

УДК 636.084.4
EDN HXSYWN
DOI 10.71453/3034-4174-2025-4-53



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОБЕЛКОВОЙ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ МЕТАНОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ В КОРМЛЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Беспоместных Константин Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры зоотехнии¹

¹Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полецкого, Россия, г. Кемерово

Аннотация. В данном аналитическом обзоре обобщены современные знания о метанокисляющих бактериях в качестве кормовых ингредиентов для сельскохозяйственных животных. Представлены результаты исследований и научные достижения, касающиеся бактериальных белков, включая процесс их производства, химический состав, влияние на усвояемость питательных веществ, качества и безопасности, показатели роста у некоторых видов моногастричных животных, включая свиней, цыплят-бройлеров. Сделан вывод, что высокобелковая кормовая добавка (ВБКД), полученная в результате ферментации природного газа с использованием бактериальной культуры, содержащей преимущественно метанотрофный микроорганизм *Methylococcus capsulatus*, является перспективным источником белка на основе таких критериев, как аминокислотный состав, усвояемость, а также продуктивность и здоровье животных. Будущие исследовательские задачи включают модификацию последующих этапов обработки для получения продуктов с добавленной стоимостью, а также улучшение понимания факторов, влияющих на доступность питательных веществ и продуктивность животных.

Целью данной работы является изучение качества и безопасности высокобелковой кормовой добавки на основе метанокисляющих бактерий и оценка её использования в кормлении моногастричных сельскохозяйственных животных. *Предметом исследования* является высокобелковая кормовая добавка, полученная на основе метанокисляющих

бактерий, и её комплексная оценка безопасности использования как источника белка и аминокислот в кормлении сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: метанотрофные бактерии, высокобелковая кормовая добавка, биомасса, микробный белок, кормление, сельскохозяйственные животные, качество, безопасность.

USE OF A HIGH-PROTEIN FEED ADDITIVE BASED ON METHANE-OXIDIZING BACTERIA IN FARM ANIMALS FEEDING

Bespomestnykh Konstantin V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Animal Science¹

¹Kuzbass State Agrarian University, Russia, Kemerovo

Abstract. This analytical review summarizes current knowledge about methane-oxidizing bacteria as feed ingredients for farm animals. It presents research results and scientific achievements related to bacterial proteins, including their production process, chemical composition, impact on nutrient digestibility, quality, and safety, as well as growth performance in certain monogastric animals, such as pigs and broiler chickens. It was concluded that a high-protein feed additive (HPFA) obtained by fermenting natural gas using a bacterial culture containing the predominantly methanotrophic microorganism *Methylococcus capsulatus* is a promising source of protein based on criteria such as amino acid composition, digestibility, and animal productivity and health. Future research challenges include modifying subsequent processing steps to produce value-added products, as well as improving understanding of the factors that influence nutrient availability and animal productivity.

The aim of this work is to study the quality and safety of a high-protein feed additive based on methane-oxidizing bacteria and to evaluate its use in the feeding of monogastric farm animals. The subject of the study is a high-protein feed additive based on methane-oxidizing bacteria and its comprehensive safety assessment as a source of protein and amino acids in the feeding of farm animals.

Keywords: methanotrophic bacteria, high-protein feed additive, biomass, microbial protein, feeding, farm animals, quality, safety.

Введение

В настоящее время растёт потребность в высококачественном белке в кормлении сельскохозяйственных животных. Высокий спрос на высококачественные источники белка в ближайшем будущем может оказаться недостаточным для удовлетворения традиционных источников, таких как мясокостная мука, рыбная мука и соевая мука. Поэтому крайне необходимы корма, способные частично заменить традиционные источники высококачественного белка [8].

В животноводстве ключевым фактором повышения продуктивности животных является сбалансированное питание с оптимальным содержанием белка, обеспечивающего рост, восполнение потерь и улучшение продуктивных качеств. В последние годы все большее внимание уделяется использованию биотехнологических методов для создания кормовых добавок, которые не только увеличивают концентрацию белка, но и улучшают усвояемость кормов. Одним из перспективных направлений является применение метаноксиляющих бактерий для производства высокобелковых кормовых продуктов [11].

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели были изучены и проанализированы научные источники (отечественные и зарубежные статьи) с последующим обобщением полученной информации. В качестве источников были использованы следующие интернет-ресурсы: *e-Library*, *Cyberleninka*, *ResearchGate*.

Результаты

Быстрый рост и высокое содержание белка – хорошо известные свойства бактерий, используемых для производства белка. В 1960-х и 1970-х годах значительные исследования и промышленное развитие были посвящены производству микробного белка (одноклеточного белка, SCP) из углеводородных субстратов, таких как метанол и метан, с целью обеспечения белком питания человека и животных. Компания *Imperial Chemical Industries Ltd* (ICI) произвела коммерчески доступный продукт (PRUTEEN1) из метанола, используя метанол-облигатные бактерии *Methylophilus methylotrophus*. Возможность производства бактериального белка из метанола стало крупным биотехнологическим прорывом, а результаты исследований по оценке

кормов с участием ряда видов были в целом обнадеживающими [1]. Однако коммерческое производство было прекращено главным образом из-за экономических соображений, связанных с ростом цен на нефть и низкой ценой на традиционные источники белка.

В последние годы растущий глобальный спрос на устойчивые источники белка, не зависящие от использования сельскохозяйственных земель и климатических изменений, привел к возобновлению внимания к потенциалу использования микробного белка в животноводстве [9].

Основное внимание учеными уделялось метану, основному компоненту природного газа, широко распространенному в природе, как привлекательному субстрату для производства бактериального белка. Обильные запасы, дешевая транспортировка и разумная стоимость природного газа указывают на то, что производство белка из природного газа может быть реалистичным в больших масштабах. Использование метанооксиляющих бактерий в качестве источника аминокислот в кормах для животных может сохранить чрезмерно используемые источники белка, пригодные для непосредственного потребления человеком. Метанотрофные бактерии – это облигатные аэробные микроорганизмы, которые используют метан в качестве единственного источника углерода и энергии для роста. Окисление метана до метанола является первым этапом их метаболического пути. Метанотрофы повсеместно распространены и играют важную роль в глобальном балансе метана, снижая его воздействие, как пример, на глобальное потепление [4].

Метан содержит углерод в восстановленной и энергоэффективной форме и может обеспечивать высокую производительность микробных клеток при биоконверсии субстрата. В ранних исследованиях было обнаружено, что два штамма постоянно культивируемых метанооксиляющих бактерий имеют благоприятный с точки зрения питания профиль незаменимых аминокислот. Последующие результаты исследований на молодых цыплятах показали, что бактерии, перерабатывающие (утилизирующие) метан, являются полезными источниками белка для моногастричных животных [2].

Природный метанотроф *Methylococcus capsulatus* продемонстрировал высокую эффективность в производстве бактериального белка из метана. Были проведены значительные исследования микробного высокобелкового корма, получаемого в основном из метана путем ферментации природного

газа, в качестве источника белка для ряда видов животных, включая свиней, цыплят-бройлеров [6].

Эксперименты по кормлению сельскохозяйственных животных показали, что бактериальный белок, получаемый из природного газа, может быть использован в качестве устойчивого источника белка для животноводства. Высокое содержание нуклеиновых кислот может сделать бактерии непригодными для употребления в пищу человеком, если эти нуклеиновые кислоты не будут частично удалены. Хотя основное внимание в исследованиях нуклеиновых кислот было сосредоточено на ограничениях их прямого использования в качестве пищевых продуктов для человека, но их потенциальная полезность должна стать частью оценки в качестве ингредиентов кормов для животных [3].

Использование бактериального белка, выращенного на природном газе, было одобрено Европейским Союзом (ЕС) в 1995 г. для кормления свиней, телят. Пересмотр Регламента ЕС № 767/2009, касающегося источников микробного белка, может способствовать дальнейшему развитию и использованию таких продуктов в качестве кормовых ингредиентов.

1. Технология производства высокобелковой кормовой добавки

Технология производства бактериального белка из метанола путем ферментации уже была разработана. Предполагается, что технология производства бактериального белка из метана может быть экономически более привлекательной, чем производство из метанола, из-за более низкой стоимости субстрата и более высокого выхода белка. Бактериальная биомасса выращивалась путем непрерывной аэробной ферментации в специально разработанном и запатентованном петлевом ферментере. Использовались 2 м³ метана в качестве источника углерода и энергии на кг сухого вещества биомассы, что соответствует примерно 1,7 кг метана на 1 кг сырого белка, и природные аэробные метанотрофы *Methylococcus capsulatus* в качестве основных бактерий культуры. Природный газ содержит различные концентрации этана и пропана в дополнение к метану, и его использование в качестве субстрата для ферментации требует применения *Methylococcus capsulatus* в совместной культуре с гетерогенными бактериями *Ralstonia sp.*, *Brevibacillus agri* и *Aneurinibacillus sp.* для обеспечения роста в непрерывной системе. В качестве источника азота применялся аммиак, который при неоптимальном соотношении может снизить рост в непрерывной культуре.

Кроме того, в ферментер добавляли кислород и минеральный раствор, а массоперенос составлял около 4 кг/м³/ч [12].

Клетки при непрерывном процессе отбирали из ферментера, центрифугировали, подвергали ультрафильтрации, инактивировали нагреванием и высушивали распылением [5].

2. Аминокислотный профиль высокобелковой кормовой добавки

Химический состав бактериальной биомассы зависит от таких факторов, как тип субстрата и условия ферментации, типы бактерий и обработки после ферментации.

Таблица 1

Содержание сырого протеина, липидов, золы и нуклеиновых кислот в бактериальной культуре, г/100 г сухого вещества

Субстрат	Бактериальная культура	Сырой протеин	Липиды	Зола	Нуклеиновые кислоты
Метанол	<i>Methylophilus methylotrophus</i>	81,3	7,2	9,1	15,9
Метан	<i>Methylococcus capsulatus</i>	73,2	10,7	8,5	9,9

Пищевая ценность биомассы, полученной из метана или метанола, в основном определяется содержанием белка и в меньшей степени липидов. В таблицах 1 и 2 представлены приблизительный состав и аминокислотный профиль бактерий.

Белки, полученные на природном газе, сравниваются со средними данными по бактериальным белкам, полученным с использованием метанола (*Methylophilus methylotrophus*).

Средние значения содержания сырого белка в биомассе метанотрофных бактерий были ниже, чем в биомассе, выращенной на метаноле, что отчасти связано с более низким содержанием нуклеиновых кислот.

Таблица 2

Аминокислотный состав кормовой добавки, выращенной на природном газе с соевым шротом, рыбной мукой, и кормовой добавки, выращенной на метаноле

Аминокислоты	Кормовая добавка, полученная на метане	Соевый шрот	Рыбная мука	Кормовая добавка, полученная на метаноле
<i>Незаменимые аминокислоты</i>				
Аргинин	6,3 ± 0,3	7,4 ± 0,5	6,2 ± 0,6	4,6
Гистидин	2,2 ± 0,2	2,7 ± 0,2	2,5 ± 0,4	1,9
Изолейцин	4,4 ± 0,4	4,7 ± 0,3	4,7 ± 0,3	4,3
Лейцин	7,5 ± 0,2	7,5 ± 0,5	7,9 ± 0,4	7,0
Лизин	5,6 ± 0,4	6,1 ± 0,3	8,2 ± 0,3	6,0
Метионин	2,6 ± 0,2	1,3 ± 0,1	3,0 ± 0,1	2,4
Фенилаланин	4,2 ± 0,2	5,0 ± 0,3	4,1 ± 0,2	4,1
Треонин	4,3 ± 0,3	3,9 ± 0,3	4,0 ± 0,6	4,6
Триптофан	2,2 ± 0,8	1,4	0,9	0,9
Валин	5,8 ± 0,3	4,8 ± 0,4	5,3 ± 0,1	5,6
<i>Необязательные аминокислоты</i>				
Аланин	7,1 ± 0,4	4,2 ± 0,4	6,1 ± 0,1	7,1
Аспарагиновая кислота	8,5 ± 0,4	11,2 ± 0,7	9,9 ± 1,2	8,8
Цистеин+цистин	0,7 ± 0,1	1,5 ± 0,2	0,9 ± 0,2	0,7
Глутаминовая кислота	10,6 ± 0,6	18,2 ± 1,4	12,6 ± 1,0	10,6
Глицин	4,9 ± 0,3	4,2 ± 0,3	6,0 ± 0,8	5,7
Пролин	3,8 ± 0,3	5,0 ± 0,3	4,3 ± 0,6	2,9
Серин	3,6 ± 0,2	5,2 ± 0,3	4,1 ± 0,3	3,3
Тирозин	3,6 ± 0,3	3,8 ± 0,3	3,2 ± 0,1	3,4

На долю биомассы, выращенной на метаноле, приходилось около 71 % азота, а на долю нуклеиновых кислот – 19 % от общего количества азота.

Остальная часть азота поступает за счет глюкозамина и этаноламина, являющихся компонентами клетки [13].

3. Усвояемость аминокислот кормовой добавки, полученной на метане

В результате исследований была обнаружена высокая усвояемость лизина и аргинина, в то время как усвояемость цистеина была низкой [7].

При добавлении в рационы свиней на откорме высокобелковой кормовой добавки (ВБКД), выращенной на метане, вместо соевого шрота наблюдалось снижение усвояемости азота, но усвояемость энергии не изменялась. При добавлении ВБКД в рационы цыплят-бройлеров вместо соевого шрота или рыбной муки усвояемость аминокислот либо оставалась неизменной, либо повышалась [15].

Снижение усвояемости аминокислот в рационах, содержащих ВБКД, по сравнению с соевым шротом, как наблюдалось у свиней, может быть связано с негативным воздействием компонентов микробной мембраны и клеточной стенки. Кроме того, пептидогликаны в клеточной стенке бактерий могут быть устойчивы к протеазам благодаря наличию D-аминокислот. Различия в кажущейся усвояемости аминокислот в ВБКД могут быть обусловлены долевым соотношением этих аминокислот, связанных с клеточной мембраной, или долевым соотношением этих аминокислот в эндогенных секретах [19].

Было показано, что последующая обработка микробной биомассы путем автолиза обеспечивает несколько более высокую усвояемость аминокислот по сравнению с рационами, содержащими микробную биомассу. Автолиз и гидролиз с последующей фильтрацией для удаления мембранной фракции приводили к увеличению кажущейся усвояемости большинства аминокислот. Исследования показывают, что последующая обработка биомассы влияет на доступность питательных веществ, но эффект зависит от применяемой методики: высокое давление с последующим автолизом для разрушения клеточной стенки не улучшало усвояемость питательных веществ, в то время как последующая ультрафильтрация повышала этот фактор. Микробные клетки могут содержать плохо перевариваемые клеточные стенки и мембраны, а разрушение клеток может быть необходимой частью производственного процесса. При выращивании *Methylococcus capsulatus* на метане, особенно если среда содержит высокие концентрации меди, образуется сложная система внутренних клеточных мембран [14].

В результате научных изысканий ученые доказали, что питательная среда влияет на доступность питательных веществ в ВБҚД, при этом метанол приводит к снижению содержания клеточных мембран и уменьшению доли внутриклеточного мембранно-связанного белка по сравнению с природным газом. Исследования также показали высокую усвояемость аминокислот у свиней, получавших ВБҚД, полученную из метанола. При этом пищевые РНК и ДНК распадаются на нуклеиновые кислоты в просвете кишечника, а затем далее расщепляются на нуклеозиды и свободные пуриновые и пиримидиновые основания ферментами нуклеозидфосфатазы в слизистой оболочке [16].

4. Влияние белковой кормовой добавки на показатели роста животных

В целом результаты экспериментов на свиньях показывают, что ВБҚД может составлять не менее 41 % от общего количества белка в рационе поросят и до 44 % для свиней на стадии откорма без ухудшения показателей роста.

Исследования на цыплятах-бройлерах подтвердили ранее полученные данные: аналогичное потребление корма при содержании соевого шрота составляет до 14–17 % от общего количества белка в рационе и повышает эффективность использования корма при содержании до 33 %, но может снизить прирост массы при содержании соевого шрота выше 30 % от общего количества белка в рационе.

В исследованиях с использованием ВБҚД не было выявлено никаких признаков негативного влияния на клиническое здоровье свиней, цыплят-бройлеров. Включение ВБҚД в рацион не повлияло ни на концентрацию метаболитов в плазме свиней, ни на ферменты, связанные с метаболизмом белков и жиров. Исследования не выявили смертности или проблем со здоровьем в ответ на кормление животных ВБҚД [15].

При оценке ВБҚД как источника белка для животных следует учитывать аспекты безопасности. Однако на основе показателей роста и клинического состояния здоровья животных можно заключить, что ВБҚД хорошо переносится всеми исследованными видами животных. Кроме того, бактерии, используемые в производстве ВБҚД, не являются патогенными, а последующая обработка бактерий при производственных процессах включает термическую обработку для уничтожения всех бактерий. Высокое содержание нуклеиновых кислот в ВБҚД связано с потенциальными рисками

для здоровья из-за повышенного уровня мочевой кислоты в плазме крови. Однако результаты показывают, что нуклеиновые кислоты в ВБКД хорошо усваивались животными. У кур наблюдалось снижение активности уриказы, что предполагает, что они могут быть более склонны к повышению уровня мочевой кислоты, чем другие виды.

5. Оценка качества продукции

Ряд ученых утверждает, что ВБКД может увеличить соотношение постного жира у цыплят-бройлеров. Однако существуют расхождения в результатах. Ученые сообщили о снижении количества абдоминального жира у цыплят-бройлеров при кормлении ВБКД вместо соевой муки. Однако различий по содержанию белков и жиров в составе тушки цыплят-бройлеров, получавших ВБКД вместо рыбной муки, не обнаружено. Кроме того, ученые заявили об отсутствии значительного влияния на уровень абдоминального жира у цыплят при замене рыбной муки бактериальной мукой [10].

Несколько исследований показали, что ВБКД может улучшить качество мяса моногастрических сельскохозяйственных животных. При добавлении ВБКД в рацион свиней на откорме и бройлерных кур наблюдалось при хранении и стабильное сохранение органолептических качеств замороженного мяса [17; 18].

При добавлении ВБКД в рацион свиней на стадии откорма отмечалось улучшение показателей по качеству жира и сенсорных характеристик свинины, а также снижение окисления липидов в замороженной свинине. Кормление растущих свиней ВБКД, полученной из метанола, на основе рыбной муки привело к увеличению содержания насыщенных жирных кислот и к снижению содержания мононенасыщенных жирных кислот (олеиновой кислоты) и ненасыщенных жирных кислот в подкожном жире. В последнем исследовании не было обнаружено различий в качестве туши или мяса свинины, определяемом по интенсивности запаха вареного жира или интенсивности вкуса вареной свинины, от свиней, получавших бактериальную белковую или рыбную муку [19].

Однако основной механизм оптимизации и сохранения органолептических показателей мяса цыплят-бройлеров и свинины при добавлении костной муки не разработан, а его разработка может быть частично связана с изменениями в составе жирных кислот. Могут быть задействованы и другие механизмы, такие как повышение антиоксидантной активности в результате добавления костной муки.

Заключение

Сегодня растет внимание к потенциалу микробных источников белка при обеспечении устойчивого снабжения кормовым белком для моногастричных сельскохозяйственных животных. Бактериальный белок можно быстро выращивать, что снижает нагрузку на такие ограниченные и дорогостоящие источники высококачественного белка, как рыбная мука. Кроме того, в то время как производство микробного белка требует небольших физических площадей, производство растительных белков имеет ограничения, включая площадь земли, водоснабжение и обеспечение удобрениями, а также особого внимания требуют экологические проблемы.

Белок кормов для животных следует получать на основе стабильных субстратов и условий обработки, а также он должен быть стандартизирован для получения ВБКД.

В данном обзоре обобщены современные знания о бактериальной кормовой добавке, выращенной на природном газе в качестве источника энергии и углерода, как альтернативном ингредиенте корма для ряда моногастричных видов сельскохозяйственных животных. Природный газ содержит в основном метан, а метанотрофные бактерии могут выращиваться непосредственно на природном газе или после преобразования метана в метанол. Метан имеет определенное преимущество перед метанолом в качестве субстрата для корма благодаря восстановленной форме и более высокой энергоэффективности при производстве, а также более низкой стоимости продукта. Кроме того, природный газ легко транспортируется по газопроводам, а запасы метана практически не ограничены, поскольку его можно производить из других источников, помимо ископаемого природного газа. Химический состав ВБКД, полученной на метане и метаноле, схож, но использование метанола может обеспечивать более высокую усвояемость аминокислот. Ряд недавних экспериментов по кормлению подтвердил пищевую ценность ВБКД на основе таких критериев, как химический состав, влияние на белковый и энергетический обмены, а также показатели роста и здоровья животных.

Список источников

1. Абдулнагимов, И. Г. Влияние выбросов предприятий микробиологического синтеза кормовых добавок на состояние окружающей среды и здоровье населения // Гигиена и санитария. 2006. № 2. С. 17–21.

2. Изучение свойств сообщества метанооксиляющих микроорганизмов на основе *Methylomonas methanica* / О. С. Беспалова, Н. А. Суясов и др. // Успехи в химии и химической технологии. 2019. № 5 (215). С. 15–17.
3. Моделирование процессов контроля качества готовой продукции при производстве микробиологических добавок для животных / Е. А. Бражник, В. Х. Меликиди и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2 (58). С. 295–306.
4. Оптимизация процесса сбраживания отходов животноводства при использовании метаногенирующей микробной ассоциации / А. Ю. Винаров, Д. П. Соколов и др. // Сельскохозяйственная биология. 2013. Т. 48, № 6. С. 27–35.
5. Регуляторные и методические аспекты доклинических и клинических исследований кормовых добавок для животных / Д. Р. Каргопольцева, К. Л. Крышень и др. // Лабораторные животные для научных исследований. 2018. № 3. С. 100–113.
6. Макарова, М. И. Получение биологически ценных полупродуктов на основе биомассы сообщества метанооксиляющих микроорганизмов / М. И. Макарова, Н. А. Суясов и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – №5 (215). – С. 34-36.
7. Белково-минеральные кормовые добавки в кормлении коров / Н. А. Николаева, П. П. Борисова, Н. М. Алексеева и др. // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 1. С. 62–66.
8. Патент № 2717991 Российская Федерация, МПК А23К 10/10 (2016.01), С12N 1/20 (2006.01). Белковая кормовая добавка для сельскохозяйственных животных и рыб : № 2019123037 : заявл. 22.07.2019 : опубл. 27.03.2020 / Бабусенко Е. С., Быков В. А. и др.; патентообладатель ООО «ГИПРОБИОСИНТЕЗ». 9 с. : ил.
9. Альтернативные источники пищевого белка: концентрат из бактерий *Methylococcus capsulatus*, характеристика состава и биологическая ценность / Э. О. Садыкова, М. Д. Требух, Н. С. Никитин и др. // Вопросы питания. 2023. № 3. С. 36–44.
10. Физиологическое действие и эффективность использования высокобелковых кормовых добавок при выращивании цыплят-бройлеров / А. С. Ушаков, Б. Т. Абилов, В. Г. Гребенников и др. // Проблемы биологии продуктивных животных. 2019. № 3. С. 86–95.

11. Биологическая ценность растительных белково-витаминных добавок / Г. В. Фисенко, О. В. Коцаева, А. В. Лунева и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97. С. 120–137.
12. Methane utilization in *Methylobacterium alcaliphilum* 20Zr: a systems approach / I. R. Akberdin, M. Thompson, R. Hamilton et al. // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, Iss. 1. P. 2512. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20574-z>
13. Bowman, J. The methanotrophs – the families Methylococcaceae and Methylocystaceae // The Prokaryotes / M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.H. Schleifer, Stackebrandt, E. (eds). New York: Springer, 2006. Vol. 5. P. 266–289. https://doi.org/10.1007/0-387-30745-1_15.
14. A metagenomic study of methanotrophic microorganisms in Coal Oil Point seep sediments / O.E. Havelsrud, T.H. Haverkamp, T. Kristensen et al. // BMC microbiology. 2011. Vol. 11. P. 221. DOI 10.1186/1471-2180-11-221.
15. Микробиологические аспекты дегазации угольных шахт / С.М. Никитенко, А.Ю. Игнатова, В.С. Овсянникова и др. // Уголь. 2024. № 115. С. 91–95. DOI <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-115-91-95>.
16. Orata, F.D., Meier-Kolthoff, J.P., Sauvageau, D., Stein, L.Y. Phylogenomic analysis of the gammaproteobacterial Methanotrophs (Order Methylococcales) Calls for the reclassification of Members at the genus and Species levels // Frontiers in Microbiology. 2018. Vol. 9. P. 3162. DOI 10.3389/fmicb.2018.03162.
17. Сарыглар, Ч. А., Чысыма, Р. Б. Биотехнологический метод переработки углей: направления и перспективы // Успехи современного естествознания. 2019. № 12, Ч. 1. P. 186–191.
18. Apel, W. A., Dugan, P. R., Wiebe, M. R. Use of methanotrophic bacteria in gas phase bioreactors to abate methane in coal mine atmospheres // Fuel. 1991. Vol. 70, Iss. 8. P. 1001–1003.
19. Wverlanda, M., Tausona, A.-H., Shearera, K. Evaluation of methane-utilising bacteria products as feed ingredients for monogastric animals // Archives of Animal Nutrition. 2010. Vol. 64, № 3. P. 171–189.