

Функциональный комплекс микроорганизмов на минеральном носителе для каскадной ферментативной деструкции отходов птицеводства

Г. В. Ильина[✉], Д. Ю. Ильин, А. А. Гришина, А. Р. Дашкина

Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия

[✉]E-mail: ilyina.g.v@pgau.ru

Аннотация. Цель настоящего исследования – повышение эффективности микробного компостирования органических отходов птицеводства и обеспечение сохранения биогенных веществ в компосте путем использования функционального комплекса микробных культур-деструкторов, интегрированного с минеральным носителем. **Методы.** Биомассу функциональных микроорганизмов получали методом погруженного культивирования и инокулировали в компостируемый субстрат в заданной хронологической последовательности. Используются три комплекса микроорганизмов (нитрификаторы; термофильные деструкторы целлюлозы и лигнина подстилочного материала; мезофильные микроорганизмы – почвообразователи). Функциональную группу нитрификаторов инокулировали на минеральном носителе – глауконите в целях хемосорбции аммиака и его преобразования в нитраты. **Научная новизна.** Экологически обоснованные, аналогичные природным процессам деструкции органического вещества и гумификации приемы каскадной деструкции целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов специально сконструированными комплексами микроорганизмов, а также интеграция микроорганизмов с минеральным носителем – глауконитом являются принципиально новыми подходами в практике биоконверсии и получения органоминеральных удобрений. **Практическая значимость.** Использование описанных приемов на практике позволит сократить эмиссию нежелательных газов в атмосферу, снизить потери азота и получить экологически безопасный компост, который можно использовать в качестве органоминерального удобрения. **Результаты.** В пометно-подстилочных материалах установлено преобладание бактерий родов *Bacillus* и *Enterobacter* среди прочих аборигенных микроорганизмов – инициаторов процесса компостирования. Обнаружено повышение эффективности компостирования за счет инокуляции комплексов функциональных микроорганизмов на 21,5 %. Потери азота в эксперименте сократились на 30–33 %. Специальные приемы позволили связать остаточные количества аммиака и создать благоприятные условия для деятельности почвообразователей – актиномицетов на конечных этапах деструкции. Полученные результаты достигнуты за счет оптимального соответствия экологической и функциональной роли групп микроорганизмов каждой из стадий разложения субстрата.

Ключевые слова: биоконверсия отходов, экологическая безопасность, микробная ферментация, сельскохозяйственная биотехнология

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-10059.

Для цитирования: Ильина Г. В., Ильин Д. Ю., Гришина А. А., Дашкина А. Р. Функциональный комплекс микроорганизмов на минеральном носителе для каскадной ферментативной деструкции отходов птицеводства // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 05. С. 670–681. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-05-670-681>.

Дата поступления статьи: 30.10.2023, **дата рецензирования:** 29.01.2024, **дата принятия:** 18.03.2024.

Functional complex of microorganisms on mineral carrier for cascade enzymatic degradation of poultry waste

G. V. Ilyina✉, D. Yu. Ilyin, A. A. Grishina, A. R. Dashkina

Penza State Agrarian University, Penza, Russia

✉E-mail: ilyina.g.v@pgau.ru

Abstract. The purpose of this study is to increase the efficiency of microbial composting of organic poultry waste and to ensure the preservation of nutrients in compost by using a functional complex of microbial destructuring cultures integrated with a mineral carrier. **Methods.** Biomass of functional microorganisms was obtained by submerged cultivation and inoculated into a compostable substrate in a given chronological sequence. Three complexes of microorganisms were used (nitrifiers; thermophilic decomposers of cellulose and lignin of litter material; mesophilic microorganisms – soil formers). The functional group of nitrifiers was inoculated on a mineral carrier, glauconite, for the purpose of chemisorption of ammonia and its conversion into nitrates. **Scientific novelty.** Environmentally sound, similar to natural processes of destruction of organic matter and humification, methods of cascade destruction of cellulose- and lignin-containing waste by specially designed complexes of microorganisms, as well as the integration of microorganisms with a mineral carrier – glauconite – are fundamentally new approaches in the practice of bioconversion and the production of organomineral fertilizers. **Practical significance.** Using the described techniques in practice will reduce the emission of unwanted gases into the atmosphere, reduce nitrogen losses and obtain environmentally friendly compost, which can be used as an organomineral fertilizer. **Results.** In the dung and litter materials, the predominance of bacteria of the genera *Bacillus* and *Enterobacter* among other native microorganisms as initiators of the composting process was established. An increase in composting efficiency due to inoculation of complexes of functional microorganisms by 21.5 % was found. Nitrogen losses in the experiment were reduced by 30–33 %. Special techniques made it possible to bind residual amounts of ammonia and create favorable conditions for the activity of soil formers – actinomycetes at the final stages of destruction. The results obtained were achieved due to the optimal correspondence of the ecological and functional role of groups of microorganisms to each of the stages of substrate decomposition.

Keywords: waste bioconversion, environmental safety, microbial fermentation, agricultural biotechnology

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-26-10059.

For citation: Ilyina G. V., Ilyin D. Yu., Grishina A. A., Dashkina A. R. Functional complex of microorganisms on a mineral carrier for cascade enzymatic destruction of poultry waste. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (05): 670–681. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-05-670-681>. (In Russ.)

Date of paper submission: 30.10.2023, **date of review:** 29.01.2024, **date of acceptance:** 18.03.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Сельскохозяйственное производство служит одним из основных источников отходов, негативно влияющих на состояние почвы и других объектов окружающей среды. Отрасль птицеводства значительно загрязняет среду органическими отходами. Птицеводство – одна из основных и наиболее динамично развивающихся отраслей агропродовольственной промышленности в мире, а помет является наиболее распространенным отходом этой отрасли и требует альтернативной обработки, чтобы смягчить воздействие неправильной утилизации на окружающую среду [1–3]. Нередко объемы этих отходов так велики, что их размещение становится сложной проблемой для производства. Во всем мире животноводство в настоящее время переживает определенный кризис из-за отсутствия

экономически эффективных средств и способов переработки помета, в том числе птичьего [4]. Попадание биогенов и аборигенной микрофлоры помета в почву ведет к изменению состава компонентов биоценозов и характеристик их биотопов [5; 6]. Под влиянием газофазных испарений из пометных отходов может находиться и атмосферный воздух [7; 8]. Размещение и длительное складирование отходов на полигонах представляет экономическую проблему для предприятия, а также часто служит причиной социальной напряженности в близлежащих населенных пунктах, что в итоге способно негативно отразиться на вопросах масштабирования производства. Альтернативные, экологически приемлемые пути утилизации с потенциальными финансовыми выгодами могут заключаться в крупномасштабных схемах преобразования биомассы

в энергию, которые также могут обеспечить более легкое обращение с удобрениями в качестве побочного продукта [9; 10].

Одним из путей решения проблемы способно стать компостирование отходов, которое может рассматриваться как вариант микробной биоконверсии. Процесс компостирования, по сути, аналогичен процессу гниения. Однако серьезные потери азота, медленные процессы гумификации и длительные циклы компостирования по-прежнему остаются нерешенными проблемами в процессах компостирования [11]. Внимание исследователей привлекает экзогенная инокуляция микробов при аэробном компостировании [12; 13]. Каждое предприятие имеет свои уникальные особенности, связанные с географическим положением, технологиями, оборудованием, режимом работы, особенностями сырья и другими, которые в совокупности способны повлиять на характер образующихся отходов, который должен учитываться при утилизации последних. В связи с этим приоритетным становится поиск и адаптация к имеющемуся сырью комплекса микроорганизмов, способного обеспечить поэтапную (каскадную) деструкцию органических материалов подобно естественному природному процессу разложения, гумификации и почвообразования.

Цель настоящего исследования – повышение эффективности микробного компостирования органических отходов птицеводства и обеспечение сохранения биогенных веществ в компосте путем использования функционального комплекса микробных культур-деструкторов, интегрированного с минеральным носителем.

Это позволит сократить эмиссию нежелательных газов в атмосферу, снизить потери азота и получить экологически безопасный компост, который можно использовать в качестве органоминерального удобрения. Сведения об апробации инновационных удобрений, полученных путем микробной ферментации отходов, имеются в отечественных и зарубежных литературных источниках [14–18]. Кроме того, показали свою эффективность приемы интеграции микробных комплексов с минеральными носителями [19].

Методология и методы исследования (Methods)

Исследования, положенные в основу работы, выполнялись на базе Пензенского государственного аграрного университета. Отходы птицеводства (пометно-подстилочная масса) 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. Аборигенная микрофлора пометно-подстилочных субстратов исследовалась в течение значительного времени и предвзяла проведение

экспериментальной работы. Культуры бактерий, мицелиальных грибов и актиномицетов, использованные в эксперименте, поддерживаются в коллекции Пензенского ГАУ и были приобретены в разное время во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт». Выделение, изоляцию и идентификацию аборигенных культур микроорганизмов из отходов осуществляли общепринятыми методами микробиологического анализа [20; 21]. Каждый этап деструкции материала отходов осуществлялся специально подобранной группой микроорганизмов, в связи с чем подготавливались отдельные микробные композиции. Питательную среду Виноградского использовали для культивирования микроорганизмов-нитрификаторов, среду Гетчинсона – для деструкторов целлюлозы и лигнина, среду Ваксмана – для культур актиномицетов. Для выявления общего представительства бактериальной микрофлоры использовали мясопептонный агар. Для выявления грибной микрофлоры использовали питательную среду Сабуро.

Пометно-подстилочную массу 60-процентной влажности помещали в пластиковые контейнеры по 5,0 кг и экспонировали 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. В опытном варианте в субстрат 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 1 г 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 л на 10,0 кг. По истечении 10 суток для деградации труднорастворимых целлюлозных и лигниновых компонентов в опытных вариантах в субстрат инокулировали функциональные комплексы термофильных мицелиальных грибов родов *Thelavia* и *Myceliophthora* в виде взвеси клеток с титром 10,0–12,0 млн клеток на 1 л культуральной жидкости. В ходе осуществления последнего этапа деструкции использовали актиномицетов родов *Nocardia* и *Cellulomonas*. Предварительно в компост вносили 10-процентный раствор серной кислоты до достижения pH на уровне 6,2–6,5 для связывания остаточных количеств аммиака и создания благоприятных условий для деятельности почвообразователей – грибов и актиномицетов на конечных этапах деструкции.

В контрольном и опытном вариантах главными оцениваемыми параметрами были органолептические (цвет, запах, консистенция), динамика величины рН. О процессах деструкции целлюлозных компонентов судили по убыли целлюлозы, содержание которой определяли азотно-спиртовым методом. Содержание подвижных форм биогенных элементов в компостах определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-104 м». В качестве основного параметра в определении эффективности процесса принимали динамику убыли массы субстрата, которую оценивали гравиметрически.

Эксперименты проводили в трехкратной повторности, различия считали достоверными при $p \leq 0,05$. Статистический анализ достоверности полученных результатов осуществлялся с помощью программного пакета Microsoft Excel.

Результаты (Results)

В процессе изучения аборигенной микрофлоры пометно-подстилочного материала определялись состав присутствующих микроорганизмов, а также динамика их состава в зависимости от сроков компостирования.

В качестве исходной точки в проводимых исследованиях использована отработанная индюшиная пометно-подстилочная масса, доставляемая на полигон хранения. В дальнейшем для изучения динамики микробных процессов образцами служили пробы пометно-подстилочного материала, депонированные в течение полугода и одного года.

В только что отработанной подстилке в зависимости от ее происхождения (подстилка с участков подраживания 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. Выделенные колонии микроорганизмов представлены на рис. 1.

Преобладающей группой являются бактерии рода *Bacillus*. Они играют важную роль в процессах аммонификации как стартового этапа деструкции азотсодержащей массы отходов. С процесса аммонификации запускается ступенчатая деградация пометно-подстилочной смеси, в связи с чем наличие и сохранение в депонируемой массе бактерий, в частности *Bacillus*, принципиально и очень важно. В материале, доставленном на полигон непосредственно с площадок откорма, была выделена единичная колония мицелиальных грибов и не

были обнаружены представители актиномицетов. Данный факт может объясняться преобладанием в свежей пометно-подстилочной смеси легкодоступных питательных факторов, преимущественно утилизируемых бактериями, а также значением 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.

По истечении каждых двух месяцев с начала размещения пометно-подстилочных материалов на полигоне хранения отбирались пробы для оценки изменения состава микроорганизмов. Было установлено, что общее число микроорганизмов в течение полугода существенно снижается по сравнению с исходным и составляет от $1,0 \times 10^7$ до $1,0 \times 10^8$ КОЕ/г сухого субстрата. Это может объясняться состоявшейся термической фазой процесса естественного компостирования материала. Также к важным изменениям параметров субстрата можно отнести снижение значения рН, обусловленное уменьшением интенсивности выделения аммиака, и, как следствие, возрастание в микробном ценозе доли грибной микрофлоры и актиномицетов (рис. 2). Активация развития последних может рассматриваться как индикатор истощения легкодоступных компонентов субстрата и изменения направленности микробиологических процессов в сторону переработки более труднорастворимых (целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин).



Рис. 1. Развитие микробных культур, выделенных из пометно-подстилочной массы, доставленной на полигон хранения
Fig. 1. Development of microbial cultures isolated from litter delivered to the landfill site

После ассимиляции легкодоступных компонентов в процесс деструкции вовлекаются более сложно утилизируемые компоненты, локализованные главным образом в подстилочных материалах (древесная стружка, опилки, щепа, солома злаков), по своей химической природе представляющие собой такие полимеры, как целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин. С учетом вышесказанного целесообразным подходом представляется внесение на начальных этапах препаратов, обеспечивающих аммонификацию и нитрификацию, а на более поздних – целлюлозо- и лигнолитических комплексов микроорганизмов. В установлении сроков внесения соответствующих комплексов микроорганизмов на протяжении процесса важную роль может играть показатель pH. Как правило, на начальных этапах активной ферментации показатель pH находится в щелочной области, а по мере дальнейшей биодegradации происходит его сдвиг в кислую сторону. Объясняется этот факт тем, что при аммонификации выделяющийся аммиак, взаимодействуя с водой, образует раствор гидроксида аммония, обладающего щелочными свойствами. На более поздних этапах происходит последовательное окисление трудноразлагаемых соединений, результатом чего могут

быть продукты с кислотными свойствами (карбонные кислоты и фенольные соединения). Регулирование величины pH во многом определяется деятельностью самих микроорганизмов и поэтапной сменой их формаций. Кроме изменений видового состава микроорганизмов, сдвиги значений pH могут также способствовать преобразованию форм веществ, подвижности элементов, и, как следствие, степени ассимилируемости таких важных биогенных элементов, как фосфор и азот. Однако для ускорения этих изменений представляется возможным коррекция pH субстрата кислотными растворами, что может обеспечить лучшую адаптацию определенных микроорганизмов и максимально полную реализацию физиолого-биохимического потенциала. Поскольку получаемый в итоге компост является интегральным результатом деятельности всех микроорганизмов на всех этапах биодеструкции разлагаемого материала, то регуляция процесса посредством последовательного внесения соответствующих микробных комплексов с одновременной коррекцией величины pH может обеспечить получение качественного продукта в максимально сжатые сроки.

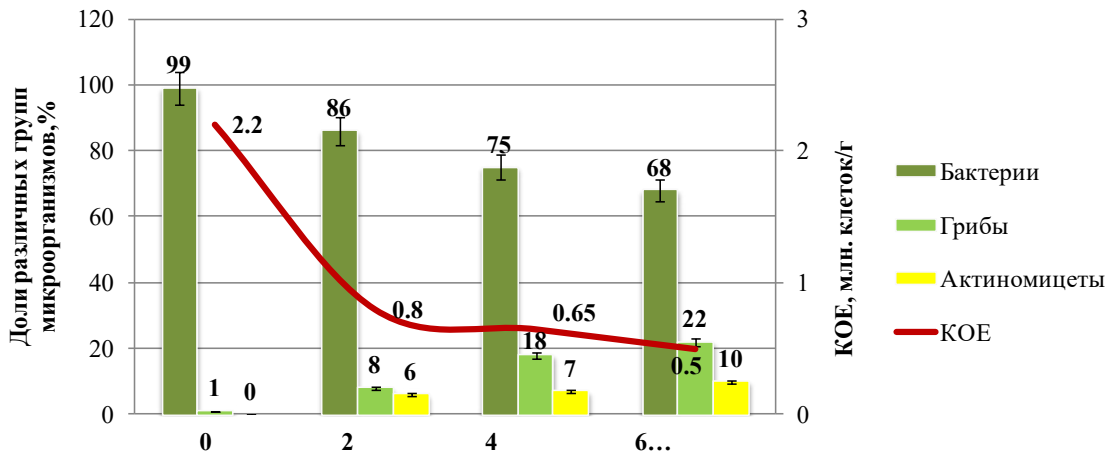


Рис. 2. Качественный и количественный состав групп микроорганизмов в материале отходов птицеводства (пометно-подстилочные массы) при хранении

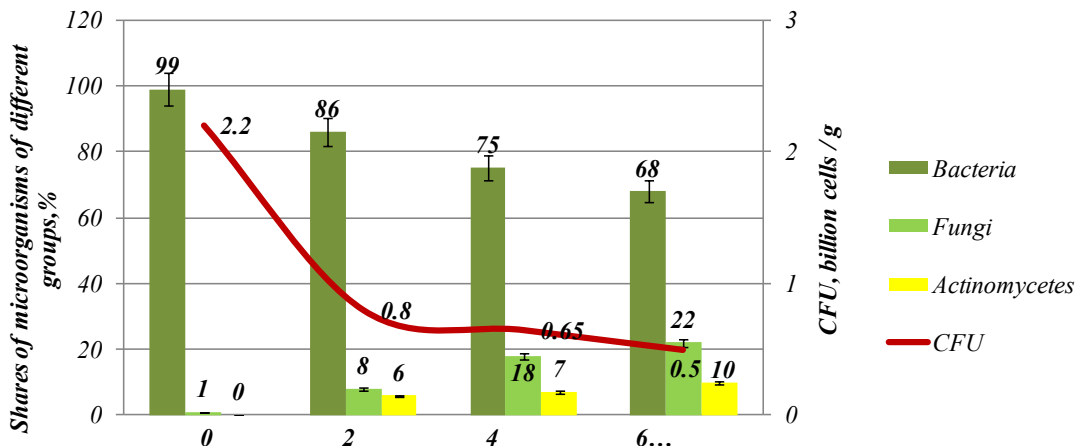


Fig. 2. Qualitative and quantitative composition of microorganism groups in poultry waste material (litter) during storage

В ходе исследований была проведена серия опытов с объединением индивидуальных культур микроорганизмов в комплексы, а также поэтапным внесением этих комплексов в субстрат. В контрольном варианте происходила ферментация субстратов за счет ферментативной активности только аборигенной микрофлоры. В опытном варианте в субстрат добавляли первый комплекс микроорганизмов – культуру нитрификаторов – представителей рода *Nitrosomonas*, иммобилизованных на минеральном носителе глауконите. В течение 10 суток материал 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 толь-

ко процессы нитрификации, но и аммонификации в компосте (рис. 3, 4). Это осуществляется за счет связывания аммиака в процессах адсорбции и хемосорбции.

Такие приемы обеспечивают снижение эмиссии аммиака за счет связывания его в форму сульфата аммония, а также окисления до нитратов и, как следствие, сохранение азота в доступной для биологической ассимиляции форме. В опытном варианте установлена также интенсификация убыли субстрата на 9,0 % от контроля, 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.

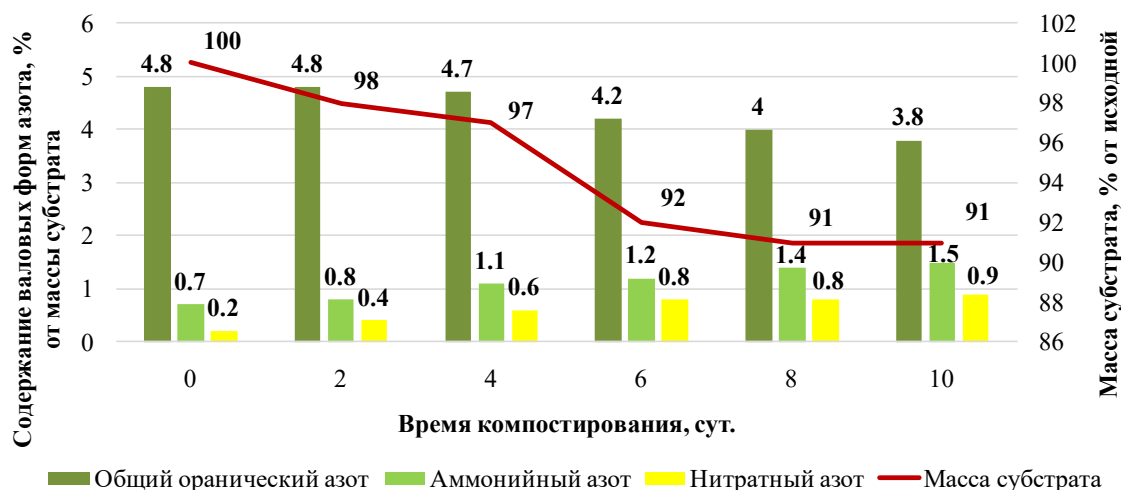


Рис. 3. Убыль субстрата и динамика содержания в нем разных форм азота в процессе компостирования отходов птицеводства в присутствии аборигенной микрофлоры (контроль)

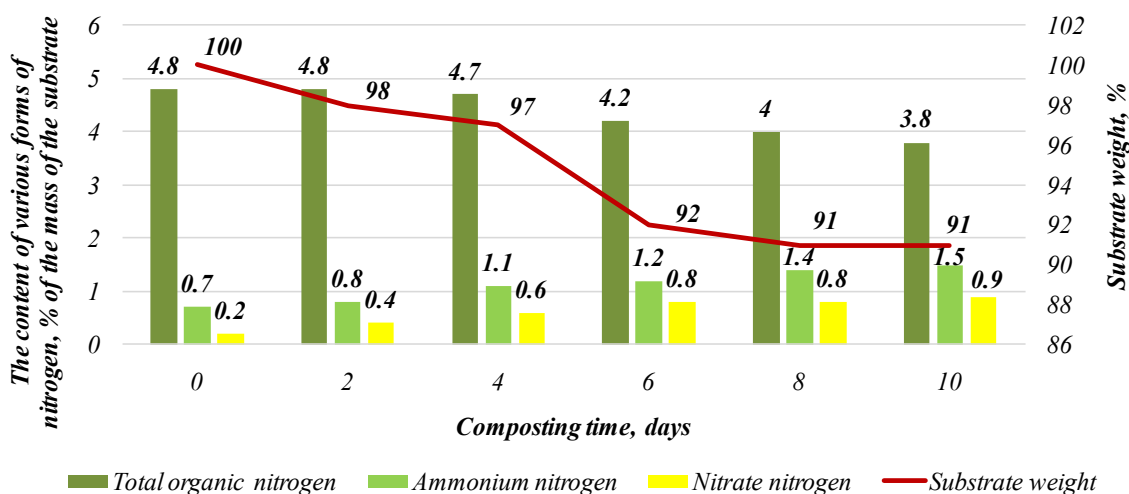


Fig. 3. Loss of substrate and dynamics of content of different forms of nitrogen in it during composting of poultry waste in the presence of indigenous microflora (control)

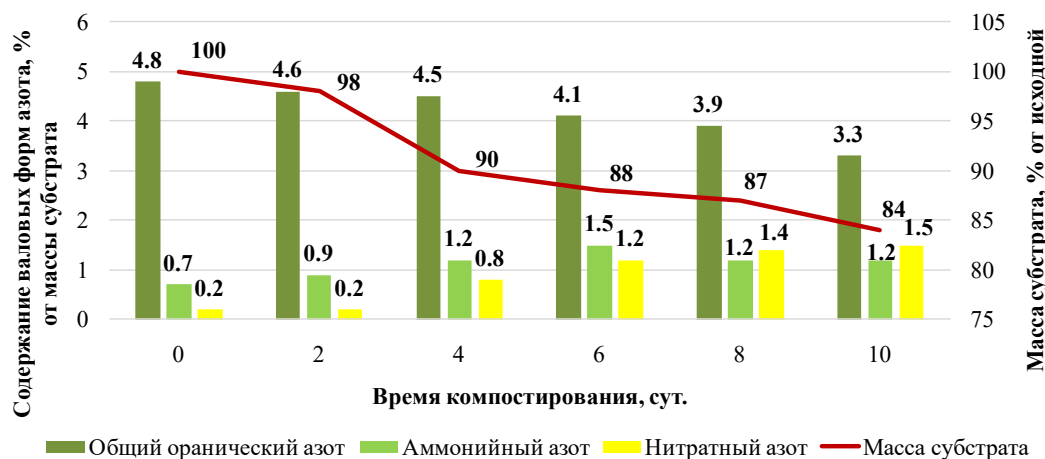


Рис. 4. Убыль субстрата и динамика содержания в нем разных форм азота в процессе компостирования отходов птицеводства в присутствии аборигенной микрофлоры с добавлением хемоавтотрофной бактерии *Nitrosomonas* в комплексе с минеральным носителем – глауконитом (опыт)

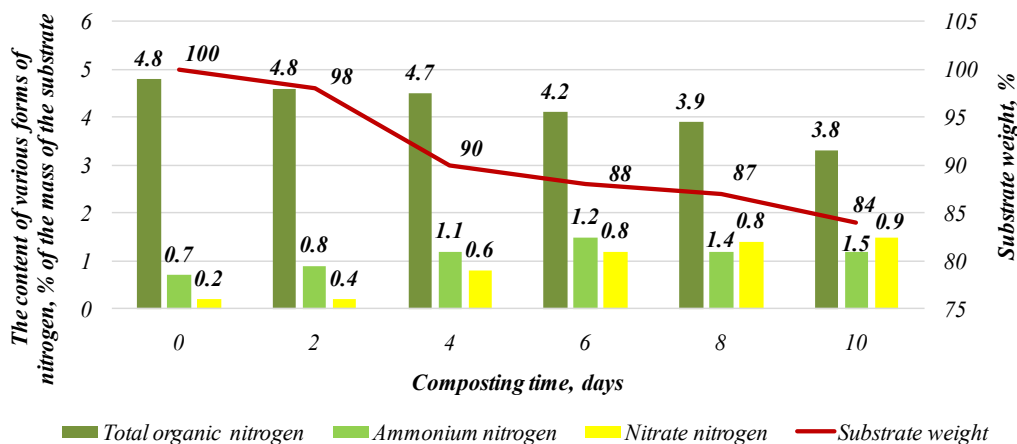


Fig. 4. Loss of substrate and dynamics of its content of different forms of nitrogen in the process of composting of poultry waste in the presence of indigenous microflora with the addition of chemoautotrophic bacterium *Nitrosomonas* in complex with mineral carrier – glauconite (experiment)

Для деградации труднорастворимых компонентов в субстрат инокулировали функциональный комплекс мицелиальных грибов родов *Thielavia* и *Myceliophthora* в равных долях в виде взвеси клеток с титром 10,0–12,0 млн клеток на 1 л культуральной жидкости. На данном этапе компостирования наступает термофаза, поэтому были задействованы термофильные виды микромицетов. В контрольном варианте ферментация осуществлялась за счет естественной микрофлоры, без добавления культур мицелиальных грибов. О процессах деструкции целлюлозных компонентов судили по убыли целлюлозы. Термический этап компостирования продолжался в течение двух недель и обеспечил в эксперименте более эффективную деструкцию целлюлозы (на 18,1 %) и более интенсивную убыль субстрата (на 12,3 %), чем в контроле (таблица 1). Такие результаты свидетельствуют о целесообразности применения термофильных мицелиальных грибов *Thielavia* и *Myceliophthora* для более эффективного расщепления целлюлозных компонентов пометно-подстилочного субстрата.

На последнем этапе деструкции использовали актиномицеты родов *Cellulomonas* и *Nocardia*. Внесение 10-процентного раствора серной кислоты до достижения pH на уровне 6,2–6,5 позволило связать остаточные количества аммиака и создать благоприятные условия для деятельности почвообразователей. Данный этап продолжался в течение месяца, а суммарно весь процесс эксперимента составил два месяца. Были получены контрольный и опытный образцы компоста, существенно отличные друг от друга по ряду характеристик, причем для экспериментального образца был характерен типичный запах почвы и насыщенный бурый цвет (таблица 2).

Итогом ферментации является получение зрелого компоста – рыхлой массы влажностью 30 %, цветом от светло-бурого до насыщенно коричневого, с характерным землистым запахом, свойства которого позволяют рассматривать его в качестве органоминерального удобрения.

Таблица 1

Эффективность деструкции трудноразлагаемых компонентов субстрата под воздействием микроорганизмов после двух недель ферментации при температуре 50–60 °С

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

Table 1

Efficiency of degradation of difficult to degrade substrate components under the influence of microorganisms after two weeks of fermentation at 50–60 °C

Parameters	Composting options	
	Control (indigenous microflora)	Experiment (indigenous microflora and functional complex of microorganisms)
Cellulose content, % of initial quantity	82.4 ± 4.1	67.5 ± 1.6
Substrate weight, % of initial weight	86.8 ± 1.1	76.1 ± 0.9

Таблица 2

Эффективность деструкции образцов субстрата массой 5 кг по истечении 2 месяцев экспонирования под воздействием микроорганизмов

Параметры	Варианты компостирования	
	Контроль (аборигенная микрофлора)	Опыт (аборигенная микрофлора и функциональный комплекс микроорганизмов)
Цвет	Серо-коричневый	Темно-бурый
Запах	Аммиачный	Землистый
Консистенция	Крупнодисперсная, потеря прочности подстилки незначительна	Мелкодисперсная, потеря прочности подстилки сильно выражена
pH	7,7 ± 0,1	7,2 ± 0,1
Масса субстрата, % от исходной	83,7 ± 0,7	62,2 ± 0,3
Содержание подвижного азота (N-NO ₃), мг/кг	29,7 ± 0,3	38,3 ± 0,7

Table 2

Destruction efficiency of 5 kg substrate samples after 2 months of exposure to microorganisms

Parameters	Composting options	
	Control (indigenous microflora)	Experiment (indigenous microflora and functional complex of microorganisms)
Colour	Grey-brown	Dark brown
Odour	Ammonia	Earthy
Consistency	Coarsely dispersed, loss of bedding strength is negligible	Finely dispersed, loss of bedding strength is pronounced
pH	7.7 ± 0.1	7.2 ± 0.1
Substrate weight, % of initial one	83.7 ± 0.7	62.2 ± 0.3
Mobile nitrogen content (N-NO ₃), mg/kg	29.7 ± 0.3	38.3 ± 0.7

Таким образом, установлено, что процесс компостирования инициируется аборигенной микрофлорой, однако обнаружено повышение его эффективности за счет инокуляции комплексов микроорганизмов на 21,5 % (таблица 3).

Отдельного внимания заслуживает динамика pH на фоне убыли субстрата в период микробной деструкции. Очевидно, что это достигается за счет обеспечения оптимального соответствия экологической и функциональной роли групп микроорга-

низмов 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.

Результаты эксперимента позволили установить эффективность предлагаемых микробных композиций, вносимых в субстрат в соответствии с определенными этапами его деструкции.

Таблица 3

Убыль субстрата и динамика pH при компостировании отходов птицеводства под влиянием функциональных комплексов микроорганизмов

Период деструкции, неделя	Контроль		Опыт	
	Масса субстрата, г	pH, ед.	Масса субстрата, г	pH, ед.
0	5000 ± 0,3	7,40 ± 0,1	5000 ± 0,7	7,45 ± 0,1
1	4978 ± 14,1	8,30 ± 0,3	4981 ± 16,1	8,30 ± 0,3
2	4895 ± 12,7	9,20 ± 0,3	4899 ± 11,3	9,30 ± 0,1
3*	4764 ± 21,6	9,40 ± 0,7	4710 ± 14,3	6,20 ± 0,4
4	4659 ± 13,7	9,50 ± 0,2	4370 ± 32,7	6,30 ± 0,3
5	4590 ± 33,3	9,50 ± 0,2	4300 ± 33,3	6,50 ± 0,2
6	4489 ± 26,8	9,20 ± 0,3	4186 ± 42,4	6,60 ± 0,3
7	4458 ± 31,7	9,00 ± 0,2	3690 ± 37,7	6,70 ± 0,2
8	4438 ± 36,3	8,60 ± 0,1	3480 ± 33,4	6,80 ± 0,2

* Внесение в опытном варианте 10-процентного раствора серной кислоты для коррекции pH.

Table 3

Substrate loss and pH dynamics during poultry waste composting under the influence of functional complexes of microorganisms

Destruction period, weeks	Control		Experiment	
	Substrate weight, g	pH, pcs.	Substrate weight, g	pH, pcs.
0	5000.0 ± 0.3	7.4 ± 0.1	5000.0 ± 0.7	7.5 ± 0.1
1	4978.4 ± 14.1	8.3 ± 0.3	4981.3 ± 16.1	8.3 ± 0.3
2	4895.6 ± 12.7	9.2 ± 0.3	4899.1 ± 11.3	9.3 ± 0.1
3*	4764.5 ± 21.6	9.4 ± 0.1	4710.2 ± 14.3	6.2 ± 0.2
4	4659.5 ± 13.7	9.5 ± 0.2	4370.6 ± 32.7	6.3 ± 0.1
5	4590.4 ± 33.3	9.5 ± 0.2	4300.4 ± 33.3	6.5 ± 0.2
6	4489.7 ± 26.8	9.2 ± 0.3	4186.6 ± 42.4	6.6 ± 0.3
7	4458.1 ± 31.7	9.0 ± 0.2	3690.5 ± 37.7	6.7 ± 0.2
8	4438.8 ± 36.3	8.6 ± 0.1	3480.7 ± 33.4	6.8 ± 0.2

* Application of 10 % sulfuric acid solution for pH correction.

Такое поэтапное внесение микробных суспензий обеспечивает высокую динамику формирования необходимого титра соответствующих видов микробов, что в естественных условиях может достигаться в ходе конкурентной борьбы, растянутой во времени.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Предложенные микробные композиции, характеризующиеся устойчивостью и обеспечивающие глубокую степень деструкции отходов птицеводства, способны обеспечить получение компоста, богатого биогенными элементами в доступной форме. Каскадная микробная конверсия отходов обеспечивает минимизацию потерь биогенных элементов в процессе деструкции, что, с одной стороны, снижает объемы их выбросов в атмосферу, с другой – определяет переход в доступные для растений подвижные формы. Включение в микробную композицию хемотрофов позволяет сократить поступление в атмосферу углекислого газа, важнейшего фактора, вносящего вклад в развитие парникового эффекта. Предлагаемый подход в утилизации органических отходов может обеспечить временное выпадение

углерода из круговорота за счет превращения в относительно устойчивые гуминовые вещества. При масштабной реализации такого приема его можно рассматривать как один из возможных механизмов регулирования поступления углекислого газа в рамках биосферы.

Таким образом, в ходе реализации предлагаемой технологии органические отходы птицеводства в виде отработанной подстилочной массы при помощи микроорганизмов могут быть переработаны в биогумус, или органоминеральное удобрение.

Предлагаемая технология будет востребована на предприятиях, образующих значительные массы органических отходов, в частности, на птицеводческих. Отличительными особенностями технологии будут ее воспроизводимость и относительно низкая себестоимость при высоком эффекте от реализации продукта. Полученные удобрения могут использоваться в пределах производственного холдинга, образующего сырье – органические отходы, поскольку подавляющее большинство таких предприятий имеет сектор растениеводства для самообеспечения кормами (замкнутый цикл).

Библиографический список

1. Ямалиев Т. Ш., Бочарова А. А. Экологические проблемы птицеводства // Мир Инноваций. 2021. № 4. С. 40–43.
2. Uktam T., Shafaoat N., Akhmed R. Animal waste processing technology and poultry farming in organomineral fertilizers // International Journal of Psychosocial Rehabilitation. 2020. Vol. 24, No. 6. Pp. 7263–7274. DOI: 10.37200/IJPR/V24I6/PR260731.
3. Iljina G. V., Iljin D. Yu., Zimnyakov V. M., Sashenkova S. A. Influence of organomineral fertilizer based on fermented poultry waste on the physico-chemical parameters of agricultural soils // Scientific Papers. Series A. Agronomy. 2022. Vol. 65, No. 2. Pp. 91–96.
4. Harindintwali J. D., Zhou J., Muhoza B., Wang F., Herzberger A., Yu X. Integrated eco-strategies towards sustainable carbon and nitrogen cycling in agriculture // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 293. Article number 112856. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112856.
5. Crippen T. L., Sheffield C. L., Singh B., Byrd J. A., Beier R. C., Anderson R. C. Poultry litter and the environment: Microbial profile of litter during successive flock rotations and after spreading on pastureland // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 780. Article number 146413. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146413.
6. Li F., Ghanizadeh H., Cui G., Liu J., Miao S., Liu Ch., Song W., Chen X., Cheng M., Wang P., Zhang Y., Wang A. Microbiome – based agents can optimize composting of agricultural wastes by modifying microbial communities // Bioresource Technology. 2023. Vol. 374. Article number 128765. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128765.
7. Воробьева А. А. Ильина Г. В., Ильин Д. Ю. Разработка технологии каскадной микробной конверсии отходов птицеводства // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. Т. I. С. 192–194.
8. Воробьева А. А. Производство органоминерального удобрения путем биоконверсии отходов птицеводства // Инновационная техника и технология. 2021. Т. 8, № 2. С. 39–42.
9. 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.
10. Фахреев Н. Н. Разработка и обоснование параметров газификационной установки для утилизации отходов птицеводства: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1. Казань, 2023. 179 с.
11. Hoang H. G., Thuy B. T. P., Lin C., Vo D. N., Tran H. T., Bahari M. B., Le V. G., Vu C. T. The nitrogen cycle and mitigation strategies for nitrogen loss during organic waste composting: a review // Chemosphere. 2022. Vol. 300. Article number 134514. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134514.
12. Guo H., Zhao S., Xia D., Zhao W., Li Q., Liu X., Lv J. The biochemical mechanism of enhancing the conversion of chicken manure to biogenic methane using coal slime as additive // Bioresource Technology. 2022. Vol. 344 (Part B). Article number 126226. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134514.
13. Ravindran B., Karmegam N., Awasthi M. K., Chang S. W., Selvi P. K., Balachandar R., Chinnappan S., Azelee N. I. W., Munuswamy-Ramanujam G. Valorization of food waste and poultry manure through co-composting amending saw dust, biochar and mineral salts for value-added compost production // Bioresource Technology. 2022. Vol. 346. Article number 126442. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126442.
14. Sigurnjak I., Brienza C., Snauwaert E., De Dobbelaere A., De Mey J., Vaneekhaute C., Michels E., Schoumans O., Adani F., Meers E. Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-)scrubbing technology // Waste Management. 2019. Vol. 89. Pp. 265–274. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.043.
15. Esmailian Y., Amiri M. B., Tavassoli A., Caballero-Calvo A., Rodrigo-Comino J. Replacing chemical fertilizers with organic and biological ones in transition to organic farming systems in saffron (*Crocus sativus*) cultivation // Chemosphere. 2022. Vol. 307 (Part 1). Article number 135537. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135537.
16. Srivastava R. K., Shetti N. P., Reddy K. R., Aminabhavi T. M. Sustainable energy from waste organic matters via efficient microbial processes // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 722. Article number 137927. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137927.
17. Pereira A. S. A. de P., Castro J. de S., Ribeiro V. J., Calijuri M. L. Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 779. Article number 146205. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146205.
18. Bibi F., Ilyas N., Arshad M., Khalid A., Saeed M., Ansar S., Batley J. Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by *Burkholderia cenocepacia* // Chemosphere. 2022. Vol. 291 (Part 3). Article number 132762. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132762.
19. He Y., Zhang Y., Huang X., Xu J., Zhang H., Dai X., Li X. Deciphering the internal driving mechanism of microbial community for carbon conversion and nitrogen fixation during food waste composting with multifunc-

tional microbial inoculation // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 360. Article number 127623. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127623.

20. Белов А. А., Чепцов В. С., Лысак Л. В. Методы идентификации почвенных микроорганизмов. Москва: ООО «МАКС Пресс», 2020. 196 с.

21. Маннапова Р. Т. Микробиология. Москва: ООО «Проспект», 2019. 440 с. DOI: 10.31085/9785392287734-2019-440.

Об авторах:

Галина Викторовна Ильина, доктор биологических наук, профессор кафедры биологии, биологических технологий и ветеринарно-санитарной экспертизы, Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия; ORCID 0000-0002-2583-6029, AuthorID 161274. *E-mail: ilyina.g.v@pgau.ru*

Дмитрий Юрьевич Ильин, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, биологических технологий и ветеринарно-санитарной экспертизы, Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия; ORCID 0000-0001-8379-5811, AuthorID 1622117. *E-mail: ilyin.d.u@pgau.ru*

Анна Андреевна Гришина, аспирант кафедры биологии, биологических технологий и ветеринарно-санитарной экспертизы, Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия; ORCID 0009-0009-6224-7758, AuthorID 1135512. *E-mail: grishina.a.a@pgau.ru*

Альбина Рафаэльевна Дашкина, аспирант кафедры почвоведения, агрохимии и химии, Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия; ORCID 0009-0003-2387-8027, AuthorID 1119857. *E-mail: dashkina.a.r@pgau.ru*

References

1. Yamaliev T. Sh., Bocharova A. A. Environmental problems of poultry farming. *World of Innovation*. 2021; 4: 40–43. (In Russ.)

2. Uktam T., Shafaat N., Akhmed R. Animal waste processing technology and poultry farming in organomineral fertilizers. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*. 2020; 24 (06): 7263–7274. DOI: 10.37200/IJPR/V24I6/PR260731.

3. Iljina G. V., Iljin D. Yu., Zimnyakov V. M., Sashenkova S. A. Influence of organomineral fertilizer based on fermented poultry waste on the physico-chemical parameters of agricultural soils. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2022; 65 (2): 91–96.

4. Harindintwali J. D., Zhou J., Muhoza B., Wang F., Herzberger A., Yu X. Integrated eco-strategies towards sustainable carbon and nitrogen cycling in agriculture. *Journal of Environmental Management*. 2021; 293: 112856. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112856.

5. Crippen T. L., Sheffield C. L., Singh B., Byrd J. A., Beier R. C., Anderson R. C. Poultry litter and the environment: Microbial profile of litter during successive flock rotations and after spreading on pastureland. *Science of The Total Environment*. 2021; 780: 146413. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146413.

6. Li F., Ghanizadeh H., Cui G., Liu J., Miao S., Liu Ch., Song W., Chen X., Cheng M., Wang P., Zhang Y., Wang A. Microbiome – based agents can optimize composting of agricultural wastes by modifying microbial communities. *Bioresource Technology*. 2023; 374: 128765. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128765.

7. Vorob'yeva A. A., Il'ina G. V., Il'in D. Yu. Development of technology for cascade microbial conversion of poultry waste. *Contribution of young scientists to the innovative development of the agroindustrial complex of Russia: collection of materials of the All-Russian (national) scientific-practical conference of young Scientists*. Penza: Penza State Agrarian University, 2021. Vol. I. Pp. 192–194. (In Russ.)

8. Vorob'yeva A. A. Production of organo-mineral fertilizers by bioconversion of poultry waste. *Innovative Machinery and Technology*. 2021; 8 (2): 39–42. (In Russ.)

9. Smirnov R. V., Bezdudnaya A. G., Treyman M. G. Innovative recycling activities industrial waste on the example of a poultry farm. *Technical and technological problems of the service*. 2020; 1 (51): 54–60. (In Russ.)

10. Fakhreev N. N. Development and justification of the parameters of a gasification plant for the disposal of poultry waste: dissertation ... candidate of technical sciences: 4.3.1. Kazan, 2023. 179 p. (In Russ.)

11. Hoang H. G., Thuy B. T. P., Lin C., Vo D. N., Tran H. T., Bahari M. B., Le V. G., Vu C. T. The nitrogen cycle and mitigation strategies for nitrogen loss during organic waste composting: a review. *Chemosphere*. 2022; 300: 134514. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134514.

12. Guo H., Zhao S., Xia D., Zhao W., Li Q., Liu X., Lv J. The biochemical mechanism of enhancing the conversion of chicken manure to biogenic methane using coal slime as additive. *Bioresource Technology*. 2022; 344 (B): 126226. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134514.

13. Ravindran B., Karmegam N., Awasthi M. K., Chang S. W., Selvi P. K., Balachandar R., Chinnappan S., Azelee N. I. W., Munuswamy-Ramanujam G. Valorization of food waste and poultry manure through co-compost-

ing amending saw dust, biochar and mineral salts for value-added compost production. *Bioresource Technology*. 2022; 346: 126442. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126442.

14. Sigurnjak I., Brienza C., Snauwaert E., De Dobbelaere A., De Mey J., Vaneekhaute C., Michels E., Schoumans O., Adani F., Meers E. Production and performance of bio-based mineral fertilizers from agricultural waste using ammonia (stripping-)scrubbing technology. *Waste Management*. 2019; 89: 265–274. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.043.

15. Esmacilian Y., Amiri M. B., Tavassoli A., Caballero-Calvo A., Rodrigo-Comino J. Replacing chemical fertilizers with organic and biological ones in transition to organic farming systems in saffron (*Crocus sativus*) cultivation. *Chemosphere*. 2022; 307 (1): 135537. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135537.

16. Srivastava R. K., Shetti N. P., Reddy K. R., Aminabhavi T. M. Sustainable energy from waste organic matters via efficient microbial processes. *Science of the Total Environment*. 2020; 722: 137927. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137927.

17. Pereira A. S. A. de P., Castro J. de S., Ribeiro V. J., Calijuri M. L. Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth. *Science of The Total Environment*. 2021; 779: 146205. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146205.

18. Bibi F., Ilyas N., Arshad M., Khalid A., Saeed M., Ansar S., Batley J. Formulation and efficacy testing of bio-organic fertilizer produced through solid-state fermentation of agro-waste by *Burkholderia cenocepacia*. *Chemosphere*. 2022; 291 (3): 132762. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132762.

19. He Y., Zhang Y., Huang X., Xu J., Zhang H., Dai X., Li X. Deciphering the internal driving mechanism of microbial community for carbon conversion and nitrogen fixation during food waste composting with multifunctional microbial inoculation. *Bioresource Technology*. 2022; 360: 127623. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127623.

20. Belov A. A., Cheptsov V. S., Lysak L. V. *Methods for identifying soil microorganisms*. Moscow: MAK Press LLC, 2020. 196 p. (In Russ.)

21. Mannapova R. T. *Microbiology*. Moscow: Prospect LLC, 2019. 440 p. DOI: 10.31085/9785392287734-2019-440. (In Russ.)

Authors' information:

Galina V. Ilyina, doctor of biological sciences, professor of the department of biology, biological technologies and veterinary and sanitary expertise, Penza State Agrarian University, Penza, Russia; ORCID 0000-0002-2583-6029, AuthorID 161274. *E-mail: ilyina.g.v@pgau.ru*

Dmitry Yu. Ilyin, candidate of biological sciences, associate professor of the department of biology, biological technologies and veterinary and sanitary expertise, Penza State Agrarian University, Penza, Russia; ORCID 0000-0001-8379-5811, AuthorID 1622117. *E-mail: ilyin.d.u@pgau.ru*

Anna A. Grishina, postgraduate of the department of biology, biological technologies and veterinary and sanitary expertise, Penza State Agrarian University, Penza, Russia; ORCID 0009-0009-6224-7758, AuthorID 1135512. *E-mail: grishina.a.a@pgau.ru*

Albina R. Dashkina, postgraduate of the department of soil science, agrochemistry and chemistry, Penza State Agrarian University, Penza, Russia; ORCID 0009-0003-2387-8027, AuthorID 1119857. *E-mail: dashkina.a.r@pgau.ru*