

КУРИНЫЙ ПОМЕТ КАК СТИМУЛЯТОР БИОДЕГРАДАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ НЕФТИ: ОБЗОР

М. И. МАНДРИК¹⁾, А. Ю. МАКСИМОВИЧ¹⁾,
В. М. КОПТЕЛОВА¹⁾, А. Г. ТЕРЕШКО¹⁾, А. В. КУЛИК¹⁾,
Е. С. ЛУКЬЯНЧУК¹⁾, Е. А. ГРИБАНОВА¹⁾, С. Л. ВАСИЛЕНКО¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены сведения о химическом составе куриного помета, его микробиологическая характеристика. Основное внимание уделено применению куриного помета в качестве стимулятора биodeградации углеводородов нефти (нефти, дизельного топлива, полициклических ароматических углеводородов). Куриный помет является основным по объему отходом птицеводства, который может быть использован в качестве ценного удобрения, так как он содержит азот, фосфор, калий, железо и различные микроэлементы. Возможность применения куриного помета в качестве стимулятора биodeградации углеводородов нефти обусловлена содержанием в нем не только биогенных элементов, макро- и микроэлементов, необходимых бактериям-деструкторам, но и самих бактерий-деструкторов, а также углеродных косубстратов для деградации трудноразлагаемых углеводородов. С указанной целью куриный помет может использоваться как самостоятельно, так и в комплексе с другими добавками (биокомпостом, биосурфактантами, бактериями-деструкторами, минеральными солями). Внесение куриного помета в почву может приводить к повышению в ней температуры, что также способствует более активному протеканию деградации нефтепродуктов. В результате обработки загрязненных почв куриным пометом снижается их токсичность для растений и тест-объектов, таких как *Photobacterium phosphoreum* и *Paramecium caudatum*.

Ключевые слова: куриный помет; микробиота; микроорганизмы-деструкторы; углеводороды нефти; полициклические ароматические углеводороды; ПАУ; стимуляция биodeградации; эффективность деградации.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Биотехнологии-2» (задание 3.10.2) при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования Республики Беларусь (гранты № Б23М-083 и Б24МВ-009).

Образец цитирования:

Мандрик МИ, Максимович АЮ, Коптелова ВМ, Терешко АГ, Кулик АВ, Лукьянчук ЕС, Грибанова ЕА, Василенко СЛ. Куриный помет как стимулятор биodeградации углеводородов нефти: обзор. *Экспериментальная биология и биотехнология*. 2025;2:58–65.
EDN: RRYEHM

For citation:

Mandryk MI, Maksimovich AYU, Kaptsevala VM, Tsiareshka AG, Kulik AV, Lukyanchuk YeS, Gribanova EA, Vasylenko SL. Chicken manure as a stimulator of the oil hydrocarbons biodegradation: review. *Experimental Biology and Biotechnology*. 2025;2:58–65. Russian.
EDN: RRYEHM

Авторы:

Мария Ивановна Мандрик – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры микробиологии биологического факультета.

Алина Юрьевна Максимович – аспирантка кафедры микробиологии биологического факультета. Научный руководитель – М. И. Мандрик.

Валерия Максимовна Коптелова – студентка биологического факультета. Научный руководитель – М. И. Мандрик.

Антон Геннадьевич Терешко – студент биологического факультета. Научный руководитель – М. И. Мандрик.

Арсений Вячеславович Кулик – студент биологического факультета. Научный руководитель – М. И. Мандрик.

Елена Сергеевна Лукьянчук – студентка биологического факультета. Научный руководитель – М. И. Мандрик.

Екатерина Александровна Грибанова – старший преподаватель кафедры микробиологии биологического факультета.

Светлана Леонидовна Василенко – кандидат биологических наук; заведующий кафедрой микробиологии биологического факультета.

Authors:

Maryia I. Mandryk, PhD (biology), docent; associate professor at the department of microbiology, faculty of biology.
charnymi@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-9225-8126>

Alina Yu. Maksimovich, postgraduate student at the department of microbiology, faculty of biology.

larch.alina@gmail.com

Valeryia M. Kaptsevala, student at the faculty of biology.

koptelovalera22@gmail.com

Anton G. Tsiareshka, student at the faculty of biology.

teres_96@mail.ru

Arseni V. Kulik, student at the faculty of biology.

arseniikulichok@gmail.com

Yelena S. Lukyanchuk, student at the faculty of biology.

elenalukancuk3@gmail.com

Ekaterina A. Gribanova, senior lecturer at the department of microbiology, faculty of biology.

gribanova@bsu.by

Svetlana L. Vasylenko, PhD (biology); head of the department of microbiology, faculty of biology.

vasylenko@tut.by

<https://orcid.org/0009-0003-6036-1705>

CHICKEN MANURE AS A STIMULATOR OF THE OIL HYDROCARBONS BIODEGRADATION: REVIEW

M. I. MANDRYK^a, A. Yu. MAKSIMOVICH^a,
V. M. KAPTSELAVA^a, A. G. TSIARESHKA^a, A. V. KULIK^a,
Ye. S. LUKYANCHUK^a, E. A. GRIBANOVA^a, S. L. VASYLENKO^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: M. I. Mandryk (charynmi@bsu.by)

Abstract. Information on the chemical composition of chicken manure and its microbiological characteristics is presented. The main focus is on the use of chicken manure as a stimulator of the biodegradation of oil hydrocarbons (crude oil, diesel fuel, polycyclic aromatic hydrocarbons). Chicken manure is the main waste product of poultry farming, which can be used as a valuable fertiliser, as it contains nitrogen, phosphorus, potassium, iron and various trace elements. The possibility of using chicken manure as a stimulator of oil hydrocarbons biodegradation is due to its content of not only biogenic elements, macro- and microelements necessary for decomposer bacteria, but also the decomposer bacteria themselves, as well as carbon cosubstrates for the degradation of difficult-to-decompose hydrocarbons. For this purpose, chicken manure can be used either independent or in combination with other additives (biocompost, biosurfactants, decomposer bacteria, mineral salts). Applying chicken manure to the soil can lead to an increase in its temperature, which also contributes to more active degradation of oil products. As a result of treating contaminated soils with chicken manure, their toxicity to plants and test objects such as *Photobacterium phosphoreum* and *Paramecium caudatum* is reduced.

Keywords: chicken manure; microbiota; decomposer microorganisms; oil hydrocarbons; polycyclic aromatic hydrocarbons; ПАУ; stimulation of biodegradation; degradation effectiveness.

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the state programme of scientific research «Biotechnologies-2» (assignment 3.10.2) with financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and the Ministry of Education of the Republic of Belarus (grants No. B23M-083 and B24MV-009).

Введение

Очистка загрязненных экосистем и обезвреживание производственных отходов, объемы которых возрастают с каждым годом, выступают важными задачами современной экологии. Одними из приоритетных загрязнителей являются углеводороды нефти¹ [1]. Самовосстановление экосистем, загрязненных углеводородами, занимает продолжительное время, вплоть до десятков лет, а при масштабных загрязнениях этот процесс и вовсе становится невозможным [2]. Основными способами удаления углеводородсодержащих отходов на предприятиях Беларуси являются их захоронение на специальных площадках и хранение на территории самого предприятия, что требует выделения довольно больших площадей, однако в целом не решает проблемы².

В настоящее время существует множество методов очистки экосистем и обезвреживания отходов, загрязненных нефтью и продуктами ее переработки. Среди них можно выделить физические, химические и биологические методы. Каждая группа методов имеет свои достоинства и недостатки, а также ограничения в применении. Физические и химические методы, в отличие от биологических методов, могут использоваться при более высоких концентрациях загрязнителя и обеспечить его быстрое удаление. Однако из-за того, что в ходе химических реакций загрязнитель может как обратимо, так и необратимо преобразовываться из одной формы в другую (не менее, а иногда и более токсичную), высока вероятность вторичных загрязнений³ [1; 3]. При применении методов сорбции появляется проблема регенерации или утилизации использованных сорбентов. Во время сжигания загрязненных грунтов и сорбентов в атмосферу поступают значительные объемы парниковых газов и других токсичных продуктов сгорания. Очистка грунтов методом сжигания требует их изъятия и транспортировки к месту нахождения пиролизных печей, что сопряжено с дополнительными затратами. В случае с загрязнениями относительно невысокой концентрации применение этого метода представляется экономически необоснованным [1; 4].

¹Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов : практ. рук. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Бино. Лаб. знаний, 2009. 270 с.

²Официальная статистическая информация об обращении с отходами производства за 2022 год // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь : сайт. URL: <https://www.minpriroda.gov.by/uploads/files/nalichie-otkhodov-za-2022.docx> (дата обращения: 20.05.2024).

³Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы... 270 с.

Важными преимуществами использования биологических методов являются возможность очистки почвы без ее изъятия из места загрязнения, эффективность при относительно низкой степени загрязнения, а также возможность восстановления микробиоценоза почвы [5]. Несмотря на то что к настоящему времени разработано немало биопрепаратов для ремедиации загрязненных сред, технологии биоремедиации требуют дальнейшего развития для повышения их эффективности и скорости. С этой целью могут быть использованы различные стимуляторы, в качестве которых в основном выступают комплексы минеральных удобрений. Однако интерес представляют альтернативные возобновляемые источники питательных элементов, например отходы животноводства. Применительно к биodeградации углеводов они могут стать не только источником недостающих биогенных элементов и микроэлементов, но и сорбентом нефтепродуктов, носителем интродуцируемых микроорганизмов-деструкторов, источником органических субстратов для кометаболизма трудноразлагаемых соединений (например, полициклических ароматических углеводов (ПАУ)). Согласно ряду исследований птичий помет более эффективен в качестве стимулятора биodeградации углеводов, он характеризуется более высокой степенью биодоступности азота, чем навоз крупного рогатого скота, козий и свиной навоз. Кроме того, именно птицеводство является наиболее распространенной и динамично развивающейся отраслью животноводства [6–9].

Цель данной работы – обзор исследований, посвященных применению куриного помета в качестве стимулятора биodeградации нефтепродуктов в почве.

Состав куриного помета

Птицеводство является интенсивно развивающейся отраслью промышленности как в Беларуси, так и во всем мире [9]. С одной стороны, благодаря ему потребители получают разнообразную и относительно дешевую продукцию, выступающую источником белка. С другой стороны, птицеводство несет определенную экологическую угрозу в виде довольно большого объема образующихся отходов: птичьего помета, мертвых тушек, пуха, перьев, материала подстилок [10–12].

Птичий, в частности куриный, помет служит ценным удобрением – источником азота, фосфора и калия. Концентрация этих элементов в курином помете в основном зависит от рациона кур и может варьироваться в широких пределах. Так, в сухом веществе содержится 1,22–7,11 % азота, 0,03–3,90 % фосфора и 0,90–2,44 % калия. Избыточное внесение в почву куриного помета с высоким уровнем фосфора может привести к ее загрязнению фосфатами [13–15]. Следует отметить, что в курином помете присутствуют такие элементы, как кальций, магний, медь, цинк, свинец, хром, кадмий, марганец, никель, кобальт, сера, железо и др. [4; 11; 13; 14].

Большая часть соединений в курином помете представлена органическими веществами. В сухом веществе содержится 28,40–37,10 % сырого белка, 4,37 % жирных кислот, 14,38–14,49 % целлюлозы, 20,48–21,66 % гемицеллюлозы и 4,54–7,83 % лигнина [13; 16]. Примерное соотношение углеводов нефти и азота в курином помете составляет 15,69 : 1,00 [13], что способствует быстрому протеканию биоминерализации [8].

Таким образом, куриный помет может служить источником всех основных элементов, необходимых для биodeградации. Внесение помета в почву поможет обеспечить оптимальное соотношение углеводов нефти и азота, нарушенное при ее загрязнении углеводородами [17].

Микробиота куриного помета

Куриный помет характеризуется высоким биоразнообразием. С помощью методов высокопроизводительного секвенирования микробиома куриного помета установлено, что в нем доминируют бактерии, относящиеся к типам Firmicutes и Bacteroidetes, а также присутствуют виды типов Proteobacteria, Actinobacteria и Cyanobacteria. В помете некоторых региональных популяций кур наиболее часто встречаются бактерии родов *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*, *Bacteroides*, *Escherichia*, *Prevotella*, *Se-lenomonas*, *Streptococcus*, *Megasphaera*, *Fusobacterium* и *Bifidobacterium* [18]. Среди бактерий куриного помета присутствуют и представители, способные утилизировать углеводороды нефти. Например, к ним относятся бактерии *Pseudomonas* spp., *Acinetobacter* spp., *Arthrobacter* spp., *Serratia* spp., *Flavobacterium* spp., *Bacillus* spp., *Klebsiella* spp. и *Micrococcus* spp. [19–22].

Патогенные бактерии представлены грамотрицательными бактериями *E. coli*, *Campylobacter* spp., *Salmonella* spp., *Myroides odoratus*, *M. odoratimimus*, *Providencia rettgeri*, *Ochrobactrum intermedium*, *Citrobacter freundii*, *Proteus mirabilis*, *Acinetobacter johnsonii*, *Klebsiella aerogenes*, *Serratia marcescens*, *Bilophila wadsworthia*, *Oblitimonas alkaliphila*, *Weeksella*, грамположительными бактериями *Clostridium* sp., *Mycobacterium* spp., *Staphylococcus lentus*, *S. aureus* и др. [14; 18; 23]. Стоит отметить, что состав микробиома куриного помета изменчив. В частности, биоразнообразие патогенов варьируется в помете, полученном из разных хозяйств.

Патогенные микроорганизмы куриного помета являются носителями генов антибиотикорезистентности [14; 18; 23; 24] к таким препаратам, как амоксициллин, хлорамфеникол, тетрациклин, ванкомицин, цефотаксим, имипенем, ципрофлоксацин, гентамицин, тобрамицин, макролиды и др. Обнаружены изоляты *E. coli* и *M. odoratus*, устойчивые к 9 и 11 антибиотикам разных групп соответственно. С целью снизить содержание патогенной микробиоты и предотвратить распространение генов антибиотикорезистентности перед использованием куриного помета в качестве удобрения производится его обработка. Эффективными технологиями являются компостирование и переработка личинками черной львинки [10–13; 18; 23]. В качестве альтернативного способа обеззараживания куриного помета предлагается его обработка ультрафиолетовым излучением, ультразвуком или электрическим полем [16; 25–27].

В курином помете обнаруживаются мицелиальные грибы родов *Fusarium*, *Penicillium*, *Mucor*, *Aspergillus*, *Cladosporium* и *Rhizopus*, а также дрожжи рода *Candida* [22; 25; 28].

Куриный помет как стимулятор биodeградации углеводов нефти

Применение куриного помета в качестве стимулятора биodeградации углеводов нефти в почве может решить одновременно несколько проблем, таких как использование его избыточного количества, очистка загрязненных почв, снижение потребления минеральных источников азота, фосфора, калия и железа. В процессе биodeградации углеводов куриный помет может быть источником углеродных ко субстратов для деградации труднорастворимых углеводов (в частности, ПАУ), а также источником микроорганизмов-деструкторов, азота, фосфора, калия, железа и других элементов, необходимых этим микроорганизмам при биоремедиации [20; 29]. В качестве стимулятора деградации углеводов нефти куриный помет может использоваться либо самостоятельно [22; 30–32], либо в комплексе с другими добавками [33; 34]. При обобщении данных, полученных разными исследователями, было определено, что отличаются дизайн эксперимента (в большинстве работ не указываются тип почвы и состав используемого помета, в широких пределах варьируются состав и концентрация загрязнителя, вносятся разные концентрации помета, в системе применяются либо не применяются разные типы разрыхлителей) и методы экстракции и анализа остаточных углеводов (хроматография или УФ-спектроскопия). В то же время все проанализированные работы свидетельствуют о возможности использования куриного помета в качестве эффективного стимулятора биodeградации углеводов в почве.

В исследовании [20] показано, что внесение в почву необработанного куриного помета (содержание азота составляет 3,65 %, фосфора – 1,89 %) в концентрации 1; 10 и 20 мас. % привело к увеличению эффективности деградации дизельного топлива (начальная концентрация загрязнителя составляет 3000 мг/кг, время инкубирования – 5 недель) до 76; 79 и 74 % соответственно, в то время как в контроле данный показатель составлял 58 %.

Г. О. Адамс и его коллеги также выявили, что изменение концентрации птичьего помета в пределах 10–30 %⁴ практически не сказывалось на эффективности деградации нефти в почве. Внесение в почву 10–30 % птичьего помета (высушенного и измельченного) повышает степень деградации нефти до 82–84 % (значение достигается за 50 дней). В контрольных образцах этот показатель был равен 35 % при начальном уровне загрязнения 3110 мг/кг. Вместе с тем существенной разницы между образцами, в которые вносили 10; 20 или 30 % куриного помета, ни в динамике деградации нефти, ни в конечной точке выявлено не было [30].

Российские исследователи разработали способ ремедиации нефтезагрязненного грунта, предусматривающий внесение в него куриного помета в концентрации 1–5 об. %, частично ферментированного компоста (3–5 %), изготовленного из навоза (коровьего, конского или свиного) в смеси с растительными материалами, а также разрыхлителя (соломы, щепы, коры, опила) до достижения общей пористости не менее 25 %. Для поддержания оптимальной температуры использовался укрывной материал. При обработке производились контроль уровня pH и его поддержание в пределах значений 6–8 посредством добавления карбоната или сульфата кальция. Оптимальная концентрация азота и фосфора обеспечивалась внесением соответствующих минеральных солей. В результате использования данного способа достигалось снижение концентрации нефтепродуктов в почве (исходная концентрация составляла 10,2 мас. %) на 50,7 % в течение 30 дней и на 90,1 % в течение 90 дней. Также исследователи привели данные о фракционном составе нефтепродуктов, свидетельствующие о наиболее эффективном разложении парафиновой фракции и менее эффективной биodeградации смол и асфальтенов [33].

⁴Здесь и далее при указании концентрации вносимых в почву веществ используется только знак процента, если в исследовании не уточняется, какая доля имеется в виду – объемная или массовая.

С. У. Оджой и его коллеги выявили, что куриный помет в концентрации 10 и 20 об. % стимулирует деградацию дизельного топлива в почве. Эффективность стимуляции зависела от начальной степени загрязнения. При загрязнении почвы дизельным топливом в концентрации 5 мас. % степень его деградации после внесения куриного помета увеличилась в 2–3 раза (до 60 и 76 % при внесении 10 и 20 об. % помета соответственно) за 84 дня, в то время как в контроле она составляла 25 %. В случае загрязнения почвы дизельным топливом в концентрации 10 мас. % эффективность его деградации в контроле составляла 35 %, а после внесения куриного помета в концентрации 10 и 20 об. % она возросла всего до 46 и 52 % соответственно. В течение 336 дней наилучшие результаты были зафиксированы в отношении почвы, загрязненной дизельным топливом в концентрации 5 мас. % и обработанной куриным пометом в количестве 20 об. %: эффективность деградации топлива в почве составила 96 % [35].

В рамках проведения исследования [22] повышение концентрации птичьего помета в загрязненной почве с 10 до 50 мас. % привело к увеличению эффективности деградации нефти (начальная концентрация составляла 6609,83 мг/кг). В течение 6 недель эффективность деградации нефти в контроле достигла 36 %. При внесении 10; 30 и 50 мас. % куриного помета она увеличилась до 42; 52 и 75 % соответственно.

Выявлено, что при внесении в почву птичьего помета в концентрации 25 % существенно повышается скорость биodeградации ПАУ, таких как нафталин, антрацен, фенантрен, пиррол, флуорен, пирен, хризен, флуорантен, бензопирен, причем без внесения данного стимулятора концентрация некоторых из этих соединений практически не снижается в течение 19 мес. [31]. Кроме того, зафиксировано значительное возрастание (на два порядка) количества культивируемых микроорганизмов в загрязненных почвах (с $7,39 \cdot 10^5$ до $4,77 \cdot 10^7$ КОЕ/г).

В исследовании [34] птичий помет (высушенный и измельченный) был успешно использован в комплексе с консорциумом микроорганизмов-деструкторов (*Micrococcus* sp. GS2-22, *Bacillus* sp. DS6-86, *Corynebacterium* sp. GS5-66, *Flavobacterium* sp. DS5-73 и *Pseudomonas* sp. DS10-129) и рамнолипидами, продуцируемыми бактериями *Pseudomonas* sp. DS10-129, для повышения эффективности деградации нефтепродуктов. В качестве разрыхлителя применялось кокосовое волокно. После внесения в почву всех добавок (кокосового волокна, птичьего помета, консорциума деструкторов, рамнолипидов) в концентрации 0,1 % эффективность деградации нефтепродуктов составила 67,0 %, а после повышения концентрации добавок до 1,0 % она возросла до 77,3 % за 60 дней. В течение следующих 30 дней значимое снижение концентрации нефтепродуктов не наблюдалось. Внесение в почву только микробного консорциума обеспечило эффективность деградации нефтепродуктов до 36,7 и 39,0 % за 60 и 90 дней соответственно. В то же время в контроле эффективность деградации нефтепродуктов составляла около 2 %.

А. Х. Сафаров и его коллеги использовали куриный помет в комплексе с бактериями-деструкторами *Rhodococcus erythropolis* AC81339Д для очистки почвы, загрязненной нефтью в концентрации 3 мас. %. В течение 60 дней эффективность деградации нефти достигла 73,4 % при внесении помета в количестве 5 %, а при внесении помета в количестве 10 % она составила 24,5 %. При использовании только куриного помета (в концентрации 5 и 10 %) значение этого показателя снижалось (до 45,2 и 9,0 %). В случае внесения в почву бактерий без помета степень деградации нефти составила 54,5 %. В контроле значение эффективности деградации нефти в почве было равным 12,1 % [11].

В работах [32; 36] показано, что птичий помет, по сравнению с минеральным комплексом удобрений и навозом свиней, коз, наиболее эффективно стимулирует биodeградацию керосина и дизельного топлива. При проведении исследования [7] было выявлено, что вносимые минеральные удобрения, напротив, оказывали более хороший стимулирующий эффект, чем куриный помет и навоз крупного рогатого скота, что можно объяснить более высоким содержанием азота в удобрениях.

Установлено, что внесение птичьего помета нейтрализует или снижает негативное действие дизельного топлива и нефти на растения [11; 37], благоприятно влияет на фитобиоремедиацию почвы, загрязненной нефтепродуктами, а также на почвенное микробное сообщество [38]. Ряд исследователей проводили тесты для определения токсичности загрязненных почв на таких объектах, как *Photobacterium phosphoreum* и *Paramecium caudatum* [11; 39]. В результате было выявлено, что токсичность загрязненных почв, обработанных куриным пометом, снижается, т. е. в процессе биотрансформации углеводородов нефти не образуются более токсичные продукты.

При внесении куриного помета в качестве стимулятора биodeградации нефтепродуктов в почве может наблюдаться повышение температуры. Так, в исследовании [40] температура загрязненной почвы, обработанной пометом, была выше (примерно на 5 °С), чем в контрольном образце, не обработанном пометом. Такой эффект связывают с высоким содержанием азота в курином помете, вследствие чего активно развивается микробиота. Повышение температуры при внесении куриного помета может способствовать ускорению биоремедиации.

На основе данных, полученных разными исследователями, были выявлены следующие закономерности.

Во-первых, эффективность деградации нефтепродуктов в большой степени зависит от типа почвы, о чем свидетельствует вариация контрольных значений эффективности деградации от 2 до 58 % в разных исследованиях. Зависимость этого параметра от типа и концентрации (в пределах 3000–100 000 мг/кг) загрязнителя не прослеживается.

Во-вторых, при повышении концентрации загрязнителя (в диапазоне 3000–102 000 мг/кг) наблюдается возрастание скорости деградации нефтепродуктов в почве. В таблице представлено сравнение результатов исследований [20; 22; 30; 33; 35], при проведении которых в качестве стимулятора в почву вносился только куриный помет. По всей вероятности, наиболее интенсивно процессы деструкции углеводов протекают в первые 30–49 дней, после чего скорость замедляется, так как остаются труднодоступные субстраты (ПАУ, смолы и асфальтены), а питательные вещества помета исчерпываются.

**Сравнительный анализ скорости деградации нефтепродуктов
в почве при внесении в нее куриного помета**

**Comparative analysis of the rate of oil products degradation
in soil after chicken manure adding to it**

Загрязнитель	Концентрация загрязнителя в почве, мг/кг	Время инкубирования, сут	Концентрация помета, %	Эффективность деградации, %	Удельная скорость деградации загрязнителя, %/сут	Скорость деградации загрязнителя, мг/сут	Источник
Дизельное топливо	3000	35	0 (контроль)	58,0	1,66	49,71	[20]
		35	1	76,0	2,17	65,14	
		35	10	79,0	2,26	67,71	
		35	20	74,0	2,11	63,43	
Нефть	3110	49	0 (контроль)	35,0	0,71	22,21	[30]
		49	10	83,60	1,71	53,06	
		49	20	82,47	1,68	52,34	
		49	30	84,24	1,72	53,47	
Нефть	6609	42	0 (контроль)	36,0	0,86	56,65	[22]
		42	10	42,0	1,0	66,09	
		42	30	52,0	1,24	81,83	
		42	50	75,0	1,79	118,02	
Дизельное топливо	50 000	84	0 (контроль)	25,0	0,30	148,81	[35]
		84	10	60,0	0,71	357,14	
		84	20	76,0	0,90	452,38	
	100 000	84	0 (контроль)	35,0	0,42	416,67	
		84	10	46,0	0,55	547,62	
		84	20	52,0	0,62	619,05	
Нефть	102 000	30	1–5	50,70	1,69	1723,80	[33]
		90	1–5	90,10	1,0	1021,13	

В-третьих, при повышении концентрации вносимого в почву куриного помета скорость деградации загрязнителя если и нарастает, то нелинейно. По этой причине экономически наиболее целесообразными вариантами видятся внесение в почву помета в концентрации 1–10 мас. % и повторная обработка почвы через 30–49 дней.

Заключение

Использование куриного помета в качестве стимулятора биodeградации углеводов нефти как самостоятельно, так и в комплексе с другими добавками (компостом, биосурфактантами, бактериями-деструкторами) является перспективной технологией биоремедиации. Несмотря на большое количество проведенных исследований в разных странах, остается актуальным определение оптимальной концентрации вносимого в почву помета или метода ее расчета при очистке грунтов разной степени загрязненности. В рассмотренных исследованиях концентрация вносимого куриного помета варьировалась от 0,1

до 50,0 %. Вместе с тем в одних исследованиях повышение концентрации куриного помета не влияло на эффективность деградации нефтепродуктов в почве или приводило к ее увеличению, а в других исследованиях данная мера приводила к ее снижению. Вероятно, результат зависит от предварительной подготовки помета, а также от типа почвы и состояния микробного сообщества в ней. Этап подготовки помета является немаловажным, так как в ходе него обеспечивается снижение содержания в помете патогенной микробиоты, в том числе такой, которая несет гены антибиотикорезистентности. При использовании куриного помета как стимулятора биodeградации углеводородов нефти предварительная обработка может включать мероприятия по увеличению содержания бактерий-деструкторов. Также представляет интерес разработка микробных препаратов, которые в комплексе с птичьим пометом будут способствовать более эффективному и быстрому разрушению поллютантов.

Библиографические ссылки

1. Michael-Igolima U, Abbey SJ, Ifelebuegu AO. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances*. 2022;9:100319. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100319.
2. Бузмаков СА. Восстановление земель при различных уровнях загрязнения нефтью. *Записки Горного института*. 2013; 203:128–132. EDN: RSEQDV.
3. Серебrenникова МК, Тудвасева МС, Куюкина МС. Биологические способы очистки нефтезагрязненных сточных вод (обзор). *Вестник Пермского университета. Серия: Биология*. 2015;1:15–30. EDN: TYWGAX.
4. Созина ИД, Данилов АС. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв. *Записки Горного института*. 2023;260:297–312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8.
5. Asemoloye MD, Jonathan SG, Ahmad R. Synergistic plant-microbes interactions in the rhizosphere: a potential headway for the remediation of hydrocarbon polluted soils. *International Journal of Phytoremediation*. 2019;21(2):71–83. DOI: 10.1080/15226514.2018.1474437.
6. Douglas RK, Araka PP, Fou A, Hart A. Evaluation of the potential of agricultural wastes-cattle manure and poultry manure for bioremediation of crude oil-contaminated soil. *Bioremediation Journal*. 2024;29(1):96–103. DOI: 10.1080/10889868.2024.2322471.
7. Aghalibe ChU, Igwe JC, Obike AI. Studies on the removal of petroleum hydrocarbons (PHCs) from a crude oil impacted soil amended with cow dung, poultry manure and NPK fertilizer. *Chemistry Research Journal*. 2017;2(4):22–30.
8. Wang K, Li W, Li X, Ren N. Spatial nitrifications of microbial processes during composting of swine, cow and chicken manure. *Scientific Reports*. 2015;5:14932. DOI: 10.1038/srep14932.
9. Буяров ВС, Калашникова ЛВ, Алдобаева НА, Подчуфарова АС. Приоритетные направления научных исследований в птицеводстве. *Биология в сельском хозяйстве*. 2017;2:17–25. EDN: YMVHR.
10. Бочкарева ИИ, Майманова ЕА. Птицефабрика как источник загрязнения окружающей среды. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2019;4(2):106–111. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-106-111.
11. Сафаров АХ, Ягафарова ГГ, Пушкар ЕН, Габитова ИУ, Микулик ВВ, Кузнецова ГМ. Изучение влияния органического отхода птицефабрики на очистку нефтезагрязненных почв. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016;2:177–189. DOI: 10.15593/240985125/2016.02.11.
12. Нестерович ВВ, Пархимович АВ, Чирич АВ. О «превращении» в птицеводстве отрицательных экстерналий в положительные. В: *Белорусский государственный аграрный технический университет. Рыночная экономика: сегодня и завтра. Тезисы XI Международной научной студенческой конференции; 17–18 марта 2022 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет; 2022. с. 81–84.
13. Свергузова СВ, Шайхиев ИГ, Сапронова ЖА, Бомба ИВ. Переработка куриного помета с использованием личинок черной львинки (*Hermetia illucens*): обзор. *Птицеводство*. 2021;2:68–73. DOI: 10.33845/0033-3239-2021-70-2-68-73.
14. Błażejewska A, Zalewska M, Grudniak A, Popowska M. A comprehensive study of the microbiome, resistome, and physical and chemical characteristics of chicken waste from intensive farms. *Biomolecules*. 2022;12(8):1132. DOI: 10.3390/biom12081132.
15. Новожилов ИА. Влияние больших норм куриного помета на свойства и состав дерново-подзолистых грунтово-оглеенных почв [диссертация]. Москва: Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева; 2004. 140 с.
16. Vaghar Seyedin SM, Mojtahedi M, Farhangfar SH, Ghiasi SE. Non-thermal technologies for broiler litter processing: microbial safety, chemical composition, nutritional value, and fermentation parameters *in vitro*. *Veterinary Medicine and Science*. 2024;10(4): e1497. DOI: 10.1002/vms3.1497.
17. Шамраев АВ, Шорина ТС. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009;6:642–645. EDN: MNKVRV.
18. Наумова НБ, Ручко ЕН, Савенков ОА, Плешакова ВИ. Микробиом почвы и сельскохозяйственных культур при внесении компоста куриного помета. *Почвы и окружающая среда*. 2021;4(1):35–49. DOI: 10.31251/pos.v4i1.141.
19. Ezekoye CC, Amakoromo ER, Ibiene AA. Laboratory-based bioremediation of hydrocarbon polluted mangrove swamp soil in the Niger delta using poultry wastes. *Microbiology Research Journal International*. 2017;19(2):1–14. DOI: 10.9734/MRJ/2017/15153.
20. Williams CM, Grimes JL, Mikkelsen RL. The use of poultry litter as co-substrate and source of inorganic nutrients and microorganisms for the *ex situ* biodegradation of petroleum compounds. *Poultry Science*. 1999;78(7):956–964. DOI: 10.1093/ps/78.7.956.
21. Akinde SB, Obire O. Aerobic heterotrophic bacteria and petroleum-utilizing bacteria from cow dung and poultry manure. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2008;24:1999–2002. DOI: 10.1007/s11274-008-9700-z.
22. Okafor UC, Orji MU, Agu KC, Awah NS, Okeke BC, Okafor OI, et al. Bioremediation of crude oil-polluted soil using broiler-chicken droppings. *Journal of Applied and Environmental Microbiology*. 2016;4(4):75–84. DOI: 10.12691/jaem-4-4-2.
23. Zhao Z, Yang C, Gao B, Wu Y, Ao Y, Ma S, et al. Insights into the reduction of antibiotic-resistant bacteria and mobile antibiotic resistance genes by black soldier fly larvae in chicken manure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023;266:115551. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115551.

24. Li L, Liu X, Li J, Chen Z, Song T, Jin S, et al. Mitigating tetracycline antibiotic contamination in chicken manure using *ex situ* fermentation system. *Journal of Environmental Management*. 2024;356:120614. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120614.
25. Гурьянов ДВ, Хмыров ВД, Папихин РВ, Маслова МВ. Обеззараживание куриного помета ультрафиолетовым облучением. *Аграрный научный журнал*. 2018;11:52–54. DOI: 10.28983/asj.v0i11.613.
26. Гурьянов ДВ, Хмыров ВД, Папихин РВ, Маслова МВ. Обеззараживание куриного помета ультразвуковым облучением. *Аграрный научный журнал*. 2019;2:78–81. DOI: 10.28983/asj.y2019i2pp78-81.
27. Гурьянов ДВ, Хмыров ВД, Гурьянова ЮВ. Поточный способ обеззараживания электрическим полем и переработки помета в органическое удобрение. *Аграрный научный журнал*. 2019;4:75–78. DOI: 10.28983/asj.y2019i4pp75-78.
28. Ostović M, Ravić I, Kovačić M, Kabalin AE, Matković K, Sabolek I, et al. Differences in fungal contamination of broiler litter between summer and winter fattening periods. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2021;72(2):140–147. DOI: 10.2478/aiht-2021-72-3508.
29. Коптелова ВМ, Кремза АА, Ларченко АЮ, Мандрик МИ. Оценка способности бактерий – деструкторов углеводов нефти утилизировать отходы птицеводства. В: Институт микробиологии НАН Беларуси. *Инновационные биотехнологии для охраны окружающей среды: от теории к практике. Материалы I Международной научно-практической конференции; 23–25 апреля 2024 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Институт микробиологии НАН Беларуси; 2024. с. 192–194. EDN: GRUOBB.
30. Adams GO, Tawari-Fufeyin P, Igelenyah E. Bioremediation of spent oil contaminated soils using poultry litter. *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*. 2014;3(2):124–130.
31. Atagana HI. Co-composting of PAH-contaminated soil with poultry manure. *Letters in Applied Microbiology*. 2004;39(2):163–168. DOI: 10.1111/j.1472-765X.2004.01554.x.
32. Agarry SE, Owabor CN, Yusuf RO. Bioremediation of soil artificially contaminated with petroleum hydrocarbon oil mixtures: evaluation of the use of animal manure and chemical fertilizer. *Bioremediation Journal*. 2010;14(4):189–195. DOI: 10.1080/10889868.2010.514965.
33. Шулаева РВ, Сергеев ВА, Фусс ВА, Кобяков НИ, Мерсон МЭ, Вяткин АП и др., авторы и патентообладатели. *Способ ремедиации нефтезагрязненных грунтов*. Патент RU 2224604C1. 27 февраля 2004 г.
34. Rahman KSM, Banat IM, Thahira J, Thayumanavan T, Lakshmanaperumalsamy P. Bioremediation of gasoline contaminated soil by a bacterial consortium amended with poultry litter, coir pith and rhamnolipid biosurfactant. *Bioresource Technology*. 2002;81(1):25–32. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00105-5.
35. Ogboje SU, Ukpebor JE, Ukpebor EE. The effects of chicken manure digestates on the removal of diesel range organics from petroleum products polluted soils. *Bulgarian Journal of Soil Science*. 2021;6(1):78–95.
36. Fallgren PH, Jin S. Biodegradation of petroleum compounds in soil by a solid-phase circulating bioreactor with poultry manure amendments. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Environmental Science and Engineering and Toxicology*. 2008;43(2):125–131. DOI: 10.1080/10934520701781202.
37. Kumar KS, Sivaraj R, Radhakrishna A. An investigation of growth and yield of *Helianthus annuus* on diesel contaminated soil and bioremediated diesel contaminated soil. *World Journal of Pharmaceutical Research*. 2014;3(10):1530–1544.
38. Barati M, Bakhtiari F, Mowla D, Safarzadeh S. Comparison of the effects of poultry manure and its biochar on barley growth in petroleum-contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*. 2018;20(2):98–103. DOI: 10.1080/15226514.2017.1337069.
39. Gupta G, Tao J. Bioremediation of gasoline-contaminated soil using poultry litter. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Environmental Science and Engineering and Toxicology*. 1996;31(9):2395–2407. DOI: 10.1080/10934529609376498.
40. Ubani O, Atagana HI. Measuring the effect of co-composting crude oil sludge with pig, cow, horse and poultry manures on the degradation of selected polycyclic aromatic hydrocarbons. *Archives of Environmental Protection*. 2018;44(1):77–86. DOI: 10.24425/118184.