

МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 581.522 + 581.95

EDN JSCJHE

doi: 10.17072/1994-9952-2025-1-21-31



Микробиологический анализ торфяной лечебной грязи месторождения Таборли-3

Л. Ф. Гафарова¹, У. Курди¹, Г. Ю. Яковлева¹, А. И. Колпаков¹, О. Н. Ильинская¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ляйсан Фаридовна Гафарова, gafarova.lf@rambler.ru

Аннотация. Торфяные грязи (пелоиды) представляют собой природные органоминеральные комплексы, образованные при разложении органических остатков в болотистой местности в условиях недостатка кислорода. Они обладают высокой теплоемкостью и содержат биологически активные вещества (соли, газы, биостимуляторы, метаболиты организмов и пр.), а также живые микроорганизмы. Однако микробный состав пелоидов практически не изучен. Цель работы заключалась в анализе микробного состава торфяных пелоидов месторождения Таборли-3 (Республика Татарстан) согласно санитарно-бактериологическим характеристикам, спектру культивируемых микроорганизмов, молекулярно-генетическому определению прокариотического метагенома и его функционального потенциала. В течение 2021–2023 гг. изучены 7 образцов таборлинских пелоидов. Санитарно-бактериологический анализ осуществляли согласно программе производственного контроля санаториев, применяющих данную грязь. Таксономическую идентификацию выделенных культур микроорганизмов проводили методом времяпролетной масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией MALDI-TOF MS. Молекулярно-генетический анализ сообщества микроорганизмов выполняли секвенированием 16S рРНК с помощью Illumina MiSeq, дальнейший анализ последовательностей проводили с использованием пакета программного обеспечения Mothur на платформе Galaxy. Охарактеризованы бактериальные сообщества пелоидов, в которых преобладали представители филумов *Firmicutes* (22%) и *Proteobacteria* (36%). На уровне семейств доминировали *Streptococcaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lactobacillaceae*, *Comamonadaceae* и *Sphingomonadaceae*. Функциональный потенциал сообществ подтверждает, что бактерии пелоидов содержат основные гены метаболизма углеводов, липидов, витаминов, аминокислот и нуклеотидов, а также способны утилизировать ксенобиотики. Впервые охарактеризован микробиом лечебных грязей месторождения Таборли-3. Мониторинг состава микробных сообществ лечебных грязей является важной составляющей для оценки вклада микроорганизмов и их метаболитов в оздоровительный эффект пелоидотерапии.

Ключевые слова: пелоиды, торфяные грязи, санитарно-бактериологический анализ, микробиом, метагеном, функциональный профиль

Для цитирования: Микробиологический анализ торфяной лечебной грязи месторождения Таборли-3 / Л. Ф. Гафарова, У. Курди, Г. Ю. Яковлева, А. И. Колпаков, О. Н. Ильинская // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 1. С. 21–31. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-1-21-31>. EDN: JSCJHE

Благодарности: исследование проведено в рамках Программы стратегического академического лидерства КФУ «Приоритет-2030».

MICROBIOLOGY

Original article

Microbiological analysis of peat therapeutic mud from the Taborli-3 deposit

L. F. Gafarova¹, W. Kurdi¹, G. Yu. Yakovleva¹, A. I. Kolpakov¹, O. N. Ilinskaya¹

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Corresponding author: Lyaysan F. Gafarova, gafarova.lf@rambler.ru

Abstract. Peat mud (peloids) are natural organomineral complexes formed during the decomposition of organic residues in swampy areas under conditions of lack of oxygen. They have a high heat capacity and contain biologically active substances (salts, gases, biostimulants, metabolites of organisms, etc.), as well as living mi-

croorganisms. However, the microbial composition of peloids is practically unknown. The purpose of the work was to analyze the microbial composition of peat peloids from the Taborli-3 deposit (Tatarstan Republic) according to sanitary and bacteriological characteristics, the range of cultivated microorganisms, molecular-genetic determination of the prokaryotic metagenome and its functional potential. During 2021-2023 7 samples of peloids from the Taborli-3 deposit were studied. Sanitary and bacteriological analysis was carried out in accordance with the control program of sanatoriums using this mud. Taxonomic identification of the isolated microorganism cultures was carried out using time-of-flight mass spectrometry with matrix-assisted laser desorption/ionization MALDI-TOF MS. Molecular-genetic analysis of the microbial community was performed by sequencing 16S rRNA using Illumina MiSeq, subsequent sequence analysis was carried out using the Mothur software package on Galaxy platform. Bacterial communities of peloids were characterized, the dominance of representatives of the phyla *Firmicutes* (22%) and *Proteobacteria* (36%) was established. At the family level, *Streptococcaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lactobacillaceae*, *Comamonadaceae* and *Sphingomonadaceae* were dominant. The functional potential of the communities confirms that peloid bacteria contain the main genes for the metabolism of carbohydrates, lipids, vitamins, amino acids and nucleotides, and are also capable to utilize xenobiotics. The microbiome of therapeutic mud from the Taborli-3 deposit was characterized for the first time. Monitoring the composition of microbial communities of therapeutic mud is an important component for assessing the contribution of microorganisms and their metabolites to the healing effect of peloid therapy.

Keywords: peloids, peat mud, sanitary-bacteriological analysis, metagenome, microbiome, functional profile

For citation: Gafarova L. F., Kurdi U., Yakovleva G. Yu., Kolpakov A. I., Ilinskaya O. N. [Microbiological analysis of peat therapeutic mud from the Taborli-3 deposit]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 1 (2025): pp. 21-31. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-1-21-31>.

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the KFU Strategic Academic Leadership Program “Priority-2030”.

Введение

Под лечебными грязями (пелоидами) понимаются природные коллоидальные органоминеральные образования (иловые, торфяные, сопочные), обладающие высокой пластичностью, теплоемкостью и медленной теплоотдачей, содержащие биологические активные вещества (соли, газы, витамины, ферменты, гормоны и др.) и живые микроорганизмы¹.

Торфяные грязи образуются вследствие разложения высших растений в местностях, подвергающихся заболачиванию, чаще вблизи пресных водоемов². Они представляют собой болотные отложения торфов высокой степени разложения (более 40%), преимущественно органического состава (более 50% от сухого вещества)³. Провинция торфяных грязей на севере граничит с тундрой, на юге – с лесостепной и степной зонами, охватывает более 80% территории России. Практически в любой области этой территории можно выявить месторождения торфяных грязей. Это, как правило, пресноводный бессульфидный торф, лечебная значимость которого обуславливается высокими тепловыми свойствами и большим количеством органических веществ, в том числе признающихся терапевтически активными – гуминовых кислот, липидов, битумов [Ялтанец и др., 2004]. Данные о торфяных лечебных грязях, приведенные в литературе, подтверждают ее терапевтическую эффективность в отношении хронических неспецифических заболевания легких, астмы и заболевания верхних отделов ЖКТ [Антипова и др., 2012]; также применяются при реабилитации пациентов после операций на позвоночнике [Гайдукова и др., 2023].

Таборли-3 – действующее месторождение торфяных шламов (грязей), находится на пойменной территории р. Чаж в Агрызском р-не Республики Татарстан (рис. 1) [Таборли: Российский федеральный геологический фонд, 2023]. Грязи используются в Татарстане – в санатории «Шифалы-Су Ижминводы» [Tatarica: Татарская энциклопедия, 2023], спортивно-оздоровительном комплексе санатория-профилактория «Ян» (Альметьевский р-н), и также в санаториях Удмуртии «Варзи-Ятчи» и «Металлург» [Перспективы развития..., 2020]. Запасы таборлинского месторождения лечебной грязи значительны, что обуславливает возможность развития сети грязелечебниц в прилегающих и удаленных регионах. В Республике Татарстан известно 8 месторождений лечебной грязи с запасами около 900 тыс. м³ [Tatarica: Татарская энциклопедия, 2023]. Наиболее крупные – это месторождение торфяных грязей Таборли-3 (Агрызский р-н) и Верхняя Мочажина (Лениногорский р-н). Разрабатываются месторождения сапропе-

¹ Перечень курортов России с обоснованием их уникальности по природным лечебным факторам: метод, указания (утв. Минздравом РФ 22.12.1999 N 99/228). М., 2000.

² Применение пелоидотерапии в лечебно-профилактических и реабилитационных программах: клинич. рекомендации. Утверждены на XIII Международном конгрессе «Реабилитация и санаторно-курортное лечение». М., 2015. 31 с.

³ Методические указания критерии оценки качества грязей при их разведке, использовании и охране / Составители Л. С. Михеева, Я. А. Требухов; Центральный Ордена трудового Красного знамени научно-исследовательский институт курортологии и физиотерапии Минздрава СССР. М., 1987. 25 с.

левых грязей (Бугульминский р-н) и иловых лечебных грязей (Азнакаевский р-н). На сегодня наиболее изученными являются грязи Сакского месторождения (Крым), которые характеризуются наличием гипса, галита, кальцита, арагонита и бассанита [Максимов и др., 2021], а жидкая фаза представлена поровым раствором, содержащим хлориды и магниевые-натриевые растворимые соли вместе с комплексом органических веществ [Антипова и др., 2012]. К сожалению, о составе пелоидов Татарстана практически ничего не известно; также отсутствуют данные о химических, физических, радиологических и микробиологических характеристиках торфяной грязи месторождения Таборли-3, не опубликованы и результаты, подтверждающие ее терапевтические эффекты. Однако, в соответствии с информацией на официальном сайте санатория «Шифалы-Су Ижминводы», лечебные грязи месторождения Таборли-3 с успехом применяются для лечения и профилактики широкого круга заболеваний опорно-двигательного аппарата, нервной системы, органов малого таза, а также кожных и ряда других заболеваний [Санаторий Шифалы Су Ижминводы, 2023]. В результате жизнедеятельности микроорганизмов в грязь попадают биологически активные вещества: сероводород, липиды, каротиноиды, ферменты оксидоредуктазы и гидролазы, витамины, гормоноподобные вещества.

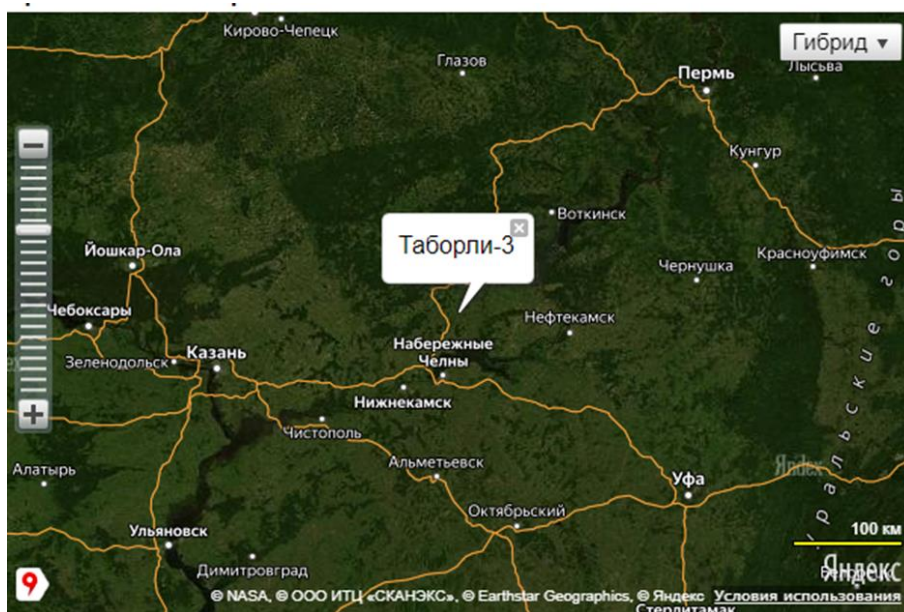


Рис. 1. Местоположение месторождения торфяной грязи Таборли-3 [Паспорт месторождения ..., 2023]

[Location of the Taborli-3 peat mud deposit [Taborli-3 field passport, 2023]

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы стал анализ микробного состава торфяных пелоидов месторождения Таборли-3 в соответствии с рекомендуемыми нормами санитарно-бактериологического исследования параллельно с характеристикой таксономического спектра культивируемых микроорганизмов, молекулярно-генетическому определению прокариотического метабенома и его функционального потенциала.

Материалы и методы

Подготовка образцов пелоидов и микробиологическое исследование

В 2021 г. проведен анализ проб лечебной грязи ($n = 7$) месторождения Таборли-3, расположенного в Агрызском р-не Республики Татарстан (рис. 1), Санитарно-бактериологический анализ пелоидов проводили в соответствии с Методическими указаниями⁴.

Отобранные образцы пелоидов гомогенизировали и отбирали 1 г влажной массы, готовили серию последовательных разведений в стерильной дистиллированной воде и высевали на рекомендованные среды для подсчета колониеобразующих единиц (КОЕ). Общее количество микроорганизмов определяли на неселективной среде – мясопептонном агаре (компания BioMedia, РФ). Для выявления энтеробактерий использовали лактозопептонную среду Эйкмана (ООО Биотехновация); для выделения и грамотрицательных микроорганизмов кишечной группы производили высев на среду Эндо (Микролаб, представи-

⁴ Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу лечебных грязей (утв. Главным гос. сан. врачом СССР 11 сент. 1989 г. №143-9/316-17). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=145496>.

тель Laboratorios Conda в РФ). Для обнаружения грибов медицинского значения применяли среду Сабуро (BioMedia) для солеустойчивых микроорганизмов, в том числе коагулазоположительных стафилококков – желточно-солевой агар производства ВНИИМС (ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН), для синегнойной палочки – цетримидный агар (BioMedia). Результаты представляли как средне-арифметическое число со стандартным отклонением по исследованным 7 образцам. Таксономическую идентификацию чистых культур всех выделенных микроорганизмов проводили методом времяпролетной масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией MALDI-TOF-MS на масс-спектрометре Vitek MS (производства БиоМерье (bioMerieux), Франция).

Метагеномный анализ сообщества бактерий

Из поступивших образцов пелоидов выделяли общую ДНК с использованием набора Miniprep Kit (Ахуген, США) согласно протоколу производителя. Полученную ДНК нормализовали до концентрации 10 нг/мкл. Для подтверждения качественного выделения ДНК проводили амплификацию гена 16S рРНК, по области V3—V4 гена 16s рРНК бактерий с помощью полимеразной цепной реакции и геле-электрофореза. С помощью Illumina MiSeq была проведена подготовка библиотеки и секвенирование. Выбор оперативной таксономической единицы (OTU) осуществляли при пороге идентичности 97% и классифицировали по справочной базе данных Greengenes 13-8-99 [DeSantis et al., 2006]. Оценку функциональных профилей сообществ осуществляли на платформе iVikodak с использованием инструмента Global Mapper [Nagpal et al., 2019].

Результаты

Стандартный санитарно-бактериологический анализ образцов пелоидов месторождения Таборли-3 выявил присутствие 12 основных видов культивируемых бактерий (табл. 1). Только одна из 7 проб не соответствовала гигиеническим нормативам по показателю *Pseudomonas aeruginosa*, обнаружение которой недопустимо в грязях, готовых к применению. Данный факт свидетельствует о важности и необходимости соблюдения регламента термообработки при пробоподготовке грязи перед ее использованием.

Таблица 1

Таксономическая идентификация и количественный состав культивируемых бактерий торфяной лечебной грязи месторождения Таборли-3, поступающей в санатории Республики Татарстан. Представлены средние значения 7 образцов

[Taxonomic identification and quantitative composition of cultivated bacteria of peat medicinal mud from the Taborli-3 deposit, supplied to sanatoriums of the Republic of Tatarstan. The average values of 7 samples are presented]

№	Идентифицированные микроорганизмы	Σ колоний микроорганизмов, выросших из 7 образцов пелоидов ($\times 10^4/\text{г}$ пелоида)	%
1	<i>Bacillus firmus</i>	245±15	87.7
2	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	10±2	3.6
3	<i>Micrococcus luteus</i>	3±1	1.1
4	<i>Rhizobium radiobacter</i>	3±1	1.1
5	<i>Brevibacillus spp</i>	3±1	1.1
6	<i>Staphylococcus hominis</i>	3±1	1.1
7	<i>Paracoccus yeei</i>	3±1	1.1
8	<i>Bacillus megaterium</i>	2±1	0.7
9	<i>Staphylococcus warneri</i>	2±1	0.7
10	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	2±1	0.7
11	<i>Brevundimonas diminuta</i>	2±1	0.7
12	<i>Pseudomonas aeruginosa*</i>	1	0.4
	Итого	279	

Примечание: * обнаружен только в одном образце.

Как видно из данных табл. 1, среди выделенных микроорганизмов доминировал вид *Bacillus firmus*, часто встречающийся в различных почвах. Этот вид включает штаммы, умеренно устойчивые к щелочам (рН от 6.5 до 8.5), и алкалофильные (рН до 10.5) [Guffanti et al., 1980]. *B. firmus* может участвовать в ассоциативной азотфиксации [Злотников и др., 2007], которая способствует более гибкому реагированию на экологические факторы, позволяет полнее использовать потоки энергии и глубже утилизировать субстраты по сравнению с чистыми культурами [Вавилин, 1986].

Также относительно часто встречались изоляты *Lysinibacillus fusiformis*. По данным литературы, различные штаммы *L. fusiformis* выделяются из сельскохозяйственных почв и производственных сточных вод. Некоторые штаммы проявляют высокую протеолитическую активность в отношении казеина, обладают высокой липолитической активностью [Нагызбеккызы и др., 2022] Штаммы *L. fusiformis* проявляют антагонистическую активность в отношении других бактерий [Марданова и др., 2015] и могут использоваться в биоремедиации [Mehta et al., 2015].

Перечисленные выше свойства *B. firmus* и *L. fusiformis* иллюстрируют их участие в процессах биоремедиации и повышении лечебных свойств грязей.

Метагеномный анализ позволил установить, что в пелоидах доминируют бактерии филумов *Proteobacteria* (36%) и *Firmicutes* (22%) (рис. 2 А). Стоит отметить, что в пелоидах присутствуют и цианобактерии (11%), являющиеся наиболее сложно организованными и морфологически дифференцированными прокариотами, способными к оксигенному фотосинтезу.

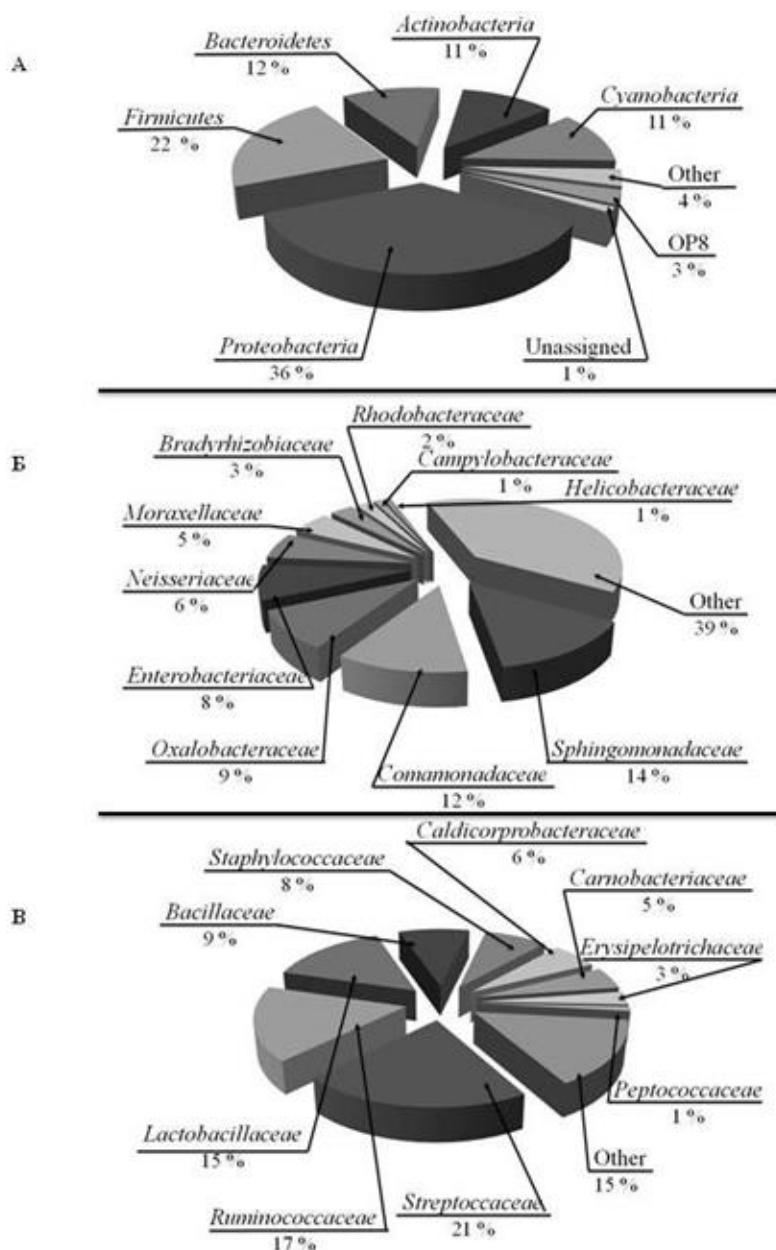


Рис. 2. Таксономическая идентификация бактерий пелоидов месторождения Таборли-3:

А – согласно филумам, Б – внутри филума *Firmicutes*, В – внутри филума *Proteobacteria*

[Taxonomic identification of bacteria from peloids of the Taborli-3 deposit:

A – according to phyla, Б – within the *Firmicutes* phylum, В – within the *Proteobacteria* phylum]

Внутри филума *Firmicutes* преобладали представители семейства *Sphingomonadaceae* (14%) (рис. 2Б), – граммотрицательные бактерии, содержащие гликозилцерамиды в своей внешней мембране [Kawahara et al., 2002]. Они являются многочисленными в окружающей среде, но не в кишечнике человека, и не являются патогенными [Nandy et al., 2013]. Второе место по численности занимает семейство *Comamonadaceae* (12%), аэробные граммотрицательные оксидазоположительные палочки, которые обычно встречаются в почве, воде и на растениях, но редко вызывают инфекции у человека.

Среди филума *Proteobacteria* выявлено высокое содержание стрептококков, руминококков и лактобацилл (рис. 2В). Семейство *Streptococcaceae* включает шаровидные аспорогенные грамположительные хемоорганотрофные факультативно-анаэробные бактерии, присутствующие у человека в составе нормальной микрофлоры верхних дыхательных путей; также стрептококки, родственные *Streptococcus sanguis*, представляют собой основной сегмент бактериальной флоры некоторых почв. Стрептококки имеют сложные питательные потребности и погибают при пастеризации, что косвенно подтверждается отсутствием культивируемых форм этих бактерий в пелоидах. Руминококки – семейство грамположительных неподвижных анаэробных аспорогенных бактерий, которые расщепляют целлюлозу, заселяют рубец жвачных и толстую кишку травоядных животных, а также входят в состав резидентной микрофлоры толстой кишки человека. Присутствие лактобацилл в пелоидах имеет особое значение, поскольку они участвуют в сбраживании травянистой биомассы с образованием спектра органических кислот, включая молочную, тем самым препятствуют развитию в пелоидах плесневых грибов.

Оценка функционального потенциала микробиома пелоидов подтверждает многообразие процессов, которые осуществляют бактерии. Очевидно, что большинство генетических детерминант относится к основным метаболическим процессам, таким как обмен углеводов, витаминов, аминокислот, нуклеотидов, терпеноидов, поликетидов (табл. 2). В то же время не исключена возможность продукции факторов устойчивости к антибиотикам, например, ферментов бета-лактамаз, разрушающих пенициллиновое кольцо, или генов, участвующих в развитии бактериальных инфекций. Метагеномный и функциональный анализы существенно расширяют наши познания о спектре микроорганизмов пелоидов, однако классический санитарно-бактериологический анализ по-прежнему имеет решающее значение для определения безопасности применения лечебных грязей.

Таблица 2

Функциональная активность бактериальных сообществ лечебной грязи месторождения Таборли-3

[Functional activity of bacterial communities in therapeutic mud of the Taborli-3 deposit]

Число генов	Функции
32113,89	Углеводный обмен
9254,55	Метаболизм терпеноидов и поликетидов
7289,53	Биодеградация и метаболизм ксенобиотиков
5300,23	Устойчивость к антибиотикам
6398,43	Инфекционные заболевания бактериальные
6109,62	Липидный обмен
10077,31	Метаболизм кофакторов и витаминов
8651,81	Энергетический обмен
14671,70	Аминокислотный обмен
10007,93	Нуклеотидный метаболизм
8285,88	Биосинтез вторичных метаболитов
611,28	Экологическая адаптация
12296,82	Репликация
2434,72	Мембранный транспорт

Обсуждение

Проведенные исследования выявили преобладание в пелоиде граммотрицательных бактерий филумов *Proteobacteria* (36%) и грамположительных бактерий филума *Firmicutes* (22%). За ними с примерно равными долями следовали бактериоиды, актиномицеты и цианобактерии (рис. 2А). Мы сочли возможными приводить принятые ранее номенклатурные названия филумов, поскольку использование новой номенклатуры 2021 г. (соответственно, *Bacillota*, *Pseudomonadota*, *Bacteroidota*, *Actinomycetota* и *Cyanobacteriota*) оспаривается многими авторами [Oren et al., 2022]. Естественно, что выделение и определение метаболического потенциала разнообразных микроорганизмов из пелоидов не входит в протоколы санитарно-бактериологического анализа и представляет собой отдельную масштабную задачу, требующую использования широкого спектра разнообразных сред и подбора условий культивирования. На основе

анализа метагенома пелоидов можно сделать определенный вывод о вкладе доминирующих филумов в физиологическую активность лечебных грязей. В частности, обнаружение стрептококков косвенно свидетельствует о наличии в пелоиде их внеклеточных метаболитов, таких как стрептолизин, стрептокиназа, лейкоцидин, бактериоцины (рис. 2В). Наличие руминококков вследствие их метаболической активности вносит вклад в расщепление остатков целлюлозы в пелоиде с образованием метана. Лактобациллы – известные продуценты не только молочной, но и других органических кислот, считаются наиболее значимой группой пробиотических бактерий.

В то же время анализ культивируемых бактерий, определенных нами в составе пелоида месторождения Таборли-3, показывает практически абсолютное доминирование двух видов – *Bacillus firmus* и *Lysinibacillus fusiformis* (см. табл. 1).

B. firmus не обладает риском для здоровья человека и используется в некоторых биологических процессах, в частности, для энзиматического гидролиза целлюлозосодержащих субстратов [Teeravivattanakit et al., 2022]. Этот вид также обладает высокой ксиланолитической активностью, улучшая доступ целлюлолитических ферментов к целлюлозе [Teeravivattanakit et al., 2022], что важно для разложения растительных остатков при созревании пелоида.

Более того, *B. firmus* эффективен в процессе биodeградации ксенобиотиков, в частности, ди-2-этилгексилфталата (ДЭГФ), который используется в качестве пластификатора при производстве пластмасс и выбрасывается на свалки. Так, штамм *B. firmus* MP04 использует ДЭГФ в качестве единственного источника углерода при pH 7, концентрации соли 5%, температуре от 20 до 37°C [Rashmi et al., 2023]. Описан гипертотермальный к мышьяку штамм *B. firmus* L-148, который может переносить концентрацию мышьяка более 3М и окислять 75 мМ арсенита [As(III)], в том числе в присутствии тяжелых металлов [Bagade et al., 2020]. *B. firmus* способен разлагать краситель Reactive Blue 160 (RB160), используемый в текстильной красильной промышленности и попадающий в воду и почвы (в бассейне р. Нойял, штат Тамил Наду, Индия), с образованием нетоксичных продуктов разложения [Varathi et al., 2019]; способен метаболизировать фипронил, который широко используется против различных насекомых-вредителей и создает серьезные проблемы для окружающей среды [Mandal et al., 2014].

B. firmus оказался сильным поликлональным активатором В-лимфоцитов мыши, влияющим на все изотипы Ig и повышающим синтез IFN-гамма и IL-10. Учитывая стимулирующий эффект на образование IgA и стимуляцию макрофагов, *B. firmus* представляется перспективным адьювантом слизистой оболочки и/или пробиотиком [Prokesová et al., 2002].

Данные литературы об различных биологических активностях *Lysinibacillus fusiformis* свидетельствуют, что этот вид способен к деградации ксенобиотиков [Adefiranye et al., 2023]; например, гербицида диурона, что делает его перспективным участником процессов биоремедиации участков, загрязненных диуроном [Reyes-Cervantes et al., 2021]. Штамм *L. fusiformis* B30 эффективно удаляет азотистые загрязнения посредством гетеротрофной нитрификации и аэробной денитрификации без накопления нитритов, переводя аммонийный азот в газообразный [Wu et al., 2023]. Штамм *L. fusiformis* MK559526 продуцирует биосурфактант с высоким потенциалом эмульгирования и значительным снижением поверхностного натяжения, что определяет значение штамма в процессе биоремедиации почв [John et al., 2021].

Эндобитные бактерии *L. fusiformis* B27, выделенные из *Rhizophora mucronata*, являются перспективным продуцентом L-аспарагиназы, которая применяется как противоопухолевое цитостатическое средство в терапии некоторых лейкозов [Prihanto et al., 2019]. Штамм *L. fusiformis* S4C11, выделенный из корней яблони в северной Италии, обладает противогрибковой активностью в отношении различных возбудителей и способен препятствовать прорастанию конидий *Botrytis cinerea*, а также ингибировать ее рост за счет продукции летучих органических молекул [Passera et al., 2021].

Таким образом, доминантные культивируемые бактерии пелоидов месторождения Таборли-3 имеют высокий потенциал полезных свойств, подтверждающих их вклад в детоксификацию возможных промышленных загрязнений пелоидов, а также в их оздоравливающий эффект.

Заключение

Впервые охарактеризован микробиом торфяных грязей (пелоидов) месторождения Таборли-3 (Республика Татарстан), применяющихся в санаториях Татарстана для лечения и профилактики широкого круга заболеваний опорно-двигательного аппарата, нервной системы, органов малого таза, а также кожных и ряда других заболеваний. Органоминеральные комплексы пелоидов содержат продукты разложения органических веществ, соли, газы, биостимуляторы, метаболиты организмов, а также живые микроорганизмы, вносящие вклад в оздоравливающий эффект пелоидов.

Согласно полученным санитарно-бактериологическим характеристикам, исследованные пелоиды в основном удовлетворяют требованиям безопасности: только в одной пробе из 7-и была обнаружена единственная колония *Pseudomonas aeruginosa*. Молекулярно-генетический анализ сообщества микроорганизмов на основе секвенирования 16S рРНК показал, что в сообществе преобладают бактерии филумов

Firmicutes (22%) и *Proteobacteria* (36%). Среди семейств доминировали представители *Streptococcaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lactobacillaceae*, *Comamonadaceae* и *Sphingomonadaceae*. Анализ функционального потенциала прокариотического метагенома выявил, что бактерии пелоидов содержат основные гены метаболизма углеводов, липидов, витаминов, аминокислот и нуклеотидов, а также способны утилизировать ксенобиотики.

Важно отметить, что доминирующими культивируемыми микроорганизмами были безопасные для человека бактерии двух видов – *Bacillus firmus* и *Lysinibacillus fusiformis*, для которых подтверждена способность к деструкции ксенобиотических загрязнений и антифунгицидный потенциал. Выявление структуры и функций микробных сообществ пелоидов представляет собой современное перспективное направление, которое позволит во многом объяснить полезные свойства лечебных грязей.

Список источников

1. Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки. М.: Наука, 1986. 144 с.
2. Гайдукова Т.Ю. и др. Торфяные лечебные грязи: новые подходы к реабилитации пациентов после операций на позвоночнике // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2023. Т. 100, № 3-2. С. 58–59. EDN: ZQECTW
3. Злотников А.К. и др. Физиологические и биохимические свойства бактериальной ассоциации *Klebsiella terrigena* E6 и *Bacillus firmus* E3 // Прикладная биохимия и микробиология. 2007. Т. 43, № 3. С. 338–346. EDN: IAGBQD
4. Максимов Г.С. и др. Минеральный состав грязи Сакского месторождения // Минералы: строение, свойства, методы исследования. 2021. № 12. С. 91–92. EDN: ALIZSF
5. Марданова А.М. и др. Поиск и выделение новых штаммов бактерий-антагонистов фитопатогенных микромицетов рода *Fusarium* // Биоразнообразие и экология грибов и грибоподобных организмов Северной Евразии: материалы Всерос. конф. Екатеринбург, 2015. С. 149–151.
6. Нагызбеккызы Э. и др. Выделение и скрининг микроорганизмов, перспективных при создании на их основе заквасок для получения биогаза из сточной воды // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. Т. 3. С. 27–33. doi: 10.17513/srbs.1280. EDN: TGXJXR
7. Паспорт месторождения Таборли-3 [Электронный ресурс]. URL: http://reports.geologyscience.ru/kadastr_view_one.php?id=43154 (дата обращения: 04.12.2023).
8. Пелоидотерапия больших бронхиальной астмой с сопутствующей патологией / И.И. Антипова, Т.Н. Заришова, Н.Н. Симагаева и др. Томск: STT, 2012. 244 с.
9. Перспективы развития санаторно-курортного туризма в регионе (на материалах Республики Татарстан) / Г.Н. Булатова, Э.И. Байбаков, В.А. Рубцов и др. // Приоритетные направления и проблемы развития внутреннего и международного туризма в России: материалы IV Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф, Симферополь, 2020. С. 204–208.
10. Санаторий Шифалы Су Ижминводы [Электронный ресурс] // Санаторий Шифалы Су Ижминводы: официальный сайт. URL: <https://xn--f1adbpg.xn--p1ai/%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8V%D0%B5-%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D1%84%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B/#torf> (дата обращения: 04.12.2023).
11. Таборли-3 [Электронный ресурс]: Российский федеральный геологический фонд: официальный сайт. URL: <https://www.rfgf.ru/gkm/itemview.php?id=43154> (дата обращения: 04.12.2023).
12. Tatarica: Татарская энциклопедия. [Электронный ресурс]. Казань, 2018. URL: <https://tatarica.org/ru> (дата обращения: 04.12.2023).
13. Ялганец И.М. и др. Научно-практическое использование сапропелевых илов и торфяных грязей в комплексном санаторно-курортном лечении // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 12. С. 28–39. EDN: MUMDST
14. Adefiranye O.O. et al. Draft genome of *Lysinibacillus fusiformis* PwPw_T2 isolated from *Ananas comosus* revealing acetic acid producing and xenobiotic degrading enzymes // Microbiol. Resour. Announc. 2023. Vol. 12, № 12. Art. 0075323. doi: 10.1128/MRA.00753-23.
15. Bagade A. et al. Characterisation of hyper tolerant *Bacillus firmus* L-148 for arsenic oxidation // Environ Pollut. 2020. Vol. 261. Art. 114124. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114124.
16. Barathi S. et al. Biodegradation of textile dye Reactive Blue 160 by *Bacillus firmus* (Bacillaceae: Bacillales) and non-target toxicity screening of their degraded products // Toxicol. Rep. 2019. Vol. № 7. P. 16–22. doi: 10.1016/j.toxrep.2019.11.017.
17. DeSantis T.Z. et al. Greengenes, a chimera-checked 16S rRNA gene database and workbench compatible with ARB // Appl. Environ. Microbiol. 2006. Vol. 72, №7. P. 5069–5072. doi: 10.1128/aem.03006-05.

18. Guffanti A.A. et al. Bioenergetic Properties of Alkaline-tolerant and Alkalophilic Strains of Bacillus // Journal of General Microbiology. 1980. Vol. 119, № 1. P. 79–86. doi: 10.1099/00221287-119-1-79.
19. John W.C. et al. Evaluation of biosurfactant production potential of Lysinibacillus fusiformis MK559526 isolated from automobile-mechanic-workshop soil // Braz. J. Microbiol. 2021. Vol. 52, № 2. P. 663–674. doi: 10.1007/s42770-021-00432-3.
20. Kawahara K. et al. Occurrence of an alpha-galacturonosyl-ceramide in the dioxin-degrading bacterium Sphingomonas wittichii // FEMS Microbiol. Lett. 2002. Vol. 214, № 2. P. 289–294. doi: 10.1111/j.1574-6968.2002.tb11361.x.
21. Mandal K. et al. Bioremediation of fipronil by a Bacillus firmus isolate from soil // Chemosphere. 2014. Vol. 101. P. 55–60. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.043.
22. Mehta J. et al. Decolourization of simulated dye in aqueous medium using bacterial strains // European Journal of Advances in Engineering and Technology. 2015. Vol. 2, № 3. P. 9–18.
23. Nagpal S. et al. iVikodak-A platform and standard workflow for inferring, analyzing, comparing, and visualizing the functional potential of microbial communities // Front Microbiol. 2019. Vol. 9. Art. 3336. doi: 10.3389/fmicb.2018.03336.
24. Nandy S. et al. Community Acquired Bacteremia by Sphingomonas paucimobilis: Two Rare Case Reports // J. Clin. Diagn. Res. 2013. Vol. 7, № 12. P. 2947–2949. doi: 10.7860/JCDR/2013/6459.3802.
25. Oren A., Göker M., Sutcliffe I.C. Executive Board of the International Committee on Systematics of Prokaryotes. New Phylum Names Harmonize Prokaryotic Nomenclature // mBio. 2022. Vol. 13, № 5. Art. 0147922. doi: 10.1128/mbio.01479-22.
26. Passera A. et al. Characterization of Lysinibacillus fusiformis strain S4C11: In vitro, in planta, and in silico analyses reveal a plant-beneficial microbe // Microbiol Res. 2021. Vol. 244. Art. 126665. doi: 10.1016/j.micres.2020.126665.
27. Prihanto A.A. et al. Optimization of glutaminase-free L-asparaginase production using mangrove endophytic Lysinibacillus fusiformis B27 // F1000 Res. 2019. Vol. 8. Art. 1938. doi: 10.12688/f1000research.21178.2.
28. Prokesová L. et al. Immunostimulatory effect of Bacillus firmus on mouse lymphocytes // Folia Microbiol. (Praha). 2002. Vol. 47, № 2. P. 193–197. doi: 10.1007/BF02817682.
29. Rashmi M. et al. Biodegradation of di-2-ethylhexyl phthalate by Bacillus firmus MP04 strain: parametric optimization using full factorial design // Biodegradation. 2023. Vol. 34, № 6. P. 567–579. doi: 10.1007/s10532-023-10043-4.
30. Reyes-Cervantes A. et al. Evaluation in the performance of the biodegradation of herbicide diuron to high concentrations by Lysinibacillus fusiformis acclimatized by sequential batch culture // J. Environ. Manage. 2021. Vol. 291. Art. 112688. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112688.
31. Teeravivattanakit T. et al. Digestibility of Bacillus firmus K-1 pretreated rice straw by different commercial cellulase cocktails // Prep. Biochem. Biotechnol. 2022. Vol. 52, № 5. P. 508–513. doi: 10.1080/10826068.2021.1969575.
32. Wu S. et al. Simultaneous nitrogen removal via heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by a novel Lysinibacillus fusiformis B301 // Water Environ. Res. 2023. Vol. 95, № 3. Art. e10850. doi: 10.1002/wer.10850.

References

1. Vavilin V.A. *Vremja oborota biomassy i destrukcija organičeskogo veščestva v sistemach biologičeskoj očistki* [Biomass turnover time and destruction of organic matter in biological treatment systems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 144 p. (In Russ.).
2. Gaidukova T.Yu., Kulikov A.G., Ksenofontova I.V., Adilov V.B. [Peat therapeutic mud: new approaches to the rehabilitation of patients after spinal surgery]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lečebnoj fizičeskoj kul'tury*. V. 100, No. 3-2 (2023): pp. 58-59. (In Russ.).
3. Zlotnikov A.K., Kazakova M.L., Zlotnikov K.M. et al. [Physiological and biochemical properties of the bacterial association Klebsiella terrigena E6 and Bacillus firmus E3]. *Prikladnaja biochimija i mikrobiologija*. V. 43, No. 3 (2007): pp. 338-346. (In Russ.).
4. Maksimov G.S., Naukhatsky I.A., Maksimova E.M. et al. [Mineral composition of mud from the Saki deposit]. *Mineraly: stroenie, svojstva, metody issledovanija*. No. 12 (2021): pp. 91-92. (In Russ.).
5. Mardanova A.M., Lutfullin M.T., Shalavina M.A. et al. [Search and isolation of new strains of bacteria-antagonists of phytopathogenic micromycetes of the genus Fusarium]. *Bioraznoobrazie i ekologija gribov i gribopodobnyh organizmov Severnoj Evrazii* [Biodiversity and ecology of fungi and mushroom-like organisms of Northern Eurasia: proceedings of the All-Russian Conference]. Ekaterinburg, 2015, pp. 149-151. (In Russ.).
6. Nagyzbekkyzy E., Moldagulova E.B., Sarsenova A.S. et al. [Isolation and screening of microorganisms that are promising for creating starter cultures on their basis for producing biogas from wastewater]. *Naučnoe obozrenie. Biologičeskie nauki*. V. 3 (2022): pp. 27-33. DOI: <https://doi.org/10.17513/srbs.1280>. (In Russ.).

7. *Pasport mestoroždenija Taborli-3* [Taborli-3 field passport] Available at: http://reports.geologyscience.ru/kadastr_view_one.php?id=43154 (accessed 04.12.2023). (In Russ.).
8. Antipova I.I., Zaripova T.N., Simagaeva N.N. et al. *Peloidoterapija bol'nykh bronchial'noj astmoj s so-putstvjujuščej patologiej* [Peloid therapy of patients with bronchial asthma with concomitant pathology]. Tomsk, STT Publ., 2012. 244 p. (In Russ.).
9. Bulatova G.N., Baibakov E.I., Rubtsov V.A. et al. [Prospects for the development of sanatorium and resort tourism in the region (based on materials from the Republic of Tatarstan)]. *Prioritetnye napravlenija i problemy razvitiya vnutrennego i meždunarodnogo turizma v Rossii* [Priority directions and problems of development of domestic and international tourism in Russia: materials of the IV All-Russian Conference]. Simferopol', 2020, pp. 204-208. (In Russ.). EDN: GLWEAC
10. *Sanatorij Shifaly Su Izhminvody* [Sanatorium Shifaly Su Izhminvody]. Available at: <https://xn--f1adbpg.xn--p1ai/%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D0%BB%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D1%84%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%8B/#torf> (accessed 04.12.2023). (In Russ.).
11. *Taborli-3* [Taborli-3]. Available at: <https://www.rfgf.ru/gkm/itemview.php?id=43154> (accessed 04.12.2023). (In Russ.).
12. *Tatarica: Tatarskaja èncyklopedija* [Tatarica: The Tatar Encyclopedia]. Kazan', 2018. Available at: <https://tatarica.org/ru> (accessed 04.12.2023). (In Russ.).
13. Yaltanets I.M., Shtin S.M., Poshtar A.S., Kimarskaya S.I. [Scientific and practical use of sapropel silts and peat pollution in a complex sanatorium-resort treatment]. *Gornyj informacionno-analitičeskij bjulleten'*. No. 12 (2004): pp. 28-39. (In Russ.).
14. Adefiranye O.O., Adeniji A.A., Obidi O.F., Oyetibo G.O., Babalola O.O. Draft genome of *Lysinibacillus fusiformis* PwPw_T2 isolated from *Ananas comosus* revealing acetic acid producing and xenobiotic degrading enzymes. *Microbiol. Resour. Announc.* V. 12, No. 12 (2023). Art. e0075323. DOI: <https://doi.org/10.1128/MRA.00753-23>.
15. Bagade A., Nandre V., Paul D., Patil Y., Sharma N., Giri A., Kodam K. Characterisation of hyper tolerant *Bacillus firmus* L-148 for arsenic oxidation. *Environ Pollut.* V. 261 (2020). Art. 114124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114124>.
16. Barathi S., Karthik C., Nadanasabapathi S., Padikasan I.A. Biodegradation of textile dye Reactive Blue 160 by *Bacillus firmus* (Bacillaceae: Bacillales) and non-target toxicity screening of their degraded products. *Toxicol. Rep.* V. 7 (2019): pp. 16-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.11.017>.
17. DeSantis T.Z., Hugenholtz P., Larsen N., et al. Greengenes, a chimera-checked 16S rRNA gene database and workbench compatible with ARB. *Appl. Environ Microbiol.* V. 72, No. 7 (2006): pp. 5069-5072. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.03006-05>.
18. Guffanti A.A., Blanco R., Benenson R.A., Krulwich T.A. Bioenergetic Properties of Alkaline-tolerant and Alkalophilic Strains of *Bacillus*. *Journal of General Microbiology.* V. 119, No. 1 (1980): pp. 79-86. DOI: <https://doi.org/10.1099/00221287-119-1-79>.
19. John W.C., Ogbonna I.O., Gberikon G.M., Iheukwumere C.C. Evaluation of biosurfactant production potential of *Lysinibacillus fusiformis* MK559526 isolated from automobile-mechanic-workshop soil. *Braz. J. Microbiol.* V. 52, No. 2 (2021): pp. 663-674. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00432-3>.
20. Kawahara K., Kubota M., Sato N., Tsuge K., Seto Y. Occurrence of an alpha-galacturonosyl-ceramide in the dioxin-degrading bacterium *Sphingomonas wittichii*. *FEMS Microbiol. Lett.* V. 214, No. 2 (2002): pp. 289-294.
21. Mandal K., Singh B., Jariyal M., Gupta V.K. Bioremediation of fipronil by a *Bacillus firmus* isolate from soil. *Chemosphere.* V. 101 (2014): pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.043>.
22. Mehta J., Dilbaghi N., Dudeja S.S., Yadav A., Sharma P. Decolourization of simulated dye in aqueous medium using bacterial strains. *European Journal of Advances in Engineering and Technology.* V. 2, No. 3 (2015): pp. 9-18.
23. Nagpal S., Haque M.M., Singh R. et al. iVikodak-A platform and standard workflow for inferring, analyzing, comparing, and visualizing the functional potential of microbial communities. *Front Microbiol.* V. 9 (2019). Art. 3336. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03336>.
24. Nandy S., Dudeja M., Das A.K., Tiwari R. Community Acquired Bacteremia by *Sphingomonas paucimobilis*: Two Rare Case Reports. *J. Clin. Diagn. Res.* V. 7, No. 12 (2013): pp. 2947-2949. DOI: <https://doi.org/10.7860/JCDR/2013/6459.3802>.
25. Oren A., Göker M., Sutcliffe I.C. Executive Board of the International Committee on Systematics of Prokaryotes. New Phylum Names Harmonize Prokaryotic Nomenclature. *mBio.* V. 13, No. 5 (2022). Art. 0147922. DOI: <https://doi.org/10.1128/mbio.01479-22>.
26. Passera A., Rossato M., Oliver J.S., Battelli G., Shahzad G.I., Cosentino E., Sage J.M., Toffolatti S.L., Lo-patriello G., Davis J.R., Kaiser M.D., Delledonne M., Casati P. Characterization of *Lysinibacillus fusiformis*

strain S4C11: In vitro, in planta, and in silico analyses reveal a plant-beneficial microbe. *Microbiol. Res.* V. 244 (2021). Art. 126665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126665>.

27. Prihanto A.A., Yanti I., Murtazam M.A., Jatmiko Y.D. Optimization of glutaminase-free L-asparaginase production using mangrove endophytic *Lysinibacillus fusiformis* B27. *F1000Res.* V. 8 (2019): pp. 1938. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.21178.2>.

28. Prokesová L., Mlčková P., Stanková I., Ladmanová P., Jezková J., Chalupná P., Novotná O., Cechová D., Julák J. Immunostimulatory effect of *Bacillus firmus* on mouse lymphocytes. *Folia Microbiol. (Praha).* V. 47, No. 2 (2002): pp. 193-197. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02817682>.

29. Rashmi M., Singh T., Rajput N.S., Kulshreshtha S. Biodegradation of di-2-ethylhexyl phthalate by *Bacillus firmus* MP04 strain: parametric optimization using full factorial design. *Biodegradation.* V. 34, No. 6 (2023): pp. 567-579. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10532-023-10043-4>.

30. Reyes-Cervantes A., Robles-Morales D.L., Téllez-Jurado A., Huerta-Ochoa S., Jiménez-González A., Medina-Moreno S.A. Evaluation in the performance of the biodegradation of herbicide diuron to high concentrations by *Lysinibacillus fusiformis* acclimatized by sequential batch culture. *J. Environ. Manage.* V. 291 (2021). Art. 112688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112688>.

31. Teeravivattanakit T., Baramée S., Ketbot P., Waeonukul R., Pason P., Tachaapaikoon C., Ratanakhanokchai K., Phitsuwan P. Digestibility of *Bacillus firmus* K-1 pretreated rice straw by different commercial cellulase cocktails. *Prep. Biochem. Biotechnol.* V. 52, No. 5 (2022): pp. 508-513. DOI: <https://doi.org/10.1080/10826068.2021.1969575>.

32. Wu S., Lv N., Zhou Y., Li X. Simultaneous nitrogen removal via heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by a novel *Lysinibacillus fusiformis* B301. *Water Environ. Res.* V. 95, No. 3 (2023). Art. e10850. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.10850>.

Статья поступила в редакцию 06.11.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 04.03.2025.

The article was submitted 06.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 04.03.2025.

Информация об авторах

Ляйсан Фаридовна Гафарова – gafarova.lf@rambler.ru, аспирант кафедры микробиологии;

Уильям Курди – William.m.kurdy@hotmail.com, аспирант кафедры микробиологии;

Галина Юрьевна Яковлева – yakovleva_galina@mail.ru, канд. биол. наук, доцент кафедры микробиологии;

Алексей Иванович Колпаков – ljoscha@mail.ru, канд. биол. наук, доцент кафедры микробиологии;

Ольга Николаевна Ильинская – ilinskaya_kfu@mail.ru, д-р. биол. наук, профессор, зав. кафедры микробиологии.

Information about the authors

Lyaysan F. Gafarova – gafarova.lf@rambler.ru, graduate student of the Department of Microbiology;

William. Kurdi – William.m.kurdy@hotmail.com, graduate student of the Department of Microbiology;

Galina Yu. Yakovleva – yakovleva_galina@mail.ru, PhD, Associate Professor of the Department of Microbiology;

Alexey I. Kolpakov – ljoscha@mail.ru, PhD, Associate Professor of the Department of Microbiology;

Olga N. Ilinskaya – ilinskaya_kfu@mail.ru, doctor of biology, professor, head of the Department of Microbiology.

Вклад авторов:

Гафарова Л. Ф. – сбор материала и экспериментальные методы; анализ литературы.

Курди У. – методы биоинформатики.

Яковлева Г. Ю. – оформление таблиц; статистическая обработка; анализ полученных данных и редактирование.

Колпаков А. И. – написание и редактирование текста.

Ильинская О. Н. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Gafarova L. F. – collection of material and experimental methods; literature analysis.

Kurdi W. – bioinformatics methods.

Yakovleva G. Yu. – design of tables; statistical processing of the material; analysis of obtained data and editing.

Kolpakov A. I. – writing and editing text.

Ilinskaya O. N. – scientific management; research concept; methodology development; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.