

4.1.3. АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ
(БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.861:631.95

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_4_73

EDN: ARVTXE

**Возможности регулирования потоков биогенных элементов
в агроэкосистемах путем использования органо-минерального
удобрения на основе ферментированных отходов птицеводства****Галина Викторовна Ильина^{1✉}, Дмитрий Юрьевич Ильин²,
Анна Андреевна Гришина³, Альбина Рафаэлевна Дашкина⁴**^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия¹ilyina.g.v@pgau.ru[✉]

Аннотация. Биогенные элементы и их потоки в агроэкосистемах следует рассматривать как фактор, определяющий формирование почвенного плодородия, обеспечивающий экологическое благополучие и урожай растительной массы. Изменение естественных циклов биогенных элементов в агроэкосистемах происходит за счет отчуждения питательных веществ с урожаем, потерь в результате стока, инфильтрации, денитрификации, эмиссии газов, снижения их доступности в силу флуктуаций водородного потенциала почвы. Использование органических удобрений не всегда способно полностью решить проблему потерь элементов питания. Значительные концентрации NH_3 , NH_4^+ и H_2S могут лимитировать развитие и активность почвенной микрофлоры, определяющей вектор потока биогенных элементов. Рассматривается потенциал удобрения на основе пометных масс индейки как источника биогенных элементов и агромелиоранта. С целью удержания и сохранения биодоступности элементов питания разработан способ ускоренного компостирования пометно-подстилочных масс путем их микробной ферментации и иммобилизации биогенов на минеральном носителе. Каскадная ферментативная деструкция пометно-подстилочных масс индейки осуществляется функциональным комплексом микроорганизмов, интегрированным с природным минералом – глауконитом. При ферментации использованы культуры бактерий, способных внести весомый вклад в процессы аммонификации и нитрификации. Инициация процесса разложения отходов обеспечивается аборигенной микрофлорой, однако установлено повышение его эффективности за счет дополнительного внесения функциональных комплексов микроорганизмов на 21,5%. Существенный вклад в удержание подвижных форм биогенных элементов в почвах вносит и глауконит, обладающий определенными сорбционными свойствами и являющийся дополнительным резервом минеральных элементов. При использовании органо-минерального удобрения потери азота сокращаются до 45%, доля доступного фосфора возрастает на 25–28%, что ведет к снижению эмиссии газов в атмосферу и оптимизации потоков биогенных элементов в почве.

Ключевые слова: конверсия органических отходов, органо-минеральные удобрения, биогенный азот, плодородие почвы, эмиссия газов

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-26-10059, <http://rscf.ru/project/23-26-10059/>.

Для цитирования: Ильина Г.В., Ильин Д.Ю., Гришина А.А., Дашкина А.Р. Возможности регулирования потоков биогенных элементов в агроэкосистемах путем использования органо-минерального удобрения на основе ферментированных отходов птицеводства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 4(79). С. 73–84. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_4_73–84.

4.1.3. AGRICULTURAL CHEMISTRY, AGRONOMIC SOIL SCIENCE,
PROTECTION AND QUARANTINE OF PLANTS (BIOLOGICAL SCIENCES)

Original article

**Possibilities of regulation of biogenic element fluxes
in agroecosystems by using organomineral fertilizer
based on fermented poultry waste****Galina V. Ilyina^{1✉}, Dmitry Yu. Ilyin², Anna A. Grishina³, Albina R. Dashkina⁴**^{1, 2, 3, 4} Penza State Agrarian University, Penza, Russia¹ilyina.g.v@pgau.ru[✉]

Abstract. Biogenic elements and their fluxes in agroecosystems should be considered as a factor determining the formation of soil fertility that ensures ecological well-being and yield of plant mass. Changes in natural cycles of

biogenic elements in agroecosystems occur due to the loss of nutrients with harvest, losses as a result of drainage, infiltration, denitrification, emission of gases, and reduction of elements availability due to fluctuations in soil hydrogen potential. The application of organic fertilizers is not always able to completely solve the problem of nutrient element losses. Significant concentrations of NH_3 , NH_4^+ and H_2S can limit the development and activity of soil microflora, which determines the vector of biogenic element fluxes. The authors consider the potential of turkey litter-based fertilizer as a source of biogenic elements and agromeliorant. In order to retain and preserve the bioavailability of nutrients the authors have developed a method of accelerated composting of litter masses by their microbial fermentation and immobilization of biogens on a mineral carrier. Cascade enzymatic degradation of turkey litter is performed by a functional complex of microorganisms integrated with the glauconite natural mineral. Fermentation utilizes bacterial cultures capable of making a significant contribution to the processes of ammonification and nitrification. The initiation of waste decomposition process is provided by indigenous microflora, but it has been established that additional application of functional complexes of microorganisms increases its efficiency by 21.5%. A significant contribution to the retention of mobile forms of biogenic elements in soils is made by glauconite, which has certain sorption properties and is an additional reserve of mineral elements. The use of organomineral fertilizer reduces nitrogen losses up to 45%, while the amount of available phosphorus increases by 25-28%, which leads to a decrease in gas emissions into the atmosphere and optimizes the biogenic element fluxes in the soil.

Key words: organic waste conversion, organomineral fertilizers, biogenic nitrogen, soil fertility, gas emission

Funding: the study was funded by a Russian Science Foundation grant No. 23-26-10059, <http://rscf.ru/project/23-26-10059/>.

For citation: Ilyina G.V., Ilyin D.Yu., Grishina A.A., Dashkina A.R. Possibilities of regulation of biogenic element fluxes in agroecosystems by using organomineral fertilizer based on fermented poultry waste. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(4):73-84. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_4_73-84.

Введение

Сельское хозяйство России является крупной отраслью национальной экономики. В настоящее время российский АПК в целом и сельское хозяйство в частности находятся на стадии активного развития, чему прежде всего способствовали пандемия коронавируса, санкционное давление на экономику страны и соответствующие оперативные государственные меры по импортозамещению в целях обеспечения продовольственной безопасности страны.

Следствием интенсификации земледелия нередко оказывается истощение почвенного плодородия. Изменение естественных циклов биогенных элементов в агроэкосистемах происходит за счет отчуждения питательных веществ с урожаем, потерь в результате стока, инфильтрации, денитрификации, эмиссии газов, снижения их доступности в силу флуктуаций водородного потенциала почвы. Биогенные элементы и их потоки в агроэкосистемах следует рассматривать как фактор, определяющий формирование почвенного плодородия, обеспечивающий экологическое благополучие и урожай растительной массы.

В условиях естественного и антропогенного снижения почвенного плодородия, дефицита биогенных элементов в почвах сельскохозяйственного назначения отмечается и недостаток доступных качественных удобрений. Пометные массы сельскохозяйственной птицы являются признанным источником биогенных веществ, перспективным для компенсации их потерь из почв сельскохозяйственного назначения. Использование таких отходов в качестве удобрения способствует решению целого ряда экологических проблем.

Птицеводство характеризуется быстрой окупаемостью, отличается относительно коротким производственным циклом [14]. В.П. Лысенко в работах, посвященных проблемам утилизации отходов птицеводства, отмечал, что динамичное развитие промышленного птицеводства ставит задачи надежной защиты окружающей природной среды от загрязнения пометом, так как это может привести к экологической катастрофе не только в зоне влияния птицефабрики, но и соседних территорий, возникновению инфекционных болезней у людей, сельскохозяйственных животных и птицы [9, 10].

Проблема утилизации отходов птицеводства имеет и эколого-экономические аспекты, которые рассматриваются в ряде публикаций отечественных авторов [13, 15]. Выгодными и эффективными показали себя такие пути конверсии, как:

- получение тепловой и электрической энергии путем анаэробного микробного расщепления;
- компостирование с получением органических мелиорантов, существенно улучшающих свойства почв;
- использование отходов как субстрата при биотехнологическом синтезе для производства продуктов с высокой добавленной стоимостью [18, 22, 25].

На сегодняшний день внимание отечественных и зарубежных исследователей сосредоточено на разработке не только экономически выгодных и технологически целесообразных, но и экологически безопасных путей как производства и переработки сырья, так и утилизации или конверсии отходов [6, 17]. В частности, актуальным вопросом является поиск путей сокращения поступления в атмосферу парниковых газов. Анаэробное разложение масс органических отходов животноводства микроорганизмами способно частично решить этот вопрос, попутно обеспечив получение качественных удобрений [16, 19].

Известны результативные примеры внедрения подобных приемов на практике, которые на фоне общих позитивных результатов позволили выявить и ряд слабых сторон технологий анаэробной конверсии. Например, это слабая воспроизводимость процессов, объясняемая низкой стабильностью микробных деструкторов и зависимостью их активности от спонтанных факторов. В частности, в ряде работ сообщается о значительном ингибировании почвенной микрофлоры, определяющей вектор потока биогенных элементов, высокими концентрациями $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ и H_2S , характерными для компостов на основе навоза и помета [21]. Результат снижения функциональной активности микробов – снижение биодоступности элементов питания для сельскохозяйственных растений. Повышенные температуры и колебания реакции среды способны повлиять на динамический баланс аммонийного и аммиачного азота. В случае превалирования аммиака будет отмечаться рост интегральной токсичности почвы [23]. При этом хорошо известно, что в процессах естественного компостирования пометных масс наблюдается существенное повышение температуры и сдвиг реакции среды, обусловленный жизнедеятельностью микроорганизмов. В настоящее время отмечается озабоченность ученых и практиков данной проблемой. Об этом свидетельствует рост публикаций, содержащих результаты исследований, посвященных биоконверсии органических отходов и получению агроmeliорантов, а также оптимизации потоков биогенных элементов в агроэкосистемах [20, 24, 26]. Все вышесказанное подчеркивает актуальность соответствующей области исследования.

Цель исследования – разработка экологически обоснованных приемов сокращения потерь биогенных элементов, в частности азота, на фоне применения органоминерального удобрения.

Исследования выполнялись на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет».

Отходы птицеводства были получены с полигона хранения отходов ГК Дамате, расположенного в Нижнеломовском районе Пензенской области. Это отработанные подстилочные массы, содержащие помет индейки и соломисто-опилочные материалы.

Пометно-подстилочную массу доводили до 60% влажности и помещали в пластиковые контейнеры по 5,0 кг. Субстраты экспонировались в стандартных условиях (20 °С, 760 мм рт. ст.) в течение 10 суток, при периодическом перемешивании. В контрольном варианте происходила ферментация субстратов за счет ферментативной активности только аборигенной микрофлоры помета птицы. В опытном варианте в суб-

страт добавляли первый комплекс микроорганизмов – культуру нитрификаторов – представителей рода *Nitrosomonas*, иммобилизованных на минеральном носителе глауконите в количестве 5,0% от массы субстрата и с титром микроорганизмов $5,0 \times 10^5$ клеток на грамм минерального носителя. Для использования концентрированную культуру разбавляли водопроводной водой в соотношении 1 : 10 и вносили при перемешивании в измельченную до фракции 0,01–0,5 мм массу минерального носителя – глауконита в количестве 1,0 л на 10,0 кг. По истечении 10 суток для деградации трудноразлагаемых целлюлозных и лигниновых компонентов в опытных вариантах в субстрат инокулировали функциональные комплексы термофильных мицелиальных грибов родов *Thielavia* и *Muceliophthora* в виде взвеси клеток с титром 10,0–12,0 млн клеток на литр культуральной жидкости.

Для осуществления последнего этапа деструкции использовали актиномицеты рода *Nocardia* и *Cellulomonas*. Предварительно в компост вносили 10% раствор серной кислоты до достижения pH на уровне 6,3–6,8, что позволило связать остаточные количества аммиака и создать благоприятные условия для деятельности почвообразователей – грибов и актиномицетов – на конечных этапах деструкции.

Для экспериментов культуры аммонификаторов выращивали на мясопептонном бульоне, целлюлозолитиков – на среде Гетчинсона, культуры для третьего этапа разложения отходов – актиномицеты – на среде Ваксмана. Культивирование в глубинных условиях в форме погруженных культур осуществляли на круговой качалке с эксцентриситетом 2,5 см и скоростью вращения от 50 до 220 оборотов в минуту, в колбах Эрленмейера объемом 500,0–1000,0 мл, а также в стеклянных банках объемом 5000,0 мл.

Выделение и изоляцию чистых микробных культур из разных объектов проводили по методу Пастера или Дригальского [1]; идентификацию выделенных микроорганизмов – общепринятыми методами микробиологического анализа [7, 11, 12]; оценку биологической безопасности отходов (пометно-подстилочная масса) – путем анализа на содержание патогенной и условно-патогенной микрофлоры [8]; анализ ферментативной активности микробной биомассы – комплексными методами [5]; глубинное и поверхностное культивирование микроорганизмов – по ГОСТ 26670-91 [3]; определение степени деструкции пометно-подстилочного материала микробными композициями разного состава – гравиметрическим методом.

Содержание общего, нитратного и аммонийного азота определяли по ГОСТ Р 53219-2008 [24], подвижного фосфора – по методу Ф.В. Чирикова [4], углерода гумуса – по Тюрину [2].

Исследование эмиссии углекислого газа и аммиака проводили в процессе ферментации контрольного (с аборигенной микрофлорой) и экспериментального (с функциональным комплексом микроорганизмов) компостов. Продолжительность эксперимента составляла 14 суток. Было проведено по 14 измерений эмиссии газов. Содержание CO_2 в составе газовой фазы определяли при помощи инфракрасного газоанализатора EGM-5, в стационарной системе микрокосмов. Измерения осуществлялись в потоке. Эмиссию аммиака определяли колориметрически на спектрофотометре Leki SS 1207.

Статистический анализ достоверности полученных результатов осуществлялся с помощью пакета Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

На основе изучения состава аборигенной микрофлоры помета индеек отмечена низкая степень разнообразия микроорганизмов. Для выявления общего представительства бактериальной микрофлоры использовали мясопептонный агар, грибной микрофлоры – питательную среду Сабуро.

В отработанной подстилке, полученной с производственных площадок ГК Дамате, вне зависимости от ее происхождения (подстилка с участков подращивания индейки

или откорма) или ее основы (древесная стружка или солома злаков), отмечается довольно высокий титр микроорганизмов: от $4,8 \times 10^8$ до $5,2 \times 10^9$ КОЕ/г сухого субстрата.

Основное разнообразие видового состава приходится на резидентов желудочно-кишечного тракта птицы (бактерии рода кишечной палочки, анаэробные клостридии, бактероиды, клетки дрожжей в небольшом количестве), а также некоторая доля бактерий, являющихся типичными представителями зимогенной микрофлоры подобных субстратов. Преобладающей формой среди них являются бактерии рода *Bacillus*. Они играют важную роль в процессах аммонификации как стартового этапа деструкции азотсодержащей массы отходов. В материале, доставленном непосредственно с площадок откорма, была выделена единичная колония мицелиальных грибов и не были обнаружены представители актиномицетов (рис. 1).

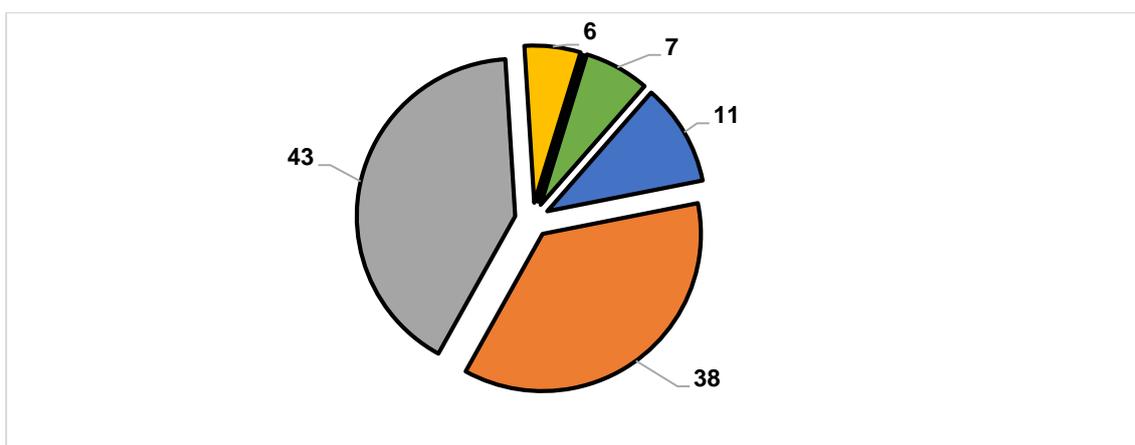


Рис. 1. Разнообразие видового состава микрофлоры пометно-подстилочной массы, полученной с производственной площадки выращивания индеек. Доля микроорганизмов: бактерии рода *Bacteroides* – 43%; бактерии рода *Bacillus* – 38%; бактерии рода *Escherichia* – 11%; прочие бактерии – 7%; мицелиальные грибы – 6%; актиномицеты отсутствуют

Малая доля мицелиальных грибов и актиномицетов в свежей пометно-подстилочной массе может объясняться преобладанием в ней смеси легкодоступных питательных субстанций (непереваренные компоненты пищи и остатки кормов), преимущественно утилизируемых бактериями. Еще одной причиной малого содержания грибов может быть высокое значение рН субстрата (на уровне 8,0–9,5), обусловленное процессами аммонификации, сопровождающимися выделением свободного аммиака. Смещение диапазона рН в щелочную область обычно рассматривается как один из неблагоприятных факторов, препятствующих распространению грибов в данной экологической нише.

Представителей патогенной микрофлоры, в частности бактерий рода *Salmonella*, в изученных отходах обнаружено не было, что говорит о безопасности потенциального внесения материалов в почву.

В ходе эксперимента материал отходов птицеводства из контрольного и опытного вариантов с интервалом в двое суток анализировали на предмет содержания органического азота в субстрате, а также определяли количество аммонийного и нитратного азота в составе субстрата. Установлено, что внесение хемоавтотрофной бактерии *Nitrosomonas* в комплексе с глауконитом стимулирует не только процессы нитрификации, но и аммонификации в компосте (рис. 2, 3). Это происходит за счет связывания аммиака в процессах адсорбции и хемосорбции. В опытном варианте установлена также интенсификация убыли субстрата на 9,0% от контроля, что сопровождается распадом углеродсодержащих соединений в целом.

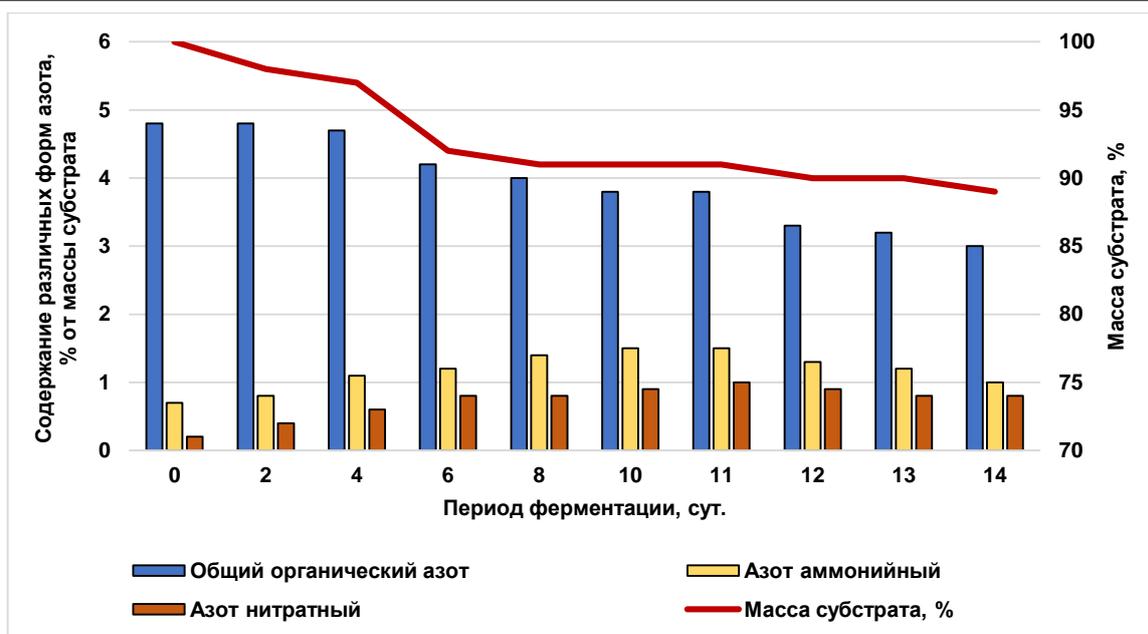


Рис. 2. Содержание различных форм азота и убыль субстрата в присутствии аборигенной микрофлоры помета индеек (контроль): $p < 0,05$; $n = 4$

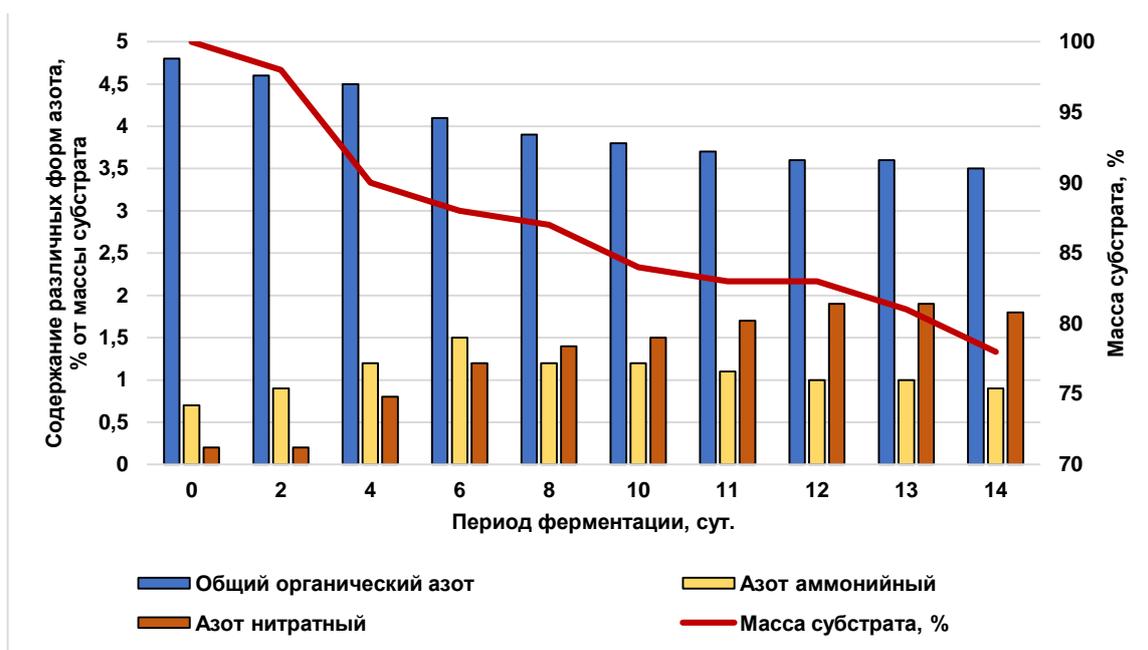


Рис. 3. Динамика содержания различных форм азота в ферментируемом материале в присутствии аборигенной микрофлоры и хемоавтотрофной бактерии рода *Nitrosomonas* в комплексе с минеральным носителем – глауконитом (опыт): $p < 0,05$; $n = 4$

Использование такого подхода позволило обеспечить снижение эмиссии аммиака за счет окисления и преобразования в нелетучую нитратную форму и, как следствие, добиться частичного сохранения такого важного биогенного элемента, как азот, в доступной для биологической ассимиляции форме. Установлена также интенсификация убыли субстрата, которая сопровождается распадом углеродсодержащих соединений в целом. Таким образом, связывание конечного продукта данного этапа деструкции исключает его ингибирующее влияние на начальные этапы процесса разложения, что может служить одной из иллюстраций принципа Ле-Шателье в химическом аспекте.

Для подтверждения установленных закономерностей была оценена эмиссия газов в контрольном и опытном вариантах опыта. На данном этапе эксперимента определяли эмиссию аммиака и углекислого газа для оценки эффективности использования функциональной культуры хемоавтотрофной бактерии рода *Nitrosomonas* в комплексе с минеральным носителем – глауконитом. Уровень эмиссии аммиака в процессе микробной ферментации отходов птицеводства различался в опытном и контрольном вариантах, но динамика процесса была сходной: увеличение эмиссии отмечалось с 4–5-х суток до 8-х суток эксперимента (рис. 4).

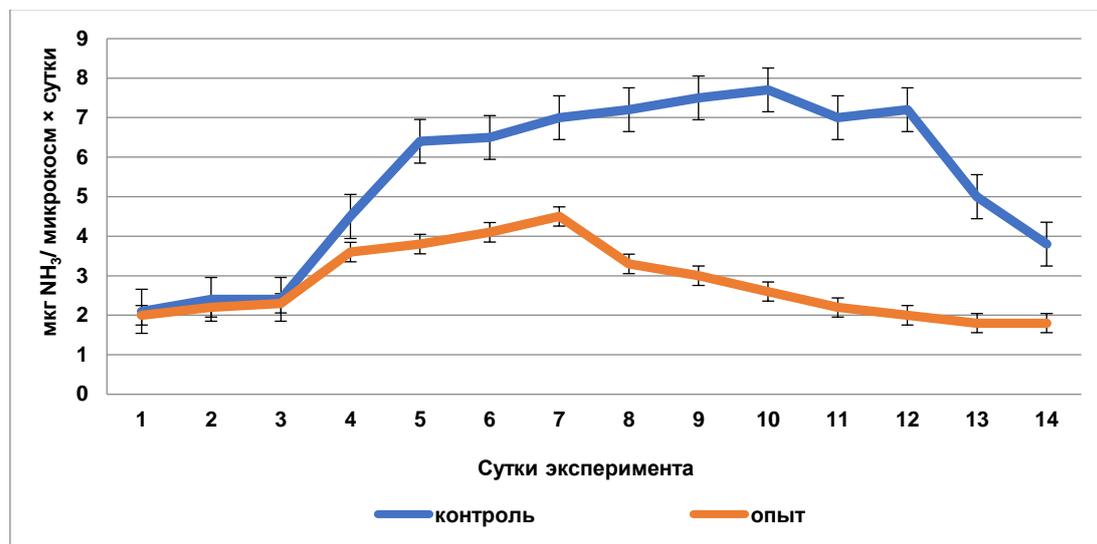


Рис. 4. Динамика эмиссии аммиака из микрокосмов: $p < 0,05$; $n = 4$

При использовании функциональной культуры хемоавтотрофной бактерии рода *Nitrosomonas* в комплексе с минеральным носителем (глауконит) суммарная эмиссия аммиака значительно снижалась, что согласуется с данными по переходу азота аммиака в нитратный азот.

Очевидно, что хемотрофное окисление азотистых соединений параллельно сопрягается с ассимиляцией углекислого газа, включаемого в состав микробной биомассы, что сокращает его попадание в атмосферу как парникового газа (рис. 5).

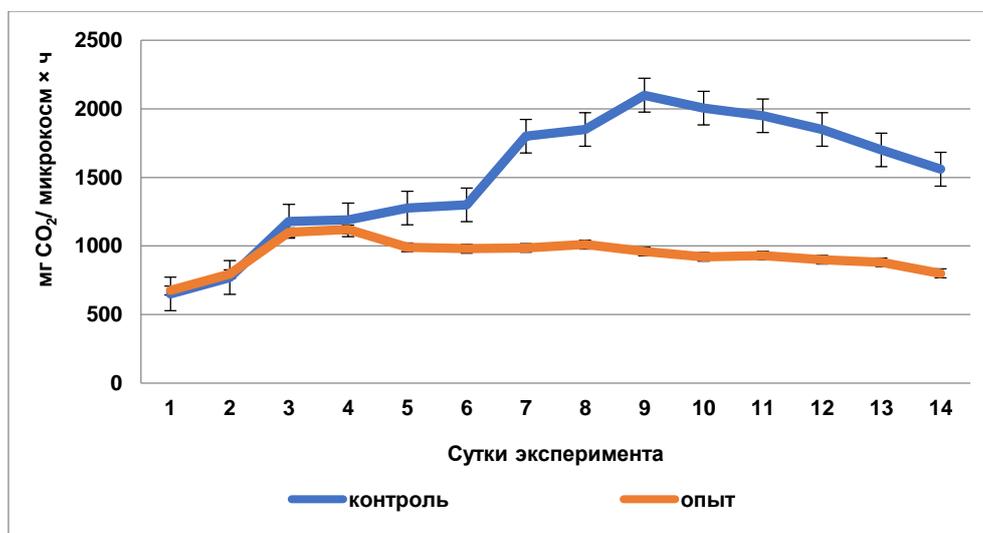


Рис. 5. Динамика эмиссии углекислого газа: $p < 0,05$; $n = 4$

По истечении 14 суток в субстрат в опытных вариантах вносили функциональный комплекс термофильных мицелиальных грибов родов *Thielavia* и *Myceliophthora*. Инокулят вносили в виде взвеси клеток (полученных путем глубинного культивирования), титр составлял 10,0–12,0 млн клеток на литр культуральной жидкости.

Описанный прием был реализован с целью деградации трудноразлагаемых целлюлозных компонентов, недоступных для ферментации бактериальными культурами. Данный этап разложения отходов продолжался в течение еще 14 суток и обеспечил в эксперименте более эффективную деструкцию материала отходов за счет утилизации целлюлозы, что подтверждается убылью субстрата, на 12,3% более интенсивной, чем в контроле, а также снижением содержания целлюлозы на 18,1% (табл. 1).

Таблица 1. Эффективность деструкции целлюлозных компонентов субстрата под воздействием комплекса микроорганизмов, n = 4

Вариант	Показатели	
	Содержание целлюлозы, % от исходного количества	Масса субстрата, % от исходной
Контроль (аборигенная микрофлора)	82,4 ± 4,1	86,8 ± 1,1
Опыт (аборигенная микрофлора и функциональный комплекс микроорганизмов)	67,5 ± 1,6	76,1 ± 0,9

Полученные экспериментальные данные согласуются с динамикой эмиссии углекислого газа (рис. 6).

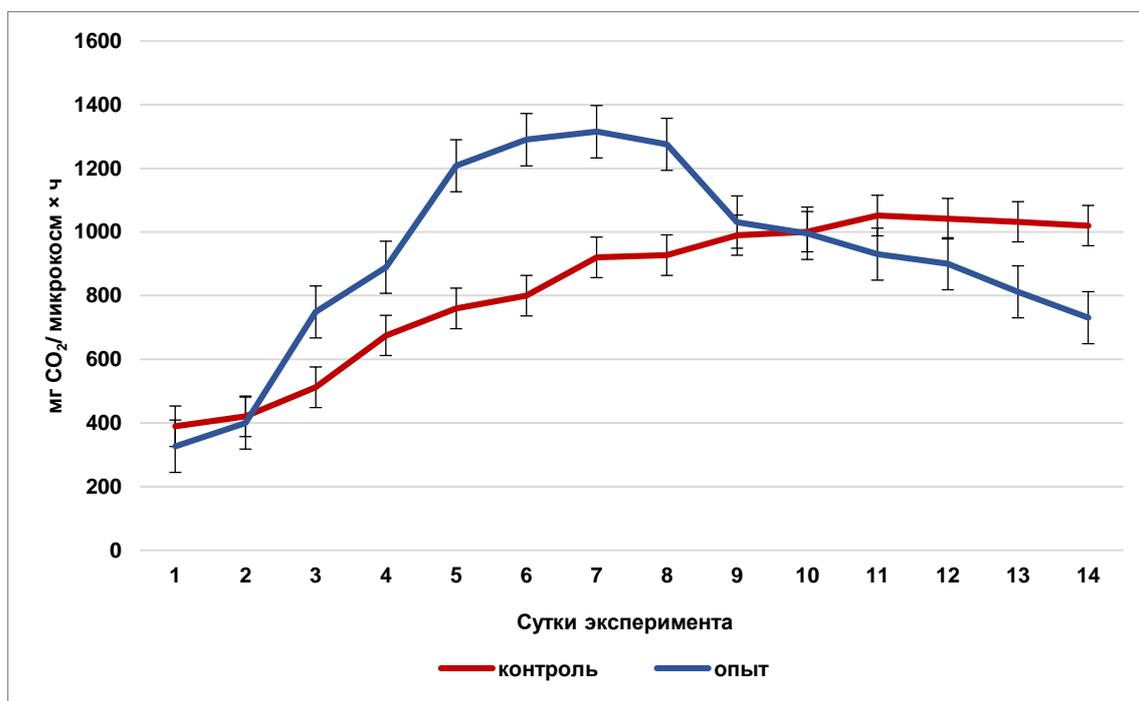


Рис. 6. Динамика эмиссии углекислого газа в присутствии в субстрате термофильных мицелиальных грибов родов *Thielavia* и *Myceliophthora*: $p < 0,05$; $n = 4$

Суммарная эмиссия при этом не превышает контрольные значения, что на фоне убыли целлюлозы свидетельствует о включении освободившегося углерода в состав гуминовых соединений. В целом результаты проведенного исследования говорят о це-

лесообразности применения композиции из термофильных мицелиальных грибов *Thielavia* и *Myceliophthora* для более эффективного расщепления целлюлозы пометно-подстилочного субстрата, что позволит уменьшить объемы твердых отходов и ускорить процессы их гумификации и получения агромелиоранта.

Для осуществления последнего этапа деструкции использовали актиномицеты родов *Cellulomonas* и *Nocardia*. Предварительно отходы закисляли до достижения рН на уровне 6,3–6,8 с целью химического связывания остаточных количеств аммиака и создания благоприятных условий для деятельности актиномицетов на конечных этапах деструкции. Процесс компостирования продолжался в течение месяца, на фоне периодических перебивок. В итоге изменились цвет, запах и консистенция ферментируемых масс отходов, причем для экспериментального образца был характерен типичный запах почвы и насыщенный бурый цвет.

Суммарно весь процесс эксперимента продолжался в течение двух месяцев, по истечении которых была проведена оценка химической структуры полученных в опыте и контроле субстратов с целью оценки содержания в них доступных биогенных элементов (табл. 2).

Таблица 2. Содержание доступных форм биогенных элементов в компостируемом материале, n = 4

Параметры	Варианты компостирования	
	Контроль (аборигенная микрофлора)	Опыт (аборигенная микрофлора и функциональный комплекс микроорганизмов)
рН	7,7 ± 0,1	7,2 ± 0,1
Содержание подвижного фосфора, мг/кг	24,5 ± 0,6	28,7 ± 0,5
Содержание подвижного азота (N-NO ₃), мг/кг	29,7 ± 0,3	38,3 ± 0,7
Масса субстрата, % от исходной	84,1 ± 1,3	66,0 ± 0,6

Таким образом, установлено, что для инициации процесса разложения отходов птицеводства необходима и достаточна активность аборигенной микрофлоры, однако показано повышение его эффективности за счет инокуляции комплексов микроорганизмов на 21,5%. Очевидно, что это достигается за счет оптимального соответствия экологической и функциональной роли групп микроорганизмов определенной стадии разложения субстрата. Такой подход позволяет достичь синергического эффекта во взаимодействии микроорганизмов, поскольку продукты каждого из этапов преобразования субстрата способствуют раскрытию потенциала деструкторов последующих этапов.

Заключение

Регулирование потоков биогенных элементов в агроэкосистемах путем использования органо-минерального удобрения на основе ферментированных отходов птицеводства способствует экологизации земледелия за счет повышения биодоступности азота и фосфора для растений и снижения эмиссии аммиака и других газов в атмосферу.

Инициация процесса разложения отходов обеспечивается аборигенной микрофлорой, однако установлено повышение его эффективности за счет дополнительного внесения функциональных комплексов микроорганизмов на 21,5%.

Существенный вклад в удержание подвижных форм биогенных элементов в почвах вносит и глауконит, обладающий определенными сорбционными свойствами и являющийся дополнительным резервом минеральных элементов.

Благодаря описанным приемам потери азота сокращаются до 45%, доля доступного фосфора возрастает на 25–28%, что ведет к снижению эмиссии газов в атмосферу и оптимизации потоков биогенных элементов в почве.

Выделяющийся при биодеструкции органических отходов углекислый газ может ассимилироваться хемотрофными микроорганизмами и превращаться во вторичную органику микробной биомассы. Данное явление может рассматриваться как мера, снижающая выброс парникового газа в атмосферу.

Проведенное исследование может быть положено в основу новой концепции использования органо-минеральных удобрений и агроулучшителей.

Список источников

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во Московского гос. ун-та, 1970. 490 с.
2. ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1992. 6 с.
3. ГОСТ 26670-91. Продукты пищевые. Методы культивирования микроорганизмов. Москва: Стандартинформ, 1992. 7 с.
4. ГОСТ Р 53219-2008. Качество почвы. Определение содержания нитратного азота, аммонийного азота и общего азота в воздушно-сухих почвах с помощью хлорида кальция в качестве экстрагирующего вещества (ИСО 14255:1998). Москва: Стандартинформ, 2009. 12 с.
5. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учебно-методическое пособие. Москва: МГУ, 1991. 304 с.
6. Зиганшина Э.Э. Биоконверсия отходов птицеводства анаэробными сообществами бактерий и архей: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.02.03. Казань, 2016. 28 с.
7. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Логинов О.Н. Разработка эффективной микробной композиции для биоконверсии отходов птицеводства // Экобиотех. 2018. Т. 1, № 1. С. 33–38. DOI: 10.31163/2618-964X-2018-1-1-33-38.
8. Лабинская А.С. Микробиология с техникой микробиологических методов исследования: учебник. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Медицина, 1978. 394 с.
9. Лысенко В.П. Переработка отходов птицеводства: монография. Сергиев Посад: [б. и.], 1998. 265 с.
10. Лысенко В.П. Перспективная технология переработки помета для начинающих предпринимателей // Эффективное животноводство. 2016. № 6(127). С. 28–30.
11. Определитель бактерий Берджи: в 2 т.; под ред. Дж. Хоулта; пер. с англ. под ред. Г.А. Заварзина. 9-е изд. Москва: Мир, 1997. Т. 1, 2. 1021 с.
12. Скворцова И.Н. Методы идентификации и выделения почвенных бактерий рода *Pseudomonas*: справочное пособие для практики студентов. Москва: Изд-во Московского государственного университета, 1981. 97 с.
13. Смирнов Р.В., Бездудная А.Г., Трейман М.Г. Инновационная деятельность по переработке производственных отходов на примере птицефабрики // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2020. № 1(51). С. 54–60.
14. Фахреев Н.Н. Разработка и обоснование параметров газификационной установки для утилизации отходов птицеводства: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1. Казань, 2023. 179 с.
15. Щеткин Б.Н. Утилизация отходов птицеводства – решение проблем экологической безопасности и ресурсосбережения. Пермь: ОГУП «Соликамская типография», 2002. 135 с.
16. Vacenetti J., Fusi A., Negri M. et al. Environmental assessment of two different crop systems in terms of biomethane potential production // Science of the Total Environment. 2014. Vol. 466-467. Pp. 1066–1077. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.109.
17. Vacenetti J., Negri M., Fiala M. et al. Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 463-464. Pp. 541–551. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.058.
18. Cavalaglio G., Coccia V., Cotana F. et al. Energy from poultry waste: An Aspen Plus-based approach to the thermo-chemical processes // Waste Management. 2018. Vol. 73. Pp. 496–503. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.05.044.
19. Chamy R., Ramos C. Factors in the determination of methanogenic potential of manure // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102(17). Pp. 7673–7677. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.05.044.

20. Costa J.C., Barbosa S.G., Sousa D.Z. Effects of pre-treatment and bioaugmentation strategies on the anaerobic digestion of chicken feathers // *Bioresour Technology*. 2012. Vol. 120. Pp. 114–119. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.06.047.
21. Demirel B., Yenigün O. Changes in microbial ecology in an anaerobic reactor // *Bioresour Technology*. 2006. Vol. 97(10). Pp. 1201–1208. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.009.
22. Gao L., Li R., Sui X. et al. Conversion of chicken feather waste to N-doped carbon nanotubes for the catalytic reduction of 4-nitrophenol // *Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 48(17). Pp. 10191–1017. DOI: 10.1021/es5021839.
23. Garcia M.L., Angenent L.T. Interaction between temperature and ammonia in mesophilic digesters for animal waste treatment // *Water Research*. 2009. Vol. 43(9). Pp. 2373–2382. DOI: 10.1016/j.watres.2009.02.036.
24. Lu L., Jin Y., Liu H. et al. Nitrogen evolution during the co-combustion of hydrothermally treated municipal solid waste and coal in a bubbling fluidized bed // *Waste Management*. 2014. Vol. 34(1). Pp. 79–85. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.025.
25. Masood S., Hussain A., Javid A. et al. Fungal conversion of chicken-feather waste into biofortified compost // *Brazilian Journal of Biology*. 2022. Vol. 83(5). Article no. e248026. DOI: 10.1590/1519-6984.248026.
26. Niu D.J., Huang H., Dai X.H. et al. Greenhouse gases emissions accounting for typical sewage sludge digestion with energy utilization and residue land application in China // *Waste Management*. 2013. Vol. 33(1). Pp. 123–128. DOI: 10.1016/j.

References

1. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv: uchebnoe posobie. 2-e izd., pererab. i dop. [Manual on chemical analysis of soils: textbook. 2nd edition, revised and enlarged]. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 490 p. (In Russ.).
2. GOST 26204-91. Pochvy. Opredelenie podvizhnykh soedinenij fosfora i kaliya po netody Chirikova v modifikatsii TSINAO [Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Chiricov method modified by CINA0]. Moscow: Standards Publishing House; 1992. 6 p. (In Russ.).
3. GOST 26670-91. Produkty pishchevye. Metody kul'tivirovaniya mikroorganizmov [Food products. Methods for cultivation of microorganisms]. Moscow: Standardinform; 1992. 7 p. (In Russ.).
4. GOST R 53219-2008. Kachestvo pochvy. Opredelenie sodержaniya nitratnogo azota, ammonijnogo azota i obshchego azota v vozdušno-sukhikh pochvakh s pomoshch'yu khlorida kal'tsiya v kachestve ekstragiryushchego veshchestva (ISO 14255:1998) [Soil quality. Determination of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and total soluble nitrogen in air-dry soils using calcium chloride solution as extractant (ISO 14255:1998)]. Moscow: Standardinform, 2009. 12 p. (In Russ.).
5. Zvyagintsev D.G. Metody pochvennoj mikrobiologii i biokhimii: uchebno-metodicheskoe posobie [Methods of soil microbiology and biochemistry: an educational and methodical manual]. Moscow: Moscow State University Press; 1991. 304 p. (In Russ.).
6. Ziganshina E.E. Biokonversiya otkhodov ptitsevodstva anaerobnymi soobshchestvami bakterij i arkhej [Bioconversion of poultry waste by anaerobic communities of bacteria and archaea]: avtoreferat dissertatsii ... kandidata biologicheskikh nauk: 03.02.03 = Abstract of Candidate Dissertation on Biological Sciences: 03.02.03. Kazan; 2016. 28 p. (In Russ.).
7. Kuzina E.V., Rafikova G.F., Loginov O.N. Razrabotka effektivnoj mikrobnj kompozitsii dlya biokonversii otkhodov ptitsevodstva [Development of effective microbial composition for the bioconversion of poultry waste]. *Ekobiotekh = Ecobiotech*. 2018;1(1):33-38. DOI: 10.31163/2618-964X-2018-1-1-33-38. (In Russ.).
8. Labinskaya A.S. Mikrobiologiya s tekhnikoj mikrobiologicheskikh metodov issledovaniya: uchebnik. 4-e izd., pererab. i dop. [Microbiology with the technique of microbiological research methods: study guide. 4th edition, revised and enlarged]. Moscow: Medicine Press; 1978. 394 p. (In Russ.).
9. Lysenko V.P. Pererabotka otkhodov ptitsevodstva: monografiya [Processing of poultry waste: monograph]. Sergiev Posad: [S. L. Indicatione]; 1998. 265 p. (In Russ.).
10. Lysenko V.P. Perspektivnaya tekhnologiya pererabotki pometa dlya nachinayushchikh predprinimatelej [Promising technology of manure processing for novice entrepreneurs]. *Effektivnoe zhivotnovodstvo = Efficient Animal Husbandry*. 2016;6(127):28-30. (In Russ.).
11. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology. Holt John G. editor, 9th edition. Baltimore: Williams & Wilkins; 1994. 787 p. (In Russ.).
12. Skvortsova I.N. Metody identifikatsii i vydeleniya pochvennykh bakterij roda Pseudomonas: spravochnoe posobie dlya praktiki studentov [Methods of identification and isolation of soil bacteria of the genus Pseudomonas: reference guide for students' practice]. Moscow: Moscow State University Press; 1981. 97 p. (In Russ.).
13. Smirnov R.V., Bezudnaya A.G, Treyman M.G. Innovatsionnaya deyatel'nost' po pererabotke proizvodstvennykh otkhodov na primere ptitsefabriki [Innovative recycling activities industrial waste on the example of a poultry farm]. *Technico-tekhnologicheskie problemy servisa = Technical and technological problems of the service*. 2020;1(51):54-60. (In Russ.).

14. Fakhreev N.N. Razrabotka i obosnovanie parametrov gazifikatsionnoj ustanovki dlya utilizatsii otkhodov ptitsevodstva [Development and justification of the parameters of a gasification plant for the disposal of poultry waste]: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 4.3.1. = Candidate Dissertation on Engineering Sciences: 4.3.1. Kazan; 2023. 179 p. (In Russ.).
15. Shchetkin B.N. Utilizatsiya otkhodov ptitsevodstva – reshenie problem ekologicheskoy bezopasnosti i resursoberezeniya [Poultry waste disposal is the way for solving problems of environmental safety and resource conservation]. Perm: Solikamsk Printing House; 2002. 135 p. (In Russ.).
16. Bacenetti J., Fusi A., Negri M. et al. Environmental assessment of two different crop systems in terms of biomethane potential production. *Science of the Total Environment*. 2014;466-467:1066-1077. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.109.
17. Bacenetti J., Negri M., Fiala M. et al. Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process. *Science of the Total Environment*. 2013;463-464:541-551. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.058.
18. Cavalaglio G., Coccia V., Cotana F. et al. Energy from poultry waste: An Aspen Plus-based approach to the thermo-chemical processes. *Waste Management*. 2018;73:496-503. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.025.
19. Chamy R., Ramos C. Factors in the determination of methanogenic potential of manure. *Bioresour Technology*. 2011;102(17):7673-7677. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.05.044.
20. Costa J.C., Barbosa S.G., Sousa D.Z. Effects of pre-treatment and bioaugmentation strategies on the anaerobic digestion of chicken feathers. *Bioresour Technology*. 2012;120:114-119. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.06.047.
21. Demirel B., Yenigün O. Changes in microbial ecology in an anaerobic reactor. *Bioresour Technology*. 2006;97(10):1201-1208. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.009.
22. Gao L., Li R., Sui X. et al. Conversion of chicken feather waste to N-doped carbon nanotubes for the catalytic reduction of 4-nitrophenol. *Environmental Science and Technology*. 2014;48(17):10191-10197. DOI: 10.1021/es5021839.
23. Garcia M.L., Angenent L.T. Interaction between temperature and ammonia in mesophilic digesters for animal waste treatment. *Water Research*. 2009;43(9):2373-2382. DOI: 10.1016/j.watres.2009.02.036.
24. Lu L., Jin Y., Liu H. et al. Nitrogen evolution during the co-combustion of hydrothermally treated municipal solid waste and coal in a bubbling fluidized bed. *Waste Management*. 2014;34(1):79-85. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.025.
25. Masood S., Hussain A., Javid A. et al. Fungal conversion of chicken-feather waste into biofortified compost. *Brazilian Journal of Biology*. 2022;83(5):e248026. DOI: 10.1590/1519-6984.248026.
26. Niu D.J., Huang H., Dai X.H. et al. Greenhouse gases emissions accounting for typical sewage sludge digestion with energy utilization and residue land application in Chin. *Waste Management*. 2013;33(1):123-128. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.025.

Информация об авторах

Г.В. Ильина – доктор биологических наук, профессор кафедры биологии, биологических технологий и ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», ilyina.g.v@pgau.ru.

Д.Ю. Ильин – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, биологических технологий и ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», ilyin.d.u@pgau.ru.

А.А. Гришина – аспирант кафедры биологии, биологических технологий и ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», grishina.a.a@pgau.ru.

А.Р. Дашкина – аспирант кафедры почвоведения, агрохимии и химии ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет», dashkina.a.r@pgau.ru.

Information about the authors

G.V. Ilyina, Doctor of Biological Sciences, Professor, the Dept. of Biology, Biological Technologies and Veterinary and Sanitary Expertise, Penza State Agrarian University, ilyina.g.v@pgau.ru.

D.Yu. Ilyin, Candidate of Biological Sciences, Docent, the Dept. of Biology, Biological Technologies and Veterinary and Sanitary Expertise, Penza State Agrarian University, ilyin.d.u@pgau.ru.

A.A. Grishina, Postgraduate Student, the Dept. of Biology, Biological Technologies and Veterinary and Sanitary Expertise, Penza State Agrarian University, grishina.a.a@pgau.ru.

A.R. Dashkina, Postgraduate Student, the Dept. of Soil Science, Agrochemistry and Chemistry, Penza State Agrarian University, dashkina.a.r@pgau.ru.

Статья поступила в редакцию 21.07.2023; одобрена после рецензирования 23.08.2023; принята к публикации 04.09.2023.

The article was submitted 21.07.2023; approved after reviewing 23.08.2023; accepted for publication 04.09.2023.

© Ильина Г.В., Ильин Д.Ю., Гришина А.А., Дашкина А.Р., 2023