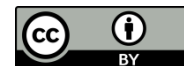


Оригинальная статья / Original article

УДК 631.812;579.64

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-236-243>



## Микробиологическая оценка процесса ускоренной твердофазной ферментации органического сырья

© Н.В. Фомичева\*, Г.Ю. Рабинович\*,  
Е.А. Прутенская\*\*, Ю.Д. Смирнова\*

\*ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», г. Москва, Российская Федерация

\*\*Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

**Резюме:** Отходы животноводства и птицеводства при рациональном подходе становятся сырьем для производства органических удобрений. Во Всероссийском научно-исследовательском институте мелиорированных земель – филиале ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», предложена схема ускоренной твердофазной ферментации навоза крупного рогатого скота с торфом: 48 ч при 37 °С, затем 48 ч при 60 °С, далее 24 ч при 37 °С, завершающаяся естественным остыванием ферментируемой массы. Отличительная черта ускоренной ферментации – искусственное поддержание заданных температур. Цель работы – провести микробиологическую оценку процесса ускоренной твердофазной ферментации. Эксперимент проводили в лабораторном ферментере объемом 1,75 дм<sup>3</sup>. В процессе ферментации изучали численность микроорганизмов, использующих органические и минеральные формы азота (методом предельных разведений), а также видовую принадлежность микробиоценоза (методом масс-спектрометрии). Результаты исследований показали, что температурный режим основных этапов процесса ферментации обеспечивал максимальную численность мезофильных и термофильных азоттрансформирующих микроорганизмов. Их активное развитие способствовало интенсивной трансформации ферментируемой смеси, о чем свидетельствовали мезофильный и термофильный коэффициенты минерализации. По линейным коэффициентам минерализации в конце процесса судили о завершении процессов трансформации и стабилизации продукта ферментации. Продукт ферментации характеризовался высокой численностью азоттрансформирующих микроорганизмов – в среднем  $3,5 \pm 0,3 \cdot 10^8$  КОЕ/г абсолютно сухого вещества. Определение родовой принадлежности микробиоценоза ферментируемой массы и конечного продукта подтвердило, что температурный режим проведения процесса обеспечивал уничтожение санитарно-показательных микроорганизмов, изначально присутствующих в исходной смеси (*E. coli*, *Citrobacter*, *Proteus*), и начиная с пастеризационного периода способствовал активному развитию непатогенных и неболезнетворных бактерий рода *Bacillus* (*B. megaterium*, *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. pumilus* и *B. altitudinis*). Микробиологическая оценка полученного продукта ферментации позволяет рекомендовать его к использованию в качестве экологически безопасного органического удобрения.

**Ключевые слова:** микроорганизмы, мезофилы, термофилы, навоз, коэффициент минерализации, ускоренная ферментация

**Для цитирования:** Фомичева Н.В., Рабинович Г.Ю., Прутенская Е.А., Смирнова Ю.Д. Микробиологическая оценка процесса ускоренной твердофазной ферментации органического сырья. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021. Т. 11. N 2. С. 236–243. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-236-243>

## Microbiologic assessment of accelerated solid-state fermentation of agricultural organic wastes

Natalia V. Fomicheva\*, Galina Yu. Rabinovich\*,  
Ekaterina A. Prutenskaya\*\*, Yulia D. Smirnova\*

\*FRC V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

\*\*Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

**Abstract:** Livestock and poultry wastes, when effectively managed, become feedstock for organic fertiliser production. Researchers from the All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands, the branch of Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”, proposed an accelerated regimen of cattle manure solid-phase fermentation with peat: 48 h at 37 °C, then 48 h at 60 °C and 24 h at 37 °C, terminating with nat-

ural cooling of the fermented mass. A distinctive feature of the proposed accelerated fermentation is maintenance of set-point temperatures. The aim of the work is to perform a microbiological evaluation of the process of accelerated solid-phase fermentation. An experiment was carried out in a 1.75 dm<sup>3</sup> laboratory fermenter. During the fermentation, we studied the number of microorganisms, which use organic and mineral nitrogen forms, using the limiting dilution method, as well as the species membership by mass spectrometry. The experimental findings showed that the temperature regime of the main fermentation steps yielded the maximum number of mesophilic and thermophilic nitrogen-transforming microorganisms. Their active growth caused the intensive transformation of the fermented mixture, as evidenced by mesophilic and thermophilic mineralisation coefficients. At the end of the process, the linear mineralisation coefficients were used to assess the completion of the fermentation product transformation and stabilisation. The fermentation product comprised a high number of nitrogen-transforming microorganisms (on average, 3.5±0.3108 COE/g on a dry weight basis). The determination of the microbiota species membership in the fermented mass and the final product confirmed that the process temperature regime ensured the elimination of the sanitary-indicatory microorganisms present in the original mixture (*E. coli*, *Citrobacter*, *Proteus*). In addition, during pasteurisation, this regime led to the active development of non-pathogenic *Bacillus* bacteria (*B. megaterium*, *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. pumilus* and *B. altitudinis*). The fermentation product is recommended for use as an environmentally safe organic fertiliser based on the microbiological evaluation.

**Keywords:** microorganisms, mesophiles, thermophiles, manure, mineralisation coefficient, accelerated fermentation

**For citation:** Fomicheva NV, Rabinovich GYu, Prutenskaya EA, Smirnova YuD. Microbiologic assessment of accelerated solid-state fermentation of agricultural organic wastes. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(2):236–243. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-236-243>

## ВВЕДЕНИЕ

Скопление помета и навоза оказывает негативное влияние на экологическое благополучие прилегающих территорий птицеводческих и животноводческих комплексов или хозяйств. В то же время указанные отходы имеют высокий уровень биогенности, в их составе содержится большое количество макро- и микроэлементов, физиологически активных веществ. Это позволяет рассматривать отходы птицеводства и животноводства в качестве основного ресурса при производстве органических удобрений.

Перспективным способом переработки отходов животноводства и птицеводства в органические удобрения является ускоренная ферментация органического сырья в реакторах или ферментерах различного конструктивного исполнения [1, 2]. Разработанные технологические параметры проведения ферментации направлены на обеспечение эффективной трансформации исходной смеси, минимизацию потерь элементов питания и существенное сокращение сроков получения органического удобрения<sup>1</sup> [3]. Например, в закрытом реакторе объемом 32 л в адиабатических условиях компостирование птичьего помета длится 14 дней [4], а в ферментерах камерного типа, представляющих собой отдельные сооружения, спустя 7–10 суток аэробной ферментации из отходов животноводства формируется качественное органическое удобрение [5]. Известны также технологии ускоренного непрерывного производства органического удобрения

в реакторах барабанного типа, где время переработки твердого навоза составляет 7 дней [6] или даже 3–4 суток [7, 8].

Во Всероссийском научно-исследовательском институте мелиорированных земель (ВНИИМЗ) – ныне филиале ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» разработан способ ускоренной твердофазной ферментации навоза крупного рогатого скота (КРС), включающий все основные этапы классического компостирования: разогрев исходной смеси; далее сохранение высокой температуры, в результате чего уничтожается патогенная микрофлора; затем постепенное охлаждение ферментируемой массы и стабилизация готового продукта. Отличительной чертой ускоренной ферментации является искусственное поддержание заданной температуры ферментируемой смеси, что позволяет независимо от времени года гарантированно получать качественное, экологически безопасное органическое удобрение.

Цель работы – провести микробиологическую оценку процесса ускоренной твердофазной ферментации.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперимент проводили в лабораторных условиях. Исходным сырьем являлся свежий навоз КРС и переходный торф, используемый в качестве влагопоглощающего и углеродсодержащего компонента. Ингредиенты объединяли и

<sup>1</sup>Кутровский В.Н., Сидоренко О.Д. Биоконверсия отходов агропромышленного комплекса: учеб. пособие. М.: Инфра-М, 2018.160 с.

тщательно перемешивали. Готовая исходная смесь имела следующие характеристики: влажность – 68%;  $pH_{KCl}$  –  $7,63 \pm 0,03$ ; С –  $41,5 \pm 1,3\%$ ;  $N_{общ}$  –  $1,56 \pm 0,07\%$ .

Ускоренную твердофазную ферментацию проводили в лабораторном ферментере, корпус которого выполнен из нержавеющей стали, имеет форму цилиндра с плоским дном и крышкой. Для обеспечения аэрации ферментируемой смеси внутри корпуса располагается перфорированная барботажная трубка, которая посредством бокового штуцера соединена с компрессором. Полезный объем ферментера –  $1,75 \text{ дм}^3$ . Исходную смесь загружали внутрь ферментера, закрывали крышкой, затем его устанавливали в термостат для поддержания заданной температуры. Процесс ускоренной твердофазной ферментации осуществляли по следующей схеме: 48 ч при  $37^\circ\text{C}$ , затем 48 ч при  $60^\circ\text{C}$ , далее 24 ч при  $37^\circ\text{C}$ , после чего процесс заканчивался естественным остыванием ферментируемой массы до температуры окружающей среды.

Переработку отходов животноводства ускоренной твердофазной ферментацией проводили дважды. Из исходной смеси и далее из ферментируемой массы один раз в сутки отбирали образцы, в которых методом предельных разведений на твердых питательных средах в трехкратной аналитической повторности определяли численность мезофильных (инкубация при  $28^\circ\text{C}$ ) и термофильных (инкубация при  $55^\circ\text{C}$ ) микроорганизмов, доминирующих в подобных процессах ферментации [9, 10]: использующих минеральные формы азота – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), использующих органические формы азота – на мясопептонном агаре (МПА). Соотношение численности указанных микроорганизмов (КАА/МПА) представляет собой значение условного коэффициента минерализации по азоту, по величине которого оценивали интенсивность минерализационных процессов, происходящих в ферментируемой массе [10].

Кроме этого в отобранных образцах осуществляли идентификацию видовой принадлежности микроорганизмов с помощью MALDI-TOF масс-спектрометрии на приборе MicroFlex (Bruker, Германия).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ Microsoft Excel и STATGRAPHICS Centurion XVI.II. При обработке полученных данных использовали элементы вариационной статистики: среднеарифметические значения и доверительный интервал конкретного значения (объем выборки  $n = 6$ ). Статистическую значи-

мость отличий анализировали с использованием  $t$ -критерия Стьюдента ( $p < 0,05$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку ферментация происходит под влиянием микроорганизмов, то создание благоприятных условий для их жизнедеятельности способствует более качественному преобразованию исходного сырья. Известно, что в процессе ферментации органической смеси участвуют представители различных таксономических групп микроорганизмов, которые способны приспосабливаться к изменениям внешней среды (влажности, температуры, pH и др.) и выполнять свою роль<sup>1</sup> [3]. Выбор температурных условий и сроков проведения процесса ускоренной ферментации, использованных в данной работе, основывался на представлении о классическом компостировании и результатах предыдущих исследований [11] и был направлен на эффективное использование потенциала микрофлоры исходного сырья.

В первые сутки выдерживания ферментируемой смеси при температуре  $37^\circ\text{C}$  наблюдался максимальный рост численности исследуемых групп микроорганизмов – их количество увеличилось более чем в три раза по сравнению с исходной смесью (таблица). Известно, что микроорганизмы, потребляя питательные компоненты ферментируемой массы, активно развиваются, процессы их жизнедеятельности приводят к образованию легкоусвояемых соединений, биологически активных веществ, участвующих в дальнейших процессах трансформации ферментируемой смеси<sup>2</sup>.

Дальнейшее поддержание указанной температуры приводило к некоторому уменьшению численности мезофильных микроорганизмов, а после 24 ч при  $60^\circ\text{C}$  наблюдалось резкое снижение их количества – в 5,2 и 3,8 раза для микроорганизмов, использующих органические и минеральные формы соответственно (см. таблицу). Тем не менее установление пастеризационного периода направлено на обеззараживание получаемого продукта, включающее гибель термочувствительных патогенных микроорганизмов и ликвидацию всхожести семян сорных растений [12]. Известны исследования по компостированию навоза КРС, в которых *Escherichia coli* O157:H7 не была обнаружена после 72 ч при  $45^\circ\text{C}$ , а *Salmonella enteritidis* – через 48 ч при той же температуре [13]. Считается, что температура смеси  $55\text{--}60^\circ\text{C}$ , действующая от нескольких минут до нескольких дней, наиболее эффективна<sup>1</sup> [3]. Соответственно, в нашем эксперименте проведение пастеризационного периода в течение 48 ч хотя и приводило

<sup>2</sup>Емцев В.Т., Мишустин Е.Н. Микробиология: учебник для академического бакалавриата; 8-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2018. 445 с.

Количество мезофильных микроорганизмов в процессе ускоренной ферментации

Number of mesophilic microorganisms in the process of accelerated fermentation

Температурный режим ускоренной ферментации	Микроорганизмы, использующие органические формы азота, $n \cdot 10^8$ КОЕ/г АСВ	Микроорганизмы, использующие минеральные формы азота, $n \cdot 10^8$ КОЕ/г АСВ
Исходная смесь	$8,6 \pm 0,7^d$	$4,7 \pm 0,3^c$
Смесь спустя 24 ч при 37 °С	$27,9 \pm 1,5^f$	$17,6 \pm 0,9^e$
Смесь спустя 48 ч при 37 °С	$15,7 \pm 1,1^e$	$13,3 \pm 0,9^d$
Смесь спустя 24 ч при 60 °С	$3,0 \pm 0,3^b$	$3,5 \pm 0,3^b$
Смесь спустя 48 ч при 60 °С	$1,9 \pm 0,2^a$	$2,1 \pm 0,2^a$
Смесь спустя 24 ч при 37 °С	$3,9 \pm 0,2^c$	$2,8 \pm 0,2^b$
Смесь спустя 24 ч естественного остывания (продукт ферментации)	$4,1 \pm 0,3^c$	$3,0 \pm 0,3^b$

*Примечание. Представлены среднеарифметические значения численности микроорганизмов с доверительным интервалом ( $n = 6$ ); в каждом столбце разными буквами обозначены статистически значимые различия ( $p < 0.05$ ); АСВ – абсолютно сухое вещество.*

к существенному снижению мезофильной азот-трансформирующей микрофлоры, но при этом создавало гарантированные условия для обеспечения санитарно-микробиологической безопасности конечного продукта и способствовало развитию термофильных микроорганизмов.

В пастеризационный период за счет жизнедеятельности термофильной микрофлоры в процессы трансформации вовлекаются более устойчивые соединения, происходит деградация биополимеров, способствующая формированию более качественного продукта<sup>1</sup> [4]. Если в начале процесса ферментации численность термофильных микроорганизмов, использующих органический и минеральный азот, составляла  $11,3 \pm 1,1 \cdot 10^6$  КОЕ/г АСВ и  $3,4 \pm 0,5 \cdot 10^6$  КОЕ/г АСВ соответственно, то спустя 48 ч при температуре 60 °С их количество достигало максимума –  $5,6 \pm 0,7 \cdot 10^8$  КОЕ/г АСВ и  $8,1 \pm 0,9 \cdot 10^8$  КОЕ/г АСВ соответственно, что свидетельствовало об активном разложении сложных органических соединений в этот период [14]. Максимумы численности термофилов, потребляющих органические и минеральные формы азота, при 60 °С отмечены и в другом лабораторном эксперименте по компостированию навоза КРС [9].

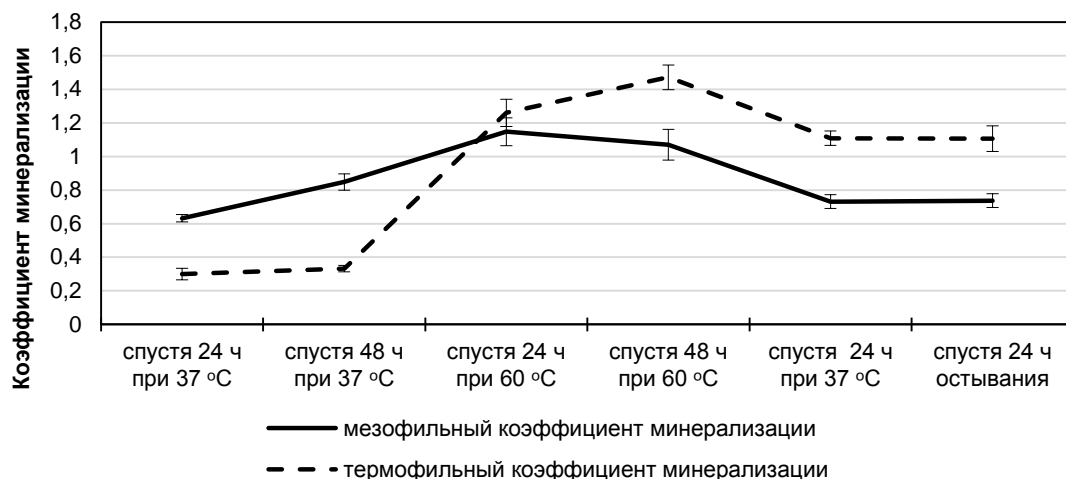
Дальнейший температурный режим – 37 °С, сохранявшийся в течение 24 ч, и последующее естественное остывание ферментируемой массы способствовали плавному завершению процессов трансформации и стабилизации продукта. В этот период количество термофилов постепенно уменьшалось, возобновлялся рост численности исследуемых мезофилов (см. таблицу). Статистическая обработка экспериментальных данных позволила выявить тесную обратную корреляционную зависимость между количеством мезофильных и термофильных азот-трансформирующих микроорганизмов в процессе ферментации: для использующих органический азот коэффициент корреляции ( $r$ ) составил -0,88, для потребляющих минеральные формы азота – -0,86.

Более подробно об уровне трансформации ферментируемой смеси, осуществляемой, в том числе, исследуемыми микроорганизмами, можно судить по мезофильным и термофильным коэффициентам минерализации, которые представлены на рисунке в виде среднеарифметических значений со стандартным отклонением (объем выборки  $n = 6$ ).

На графиках отчетливо видно, что в начале ферментации в преобразовании ферментируемой массы доминируют мезофильные микроорганизмы, а начиная с пастеризационного периода – термофильная микрофлора. Важно отметить, что линейные мезофильный и термофильный коэффициенты минерализации в конце процесса позволяют судить о завершении процессов трансформации и стабилизации продукта ферментации.

В полученном продукте ферментации отмечена достаточно высокая численность азот-трансформирующих микроорганизмов – в среднем  $3,5 \pm 0,3 \cdot 10^8$  КОЕ/г АСВ. Однако это значение может варьировать в зависимости от партии навоза КРС, на состав которого, как известно, определяющее влияние оказывает возраст, условия содержания и кормления животных [15]. Тем не менее выявленные закономерности будут сохраняться.

По численности азот-трансформирующей микрофлоры продукт ферментации можно сравнить с известными аналогами. Так, в биоудобрении Полифункур, полученном сотрудниками Института микробиологии НАН Беларуси и Института природопользования НАН Беларуси в лабораторном биореакторе путем переработки куриного помета, численность микроорганизмов, использующих органический азот, достигала  $1,1 \pm 0,04 \cdot 10^7$  КОЕ/г АСВ, а усваивающих минеральные формы азота –  $0,6 \pm 0,05 \cdot 10^7$  КОЕ/г АСВ. [3]. В биоудобрении Омуг, разработанном сотрудниками ВНИИСХМ и ИАЭП на основе аэробной ферментации помета, численность аммонификаторов составляет  $9 \cdot 10^7$  КОЕ/г АСВ. [16].



Кoeffициенты минерализации в процессе ускоренной ферментации

Mineralization coefficients in the process of accelerated fermentation

Продукт, полученный ускоренной ферментацией, рекомендуется использовать в качестве органического удобрения, поэтому он должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 53117-2008. Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия. В частности, в органическом удобрении должны отсутствовать патогенные и болезнетворные микроорганизмы, а индекс санитарно-показательных микроорганизмов не должен превышать 9 клеток/г. В связи с этим на всех основных этапах получения продукта ферментации была установлена родовая принадлежность микроорганизмов.

Использование различных температурных режимов проведения твердофазной ферментации отразилось на сукцессии микроорганизмов. Вследствие того что в процессе ферментации использовался свежий навоз КРС, в исходной смеси преобладали обитатели кишечника коровы – бактерии семейства *Enterobacteriaceae*: представители родов *Escherichia*, в частности, *E. coli*, *Citrobacter* и *Proteus*. Поскольку температура 37 °С является оптимальной для их развития, то указанные микроорганизмы были выявлены и после первых двух суток ферментации. Последующий пастеризационный период (48 ч при 60 °С) обеспечил уничтожение вышеперечисленных санитарно-показательных микроорганизмов и в ферментируемой смеси стали преобладать бактерии рода *Bacillus*: *B. megaterium* и *B. subtilis*. Способность к синтезу внеклеточных гидролитических ферментов, к расщеплению сложных природных полимеров позволяет становиться этим микроорганизмам доминирующими в процессе компостирования. Бактерии рода *Bacillus* способны образовывать эндоспоры, что позволяет им осуществлять колонизацию компоста в термофильной фазе [17].

В готовом продукте ферментации были обнаружены и другие виды бактерий рода *Bacillus* –

*B. licheniformis*, *B. pumilus* и *B. altitudinis*. Подобные результаты (доминирование бактерий *Bacillus* spp. в термофильной фазе компостирования навоза КРС и после нее получены и в других исследованиях [18, 19].

Поскольку бактерии рода *Bacillus* характеризуются полиферментативными свойствами [20, 21], то их жизнедеятельность способствовала более эффективному преобразованию ферментируемой массы, что в свою очередь отразилось на формировании качественного продукта ферментации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ ускоренной твердофазной ферментации отходов животноводства представляет собой модель классического компостирования. Существенное сокращение сроков переработки навоза КРС обеспечивали технические и технологические параметры процесса. Искусственное поддержание заданной температуры способствовало быстрому выходу процесса на рабочий режим и активной трансформации ферментируемой массы за счет жизнедеятельности мезофильных и термофильных микроорганизмов. Кoeffициенты минерализации свидетельствовали о стабилизации конечного продукта. Продукт ферментации характеризовался высокой численностью азоттрансформирующих микроорганизмов (в среднем  $3,5 \pm 0,3 \cdot 10^8$  КОЕ/г АСВ) и экологической безопасностью. Определение видовой принадлежности микрофлоры ферментируемой массы подтвердило, что предложенный температурный режим проведения ускоренной ферментации обеспечивает уничтожение санитарно-показательных микроорганизмов и способствует активному развитию бактерий рода *Bacillus*: *B. megaterium*, *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. pumilus* и *B. altitudinis*, которые не являются патогенными и болезнетворными микроорганизмами и безопасны для человека.

Микробиологическая оценка полученного

продукта ферментации позволяет рекомендовать его к использованию в качестве органического удобрения. При изготовлении соответствующей конструкции ферментера и строгом

соблюдении технологических параметров проведения процесса можно обеспечить производство органического удобрения на основе отходов животноводства в промышленном масштабе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shuhang W.U., Zhenfang J., Qingying Y.U. Progress in technologies of the composting animal manure // *Acta Agriculturae Shanghai*. 2003. Vol. 19. Issue 1. P. 50–52.
2. Фомичева Н.В., Рабинович Г.Ю., Молчанов В.П., Сульман Э.М. Современные технологии биопереработки возобновляемых сырьевых ресурсов // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология*. 2018. N 2. С. 263–273.
3. Иванов А.И., Лапа В.В., Ковалев Н.Г., Иванов И.А., Рабинович Г.Ю., Иванов Д.А. [и др.]. Производство, изучение и применение удобрений на основе птичьего помета / под общ. ред. А.И. Иванова. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2018. 317 с.
4. Petric I., Selimbasic V. Composting of poultry manure and wheat straw in a closed reactor: optimum mixture ratio and evolution of parameters // *Biodegradation*. 2008. Vol. 19. Issue 1. P. 53–63. <https://doi.org/10.1007/s10532-007-9114-x>
5. Пат. № 2112764, Российская Федерация. Способ приготовления компоста многоцелевого назначения / Н.Г. Ковалев, Б.М. Малинин, И.П. Туманов; патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственного использования мелиорированных земель; заявл. 22.01.1997; опублик. 10.06.1998.
6. Vuorinen A.H., Saharinen M.H. Effects of process conditions on composting efficiency and nitrogen immobilization during composting of manure in a drum composting system // *Acta Horticulturae*. 1998. Vol. 469. P. 89–96. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.469.8>
7. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Study results of mass and nutrient loss in technologies of different composting rate: case of bedding poultry manure. In: *Engineering for Rural Development: 15th international scientific conference*. 25–27 Maj 2016, Jelgava. Jelgava, Latvia University of Agriculture. P. 851–857.
8. Шалавина Е.В., Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Уваров Р.А., Валге А.М. Биоферментация органических отходов свиноводческого комплекса в установке барабанного типа // *Аграрная наука*. 2020. N 6. С. 51–56. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56>
9. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н. Физико-химические и микробиологические аспекты процесса аэробного компостирования // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 1995. N 4. С. 51–54.
10. Ковалев Н.Г., Рабинович Г.Ю. Микробиологические особенности аэробной ферментации // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 1999. N 3. С. 23–25.
11. Рабинович Г.Ю., Ковалев Н.Г., Фомичева Н.В. Новый вид биологически активных средств: получение, состав, перспективы использования // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2007. N 3. С. 71–73.
12. Sasáková N., Venglovský J., Papajová I., Juriš P., Ondrašovičová O., Ondrašovič M., et al. Vplyv teploty na prežívanie vybraných skupín mikroorganizmov počas kompostovania hydinového trusu // *Slovenský Veterinársky Časopis*. 2010. Vol. 35. Issue 1. P. 43–47.
13. Lung A.J., Lin C.M., Kim J.M., Marshall M.R., Nordstedt R., Thompson N.P., et al. Destruction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella Enteritidis* in cow manurecomposting // *Journal of Food Protection*. 2001. Vol. 64. Issue 9. P. 1309–1314. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-64.9.1309>
14. Saludes R.B., Iwabuchi K., Kayanuma A., Shiga T. Composting of dairy cattle manure using a thermophilic-mesophilic sequence // *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 98. Issue 2. P. 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.07.003>
15. Van Vliet P.C.J., Reijs J.W., Bloem J., Dijkstra J., de Goede R.G.M., Effects of cow diet on the microbial community and organic matter and nitrogen content of feces // *Journal of Dairy Science*. 2007. Vol. 90. Issue 11. P. 5146–5158. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0065>
16. Архипченко И.А., Бакина Л.Г., Брюханов А.Ю., Орлова О.В., Тарасов С.И. Трансформации микробного сообщества и органического субстрата при аэробной ферментации помета // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. N 8. С. 22–27. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-8-22-27>
17. Varma V.S., Das S., Sastri C.V., Kalamdh A.S. Microbial degradation of lignocellulosic fractions during drum composting of mixed organic waste // *Sustainable Environment Research*. 2017. Vol. 27. Issue 6. P. 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.05.004>
18. Sasaki H., Nonaka J., Otawa K., Kitazume O., Asano R., Sasaki T., et al. Analysis of the structure of the bacterial community in the livestock manure-based composting process // *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2009. Vol. 22. Issue 1. P. 113–118. <https://doi.org/10.5713/ajas.2009.70658>
19. Tang J.-C., Kanamori T., Inoue Y., Yasuta T., Yoshida S., Katayama A. Changes in the microbial community structure during thermophilic composting of manure as detected by the quinone profile method // *Process Biochemistry*. 2004. Vol. 39. Issue 12. P. 1999–2006. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.09.029>

20. Gutierrez-Manero F.J., Ramos-Solano B., Probanza A., Mehrouachi J., Tadeo F.R., Talon M. The plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high mounts of physiologically active gibberellins // *Physiologia Plantarum*. 2001. Vol. 111. Issue 2. P. 206–211. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.20>

01.1110211.x

21. Михайлова Н.А., Гринько О.М. Бактерии рода *Bacillus* – продуценты биологически активных веществ антимикробного действия // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2010. N 3. С. 85–89.

## REFERENCES

1. Shuhang WU, Zhenfang J, Qingying YU. Progress in technologies of the composting animal manure. *Acta Agriculturae Shanghai*. 2003;19(1):50–52.

2. Fomicheva NV, Rabinovich GYu, Molchanov VP, Sulman EM. Modern technologies of bioprocessing of renewable raw material resources. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya i ekologiya = Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology*. 2018;2: 263–273. (In Russian)

3. Ivanov AI, Lapa VV, Kovalev NG, Ivanov IA, Rabinovich GYu, Ivanov DA, et al. *Manufacturing, investigation and application of fertilizers based on the chicken manure*. St. Petersburg: Izdatel'stvo Agrofizicheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta; 2018. 317 p. (In Russian)

4. Petric I, Selimbasic V. Composting of poultry manure and wheat straw in a closed reactor: optimum mixture ratio and evolution of parameters. *Bio-degradation*. 2008;19(1):53–63. <https://doi.org/10.1007/s10532-007-9114-x>

5. Kovalev NG, Malinin BM, Tumanov IP. *Method of producing multitarget composts*. Patent RF, no. 2112764; 1997. (In Russian)

6. Vuorinen AH, Saharinen MH. Effects of process conditions on composting efficiency and nitrogen immobilization during composting of manure in a drum composting system. *Acta Horticulturae*. 1998;469:89–96. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.469.8>

7. Uvarov R, Briukhanov A, Shalavina E. Study results of mass and nutrient loss in technologies of different composting rate: case of bedding poultry manure. In: *Engineering for Rural Development: Proceedings of 15th International Scientific Conference*. 25–27 Maj 2016, Jelgava. Jelgava, Latvia University of Agriculture, p. 851–857.

8. Shalavina EV, Briukhanov AYU, Vasilev EV, Uvarov RA, Valge AM. Biofermentation of organic waste from a pig-breeding complex in a drum-type installation. *Agrarnaya nauka = Agrarian science*. 2020;6:51–56. (In Russian) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56>

9. Lopes de Gerenyu VO, Kurganova IN. Physicochemical and microbiological aspects of the aerobic composting process. *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 1995;4:51–54. (In Russian)

10. Kovalev NG, Rabinovich GYu. Microbiological features of aerobic fermentation. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 1999;3:23–25. (In Russian)

11. Rabinovich GVu, Kovalev NG, Fomicheva NV. A new kind of biologically active means: production, composition, prospects of application. *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2007;3:71–73. (In Russian)

12. Sasáková N, Venglovský J, Papajová I, Juriš P, Ondrašovičová O, Ondrašovič M, Lactičová K, Gregová G. The effect of temperature on microorganism surviving during composting of poultry manure. *Slovenský Veterinársky Časopis*. 2010;35(1): 43–47. (In Slovenian)

13. Lung AJ, Lin CM, Kim JM, Marshall MR, Nordstedt R, Thompson NP, et al. Destruction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella Enteritidis* in cow manurecomposting. *Journal of Food Protection*. 2001;64(9):1309–1314. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-64.9.1309>

14. Saludes RB, Iwabuchi K, Kayanuma A, Shiga T. Composting of dairy cattle manure using a thermophilic-mesophilic sequence. *Biosystems Engineering*. 2007;98(2):198–205. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.07.003>

15. Van Vliet PCJ, Reijs JW, Bloem J, Dijkstra J, de Goede RGM. Effects of cow diet on the microbial community and organic matter and nitrogen content of feces. *Journal of Dairy Science*. 2007;90(11): 5146–5158. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0065>

16. Arkhipchenko IA, Bakina LG, Bruhanov AYU, Orlova OV, Tarasov SI. Transformation in the microbial community and of organic substrate during aerobic fermentation of manure. *Ekologia i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(8):22–27. (In Russian) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-8-22-27>

17. Varma VS, Das S, Sastri CV, Kalamdhd AS. Microbial degradation of lignocellulosic fractions during drum composting of mixed organic waste. *Sustainable Environment Research*. 2017;27(6):265–272. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.05.004>

18. Sasaki H, Nonaka J, Otawa K, Kitazume O, Asano R, Sasaki T, et al. Analysis of the structure of the bacterial community in the livestock manure-based composting process. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2009;22(1):113–118. <https://doi.org/10.5713/ajas.2009.70658>

19. Tang J-C, Kanamori T, Inoue Y, Yasuta T, Yoshida S, Katayama A. Changes in the microbial community structure during thermophilic composting of manure as detected by the quinone profile method. *Process Biochemistry*. 2004;39(12):1999–2006. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.09.029>

20. Gutierrez-Manero FJ, Ramos-Solano B,

Probanza A, Mehouchi J, Tadeo FR, Talon M. The plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high mounts of physiologically active gibberellins. *Physiologia Plantarum*. 2001;111(2):206–211. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2001.1110211.x>

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Фомичева Наталья Викторовна**,  
к.б.н., старший научный сотрудник,  
ВНИИМЗ – филиал ФИЦ «Почвенный институт  
им. В.В. Докучаева»,  
170530, Тверская обл., Калининский р-н,  
п. Эммаус, 27,  
Российская Федерация,  
✉ e-mail: nvfomi@mail.ru

**Рабинович Галина Юрьевна**,  
д.б.н., профессор, директор  
ВНИИМЗ – филиал ФИЦ «Почвенный институт  
им. В.В. Докучаева»,  
170530, Тверская обл., Калининский р-н,  
п. Эммаус, 27,  
Российская Федерация,  
e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

**Прутенская Екатерина Анатольевна**,  
к.б.н., доцент кафедры биотехнологии,  
химии и стандартизации,  
Тверской государственный технический  
университет,  
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22,  
Российская Федерация,  
e-mail: prutenskaya@mail.ru

**Смирнова Юлия Дмитриевна**,  
к.б.н., заместитель директора по науке,  
ВНИИМЗ – филиал ФИЦ «Почвенный институт  
им. В.В. Докучаева»,  
170530, Тверская обл., Калининский р-н,  
п. Эммаус, 27,  
Российская Федерация,  
e-mail: ulayad@yandex.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад  
в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-  
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 29.01.2021.  
Одобрена после рецензирования 22.03.2021.  
Принята к публикации 31.05.2021.*

21. Mikhaylova NA, Grinko OM. Bacillus genus bacteria are producers of biologically active compounds with antimicrobial effect. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii = Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2010;3;85–89. (In Russian)

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Natalia V. Fomicheva**  
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,  
VNIIMZ – branch of FRC V.V. Dokuchaev  
Soil Science Institute  
27, Emmauss Village, Kalininsky District,  
170530, Tver Region,  
Russian Federation,  
✉ e-mail: nvfomi@mail.ru

**Galina Yu. Rabinovich**,  
Dr. Sci. (Biology), Professor,  
Director of VNIIMZ – branch of FRC  
V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,  
27, Emmauss Village, Kalininsky District,  
170530, Tver Region,  
Russian Federation,  
e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

**Ekaterina A. Prutenskaya**,  
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,  
Department of Biotechnology, Chemistry  
and Standartization,  
Tver State Technical University,  
22, A. Nikitin St., Tver, 170026,  
Russian Federation,  
e-mail: prutenskaya@mail.ru

**Yulia D. Smirnova**,  
Ph.D. (Biology), Deputy Director for Science,  
VNIIMZ – branch of FRC V.V. Dokuchaev  
Soil Science Institute,  
27, Emmauss Village, Kalininsky District,  
170530, Tver Region,  
Russian Federation,  
e-mail: ulayad@yandex.ru

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests re-  
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved  
by all the co-authors.*

*The article was submitted 29.01.2021.  
Approved after reviewing 22.03.2021.  
Accepted for publication 31.05.2021.*