

УДК 631.81:631.416:631.433(430)

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА БАЛАНС ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ И ЭМИССИЮ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ГЕРМАНИИ

© 2024 г. С. В. Митрофанов^{1,*}, Е. В. Серова¹, Н. В. Орлова¹¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”
109028 Москва, Покровский б-р, 11, Россия

*E-mail: smitrofanov@hse.ru

Изучили влияние применения удобрений на баланс макроэлементов и устойчивость земледелия в Германии. Установлено, что баланс основных элементов питания в почве поддерживается на бездефицитном уровне благодаря систематическому и сбалансированному использованию минеральных и органических удобрений. Однако в настоящее время правительство ФРГ активно внедряет политику, направленную на сокращение использования традиционных форм органических и минеральных удобрений, внедряя альтернативные способы обеспечения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур. Целью такой политики является снижение негативного воздействия агрохимикатов на окружающую среду и эмиссию парниковых газов, в частности.

Ключевые слова: устойчивое земледелие Германии, удобрения, баланс элементов питания растений, эмиссия парниковых газов.

DOI: 10.31857/S0002188124050078, **EDN:** CYWTTL

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных глобальных вызовов, связанных с устойчивым развитием и обеспечением продовольственной безопасности, проблема удовлетворения пищевых потребностей растущего мирового населения становится все более актуальной [1–3]. Эти вызовы обусловлены изменением климата, нестабильностью рынков и ограниченным доступом к пище. В контексте столь значимых глобальных проблем, использование удобрений играет критическую роль в повышении урожайности сельскохозяйственных культур и улучшении пищевой ценности получаемых продуктов [4–6]. Однако следует отметить, что интенсивное использование удобрений может привести к серьезным проблемам, таким как загрязнение почвы, воды и воздуха, а также угрозе биоразнообразию в природе и здоровью людей [7–11]. Процессы нитрификации, денитрификации и аммонификации, которые связаны с использованием удобрений, являются крупным источником эмиссии оксида азота. Кроме того, разложение органических веществ в сточных водах и почвах, вызванное использованием удобрений, может способствовать эмиссии метана [12–16].

В связи с этим разработка мер государственной политики, эффективных стратегий в области управления и применения удобрений является неотъемлемой частью устойчивого сельского хозяйства и охраны окружающей среды [17, 18].

Данная статья входит в цикл работ, целью которого является оценка влияния сельскохозяйственного применения удобрений на баланс макроэлементов и устойчивость земледелия основных стран-производителей сельскохозяйственной продукции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении данного исследования применяли общенаучные методологические подходы и методы экономической статистики. В основе информационной базы лежат данные из различных источников, таких как FAOSTAT – база данных Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций, а также данные Международной ассоциации производителей удобрений (IFA) и Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Азот. Согласно данным FAOSTAT, в земледелии Германии в период 2011–2020 гг. ежегодно, кроме 2009 г., отмечали положительный баланс азота в почве. В среднем за данный период положительный баланс азота составлял 12.5 кг/га (рис. 1).

Основным источником поступления азота в пахотные земли страны были минеральные удобрения. В период 2001–2007 гг. внесение азота в виде

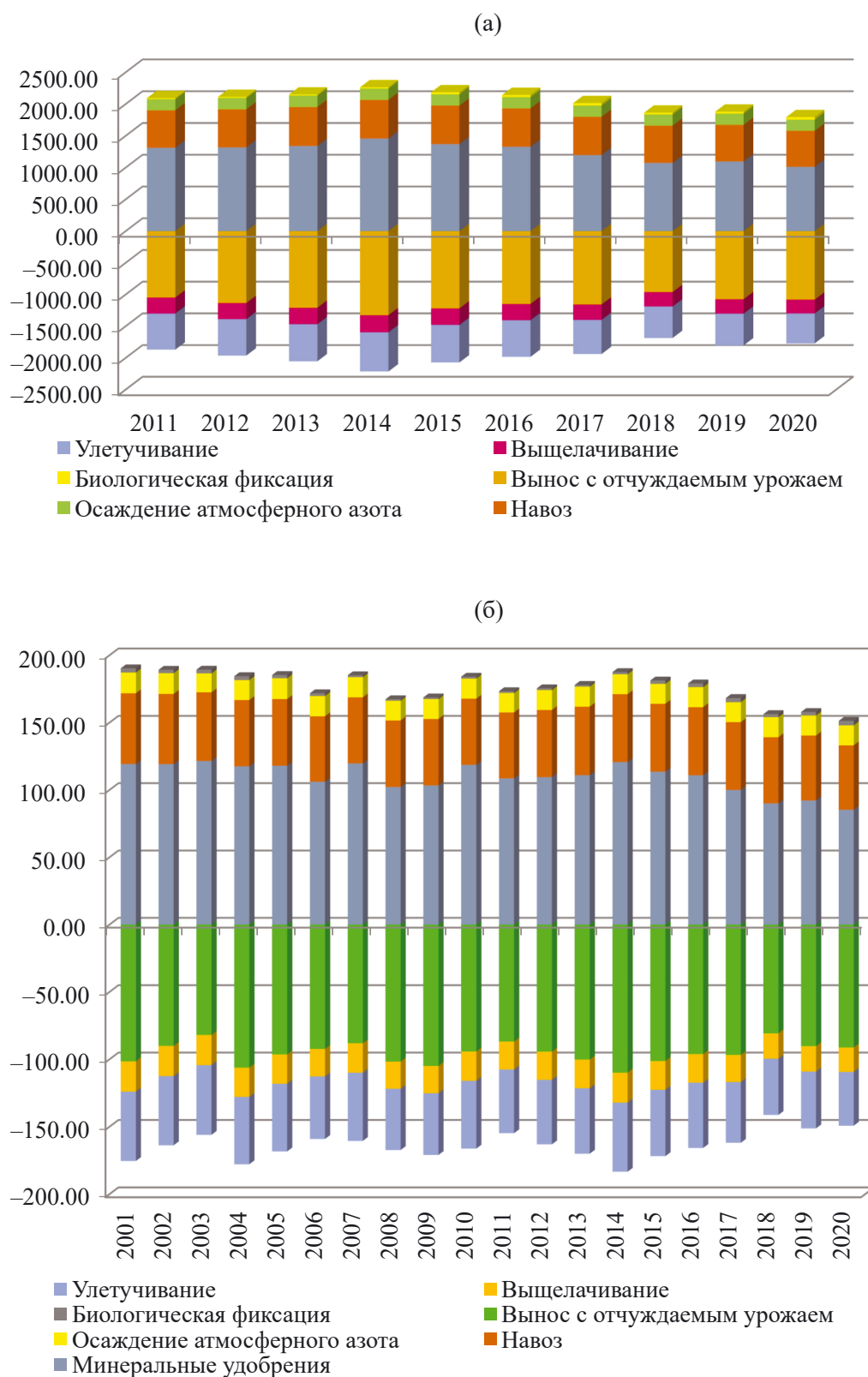


Рис. 1. Баланс азота в земледелии Германии: (а) – тыс. т/год, (б) – на единицу площади, кг/га.

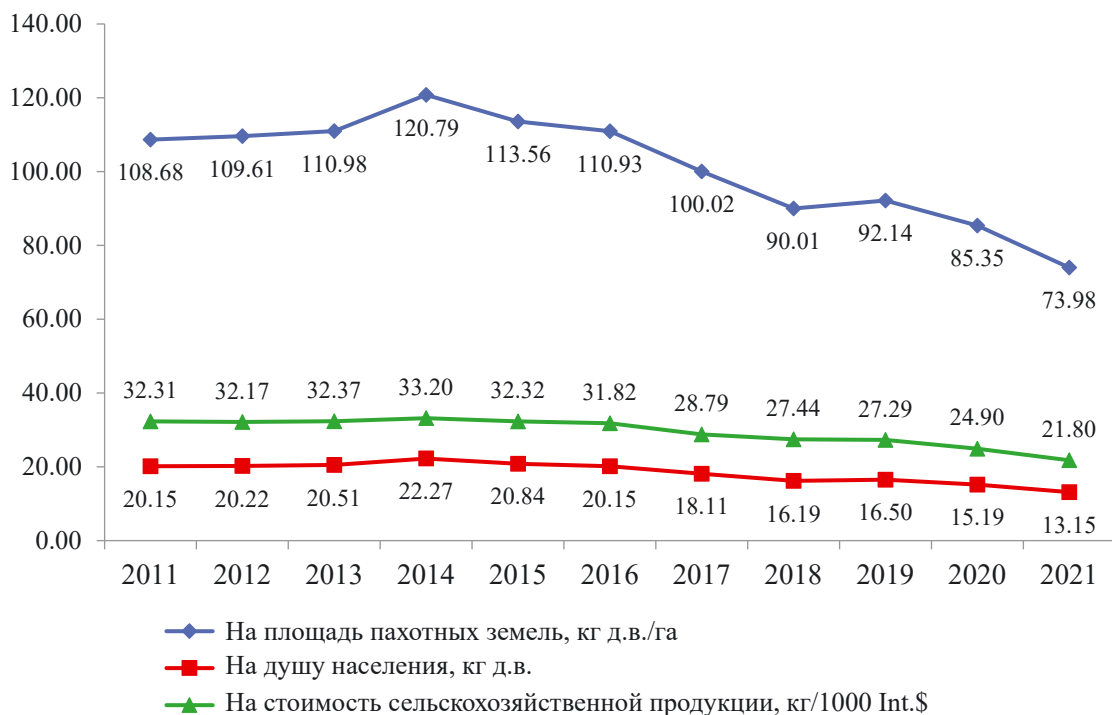


Рис. 2. Динамика внесения азотных удобрений в Германии (2011–2021 гг.).

минеральных удобрений составляло в среднем 117.3 кг д.в./га (рис. 2).

Однако с началом мирового экономического кризиса применение данных удобрений сократилось, достигнув минимума 102.3 кг д.в./га в 2008 г. Начиная с 2010 г., после снижения негативного действия кризиса объемы применения азотных удобрений начали расти и достигли пика в 120.8 кг д.в./га в 2014 г.

Начиная с 2015 г., можно было наблюдать нисходящий тренд применения азотных минеральных удобрений на пахотных угодьях, который в период 2014–2021 гг. составил – 5.94%. Данный факт связан с проводимой в стране политикой по сокращению применения удобрений с целью снижения негативного действия химикатов, в данном случае нитратов, на окружающую среду и человека.

Правительством Германии принята Национальная стратегия устойчивого развития. Одна из ее основных целей – достижение более устойчивого и экологически ответственного сельского хозяйства. Эта стратегия была разработана при участии Берлинского университета имени Гумбольдта и включает в себя ряд мероприятий, направленных на снижение использования химических удобрений в сельском хозяйстве.

Также стоит отметить законодательные акты, ориентированные на сокращение применения азотных минеральных удобрений. Например, Закон об удобрениях (Düngemittelgesetz) был принят с целью регулирования использования удобрений и минимизации

негативного воздействия на окружающую среду. Закон устанавливает стандарты и требования к использованию удобрений, включая установление предельных величин содержания соединений азота в почве и питьевой воде. Кроме того, Европейский союз также принимает меры для сокращения применения азотных минеральных удобрений. Например, Директива ЕС по нитратам устанавливает меры для предотвращения загрязнения воды нитратами из сельскохозяйственного производства. Германия должна соблюдать эти нормативы и предпринимать меры по их исполнению.

Баланс фосфора в земледелии страны в период 2011–2020 гг. являлся бездефицитным. В период 2001–2007 гг. баланс фосфора в почве на единицу площади в среднем составлял +52.1 кг/га (рис. 3).

Однако в условиях мирового экономического кризиса в стране было сокращено применение минеральных удобрений, в связи с чем этот показатель начал снижаться, минимальным он был в 2008 г. – 0.18 кг/га. В 2010 г. применение фосфорных минеральных удобрений вернулось на уровень 2001–2007 гг., ввиду чего баланс элемента достиг +5.3 кг/га. В период 2011–2020 гг. показатель стабилизировался на уровне +4.1 кг/га.

В Германии основным источником поступления фосфора в почву являются органические удобрения. В период 2001–2007 гг. с навозом в почву поступало в среднем 61–1% от внесенного P_2O_5 ,

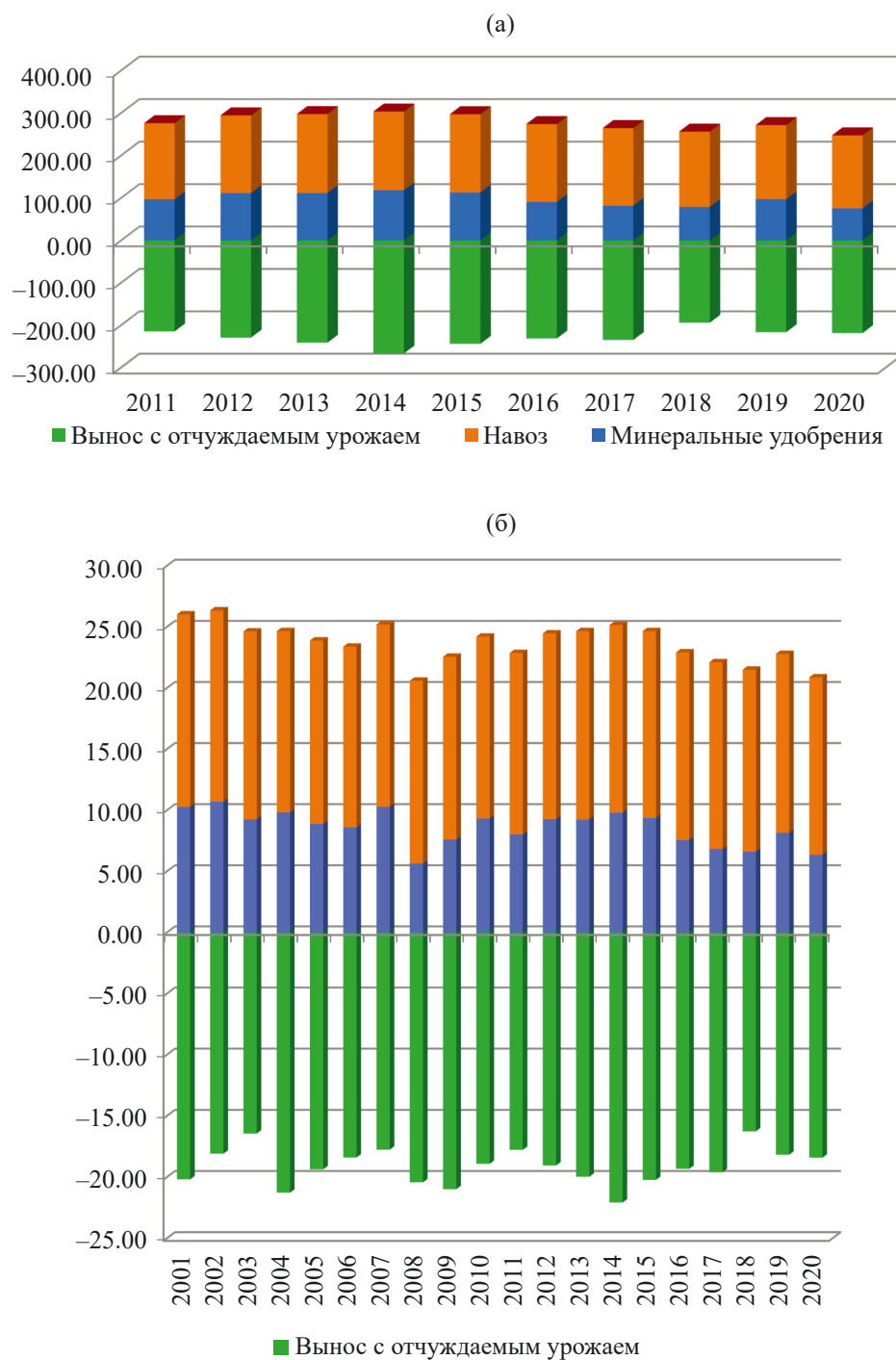


Рис. 3. Баланс фосфора в земледелии Германии: (а) – тыс. т/год, (б) – на единицу площади, кг/га.

в 2008–2009 гг. – порядка 70.0%, начиная с 2010 г. – в среднем 64.8%. Однако объемы производства и применения органических удобрений животного происхождения в стране ежегодно снижаются, что в период 2001–2020 гг. составило –0.4%. Данный факт связан с сокращением поголовья скота в Германии в рамках выполнения Парижского соглашения

по климату, а также проведения политики по достижению углеродно-нейтральной экономики.

В соответствие с данными сельскохозяйственной переписи, проведенной Федеральным статистическим управлением Германии (Destatis) в 2020 г., установлено, что в сравнении с 2010 г. количество занятых животноводством сельскохозяйственных предприятий

снизились на 22% — с 216.1 до 168.8 тысяч. Число ферм с крупным рогатым скотом за 10 лет снизилось с 144.9 до 108.0 тысяч. Поголовье крупного рогатого скота за этот же период сократилось с 12.5 до 11.3 млн голов. В то же время количество молочных ферм снизилось на 40% до 54.3 тыс., на которых насчитывается 3.9 млн дойных коров. Вместе с тем отмечено, что общее число поголовья дойных коров выросло из-за того, что среднее число содержащихся на ферме коров увеличилось с 46 до 72.

На 2020 г. в Германии насчитывалось ≈ 31.9 тыс. свиноферм, что на 47% меньше, чем было в 2010 г. — 60.1 тыс. Однако укрупнение предприятий позволило сократить темпы снижения поголовья. За этот период оно уменьшилось с 27.6 до 26.3 млн голов.

Специалисты отмечают, что численность кур и кур-несушек в стране сильно меняется из-за коротких производственных циклов и поэтому не является репрезентативной. Тем не менее, количество птицеферм сократилось в период 2011–2020 гг. примерно на 15% — с 58.2 до 49.4 тыс. Однако по состоянию на 2020 г., в Германии количество мест содержания кур составило 186.3 млн что на 1.2% больше, чем в 2016 г. — 184.1 млн мест.

Также по данным, представленным на рис. 4, можно сделать вывод о тенденции к снижению объемов применения фосфорных минеральных удобрений.

В 2021 г. в пахотные земли вносили 8.7 кг д.в./га, что на 63.2% меньше, чем в 2001 г., уменьшение в период 2001–2021 гг. составило — 4.64%. Это способствовало снижению применения P_2O_5 на душу населения на 64.6% — с 3.87 до 1.37 кг д.в./человека, на стоимость сельскохозяйственной продукции — с 6.28 до 2.28 кг/1000 Int.\$ (на 63.7%).

В складывающихся условиях сокращения объемов применения традиционных органических и минеральных удобрений в стране проводят исследования по глубокой переработке навоза и извлечению из него фосфора, использованию альтернативных источников фосфора: бытовых сточных вод, сточных вод с очистных сооружений в сельскохозяйственных предприятиях, разработке технологий, повышающих биодоступность P_2O_5 в существующих запасах почв.

Баланс калия в земледелии Германии в период 2001–2020 гг. был положительным. В период 2001–2006 гг. баланс калия в почве на единицу площади в среднем составлял +57.1 кг/га (рис. 5).

Баланс калия имел медленный нисходящий тренд, что во многом связано со снижением объемов применения калийных минеральных удобрений (рис. 6).

Данный факт обусловлен ростом цен на удобрения ввиду затянувшихся переговоров между производителями калийных удобрений и Китаем, являющимся крупнейшим импортером данных удобрений.

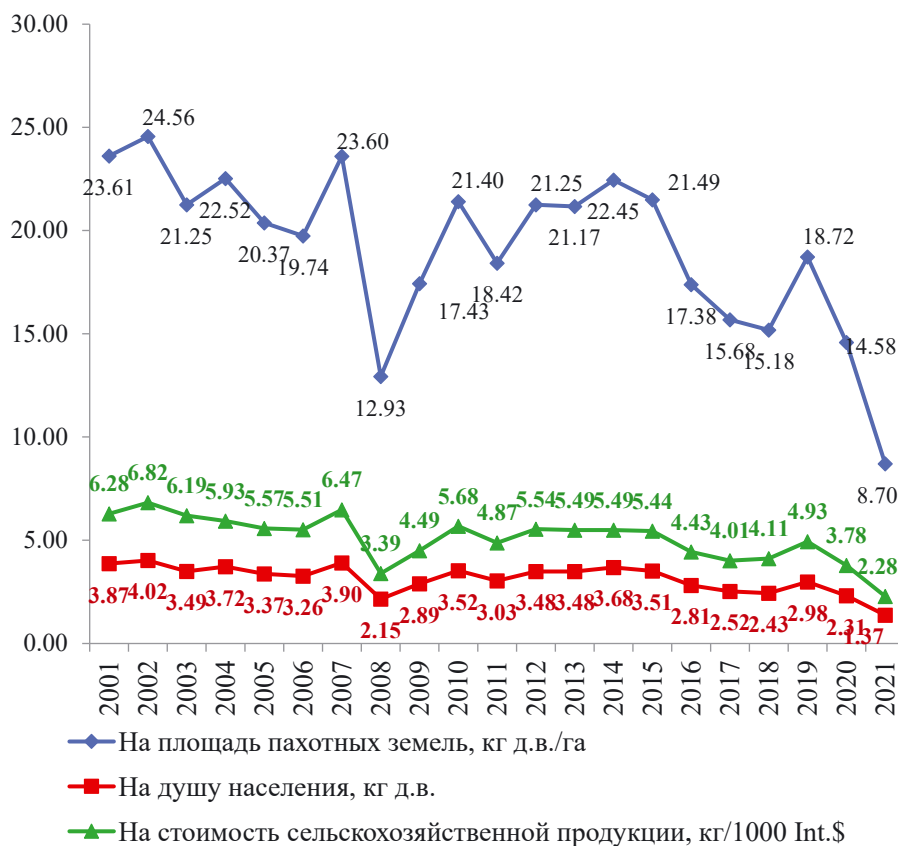


Рис. 4. Динамика внесения фосфорных удобрений в Германии (2001–2021 гг.).

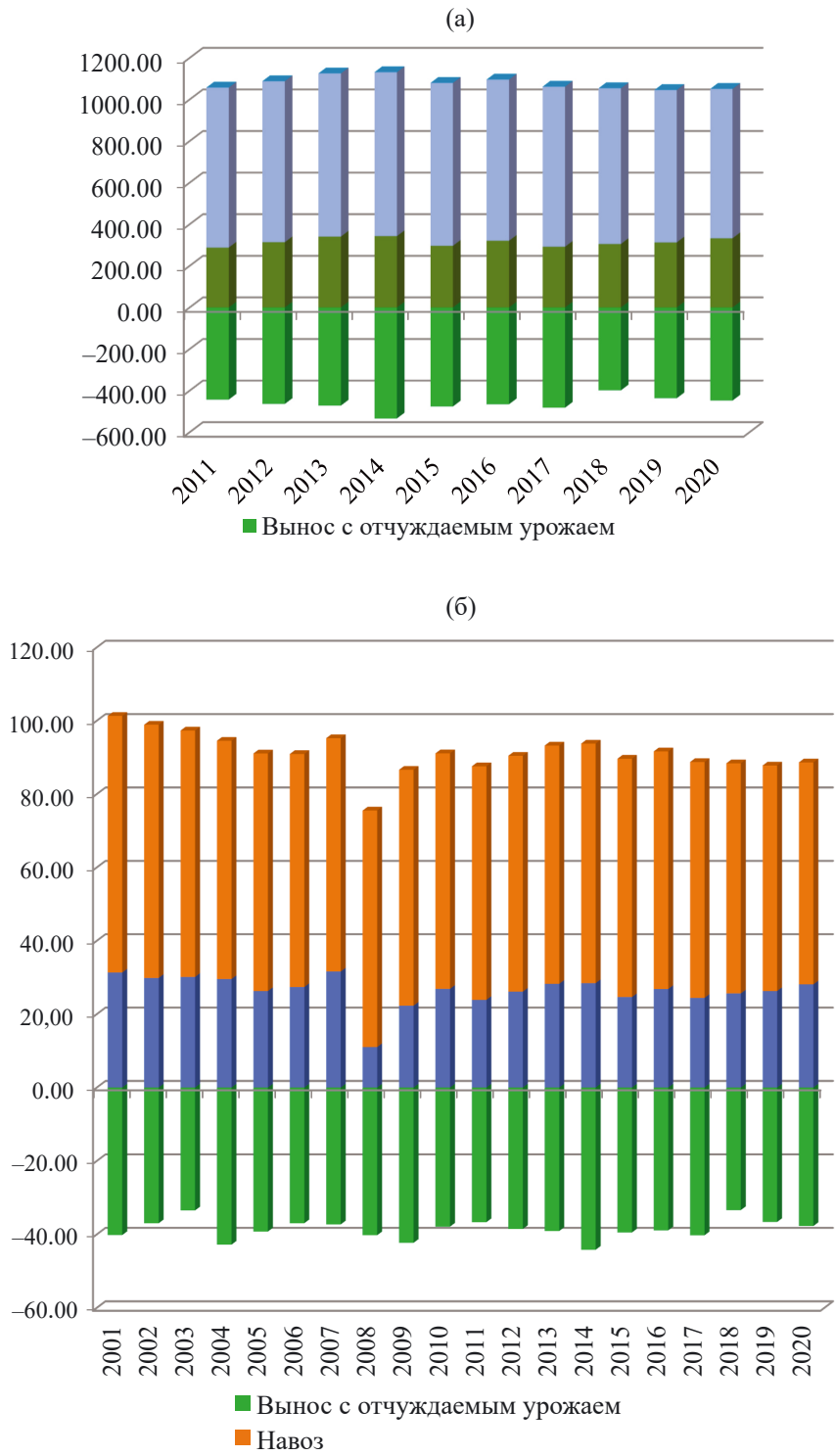


Рис. 5. Баланс калия в земледелии Германии: (а) – тыс. т/год, (б) – на единицу площади, кг/га.

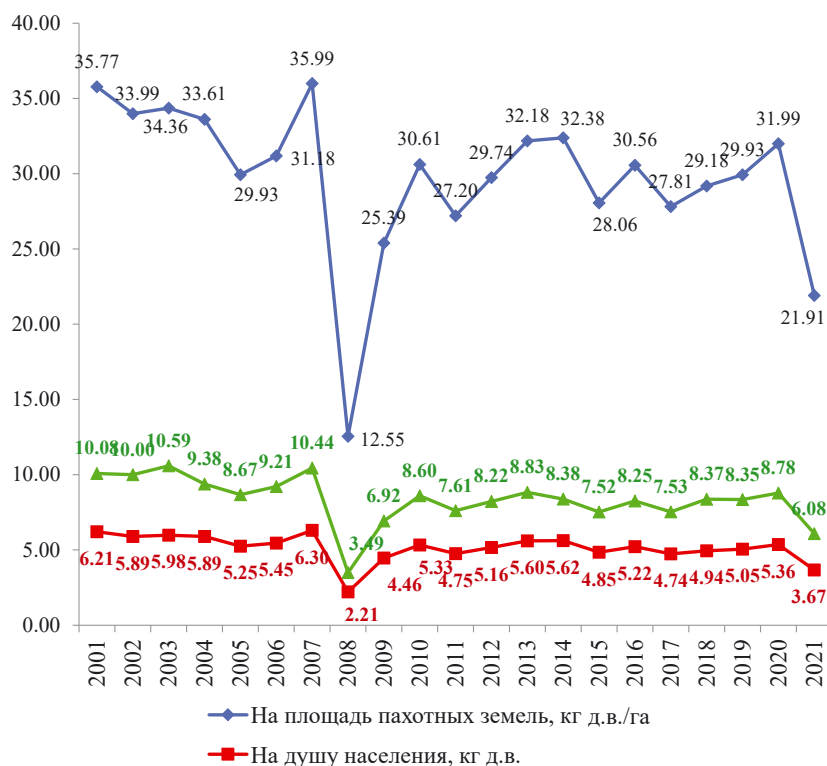


Рис. 6. Динамика внесения калийных удобрений в Германии (2011–2021 гг.).

В 2007 г. в Германии произошел рост применения минеральных удобрений — на 15.4% к 2006 г., что было связано с мировым кризисом цен на продовольствие 2007–2008 гг. В 2007 г. наблюдали беспрецедентный рост цен на сельскохозяйственные товары. По итогам года, индекс S&P GSCI Agriculture, отражающий динамику цен на 7 важнейших видов сельхозпродукции, вырос на 41% — рекорд за всю историю наблюдений. Причин столь бурного роста было несколько: среди основных можно выделить стремительное развитие индустрии биотоплива, плохие погодные условия, вызвавшие неурожай пшеницы в Австралии и Канаде, высокий спрос на продовольствие со стороны развивающихся стран, а также оживление спекулятивного интереса к данному сектору товарных рынков, связанное со сравнительно слабой его динамикой в предыдущие годы, а также со стремлением инвесторов избежать инфляционные риски [19].

В 2008 г. с началом мирового экономического кризиса в стране произошел спад применения минеральных удобрений до 11.0 кг д.в./га, в связи с чем баланс калия сократился до 35.3 кг д.в./га. В 2009 г. произошло увеличение применения калийных минеральных удобрений до 25.4 кг д.в./га. В период 2011–2020 гг. этот показатель стабилизировался на уровне 30.0 кг д.в./га.

Однако в 2021 г. произошел резкий спад применения калийных удобрений до 21.9 кг д.в./га (на 31.5%

к 2020 г.), что связано с рядом причин, основными из которых были удорожание удобрений, произведенных внутри страны, ввиду роста цен на энергоносители, в первую очередь на природный газ; соблюдение требований к использованию минеральных удобрений и пестицидов в рамках Европейской зеленой сделки.

Общий вклад сельскохозяйственного сектора Германии в эмиссию парниковых газов оценивали в 9% от общего объема выбросов в 2020 г. Правительство страны относит агропромышленный комплекс к трудно декарбонизируемым отраслям экономики. Однако принимаемые в Германии меры, в первую очередь по сокращению поголовья скота, позволили сократить за последние годы эмиссию газов на 24% по отношению к 1990 г. Существенный вклад в сокращение выбросов парниковых газов внесли изменения в землепользовании страны — 4.4% [20].

Закон Германии о борьбе с изменением климата устанавливает бюджет выбросов для сельскохозяйственного сектора в размере 56 млн т эквивалента CO₂ в 2030 г. (в 2020 г. — 70 т). Программа действий по изменению климата до 2030 г. включает такие меры, как сокращение применения азотных удобрений, усиление ферментации навоза, расширение органического земледелия, сокращение выбросов парниковых газов в животноводстве, а также продвижение потенциала

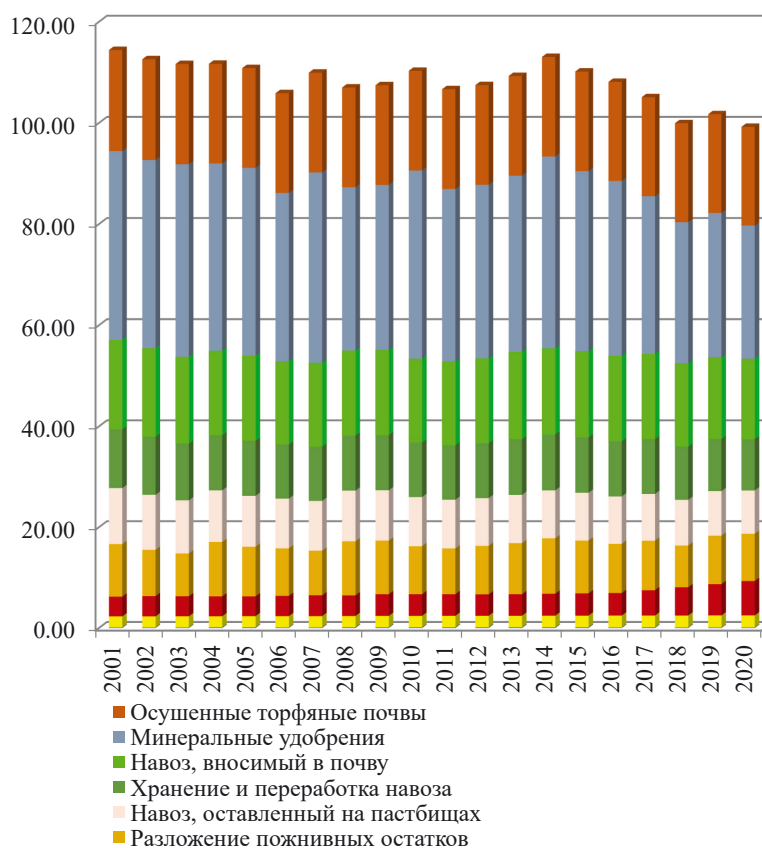


Рис. 7. Структура выбросов закиси азота в ходе сельскохозяйственной деятельности Германии, кт.

сохранения углерода в сельскохозяйственных угодьях, например, при накоплении гумуса.

Благодаря данным мерам общий объем эмиссии оксида азота в ходе сельскохозяйственного производства сократился на 12.2% — с 113.1 кт в 2014 г. до 99.2 кт в 2020 г. (рис. 7), прежде всего за счет сокращения выбросов от минеральных удобрений (с 38.0 до 26.4 кт), а также хранения, переработки и внесения навоза, а также навоза, остановленного на пастбищах (с 37.0 до 34.7 кт).

Однако в период 2001–2020 гг. отмечена тенденция к увеличению эмиссии N_2O от утилизации отходов агропродовольственных систем и внутрихозяйственного использования энергии — на 5.8 и 8.7% соответственно.

Выбросы закиси азота от возделывания сельхозкультур на торфяных почвах, сжигания и разложения растительных остатков являются стабильными и составляли в период 2001–2020 гг. в среднем 19.7, 0.12 и 9.75 кт соответственно.

Согласно данным FAOSTAT, благодаря сокращению поголовья скота в 2016 г. произошел слом возрастающего тренда эмиссии метана (рис. 8а).

В 2020 г. суммарные выбросы метана от сельскохозяйственного производства сократились по отношению к 2015 г. на 122.0 кт (на 7.4%), в том числе: от кишечной ферментации сельскохозяйственных животных и птиц — на 100.2 кт, хранения и переработки навоза — на 22.9 кт. В данный период также отмечают тенденцию к сокращению эмиссии метана от сжигания растительных остатков и внутрихозяйственного использования энергии — на 12.3 и 10.5% соответственно.

Однако объемы выбросов CH_4 от утилизации отходов агропродовольственных систем в период 2010–2020 гг. ежегодно нарастали — с 220.6 кт в 2010 г. до 278.8 кт в 2020 г. (на 20.9%).

Суммарные объемы эмиссии углекислого газа в период 2010–2020 гг. были практически неизменными и находились в пределах 36.9–37.3 тыс. кт (рис. 8б), в том числе в среднем по годам: от внутрихозяйственного использования энергии — 7.5, утилизации отходов агропродовольственных систем — 1.8, выращивания сельхозкультур на торфяных почвах — 27.7 тыс. кт.

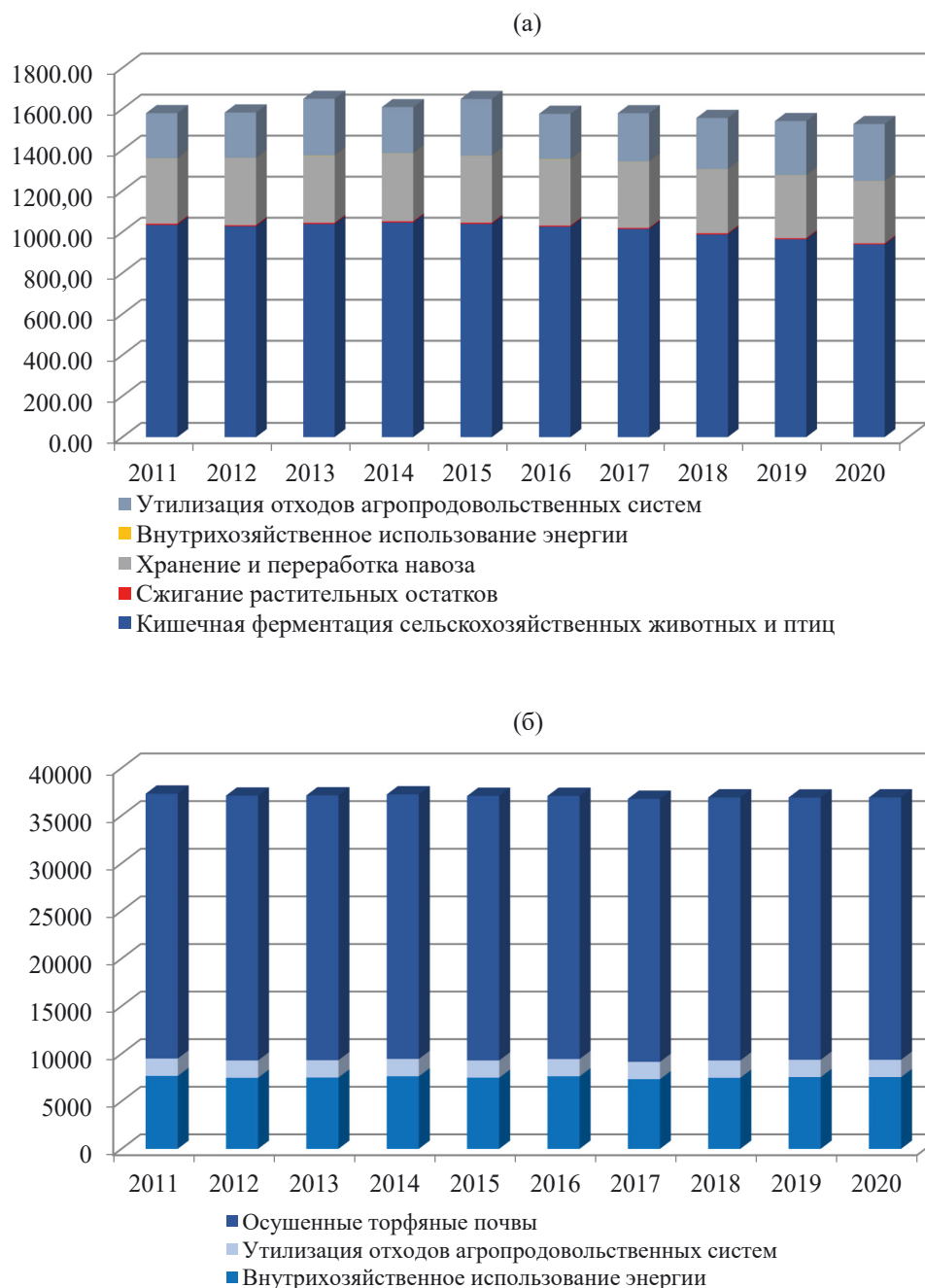


Рис. 8. Выбросы парниковых газов в ходе сельскохозяйственной деятельности Германии: (а) – метана, (б) – углекислого газа, кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Политика, проводимая правительством Германии в области применения удобрений, имеет важное значение для охраны окружающей среды и достижения устойчивого развития в сельском хозяйстве. В последние годы страна предприняла ряд мер для уменьшения негативного воздействия удобрений на окружающую среду и водные ресурсы. Результаты этой

политики уже начали давать позитивные результаты, в частности, наблюдают сокращение эмиссии оксида азота и метана. Однако необходимо отметить, что эти результаты достигаются не без вызовов. Некоторые фермеры сталкиваются с трудностями в адаптации к новым методам и ограничениям, связанным с применением удобрений. Это требует дополнительной поддержки и обучения со стороны правительства и сельскохозяйственных организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAO. The State of food security and nutrition in the World. Rome, 2018. URL: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3017en> (дата обращения: 15.08.2023).
2. United Nations. Transforming our World: the 2030 Agenda for sustainable development. URL: https://www.icnl.org/wp-content/uploads/A_RES_70_1_E.pdf (дата обращения: 15.08.2023).
3. Митрофанов С.В., Орлова Н.В. Использование биомодификации удобрений с целью повышения устойчивости растениеводства // Агрохим. вестн. 2023. № 1. С. 23–30.
4. Tilman D. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proceed. Nat. Acad. Scie.* 2011. V. 108. № 50. P. 20260–20264.
5. Cordell D. The story of phosphorus: Global food security and food for thought // *Global Environ. Change.* 2009. V. 19. № 2. P. 292–305.
6. Митрофанов С.В., Орлова Н.В., Благов Д.А., Панфёров Н.С., Тетерин В.С. Анализ тенденций развития тукоосмесительного оборудования // *Аграрн. наука.* 2023. № 6. С. 98–110.
7. Bouwman A.F. Exploring changes in world ruminant production systems // *Global Biogeochem. Cycl.* 2000. V. 14. № 3. P. 1107–1121.
8. Galloway J.N. Nitrogen cycles: Past, present, and future // *Biogeochemistry.* 2008. V. 70. № 2. P. 153–226.
9. Zhang F.S. Managing nutrient for both food security and environmental quality in China // *J. Agricult. Environ. Ethics.* 2015. V. 28. № 5. P. 833–857.
10. Sharpley A.N. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment // *J. Environ. Qual.* 2009. V. 38. № 5. P. 1939–1948.
11. Guzman G.I. Fertilizer management effects on water quality and crop production // *J. Environ. Qual.* 20–15. V. 44. № 6. P. 1859–1871.
12. Davidson E.A. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: assessment, measurement and mitigation // *Plant and Soil.* 2000. V. 219. № 1–2. P. 249–252.
13. Mandell S.V. Global crop nitrogen use efficiency as affected by nitrogen deposition // *Environ. Res. Let.* 2018. V. 13. № 4. 044013.
14. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО) // *Агрохимия.* 2019. № 5. С. 3–20.
15. Кудеяров В.Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России // *Агрохимия.* 2021. № 11. С. 3–15.
16. Yan X. Methane emissions from rice fields: quantification, mechanisms, and mitigation strategies // *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. V. 241. P. 129–158.
17. Bouwman A.F. Exploring changes in world ruminant production systems // *Agricult. Syst.* 2002. V. 84. № 2. P. 121–153.
18. Sogbedji J.M. Nutrient management strategies to reduce environmental impact of fertilizers in agricultural soils: a review // *Agron. Sustain. Develop.* 2015. V. 35. № 4. P. 1217–1245.
19. Zhang X. The use of biodegradable fertilizers to improve crop yield and quality // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2020. V. 293. 106862. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106862>
20. Climate-friendly farming: The proposals of Germany's agriculture commission. URL: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/climate-friendly-farming-proposals-germanys-agriculture-commission> (дата обращения: 18.08.2023).

Impact of Fertilizer Use on the Balance of Essential Nutrients and Greenhouse Gas Emissions in Germany

S. V. Mitrofanov^{a, #}, E. V. Serova^a, N. V. Orlova^a

^a National Research University "Higher School of Economics",
Pokrovsky b-r, 11, Moscow 109028, Russia

[#] E-mail: smitrofanov@hse.ru

The effect of fertilizers on the balance of trace elements and the sustainability of agriculture in Germany was studied. It has been established that the balance of basic nutrients in the soil is maintained at a deficiency-free level due to the systematic and balanced use of mineral and organic fertilizers. However, the German Government is currently actively implementing policies aimed at reducing the use of traditional forms of organic and mineral fertilizers, introducing alternative ways to ensure soil fertility and crop yields. The aim of such a policy is to reduce the negative impact of agrochemicals on the environment and greenhouse gas emissions, in particular.

Keywords: sustainable agriculture in Germany, fertilizers, balance of plant nutrition elements, greenhouse gas emissions.