

Дата поступления рукописи в редакцию: 19.05.2026 г.
Дата принятия рукописи в печать: 25.06.2026 г.

DOI: 10.24412/2782-3849-2026-6-644-649

ПАВЛОВА Яна Сергеевна,

кандидат с.-х.н., доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ

e-mail: yana.laborant.pavlova@mail.ru

НЕВЕРОВА Ольга Петровна,

кандидат биол. наук, доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ,

e-mail: opneverova@mail.ru

СТЕПАНОВ Алексей Владимирович,

кандидат с.-х. наук, доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ,

e-mail: alexeystepanow@mail.ru

СМИРНОВА Екатерина Сергеевна,

кандидат с.-х. наук, доцент кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ,

e-mail: ekaterina-kazantseva@list.ru

БАРЫКИНА Екатерина Сергеевна,

Преподаватель кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ,

e-mail: barykina_10@mail.ru

УКРОЖЕНКО Дарья Сергеевна,

Преподаватель кафедры биотехнологии и пищевых продуктов, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ,

e-mail: darya.ukrozhenkozoo@mail.ru

ПЕРЕРАБОТКА АГРООТХОДОВ КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ

Аннотация. Современное сельское хозяйство функционирует в условиях фундаментального противоречия между необходимостью обеспечения продовольственной безопасности и колоссальными объемами генерируемых отходов, нерациональное обращение с которыми ведёт к деградации почв, эмиссии парниковых газов и загрязнению водных объектов. Линейная модель «взял — использовал — выбросил» исчерпала свой потенциал в аграрном секторе, уступая место циркулярной экономике, в рамках которой агроотходы превращаются в ценный вторичный ресурс. Цель статьи — концептуализировать роль переработки агроотходов в переходе к циркулярной модели на основе принципов иерархии обращения с отходами, промышленного симбиоза и оценки жизненного цикла. В работе систематизирована типология агроотходов (растительные, животноводческие, перерабатывающие потоки) с количественной оценкой их объёмов, показаны экологические и экономические издержки линейной модели, проявляющиеся в потере органического углерода, эвтрофикации и росте затрат на природоохранные мероприятия. Рассмотрены теоретические основания циркулярной экономики применительно к АПК, включая концепции «петель материи», каскадного использования и дизайна отходов с эволюцией R-принципов от 3R до 9R. Проанализированы технологические коридоры переработки агроотходов — анаэробное сбраживание (биогаз), компостирование, пиролиз (биочар) и ферментация, — а также продукты высокого передела: биоудобрения, биопестициды, биополимеры и строительные композиты. Особое внимание уделено промышленному симбиозу как механизму интеграции сельхозпроизводителей с энергетикой, химической промышленностью и ЖКХ, обеспечивающему эмерджентные эффекты и замыкание материальных циклов. Выявлены

барьеры циркулярной трансформации — экономические (высокая стоимость логистики и разделения), нормативные (недостаточная поддержка) и информационные (дефицит знаний и консультаций), — а также предложены индикаторы эффективности переработки, включая время стабилизации компоста, снижение углеродного следа и возврат биогенов. Полученные результаты систематизируют существующие технологические и институциональные решения, а также выявляют критерии замыкания материальных циклов в агропромышленном комплексе.

Ключевые слова: циркулярная экономика, агроотходы, анаэробное сбраживание, биогаз, промышленный симбиоз, биоудобрения, биопестициды, индикаторы замыкания цикла, барьеры циркулярной трансформации

PAVLOVA Yana Sergeevna,

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Biotechnology and Foodstuffs, FGBOU VO Ural GAU

NEVEROVA Olga Petrovna,

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biotechnology and Foodstuffs, FGBOU VO Ural GAU

STEPANOV Alexey Vladimirovich,

candidate of agricultural sciences, associate professor Department of Biotechnology and Foodstuffs, FGBOU VO Ural GAU

SMIRNOVA Ekaterina Sergeevna,

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor Department of Biotechnology and Food Products, FGBOU VO Ural State Agrarian University

BARYKINA Ekaterina Sergeevna,

Lecturer Department of Biotechnology and Food Products, FGBOU VO Ural State Agrarian University

UKROZHENKO Darya Sergeevna,

Lecturer Department of Biotechnology and Foodstuffs, FGBOU VO Ural GAU

AGRICULTURAL WASTE RECYCLING AS AN ELEMENT OF THE CIRCULAR ECONOMY

Annotation. Modern agriculture operates under a fundamental contradiction between the need to ensure food security and the colossal volumes of waste generated, the irrational management of which leads to soil degradation, greenhouse gas emissions, and water pollution. The linear “take-use-dispose” model has exhausted its potential in the agricultural sector, giving way to a circular economy in which agricultural waste is transformed into a valuable secondary resource. The aim of this article is to conceptualize the role of agricultural waste recycling in the transition to a circular economy based on the principles of the waste management hierarchy, industrial symbiosis, and life cycle assessment. This paper systematizes the typology of agricultural waste (plant, livestock, and recycling streams) with a quantitative assessment of their volumes. It also demonstrates the environmental and economic costs of a linear model, manifested in the loss of organic carbon, eutrophication, and increased costs of environmental protection measures. The theoretical foundations of a circular economy as applied to the agro-industrial complex are considered, including the concepts of “matter loops,” cascade use, and waste design with the evolution of R-principles from 3R to 9R. Technological corridors for processing agricultural waste are analyzed—anaerobic digestion (biogas), composting, pyrolysis (biochar), and fermentation—as well as high-value products: biofertilizers, biopesticides, biopolymers, and building composites. Particular attention is paid to industrial symbiosis as a mechanism for integrating agricultural producers with the energy, chemical, and housing and utilities sectors, ensuring emergent effects and closing material cycles. Barriers to circular transformation are identified—economic (high logistics and separation costs), regulatory (insufficient support), and informational (deficit of knowledge and consultation). Indicators of recycling efficiency are proposed, including compost stabilization time, carbon footprint reduction,

◇ and nutrient recovery. The obtained results systematize existing technological and institutional solutions and identify criteria for closing material cycles in the agro-industrial complex.

◇ **Key words:** circular economy, agro-waste, anaerobic digestion, biogas, industrial symbiosis, biofertilizers, biopesticides, indicators of closed-loop production, barriers to circular transformation

Современное сельское хозяйство сталкивается с фундаментальным противоречием: с одной стороны, оно обязано обеспечивать продовольственную безопасность растущего населения планеты, с другой — генерирует колоссальные объемы отходов (солома, лузга, навоз, жом, сточные воды), нерациональное обращение с которыми приводит к деградации почв, выбросам метана и загрязнению водных бассейнов. Линейная экономическая модель «взял — использовал — выбросил» исчерпала свой потенциал в аграрном секторе, уступая место циркулярной экономике. В рамках циркулярного подхода агроотходы перестают быть проблемой и превращаются в ценный вторичный ресурс — субстрат для производства биогаза, органических удобрений, биопластиков, кормовых добавок и стройматериалов. Теоретический анализ переработки агроотходов как элемента циркулярной экономики позволяет не только систематизировать существующие технологические и институциональные решения, но и выявить критерии замыкания материальных циклов в АПК. Цель данной статьи — концептуализировать роль переработки агроотходов в переходе к циркулярной модели, опираясь на принципы иерархии обращения с отходами, промышленной симбиоз и оценку жизненного цикла.

Агроотходы подразделяются на три основные категории: растительные (пожнивные остатки, солома зерновых, лузга подсолнечника, ботва кукурузы и картофеля), животноводческие (навоз крупного рогатого скота, свиней, овец, коз, а также помет птицы) и отходы переработки (образующиеся при очистке и консервировании сырья). Согласно приведенным данным, ежегодное накопление только органических отходов животноводства в ряде стран превышает 200 млн тонн, причем навозные стоки свиноферм из-за высокой влажности (90–95%) непригодны для традиционного компостирования и требуют иных методов утилизации. Объемы растительной биомассы также значительны: например, при возделывании кукурузы более 50% всей массы составляют полевые отходы, а при переработке подсолнечника образуется трудносжигаемая шелуха, богатая диоксидом кремния [2, 3].

Линейная модель аграрного производства, ориентированная на максимизацию прибыли без учета экологических последствий, порождает растущие издержки, которые напрямую связаны

с потерей плодородия почв и деградацией экосистем. В России с 2017 по 2024 год объем образования отходов вырос более чем на 2,3 млрд тонн, тогда как доля их вторичного использования, напротив, сократилась (с 2054 до 1500 млн тонн), что отражает устойчивый отказ от рециклинга и усиление нагрузки на окружающую среду. В сельском хозяйстве такое обращение с органическими остатками ведет к эмиссии парниковых газов (метана и углекислоты) при разложении навоза и растительной биомассы на открытых площадках, а также к эвтрофикации водоемов за счет вымывания азота и фосфора. Одновременно происходит потеря органического углерода в почвах: невосполняемое отчуждение питательных веществ с урожаем и отсутствие системного возврата переработанной органики снижают содержание гумуса, усиливают кислотность и требуют компенсаторного внесения минеральных удобрений. Экономически это выражается не только в росте затрат на природоохранные мероприятия (финансирование которых в РФ увеличилось более чем на 590 млрд рублей за тот же период), но и в упущенной выгоде от неиспользованных вторичных ресурсов, что подтверждает неэффективность линейного подхода в долгосрочной перспективе [6].

Циркулярная экономика, рассматриваемая как новый этап развития «зеленой» экономики и инструмент достижения целей устойчивого развития, базируется на принципиально иной философии организации хозяйства, чем линейная модель. В приложении к агропромышленному комплексу это означает формирование замкнутых «петель материи», где органические остатки перестают быть отходами и возвращаются в производственный цикл. Ключевым механизмом здесь выступает каскадное использование биомассы: сначала она служит для получения продуктов питания и кормов, затем — для производства энергии (биогаз, биочар) или материалов (биопластики, композиты), и лишь на последнем этапе — для возврата питательных веществ в почву в виде удобрений. Принципиальное значение приобретает «дизайн отходов» (design for circularity): уже на стадии планирования агропроизводства и технологических процессов закладывается возможность многократной регенерации ресурсов. Как подчеркивается в теоретических работах, переход от простой триады 3R (reduce, reuse, recycle) к

расширенной системе 9R (от Refuse — отказа от избыточного сырья — до Recover — извлечения энергии) позволяет системно выстраивать восстановительные циклы в АПК, минимизируя потери органического углерода и биогенных элементов [5].

Среди технологических подходов к утилизации органических отходов животноводства ключевое место занимает анаэробное сбраживание, которое в отличие от классического компостирования (аэробного разложения) позволяет не только обеззараживать субстрат, но и получать биогаз — смесь метана и углекислого газа. Как показано в работе Гайфуллина и соавторов, выход метана зависит от химического состава сырья: при ферментации одного только свиного навоза с 50 кг субстрата можно получить около 13,9 м³ биогаза, а добавление измельчённого зерна кукурузы повышает этот показатель до 14,8 м³ за счёт увеличения доли углерода. Процесс реализуется в трёх температурных коридорах — психрофильном (3–25°C), мезофильном (25–40°C) и термофильном (45–55°C), причём последний даёт максимальную скорость выделения метана, но требует значительных энергозатрат. В отличие от анаэробной ферментации, традиционное компостирование на открытых площадках ведёт к потерям до 40% азота и не позволяет утилизировать слишком жидкие навозные стоки свиноферм. Пиролиз (получение биочара) в контексте технологических коридоров дополняет анаэробный метод, позволяя перерабатывать сухие растительные остатки и фиксировать углерод в стабильной форме [4].

Агроотходы служат сырьём для получения продукции высокого передела, прежде всего биоудобрений и биопестицидов. Биоудобрения на основе живых микроорганизмов (*Azotobacter*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*) улучшают питание растений и поддерживают почвенную микробиоту, в отличие от синтетических аналогов, подкисляющих почву. Биопестициды из грибов (*Trichoderma*), бактерий (*Bacillus*) или растительных экстрактов (ним, пиретрум) эффективно подавляют патогены и вредителей без накопления в окружающей среде. Пожнивные остатки и сидераты при разложении не только обогащают почву органикой, но и выделяют соединения, угнетающие нематод. Кроме того, из лигноцеллюлозной биомассы (солома, лузга) потенциально можно получать биополимеры и армирующие наполнители для строительных композитов, что расширяет ассортимент высокомаржинальной продукции из агроотходов в рамках циркулярной экономики [9].

Промышленный симбиоз, впервые масштабированный в Калундборге

(Дания), строится на обмене энергетическими и материальными потоками между предприятиями, где отходы одного производства становятся ресурсом для другого. В аграрном контексте — это индустриально-аграрный симбиоз, интегрирующий сельхозпроизводителей с энергетикой (биогаз для тепло- и электрогенерации), химической промышленностью (биоудобрения, биопестициды, сырьё для органического синтеза) и ЖКХ (переработка органической фракции твёрдых отходов и осадков сточных вод). Ключевые эффекты — эмерджентность (появление новой стоимости за счёт межотраслевого взаимодействия) и интерэктность (взаимное влияние технологических процессов, повышающее общую эффективность). Симбиоз предполагает не примитивное сжигание, а глубокую сепарацию, анаэробное сбраживание, пиролиз и газогенерацию, что позволяет извлекать из агроотходов и коммунальной органики электроэнергию, тепло, синтез-газ и вторичные ресурсы, замыкая циклы углерода и биогенных элементов. Критические условия успеха — короткое физическое расстояние между партнёрами, добровольность сотрудничества и поддержка муниципалитетов [8].

Переход малых и средних предприятий к циркулярной модели сдерживается комплексом барьеров, главный из которых — нехватка финансов (около 80% опрошенных МСП). Экономическая нецелесообразность связана с высокими затратами на реорганизацию производства, изменение логистики и стоимость разделения вторичных потоков, которые для небольших компаний часто превышают выгоду от реализации отходов. Нормативные ограничения включают недостаточную государственную поддержку и отсутствие стимулирующей законодательной среды. Информационные барьеры проявляются в дефиците практических примеров и консультационных услуг: более половины микро- и средних предприятий указали на отсутствие информации как на серьёзное препятствие. В отличие от крупного бизнеса, располагающего внутренними компетенциями, МСП зависят от внешних источников знаний, что при слабой инфраструктуре поддержки замедляет их циркулярную трансформацию [1].

Оценка эффективности переработки агроотходов требует интегральных индикаторов замыкания материальных циклов. Одним из них является средневзвешенное время стабилизации компоста, учитывающее динамику содержания органического вещества, растворимого органического углерода и респираторной активности; чем быстрее компост достигает стабильного состояния, тем выше эффективность

биотехнологии. Снижение углеродного следа косвенно отражается через уменьшение содержания органического вещества в процессе компостирования (с 87% до 35–46% за 4 месяца) и минимизацию эмиссии CO₂ на завершающих этапах. Возврат биогенов проявляется в конечных характеристиках зрелого компоста: содержание растворимого органического углерода на уровне 10 мг·г⁻¹ и респираторная активность около 2 мг CO₂–С·г⁻¹·24 ч⁻¹ свидетельствуют о стабилизации органического вещества и его готовности к внесению в почву без риска вторичной деградации. Предложенный в работе подход с использованием обобщённых аддитивных моделей и рандомизации позволяет количественно сравнивать различные варианты переработки и выявлять тот, который обеспечивает максимальную скорость замыкания цикла при минимальной вариабельности показателей [7].

Заключение. Проведённый анализ подтверждает, что переход от линейной модели к циркулярной в АПК является не только экологической необходимостью, но и экономической возможностью. Иерархия обращения с отходами и каскадное использование биомассы создают основу для минимизации потерь углерода и биогенов. Технологические коридоры (анаэробное сбраживание, компостирование, пиролиз) и продукты высокого передела (биоудобрения, биопестициды, биополимеры) повышают привлекательность циркулярных решений и формируют новые рынки. Ключевой механизм интеграции — промышленный симбиоз, соединяющий сельхозпроизводителей с энергетикой, химией и ЖКХ. Основные барьеры (дефицит финансирования у МСП, недостаток информации и поддержки) требуют адресных стимулов. Предложенные индикаторы (время стабилизации компоста, снижение углеродного следа, возврат биогенов) позволяют количественно оценивать эффективность биотехнологий. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методик расчёта коэффициента циркулярности и адаптацию практик промышленного симбиоза для малых и средних предприятий.

Список литературы:

[1] Батова Н., Тоцицкая И., Шершунович Е. Циркулярная трансформация экономики: шанс для малых и средних предприятий. BEROС Policy Paper Series. 2021. No. PP 27. 13 с.

[2] Биньковская А. В., Волков А. И., Шанина Т. П. Комплексный анализ распределения потоков органических отходов в агроэкосистемах Одесской области Украины и путей интенсификации их переработки

(с использованием геоинформационных технологий) // Географический вестник. 2015. № 4 (35). С. 43–52.

[3] Винаров А. Ю. Биотехнологическая переработка отходов животноводческих комплексов // Эффективное животноводство. 2021. № 8 (174). С. 100–101.

[4] Гайфуллин И. Х., Зиганшин Б. Г., Шорников А. В., Иванов Б. Л., Зиннатуллина А. Н. Теоретические аспекты процесса получения биогаза при анаэробной ферментации органических отходов // Техника и технологии в животноводстве. 2024. № 1. С. 90–95.

[5] Гурьева М. А. Теоретические основы концепта циркулярной экономики // Экономические отношения. 2019. Т. 9. № 3. С. 2311–2336.

[6] Савкин В. И. Экономические аспекты экологических проблем современного АПК в развитии и поддержки производства отечественной органической продукции // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. 2025. № 3 (42). С. 18–23.

[7] Селивановская С. Ю., Чижикова Н. А., Ярлыченко С. А., Савельев А. А. Оценка эффективности биотехнологий переработки органических отходов // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2009. № 3. С. 93–103.

[8] Фиговский О., Задорский В. Индустриально-аграрный симбиоз – основа инновационного технологического бизнеса в экономике [Электронный ресурс] // НОР : сайт. 2018. 6 сент. URL: <https://nauka-i-religia.ru> (дата обращения: 11.05.2026).

[9] Хусайнов Х. А., Тунтаев А. В., Елмурзаева Ф. Д. Интеграция биоресурсов в растениеводство: краткий обзор // Новые технологии. 2025. № 4. С. 219–231.

References:

[1] Batova N., Tochitskaya I., Shershunovich E. Circular transformation of the economy: a chance for small and medium-sized enterprises. BEROС Policy Paper Series. 2021. No. PP 27. 13 pp.

[2] Binkovskaya A. V., Volkov A. I., Shanina T. P. Comprehensive analysis of the distribution of organic waste flows in agroecosystems of the Odessa region of Ukraine and ways to intensify their processing (using geographic information technologies) // Geographical Bulletin. 2015. № 4 (35). S. 43–52.

[3] Vinarov A. Yu. Biotechnological processing of waste from livestock complexes // Efficient animal husbandry. 2021. № 8 (174). S. 100–101.

[4] Gaifullin I. Kh., Ziganshin B. G., Shornikov A. V., Ivanov B. L., Zinnah-tullin A. N. Theoretical aspects of the process of obtaining biogas during

anaerobic fermentation of organic waste//Technique and technology in animal husbandry. 2024. № 1. S. 90-95.

[5] Gurieva M. A. Theoretical foundations of the concept of circular economics//Economic relations. 2019. VOL. 9. № 3. S. 2311-2336.

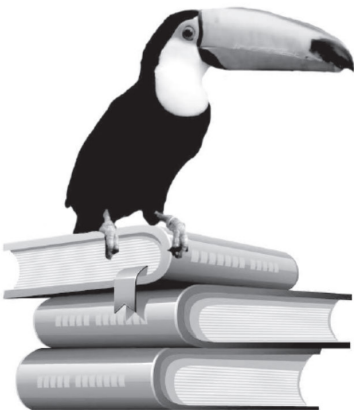
[6] Savkin V. I. Economic aspects of the environmental problems of modern agro-industrial complex in the development and support of the production of domestic organic products//Bulletin of technosphere safety and rural development. 2025. № 3 (42). S. 18-23.

[7] Selivanovskaya S. Yu., Chizhikova N. A.,

Yarlychenko S. A., Savelyev A. A. Evaluation of the effectiveness of biotechnologies for the processing of organic waste//Scientific notes of Kazan University. Natural Sciences series. 2009. № 3. S. 93-103.

[8] Figovsky O., Zadorsky V. Industrial-agrarian symbiosis is the basis of innovative technological business in the economy [Electronic re-source]//NOR: site. 2018. 6 Sep URL: <https://nauka-i-religia.ru> (Accessed: 11.05.2026).

[9] Khusainov Kh. A., Tuntaev A. V., Elmurzaeva F. D. Integration of bioresins in crop production: a brief overview//New technologies. 2025. № 4. S. 219-231.



ЮРКОМПАНИ

www.law-books.ru

Юридическое издательство
«ЮРКОМПАНИ»

Издание учебников,
учебных и методических
пособий, монографий,
научных статей.

Профессионально.

В максимально
короткие сроки.

Размещаем
в РИНЦ, E-Library.