертные оценки. В частности, были приняты сценарные допущения (табл. 1).

Формирование перечня мер, включенных в сценарии прогнозирования выбросов парниковых газов, осуществлялось на основе трех ключевых критериев:

- 1) наличие нормативно-правовой или программной основы, а также меры, закреплённые в действующих государственных документах;
- 2) технологическая и экономическая реализуемость – наличие апробированных технологий, кадрового и финансового потенциала для внедрения;
- 3) потенциал сокращения выбросов – количественная значимость эффекта, выраженная в единицах CO_2 эквивалента.

Таблица 1

Сценарные допущения при прогнозировании выбросов парниковых газов до 2035 г.

Table 1

Scenario assumptions for projections of greenhouse gas emissions up to 2035

Наименование параметра	Значение к 2035 г.	Обоснование
Поголовье КРС и удой молока	4,2–4,3 млн голов, в том числе 1 400 тыс. голов с доведением удоя молока до 7500 кг/голову в год (ежегодный рост кг/голову в год)	Ограничено наличием скотомест в сельхозпредприятиях. Прирост молока 150 кг/голову в год. Удержание поголовья и повышению продуктивности
Поголовье свиней	2 800 тыс. голов	По производственным мощностям свинокомплексов
Поголовье птицы	50 млн голов	Пик производства; дальнейший рост требует новых рынков и инвестиций
Поголовье овец, коз, лошадей, кроликов	Без изменений относительно уровня 2023 г.	Незначительный вклад в выбросы и общее влияние на итоговый результат
Половозрастная структура стада	Без существенных изменений	Сохранение текущей модели производства
Внесение азотных удобрений	Пропорционально росту ВДС сельского хозяйства	Количество вносимых азотных удобрений во многом зависит от финансового состояния сельскохозяйственных организаций (корреляция с ВДС составляет 0,7)
Внесение мочевины	Включено в общий объем азотных удобрений, растет пропорционально ВДС	Часть общей нормы азота; прогноз по тем же принципам
Известкование почв	На уровне 2023 года (без изменений)	Оптимальный уровень для поддержания pH почв; отсутствие планов по расширению
Валовый сбор зернобобовых	9,9 млн т к 2035 г.	При среднем ежегодном росте ВДС 2,0–2,4 %
Валовый сбор сахарной свеклы	5,0 млн т	Ограничение по мощности перерабатывающих заводов
Валовый сбор картофеля	4,0 млн т	Снижение внутреннего спроса; ориентация на самообеспеченность
Валовый сбор льна-волокна	55 тыс. т	Целевой показатель госпрограммы «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг.
Структура землепользования	Без изменения площадей под основными культурами (за исключением сценариев, предусматривающих изъятие неиспользуемых земель)	Стабильность аграрной политики и структуры посевов

В рамках сценария с мерами оценивались эффекты от внедрения следующих мероприятий.

Развитие органического и точного земледелия. В Республике Беларусь развитие устойчивого сельского хозяйства предусмотрено рядом нормативных правовых актов, целью которых является внедрение новых технологий ресурсосберегающего земледелия, сохранение и повышение почвенного плодородия, рациональное использование и восстановление земель.

Так, в рамках государственной программы «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг. в Беларуси в сельском хозяйстве активно внедряются технологии точного земледелия, реализуются пилотные проекты.

Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 20 сентября 2024 г. № 691 «О внедрении технологии точного земледелия» определены 7 сельскохозяйственных организаций: ОАО «Достоево» Ивановского р-на Брестской обл., сельскохозяйственное унитарное предприятие «ДолжаАгро» Лиозненского р-на Витебской обл., коммунальное сельскохозяйственное унитарное предприятие «Экспериментальная база "Криничная" Мозырского р-на Гомельской обл., районное сельскохозяйственное унитарное предприятие «Олекшицы» Берестовицкого р-на Гродненской обл., сельскохозяйственный филиал открытого акционерного общества «Минскоблагросервис» Мядельского р-на, республиканское сельскохозяйственное дочернее унитарное предприятие «Шипяны-АСК» Смолевичского р-на Минской обл. и республиканское

унитарное предприятие «Учебно-опытное хозяйство Белорусской государственной сельскохозяйственной академии» Горецкого р-на Могилевской обл., где будут апробированы различные технологии точного земледелия, оценена их эффективность с целью возможного масштабирования полученных результатов на территории страны [11].

Стратегической целью развития аграрного сектора, изложенной в Национальной стратегии устойчивого развития 2040 г., является повышение конкурентоспособности агропромышленного комплекса на основе внедрения ресурсосберегающих технологий в земледелии, новых инновационных технологий производства сельскохозяйственной продукции и глубокой переработки продовольственного сырья; развитие эколого-эффективного сельскохозяйственного производства и рынка органической продукции. Предусматривается увеличение доли сельскохозяйственных земель, используемых для получения органической продукции, с доведением этого показателя до 1,5 % в 2030 г., 2–3 % в их общей площади в 2040 г.

В сценарий «С дополнительными мерами» вошли направления, предусмотренные текущей политикой, но в большем объеме, а также мероприятия с высоким потенциалом сокращения выбросов парниковых газов, выбор которых обусловлен научными исследованиями, международным опытом и наличием ресурсного потенциала в стране.

Получение биогаза за счет сбраживания отходов сельского хозяйства и его использование в энергетических целях. Данное направление поддержано Государственной программой «Энергосбережение» на 2021–2025 гг. в Беларуси, в рамках которой предусмотрено строительство локальных биогазовых комплексов в сельскохозяйственных организациях [12]. Такие меры способствуют не только замещению ископаемого топлива и сокращению выбросов парниковых газов при энергогенерации, но и снижению выбросов CH_4 за счет утилизации животноводческих отходов, включая навоз и птичий помет, на этапах их хранения.

В связи с действующей тарифной и регуляторной политикой, направленной на обеспечение стабильной интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистему после ввода Белорусской АЭС, темп строительства новых ВИЭ, в том числе работающих на биогазе, скорее всего замедлится [13].

Несмотря на то, что использование биогазовых технологий переработки отходов растениеводства и животноводства предусмотрено действующими программами развития, данное мероприятие в сценарии «С мерами» не учитывается ввиду наличия объективных ограничений, препятствующих их массовому внедрению на данный момент.

Сохранение деградированных торфяников. В составе сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь находится значительная площадь осушенных и деградированных торфяных почв, на которых сельскохозяйственное производство фактически не ведется, однако они продолжают интенсивно выбрасывать парниковые газы из-за процессов, связанных с окислением торфа.

В частности, в настоящее время в сельском хозяйстве используется 1068,2 тыс. га осушенных земель с торфяными почвами, из них 122,2 тыс. га передано сельскому хозяйству после рекультивации выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений. По результатам проведенных почвенных обследований установлено, что на площади 258,8 тыс. га осушенных земель торфяные почвы утратили свои генетические признаки и перешли в категорию антропогенно-преобразованных, из них 190,2 тыс. га – в категорию деградированных торфяных почв (потеря органического вещества – более 50 %) [14].

Оптимизация рационов кормления крупного рогатого скота (КРС). Метаногенез в рубце крупного рогатого скота (КРС) зависит от состава рациона: соотношения концентратов и грубых кормов, содержания жиров, белков, пищевых волокон. Исследования показывают, что увеличение доли концентрированных кормов в рационах приводит к увеличению перевариваемости кормов и снижению коэффициента преобразования метана (с 6,5 при низкокачественных кормах до 3 при рационах, состоящих на 90 % из концентратов) [7], а в ряде случаев даже позволяет повысить привесы и удои [15]. Данная мера не требует капитальных затрат, легко масштабируется, но требует повышения квалификации зоотехников и пересмотра норм кормления. Включена в сценарии как дополнительная, поскольку не имеет пока системной поддержки в государственных программах, хотя отдельные элементы применяются на пилотных фермах.

Влияние указанных выше мер оценивалось на основе показателя эффективности, характеризующегося объемом сокращения выбросов парниковых газов на единицу внедренного мероприятия (табл. 2). Следует отметить, что в рамках данного исследования учитывались эффекты сокращения выбросов парниковых газов за счет снижения потребления минеральных удобрений, а также уменьшения образования метана от КРС. Влияние на изменение содержания углерода в почвах не включено в оценку, поскольку, согласно методике подготовки кадастра парниковых газов, углеродный баланс в почвах оценивается в секторе «Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ).

Таблица 2

Параметры для оценки эффективности мероприятий для сценарного моделирования
сокращения выбросов парниковых газов в секторе сельского хозяйства

Table 2

Parameters for assessing of effectiveness of measures for scenario-based modeling
of greenhouse gases emission reductions in the agricultural sector

Мера	Наименование параметра	Годовое сокращение выбросов, ед. измерения
Биогазовые установки	МВт	31,5 т CH ₄ /МВт в год
Точное земледелие	Площадь сельскохозяйственных земель, га	77 кг CO ₂ -экв./га
Органическое земледелие	Площадь сельскохозяйственных земель, га	337 кг CO ₂ -экв./га
Изъятие из сельскохозяйственного оборота нарушенных осушенных торфяников	Площадь деградированных земель, га	12,6 кг N ₂ O/га
Оптимизация кормления у крупного рогатого скота	Поголовье коров, голов Поголовье прочего КРС, голов	8,2–9,3 кг CH ₄ /голову 5,8–7,0 кг CH ₄ /голову

Примечание. Рассчитано автором по материалам [1; 9].

Перевод выбросов парникового газа в натуральном выражении в эквивалент диоксида углерода осуществляется с помощью потенциалов глобального потепления [1].

Показатели эффекта от реализации мероприятий по сокращению парниковых газов в рассматриваемых сценариях представлены в табл. 3.

Таблица 3

Целевые показатели по внедрению различных мероприятий по сокращению
выбросов парниковых газов в различных сценариях

Table 3

Target indicators for the implementation of various greenhouse gas emissions
reduction measures in the considered scenarios

Политика	Единица измерения	2023		2025		2030		2035	
		Факт		Прогноз					
	Сценарии	С мерами	Дополнитель- ные меры	С мерами	Дополнитель- ные меры	С мерами	Дополнитель- ные меры	С мерами	Дополнитель- ные меры
Биогазовые установки	МВт	21	21	21	41	21	89	21	136
Точное земледелие	% от сельскохозяйственных земель	0	0	0	0	2,7	8	5	20
Органическое земледелие	% от сельскохозяйственных земель	0	0	1	3	1,5	4	2	10
Изъятие из с/х оборота нарушен- ных осушенных торфяников	Площадь, % от деградированных земель	0	0	0	17	0	58	0	100
Оптимизация кормления у крупного рогатого скота	% от поголовья КРС	0	0	0	8	0	29	0	50

Таким образом, методика сценарного моделирования, примененная в исследовании, представляет собой пошаговый процесс, позволяющий спрогнозировать изменение выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве Беларуси до 2035 г. в зависимости от того, какие меры по их сокращению будут приняты или запланированы (2).

$$E_s(t) = \sum_{i,j} (AD_i(t) \times EF_{ij} \times GWP_j) - \sum_{m \in M_s(t)} (I_m(t) \times RE_m \times GWP_{jm}), \quad (2)$$

где $E_s(t)$ – выбросы парниковых газов в сценарии s и определенный год t ;

$\sum_{i,j}(AD_i(t) \times EF_{ij} \times GWP_j)$ – суммарные выбросы парниковых газов j по источникам i в эквиваленте диоксида углерода, рассчитанные с помощью потенциалов глобального потепления GWP_j (для метана равный 28, для закиси азота 265);

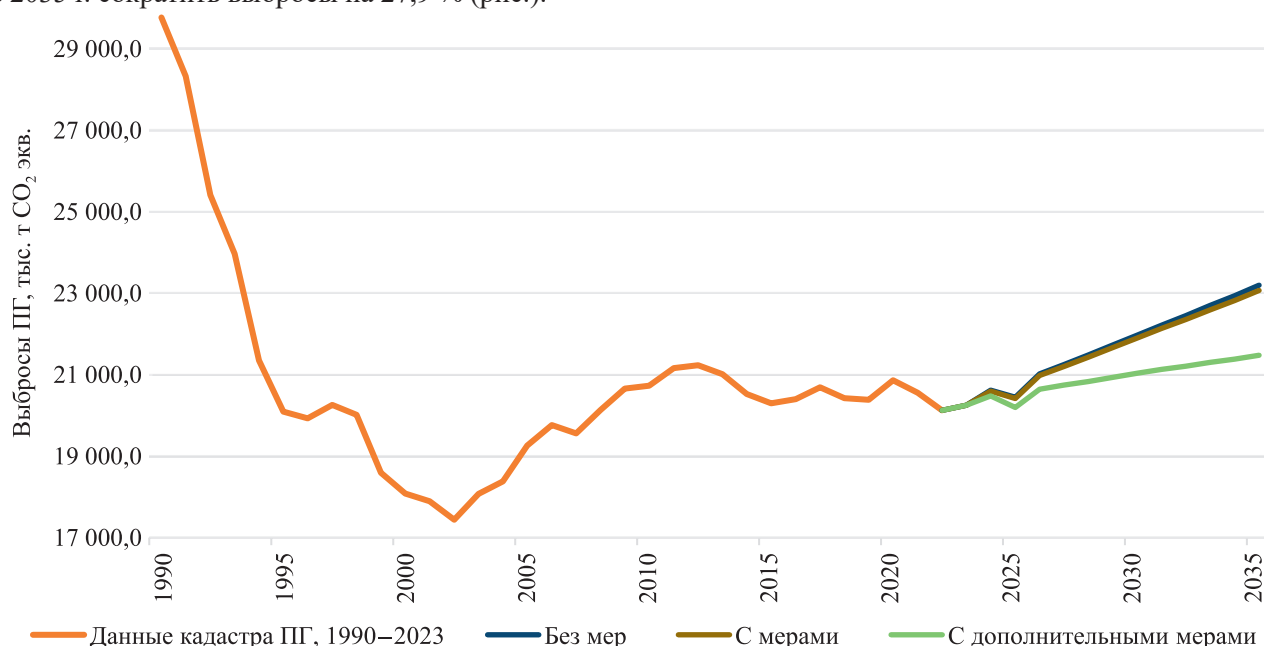
$I_m(t)$ – уровень внедрения меры m в год t (табл. 3);

RE_m – удельный показатель сокращения выбросов для меры m , приведенный в табл. 2.

Согласно выполненным расчетам по сценарию «Без мер», до 2035 г. будет наблюдаться рост выбросов парниковых газов, который превысит текущий уровень выбросов 2023 г. на 11,5 %. Однако выбросы все еще будут ниже уровня 1990 г. на 22,5 %.

Базовые меры, предусмотренные сценарием «С мерами», снизят выбросы относительно сценария «Без мер» незначительно – на 129 тыс. т CO_2 -экв. По сравнению с уровнем 1990 г. снижение в 2035 г. составит 22,9 %.

Осуществление мероприятий, включенных в сценарий «С дополнительными мерами», поможет сократить выбросы парниковых газов в 2035 г. на 1720,5 тыс. т CO_2 -экв. По сравнению с 1990 г. это позволит в 2035 г. сократить выбросы на 27,9 % (рис.).



Рассчитанные сценарии выбросов парниковых газов в секторе «Сельское хозяйство» на период до 2035 г.

Calculated scenarios of greenhouse gas emissions in the agriculture sector up 2035

Следует отметить, что сельскохозяйственный сектор¹ обладает относительно ограниченным потенциалом прямого сокращения выбросов парниковых газов. Фактически наблюдаемое их снижение в предшествующие десятилетия было обусловлено в первую очередь сокращением объемов сельскохозяйственного производства и снижением объема внесения минеральных удобрений, что не может рассматриваться как устойчивая стратегия в контексте растущего спроса на продовольствие и необходимого обеспечения продовольственной безопасности.

Прямое ограничение выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве сталкивается с существенными социально-экономическими и продовольственными ограничениями, поскольку аграрный сектор выполняет не только климатическую, но и фундаментальную продовольственную функцию. В этой связи наиболее перспективным направлением климатической стратегии выступают меры, направленные на усиление поглощательной способности продовольственных систем, прежде всего через накопление углерода в почвах.

К числу таких мер относятся: переход к системам минимальной и нулевой обработки почвы, способствующих сохранению органического вещества и снижению минерализации почвенного углерода; восстановление гидрологического режима и установление специального режима хозяйственного использования

¹В данном контексте имеются в виду категории источников выбросов, которые учитываются в кадастре парниковых газов в секторе 4 «Сельское хозяйство». Как отмечено выше, изменение содержания углерода и результирующие выбросы / поглощения CO_2 на сельскохозяйственных землях учитываются в секторе «ЗИЗЛХ».

осушенных торфяных почв, что позволяет существенно снизить эмиссию CO₂ и N₂O за счет прекращения окисления торфа.

Эти практики не только увеличивают углеродный сток, но и оказывают положительное влияние на агроэкологические параметры: повышают структурное состояние почвы, снижают эрозионные потери, улучшают водоудерживающую способность и способствуют долгосрочному сохранению плодородия [10].

Вместе с тем количественная оценка вклада данных практик в снижение чистых выбросов парниковых газов сопряжена со значительными методическими трудностями, нехваткой исходных данных, а также высоким уровнем неопределенностей оценок. В то же время, эффект от внедрения углеродных мер в сельском хозяйстве проявляется с временным лагом, подвержен высокой пространственной и временной изменчивости, а также зависит от множества факторов: типа почвы, климата, типа землепользования и агротехнических особенностей. По этим причинам дальнейшее отслеживание эффекта реализации углеродных мер в сельском хозяйстве с использованием кадастра парниковых газов – ключевого документа, подтверждающего достигнутый прогресс в сокращении выбросов парниковых газов, – становится затруднительным.

Заключение

Представлены методические подходы к прогнозированию выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве Республики Беларусь до 2035 г., разработанные на основе международных рекомендаций и адаптированные к национальным условиям. Построены три сценария («Без мер», «С мерами» и «С дополнительными мерами»), отражающие различные траектории развития сектора и потенциал снижения выбросов.

Показано, что без новых мер выбросы к 2035 г. вырастут на 11,5 % относительно 2023 г., хотя останутся ниже уровня 1990 г. Реализация таких дополнительных мер, как биогазовые установки, изъятие деградированных торфяников из оборота, оптимизация кормления КРС и нитрификации, способна сократить выбросы до 1,8 млн т CO₂-экв. к 2035 г., что позволит достичь снижения на 28,6 % относительно 1990 г.

Подчеркивается ограниченный потенциал сектора для сокращения выбросов парниковых газов, а также необходимость внедрения мер, повышающих накопление углерода в почвах. Однако данные меры трудно поддаются оценке и дальнейшему отслеживанию прогресса в их реализации через кадастры парниковых газов. Результаты исследования могут служить основой для подготовки и долгосрочной климатической стратегии Беларуси.

Библиографические ссылки

1. Межправительственная группа экспертов по изменению климата. Изменение климата 2021: основы физических наук: Резюме для политиков [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. МГЭИК. Швейцария, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch>.
2. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (принята в Нью-Йорке 09.05.1992). [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Официальный сайт ООН на русском языке. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.
3. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (принят в Киото 11.12.1997). [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Официальный сайт Рамочной конвенции ООН об изменении климата. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>.
4. Парижское соглашение (принято в Париже 12.12.2015). [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Официальный сайт Рамочной конвенции ООН об изменении климата. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf.
5. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29.09.2021 № 553 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года». [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553&p1=1>.
6. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29.09.2021 № 553 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года». [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32100553>.
7. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 6 ноября 2025 г. № 614 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов на 2026–2035 годы». [Интернет, процитировано 26 ноября 2025]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500614>.
8. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. 2006. Том 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Институт глобальных экологических стратегий (Япония). URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>.
9. Условия, процедуры и руководящие принципы рамок для обеспечения транспарентности действий и поддержки, упомянутых в статье 13 Парижского соглашения. Решение КС 18/CMP.1 [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Официальный сайт Рамочной конвенции ООН об изменении климата. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CMA_2018_3a02R.pdf.
10. Государственный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов Республики Беларусь 1990–2023 гг. [Интернет, процитировано 22 сентября 2024]. РККИ ООН. URL: <https://unfccc.int/documents/646639>.

11. Бертош ЕИ, Наркевич ИП. Влияние сельскохозяйственного производства на выбросы парниковых газов и направления их сокращения в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:93–101. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-93-101>.
12. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 20 сентября 2024 г. № 691 «О внедрении технологии точного земледелия» [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22400691>.
13. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 февраля 2021 г. № 103 «О Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 годы. [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>.
14. Бертош ЕИ, Гончар КВ, Мелех ДВ, Наркевич ИП, Фурса ЮВ. Существующие барьеры при применении систем активной дегазации полигонов твердых коммунальных отходов для решения экологических и климатических проблем в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:86–91. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2>.
15. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30 декабря 2015 г. № 1111 «О некоторых вопросах в области сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников» [Интернет, процитировано 22 сентября 2025]. Официальный сайт министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/pravitelstvom-prinjata-strategija-ratsionalnogo-ispolzovanija-torfjanikov-1804/>
16. FAO. Methane emissions in livestock and rice systems – Sources, quantification, mitigation and metrics. Rome, 2023. <https://doi.org/10.4060/cc7607en>.

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers [Internet, cited 2025 September 22]. IPCC. Switzerland, 2021. Available from: <https://www.ipcc.ch>.
2. United Nations Framework Convention on Climate Change (adopted in New York on 09.05.1992). [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.
3. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (adopted in Kyoto on 11.12.1997) [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>.
4. Paris Agreement (adopted in Paris on 12.12.2015) [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf.
5. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 553 of 29.09.2021 «On Establishing the Nationally Determined Contribution of the Republic of Belarus to Greenhouse Gas Emissions Reduction by 2030» [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100553&p1=1>.
6. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 553 of 29.09.2021 «On Establishing the Nationally Determined Contribution of the Republic of Belarus to Greenhouse Gas Emissions Reduction by 2030» [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32100553>.
7. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 614 of 06.11.2025 «On Establishing the Nationally Determined Contribution of the Republic of Belarus to Greenhouse Gas Emissions Reduction by 2035» [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22500614>.
8. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>.
9. Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement. Decision 18/CMA.1 [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CMA_2018_3a02R.pdf.
10. National Inventory of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals of the Republic of Belarus, 1990–2023. [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://unfccc.int/documents/646639>.
11. Bertosh EI, Narkievich IP. *Vliyaniye sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na vybrosy parnikovyykh gazov i napravleniya ikh sokrashcheniya v Respublike Belarus* [Impact of Agricultural Production on Greenhouse Gas Emissions and Pathways for Their Reduction in the Republic of Belarus]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:93–101. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-93-101>.
12. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 691 of 20.09.2024 «On Implementation of Precision Agriculture Technology» [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22400691>.
13. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 103 of 24.02.2021 «On the State Program 'Energy Saving' for 2021–2025» [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100103>.
14. Bertosh EI, Gonchar KV, Melekh DV, Narkevich IP, Fursa YuV. *Sushchestvuyushchiye bar'yery pri primenenii sistem aktivnoy degazatsii poligonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov dlya resheniya ekologicheskikh i klimaticheskikh problem v Respublike Belarus* [Existing barriers of using of active degassing systems for municipal solid waste disposal sites to solve environmental and climatic problems in the Republic of Belarus]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;2:86–91. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-86-91>.
15. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 1111 of 30.12.2015 «On Certain Issues Concerning Conservation and Rational (Sustainable) Use of Peatlands» [Internet, cited 2025 September 22]. Available from: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/pravitelstvom-prinjata-strategija-ratsionalnogo-ispolzovanija-torfjanikov-1804/>.
16. FAO. Methane emissions in livestock and rice systems – Sources, quantification, mitigation and metrics. Rome, 2023. <https://doi.org/10.4060/cc7607en>.

Статья поступила в редколлегию 06.10.2025.
Received by editorial board 06.10.2025.