АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (Ph.D.)
по образовательной программе «8D05105 – Биотехнология»
Кожахметовой Маржан Халидоллаевны
на тему: «Стимулирование образования биогенного метана из низкосортных углей Казахстана»

Общая характеристика работы: Данная работа посвящена повышению биогенной добычи метана из низкосортных углей Казахстана с использованием различных методов стимулирования. В условиях глобального энергетического перехода и растущего спроса на экологически чистые источники энергии особое внимание уделяется разработке методов стимулирования образования метана, включая его биогенное происхождение. Этот процесс основан на активности синтрофных и метаногенных микроорганизмов, способных разлагать органические соединения угля с образованием метана.

Актуальность темы исследования: Казахстан входит в десятку стран мира по запасам угля, которые превышают 33,6 млрд тонн, при этом около 64% из них составляют бурые и низкокалорийные угли. Они обладают экономическими и экологическими недостатками, что делает их малопригодными для традиционного использования. Однако в их составе содержится значительное количество органических веществ, способных к метаногенезу при биологической переработке.

Сжигание угля остается основным источником выбросов парниковых газов: около 80% электроэнергии в Казахстане вырабатывается на угольных электростанциях, а в 2022 году выбросы CO_2 достигли 240 млн тонн, что составляет значительную часть углеродного следа страны. Биогенное производство метана из угля по сравнению с традиционным сжиганием позволяет сократить выбросы CO_2 на 30–50%, так как обеспечивает сбор метана из угольных пластов и делает процесс его получения экологически безопасным.

Кроме того, биогенное производство метана может стать важным механизмом рекультивации заброшенных шахт и угольных отходов. В Казахстане насчитывается более 200 заброшенных шахт, биологическая рекультивация которых позволит не только снизить экологическую нагрузку, но и создать дополнительный источник энергии. Опыт США, Китая и Канады показывает, что при внедрении оптимальных методов уже через 3–5 лет из каждой тонны угля можно получать 5–10 м³ метана.

Несмотря на высокий потенциал биогенного метаногенеза, этот процесс в Казахстане остается недостаточно изученным. В то время как исследования микробиологического разложения угля активно развиваются в мире последние 20 лет, в Казахстане данное направление представлено лишь единичными работами. Недостаток фундаментальных данных о составе и активности метаногенных сообществ, а также о влиянии геохимических факторов на процесс образования метана затрудняет промышленное внедрение

технологии. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела и создание научной основы для дальнейшего развития технологии.

Таким образом, изучение стимулирования биогенного метаногенеза в низкосортных углях Казахстана является стратегически важным направлением, которое способствует повышению экономической ценности угольных ресурсов, снижению углеродных выбросов и устойчивому производству альтернативной энергии.

Цель работы: Увеличение выхода метана за счет использования различных методов стимуляции биогенной конверсии низкосортных углей Казахстана в метан.

Задачи исследования:

1. Отобрать угольные образцы из различных угольных бассейнов Казахстана и изучить их физико-химические и микробиологические характеристики.
2. Сформировать аэробные и анаэробные микробные сообщества, отобранные из различных источников, потенциально содержащих экзогенные микроорганизмы, и провести анализ их таксономического состава с использованием метагеномных подходов.
3. Культивировать и адаптировать выделенные микробные сообщества с использованием угля в качестве единственного источника углерода и энергии.
4. Создать микроэкосистему путем введения в угольные образцы отобранных аэробных и анаэробных микробных сообществ.
5. Определить промежуточные органические соединения, участвующие в процессе ферментации и установить биогеохимические показатели метаногенеза угля.
6. Изучить биодоступность угля и проанализировать интенсивность генерации метана из угля.
7. Оценить влияние ключевых факторов окружающей среды на эффективность преобразования угля в метан.

Объекты исследования: В качестве объектов исследования были отобраны образцы угля и их микробные сообщества из 3-х регионов Казахстана: Ойкарагайский угольный бассейн Алматинской области (43°12'36,6""N. 80°35'48,3"E), Экибастузский угольный бассейн Павлодарской области (51°73'08.5"N, 75°40'38.7"E) и Карагандинский угольный бассейн Карагандинской области (49°52'48,3"N. 73°06'16,5"E). В качестве источника экзогенной микрофлоры использовали микробное сообщество активного ила из системы очистки сточных вод Бостандыкского района города Алматы (43.21'90.78"N, 76.91'89.25"E) и микробное сообщество коровьего навоза с животноводческой фермы близ города Каскелен Карасайского района Алматинской области (43.22'88.84"N, 76.63'62.11"E).

Методы исследования: Теплофизические свойства образцов угля (влажность – W, зольность – A, теплотворная способность – Q, выход летучих веществ – V) характеризовались с использованием стандартов ГОСТ. Элементный состав (C, N, H, S) определяли на автоматическом анализаторе

Vario EL Cube (Германия) на основе стандартов ISO 14820-3:2020 - «Удобрения и выщелачивающие агенты».

Методы метагеномного исследования использовались для определения таксономического состава. Также использовался метод физиологического профилирования на уровне сообщества (CLPP).

Методы матрицы возбуждения-эмиссии флуоресценции (EEM) в сочетании с моделью параллельного фактора (PARAFAC) использовались для определения промежуточных веществ.

Рентгеноструктурный анализ образцов проводился на дифрактометре Empyrean X-ray Diffraction System (Malvern Panalytical, Нидерланды) с длиной волны λ = 1,54056 Å по картине отражения измельченного образца, помещенного в кювету диаметром 25 мм.

Микроструктуру образцов угля изучали с помощью метода FE-SEM-микроскопии на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-4800 (Hitachi, Япония).

Метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье проводили с использованием спектрометра ALPHA II QuickSnap (Bruker Optics GmbH, Германия). ИК-спектр образцов угля регистрировали в диапазоне от 400 до 4000 $см^{-1}$.

Газовый хроматограф Agilent 7890A с масс спектрометром Agilent 5975C с был использован для определения газов по методике ASTM 1945 и GPA 2261.

Использовались методы биосолюбилизации и акклиматизации.

Научная новизна: Данное исследование является первым в нашей стране по изучению и стимулированию потенциала образования биогенного метана из низкосортных углей Казахстана и, следовательно, первой работой в этом направлении.

Проведен кластерный анализ микробных сообществ угольных бассейнов и экзогенных микробных источников (активного ила и коровьего навоза) с использованием платформы Majorbio Cloud.

Успешно адаптированы микробные сообщества активного ила, выделенные микроорганизмы идентифицированы и зарегистрированы в базе GenBank Национального центра биотехнологической информации (NCBI).

Разработана микросистема для оптимальной биоконверсии угля в метан, параметры которой были подобраны для достижения максимального выхода метана.

Разработан метод повышения биодоступности угля, на основе которого получен патент на полезную модель («Способ растворения низкосортного угля», № 10021).

Научная и практическая значимость исследования заключается в повышении эффективности использования энергетических ресурсов путем активизации производства биогенного метана из низкосортного угля. В контексте сокращения запасов природного газа микробиологическая трансформация угля является перспективным направлением его переработки. Биогенный метан представляет возможность использования в качестве

экологически безопасного топлива без необходимости сложных технологических процессов. Кроме того, имплементация микробиологической газификации в угледобывающих регионах Казахстана способствует созданию новых рабочих мест и улучшению экономической обстановки в данных регионах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Физико-химические и микробиологические характеристики образцов угля из 3-х различных угольных бассейнов Казахстана послужили основанием для их классификации как бурого угля. Исследованы показатели влажности, зольности, содержание летучих веществ, а также уровни углерода и серы, которые оказались характерными для бурого угля класса Б. Кроме того, было зафиксировано присутствие 8-ми основных типов бактерий, которые преобладали в образцах угля.

2. Обоснована возможность использования активного ила в качестве эффективного инокулята для биоаугментации угля, так как он содержит высокоактивное сообщество метаногенных архей, способных к адаптации и функционированию в условиях, моделирующих процесс анаэробной деградации угля.

3. Определена целесообразность внедрения метода акклиматизации аэробных и анаэробных микробных сообществ для эффективного проведения процесса биогазификации угля.

4. Выявлена взаимосвязь между физико-химическими характеристиками угля и его метаногенным потенциалом: установлено, что уголь Ойкарагайского угольного бассейна при оптимальных параметрах среды (35 °C, pH 7,0–8,0, солесодержание 4,0 мг/см³) демонстрирует максимальные структурные преобразования и выход метана до 621 мкмоль/г.

Связь работы с научно-исследовательской программой: Диссертационная работа выполнена в рамках проекта ИРН AP09057876 «Исследование потенциала биогенной конверсии низкосортных углей Казахстана в метан».

Личный вклад диссертанта в разработку научных результатов, выносимых на защиту: Все этапы исследования, включая анализ литературных данных, определение целей и задач исследования, проведение экспериментальных работ, обработку и интерпретацию полученных результатов, а также их статистическую обработку, выполнены с непосредственным участием автора. Кроме того, методы, использованные в исследовании, и полученные данные были тщательно проверены на надежность и научную обоснованность.

Апробация диссертационной работы: Результаты диссертации были представлены на следующих международных научных конференциях:

- Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Фараби әдемі», 4-6 апреля 2024 г. Алматы.

- Международная конференция «Sustainable future-2024: Biotech, ecology, energy», 20-21 ноября 2024 г. Алматы.

Публикации: Основные положения и результаты диссертационного исследования представлены на международных научных конференциях и опубликованы в 8 научных работах, включая 3 статьи в журналах, индексируемых Scopus: Scientific Reports (92%, SJR 0.9), Engineered Science (91%, SJR 0.87) и International Journal of Hydrogen Energy (93%, SJR 1.318). Также опубликована 1 статья в республиканском научном журнале, рекомендованном Комитетом по контролю в сфере образования и науки РК, и 2 тезиса в материалах конференций. На основе полученных результатов была опубликована 1 монография и получен 1 патент от Патентного бюро Республики Казахстан.

Структура диссертации: Диссертация состоит из 109 страниц, обозначений и сокращений, введения, обзора литературы, объектов исследования, материалов и методов, результатов исследования и их обсуждения, заключения, списка литературы, 16 таблиц, 39 рисунков.