

Г.К. Кайырманова^{1*}, Ә.Е. Асылбек^{1,2}, А.К. Ерназарова^{1,2},
Ү.Т. Шаймерденова^{1,2}, А.Ж. Нурканова¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов», Алматы, Казахстан

*e-mail: kaiyrman@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОБНОГО И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО СТАТУСА ПЛАСТОВЫХ ВОД НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ТЕРЕН-УЗЕК»

Определение микробного статуса и физико-химических условий малопродуктивных нефтепластов является ключевым условием для внедрения экономически выгодных биотехнологий для добычи трудноизвлекаемых нефтей из заводненных скважин. Целью исследования явилось определение микробного и физико-химического статуса заводненных нефтепластов месторождения «Терен-Узек» с использованием методов метагеномного анализа. В рамках работы были проведены физико-химические измерения образцов пластовых вод, а также высокопроизводительное секвенирование 16S рРНК генов для оценки таксономического состава микробного сообщества. Выявлено, что высокая минерализация с экстремально соленой средой на глубине 800–850 м при 21 °С формируют уникальные условия для существования адаптированных к ним микроорганизмов. Установлено, что микробиота заводненных нефтепластов представлена исключительно доменом *Bacteria*, на уровне типа (Phylum) преимущественно состоит из представителей *Actinobacteria* и *Proteobacteria*. Показано низкое таксономическое разнообразие микробного сообщества нефтепластов на уровне класса с доминированием *Actinobacteria* и *Gammaproteobacteria*. Установлено, что основную долю бактериального сообщества составляют представители родов *Dietzia* (39,67%) и *Halomonas* (35,17%), что в совокупности составляет более 74% от общего количества идентифицированных последовательностей, остальные роды представлены в меньших количествах: *Janibacter* (3,21%), *Bacillus* (2,12%), *Georgenia* (2,11%), *Arthrobacter* (2,01%) и *Marinobacter* (1,38%). Выявленные условия данных нефтепластов предполагают потенциальную возможность использования биотехнологий (MEOR) на основе микроорганизмов, а обнаруженные таксоны представляют интерес для дальнейшего изучения в рамках биотехнологических разработок, направленных на повышение нефтеотдачи и биоразложение нефтезагрязнений.

Ключевые слова: нефтепласт, микрофлора, микробиологический статус, экстремальные условия.

G.K. Kaiyrmanova^{1*}, A.E. Asylbek^{1,2}, A.K. Yernazarova^{1,2},
U.T. Shaimerdenova^{1,2}, A.J. Nurkanova¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²SRI «Sustainability of ecology and bioresources», Almaty, Kazakhstan

*e-mail: kaiyrman@mail.ru

Study of the microbial and physicochemical status of formation waters from the “Teren-uzek” oil field

Determining the microbial profile and physicochemical conditions of low-yield oil reservoirs is a key prerequisite for the implementation of cost-effective biotechnologies aimed at recovering hard-to-extract oil from water-flooded wells. The aim of this study was to assess the microbial and physicochemical profile of water-flooded oil reservoirs at the “Teren-Uzek” oil field using metagenomic analysis. The study involved physicochemical measurements of formation water samples and high-throughput sequencing of 16S rRNA genes to determine the taxonomic composition of the microbial community. It was found that the high salinity of the formation water, with an extremely saline environment at depths of 800–850 meters and a temperature of 21 °C, creates unique conditions for the survival of microorganisms adapted to such environments. The microbiota of the water-flooded oil reservoirs was found to be represented exclusively by the domain *Bacteria* and, at the phylum level, was mainly composed of members of *Actinobacteria* and *Proteobacteria*. The microbial community demonstrated low taxonomic diversity at the class level, with dominance of *Actinobacteria* and *Gammaproteobacteria*. The majority

of the bacterial community consisted of representatives of the genera *Dietzia* (39.67%) and *Halomonas* (35.17%), together accounting for over 74% of the total identified sequences. Other genera were present in smaller proportions, including *Janibacter* (3.21%), *Bacillus* (2.12%), *Georgenia* (2.11%), *Arthrobacter* (2.01%), and *Marinobacter* (1.38%). The specific conditions of these oil reservoirs suggest the potential applicability of indigenous microorganisms, and the identified taxa are of interest for further exploration in the development of biotechnological approaches aimed at enhanced oil recovery (MEOR) and biodegradation of contaminating compounds.

Keywords: Petroplast, microflora, microbiological status, extreme conditions.

Г.К. Кайырманова^{1*}, Ә.Е. Асылбек^{1,2}, А.К. Ерназарова^{1,2},
Ұ.Т. Шаймерденова^{1,2}, А.Ж. Нурканова¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Қазақстан

²НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов», Алматы, Қазақстан

*e-mail: kaiyrman@mail.ru

«Терен-узек» мұнай кен орнының қабат суларының микробтық және физика-химиялық жағдайын зерттеу

Өнімділігі төмен мұнай қабаттарының микробтық жағдайы мен физика-химиялық ерекшеліктерін анықтау – суланған ұңғымалардан қиын алынатын мұнайды өндіруге бағытталған экономикалық жағынан тиімді биотехнологияларды енгізудің негізгі шарты болып табылады. Бұл зерттеудің мақсаты – «Терен-Узек» кен орнындағы суланған мұнай қабаттарының микробиологиялық және физика-химиялық жағдайын метагеномдық талдау әдістері арқылы анықтау болды. Жұмыс барысында қабат суларынан алынған үлгілердің физика-химиялық көрсеткіштері өлшеніп, микроб қауымдастығының таксономиялық құрамын бағалау үшін 16S рРНҚ гендерінің жоғары өнімділікпен секвенирлеуі жүргізілді. 800–850 м тереңдікте 21 °С температурада анықталған жоғары минералдану мен экстремалды тұзды орта осы ортаға бейімделген микроағзалардың өмір сүруіне ерекше жағдайлар туғызатыны анықталды. Суланған мұнай қабаттарының микробиотасы тек *Bacteria* доменімен сипатталады, ал тип (Phylum) деңгейінде негізінен *Actinobacteria* мен *Proteobacteria* өкілдері кездеседі. Класс деңгейінде таксономиялық әртүрлілік төмен болып, *Actinobacteria* мен *Gammaproteobacteria* басымдық танытатыны көрсетілді. Бактериялық қауымдастықтың негізгі бөлігін *Dietzia* (39,67%) және *Halomonas* (35,17%) туыстары құрайды, бұл анықталған тізбектердің жалпы санының 74%-дан астамын құрайды. Қалған туыстар аз мөлшерде кездеседі: *Janibacter* (3,21%), *Bacillus* (2,12%), *Georgenia* (2,11%), *Arthrobacter* (2,01%) және *Marinobacter* (1,38%). Зерттелген мұнай қабаттарының жағдайлары микроағзалар негізіндегі (MEOR) технологияларын қолдануға әлеуетті мүмкіндік береді, ал анықталған таксондар мұнай өндіруді арттыру мен мұнаймен ластануды биодеградациялау бағытындағы биотехнологиялық зерттеулер үшін қызығушылық тудырады.

Түйін сөздер: Мұнай қабаты, микрофлора, микробиологиялық мәртебе, экстремалды жағдайлар.

1. Введение

Пластовые воды являются неотъемлемой частью нефтяных месторождений и играют ключевую роль во вторичных и третичных методах повышения нефтеотдачи. Пластовые воды содержат песок, глинистые частицы, нефть. Месторождение «Терен-Узек», расположенное в регионе с высокими значениями минерализации, представляет собой интересный объект для изучения микробных сообществ и их взаимодействий в экстремальных условиях. Микробные сообщества являются важным биотическим фактором, активно влияющим на процессы формирования химического состава глубинных вод, минералообразования и метаморфизма горных пород [1]. Эти условия создают уникальную

среду, где обитают специфические прокариоты, обладающие способностями к адаптации к высоким концентрациям солей и другим стресс-факторам.

В настоящее время большинство разрабатываемых нефтяных месторождений РК находятся на зрелой стадии разработки, что означает уменьшение легкоизвлекаемых запасов, но в пластах остается еще большое количество нефти, относящейся к трудноизвлекаемой. Месторождение «Терен-Узек» относится именно к таким месторождениям с высокой обводненностью скважин, где продуктивные горизонты залегают на глубине 700–850 м. На поздних стадиях разработки месторождений с целью поддержания дебитов нефти на определенном уровне приходится прибегать к заводнению не-

фтяных пластов, нагнетая под высоким давлением воду или растворы на ее основе. В этой связи, наиболее актуальный вопрос в секторе добычи жидких углеводородов это повышение нефтеотдачи пласта зрелых месторождений, поиск и внедрение новых технологий для поддержания добычи нефти. В связи с чем, изучение микробного статуса и условий пластовых вод нефтяного месторождения «Терен-Узек» является ключевым фактором для исследований, предназначенных для разработки и внедрения биотехнологий увеличения трудноизвлекаемой нефти третичными методами заводненных нефтепластов. Несмотря на наличие информации о микрофлоре подземных природных вод [1,2], сведения о микрофлоре нефтепластовых вод действующих и законсервированных скважин крайне малочисленны [1–3].

Метагеномный анализ, который позволяет исследовать генетическое разнообразие и функциональные характеристики микробных сообществ без необходимости культивирования организмов, становится важным инструментом в исследовании сложных экосистем, т.к. известно, что только 1-10% от общей численности экстремальных сообществ удается культивировать

в лабораторных условиях, большая часть относится к некультивируемым микроорганизмам [1]. Применение метагеномного анализа позволяет опосредованно выявить условия жизнедеятельности микроорганизмов в экстремальных подземных экосистемах, потенциальные бактериальные штаммы, которые можно использовать в биотехнологиях, применяемых в нефтяной отрасли (МЕОР, биоремедиация) [4]. Таким образом, определение физико-химического и микробиологического статуса нефтепластовых вод заводненных скважин месторождения «Терен-Узек» является ключевым условием для поиска и внедрения экономически выгодных технологий добычи трудноизвлекаемых нефтей из заводненных скважин.

2. Материалы и методы

Материалом для работы послужили пробы пластовых вод, отобранные с продуктивного пласта (глубина 800-850 м) действующих нефтяных скважин месторождения «Терен-Узек». Месторождение «Терен-Узек» расположено в юго-восточной части Южной Эмбы, в Жылыойском районе Атырауской области (рис.1).



Рисунок 1 – Расположение месторождения «Терен-Узек» на карте Казахстана

Территория месторождения «Терен-Узек» граничит с Каспийским морем. От нагонных вод моря месторождение защищено дамбой, протяженностью 12,9 км [5]. Ближайшие населённые пункты: г. Кульсары (100 км), г. Атырау (180 км), местность – засоленная равнина, пересечённая ериками (небольшие протоки, соединяющие два водоёма) и солёными озёрами. Плотность нефти варьируется от 0,918 до 0,937 г/см³, что относит ее к тяжелым нефтям, отличающейся повышенной концентрацией смолисто-асфальтеновых компонентов. Вода, поступающая на скважину: используется вода для хоз-питьевых нужд и бурения, общий объем водопотребления и водоотведения на одну скважину составляет 195,93 м³/цикл, включая 166,58 м³ буровых сточных вод [6]. Пробы отобраны в стерильные пластиковые бутылки объёмом 500 мл, хранились при температуре 4–8 °С и в течение 24 часов были доставлены в лабораторию для дальнейшего анализа. При отборе вод, такие нестабильные параметры как температура и рН, измерялись непосредственно на месте. Были проведены физико-химический анализ образцов пластовых вод и метагеномное секвенирование 16S рРНК генов для оценки таксономического состава микробного сообщества.

Химические характеристики образцов исследовались в соответствии с ГОСТ. Ионы HCO_3^- , CO_3^{2-} и рН определялись электрометрическим методом, а концентрация взвешенных веществ и солёность измерялись гравиметрическим методом в соответствии с ГОСТ 26449.1-85 [7]. Концентрации ионов SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , и NO_3^- анализировались с использованием гравиметрических, меркуриметрических, комплексообразующих, вычислительных и ионно-хроматографических методов в соответствии с ГОСТ 26449.1-85 и МВИ № 13-2020 [8]. Концентрация ионов железа определялась комплексообразующим методом в соответствии с ГОСТ 23268.11-78 [9]. Ионы иодида и бромиды выявлялись с использованием ионно-хроматографических, йодометрических и титриметрических методов в соответствии с ГОСТ 23268.16-78 [10], 23268.15-78 [18] и МВИ № 13-2020. Вязкость измерялась с использованием вискозиметра в соответствии с стандартом Республики Казахстан СТ РК ASTM D 445-2011 [11]. Плотность измерялась с использованием гидрометра в соответствии с ГОСТ 18995.1-73 [12].

16S метагеномное секвенирование проводилось на полногеномном секвенаторе нового поколения MiSeq (Illumina, США) по протоколу

16S Metagenomic Sequencing Library Preparation Guide. Preparing 16S Ribosomal RNA Gene Amplicons for the Illumina MiSeq System (Part # 15044223 Rev. A) 28 P.

ДНК-библиотеки (совокупность фрагментов исследуемого образца ДНК) готовили согласно инструкции 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation guide (part no. 15044223 rev. A). Вариабельные V3 и V4 регионы гена 16S рРНК амплифицировали с помощью универсальных бактериальных праймеров с добавлением адаптеров Illumina.

Реакционная смесь состояла из: 2,5 µl ДНК матрицы; по 5 µl каждого праймера в 1 µM концентрации; 12,5 µl КАРА HiFi HotStart ReadyMix в 2X концентрации (КАРА Biosystems, Cape Town, South Africa). ПЦР амплификация проводилась по следующей программе: 95oC в течение 3 минут, далее 25 циклов амплификации 95oC 30 секунд, 55oC 30 секунд, 72oC 30 секунд и один цикл при 72o в течение 5 минут. ПЦР-продукт был очищен с помощью набора Agencourt AMPure PCR purification kit (Beckman Coulter Inc. Beverly, Massachusetts, USA). Далее к каждому образцу были добавлены адаптеры Nextera XT Index primer (Illumina Inc., San Diego, CA, USA) путем амплификации в реакционной смеси, в состав которой входили 12,5 µl КАРА HiFi HotStart ReadyMix, по 5 µl каждого индекса праймера, 10 µl воды и по 5 µl ПЦР-продукта. Программа амплификации: 95oC в течение 3 минут, далее 8 циклов амплификации 95oC 30 секунд, 55oC 30 секунд, 72oC 30 секунд и один цикл при 72o в течение 5 минут. ПЦР-продукт с добавленными индексами был очищен с помощью набора Agencourt AMPure PCR purification kit (Beckman Coulter Inc. Beverly, Massachusetts, USA).

Общий пул образцов загружали в картридж набора Kit v3 (600 циклов) (Illumina, США). Запускали программу секвенирования на приборе MiSeq. По окончании секвенирования автоматически была проведена вторичная обработка данных с помощью программного обеспечения MiSeq Reporter.

3. Результаты и обсуждение

К базовым характеристикам пластовых вод относятся общая минерализация воды, содержание основных ионов, катионов, рН. В образце пластовой воды месторождения «Терен-Узек» были определены показатели концентрации распространённых анионов и катионов, общей ми-

нерализации, pH и температуры, как ключевые факторы условий жизнедеятельности микроорганизмов пластовых вод (таблица 1).

Полученные результаты указывают на высокую минерализацию вод, с общим содержанием растворённых веществ, достигающим $101820,0 \pm 3054,6$ мг/дм³, что свидетельствует о формировании экстремально соленой среды. Подобные значения характерны для глубинных горизонтов высокоминерализованных коллекторов и сравнимы с данными по Тенгизскому (около 98000 мг/дм³) и Кашаганскому месторождениям (95000 – 105000 мг/дм³) [13, 14].

Основными анионами в составе вод выступают хлорид-ион (Cl⁻) и натрий-ион (Na⁺), концентрации которых составляют $50516,3 \pm 940,0$ мг/дм³ и $20391,2 \pm 341,7$ мг/дм³ соответственно. Такое ионное соотношение типично для хлоркальциевого типа вод, преобладающего в крупных нефтяных бассейнах Казахстана [15]. Высокое содержание Na⁺ и Cl⁻ и, как следствие, высокая ионная сила среды, оказывает селективное давление на микробные сообщества, способствуя доминированию галофильных и осмотолерант-

ных организмов, что подтверждается данными по преобладанию рода *Halomonas* (см. рис. 4) [1, 16].

Концентрации ионов кальция (Ca²⁺) и магния (Mg²⁺) составляют $3006,0 \pm 90,1$ мг/дм³ и $1459,2 \pm 40,0$ мг/дм³ соответственно, что также характерно для подземных вод осадочного происхождения. Относительно низкое содержание сульфат-ионов (SO₄²⁻) – $4,94 \pm 0,2$ мг/дм³ – может быть связано с активным микробным восстановлением сульфатов с участием сульфатредуцирующих бактерий (SRB), что типично для анаэробных пластовых условий [17].

Показатель pH составляет $6,49 \pm 0,19$, что свидетельствует о слабокислой реакции среды. Такой уровень кислотности способствует стабильности железа в двухвалентной форме (Fe²⁺), концентрация которого составляет $0,77 \pm 0,02$ мг/дм³, и может указывать на восстановительный потенциал среды. Также были выявлены следы трёхвалентного железа (Fe³⁺ – $0,14 \pm 0,01$ мг/дм³), что может свидетельствовать о протекании окислительно-восстановительных процессов.

Таблица 1 – Физико-химическая характеристика нефтепластовых вод месторождения «Терен-Узек»

№	Параметры	Единицы измерений	Пластовые воды
1	Хлорид-ион Cl ⁻	мг/дм ³	50516,3±940,0
2	Сульфат-ион SO ₄ ²⁻		4,94±0,2
3	Гидрокарбонат-ион HCO ₃		146,4±5,01
4	Карбонат-ион CO ₃ ⁻		не обнаружено
5	Na ⁺		20391,2±341,7
6	Mg ²⁺		1459,2±40,0
7	Ca ²⁺		3006,0±90,1
	K ⁺		264,4±7,2
8	Fe ³⁺		0,77±0,02
	Fe ²⁺		
9	Общая минерализация		101820,0±3054,6
10	Взвешенные вещества		2829,0±84,3
11	pH	ед.	6,49±0,19
12	t	°C	21,0±0,6

Температура пластовой воды составляла $21,0 \pm 0,6$ °C, что относит месторождение к категории умеренно термальных. Это позволяет поддерживать активность как мезофильных, так и умеренно термофильных микроорганиз-

мов, включая такие роды, как *Dietzia*, *Bacillus* и *Georgania* [18].

Таким образом, физико-химические параметры пластовых вод «Терен-Узек» создают экстремальные, но устойчивые условия, благо-

приятные для развития специализированных микробных сообществ. Эти особенности необходимо учитывать при планировании микробиологических и биотехнологических методов повышения нефтеотдачи.

Таксономический анализ микробного сообщества, выделенного из пластовой воды ме-

сторождения «Терен-Узек», представлен на рисунке 2. Согласно результатам высокопроизводительного секвенирования и последующей классификации, микробиота представлена исключительно доменом *Bacteria*, что подтверждает ранее полученные данные для аналогичных нефтяных резервуаров [19, 20].

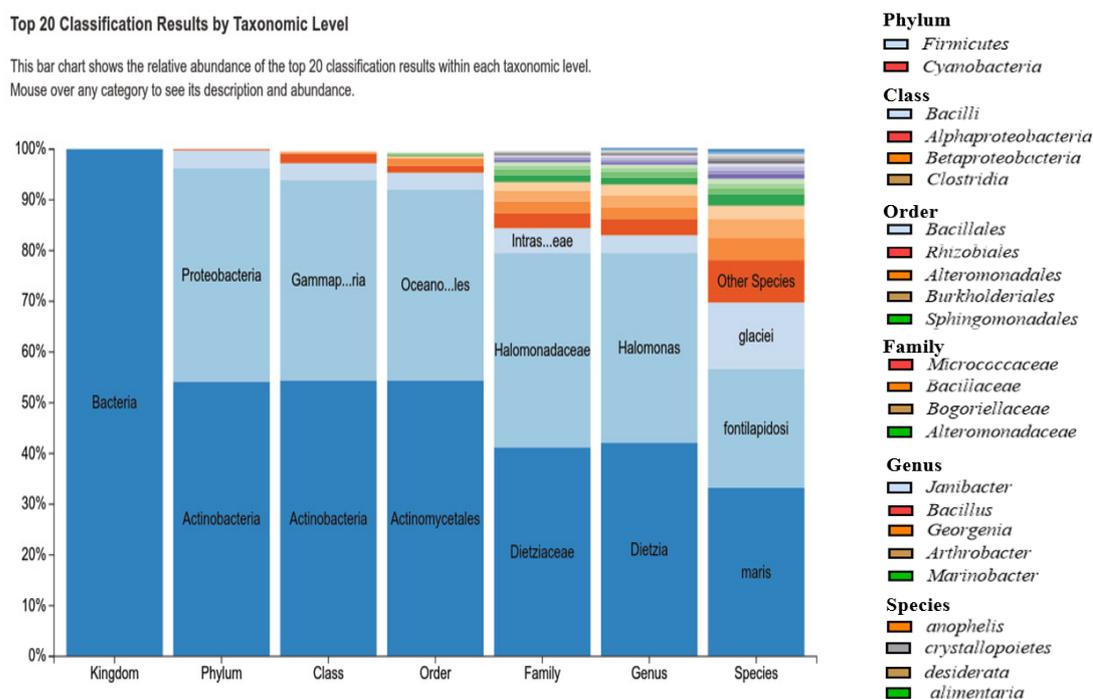


Рисунок 2 – Таксономическое распределение микробного сообщества в пластовой воде месторождения «Терен-Узек»

На уровне типа (Phylum) микробное сообщество заводненных нефтепластов преимущественно состоит из представителей *Actinobacteria* и *Proteobacteria*, в меньших количествах в образце были выявлены представители типов (Phylum) *Firmicutes* и *Cyanobacteria*. Подобное доминирование представителей таксонов *Actinobacteria* и *Proteobacteria* наблюдалось и в других нефтяных месторождениях [21-24], что свидетельствует об универсальности их экологических стратегий и адаптационных механизмов в экстремальной подземной нефтяной среде. Стоит отметить, что хотя относительное представительство *Firmicutes* и *Cyanobacteria* невелико, эти микроорганизмы могут выполнять вспомогательные экологические функции, могут быть как реликтовыми компонентами исходного микробного разнообразия, так и привнесенными с поверхности при заводнении нефтепластов.

Следует отметить, высокое содержание представителей семейств (Family) *Dietziaceae* и *Halomonadaceae*, составляющих 39,67% и 35,17%, соответственно. Известно, что эти микроорганизмы широко распространены в нефтеносных пластах и характеризуются способностью к деградации углеводов, а также к продукции поверхностно-активных веществ [25, 26]. Их наличие типично для резервуаров с высокой минерализацией и указывает на адаптацию микробиоты к экстремальным условиям, аналогично результатам, полученным при изучении месторождений с повышенным соледержанием [18, 23, 27].

На рисунке 3 представлена круговая диаграмма, иллюстрирующая таксономическое распределение микробного сообщества пластовой воды месторождения «Терен-Узек» по классу.

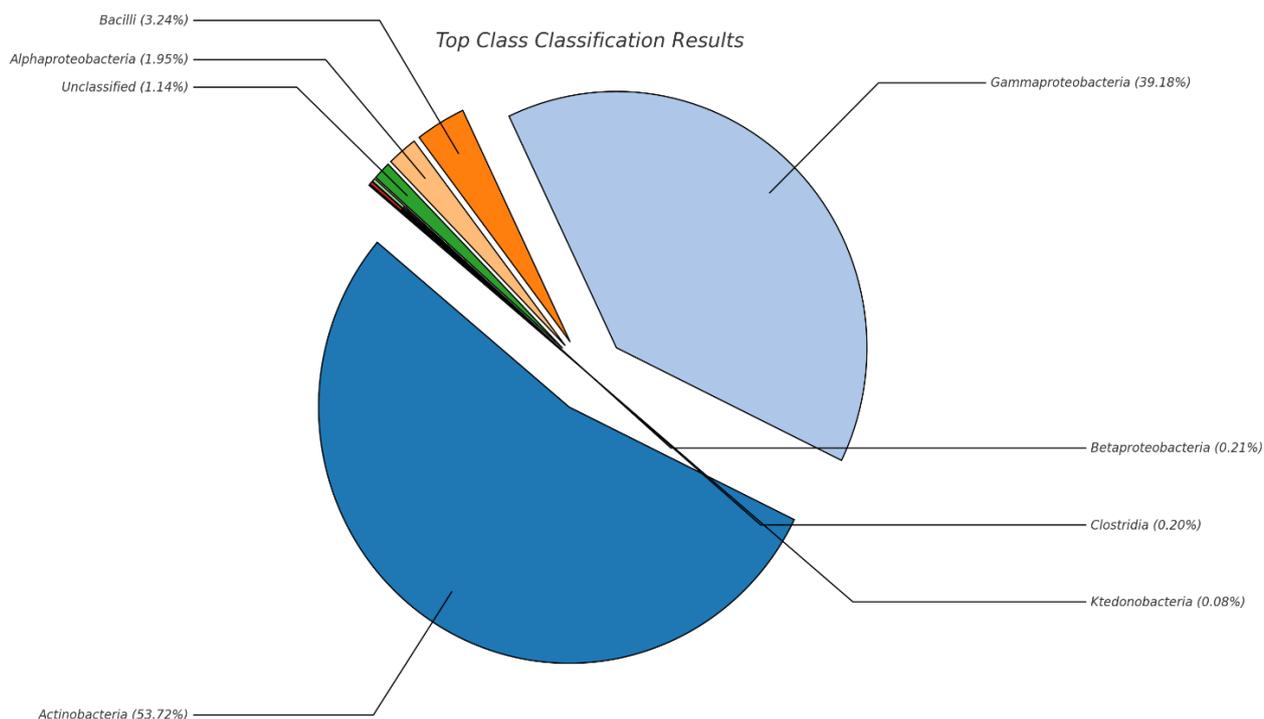


Рисунок 3 – Распределение микробиоты пластовой воды месторождения «Терен-Узек» по классу

Как видно, микробное сообщество характеризуется выраженным доминированием двух классов:

- Actinobacteria (53,72%) – наибольшая доля, что указывает на преобладание грамположительных микроорганизмов, обладающих устойчивостью к экстремальным условиям (высокое давление, соленость), а также потенциальной способностью к деградации сложных органических соединений, включая углеводороды;

- Gammaproteobacteria (39,18%) – также значительная доля, типичная для нефтяных пластов, поскольку представители этого класса включают множество нефтеокисляющих и галофильных бактерий.

Остальные классы представлены в значительно меньших количествах:

- Bacilli – 3,24%, бактерии класса *Bacilli* преимущественно факультативно аэробные, спорообразующие, что позволяет им выживать в стрессовых условиях высокой минерализации и солености пластовых вод, характеризуются устойчивостью к окислительному стрессу, что может быть важно в условиях окси-аноксигенного статуса пластовых вод, также демонстрируют широкий метаболический потенциал, позволяющий им использовать разнообразные органи-

ческие и неорганические соединения в качестве источников углерода и энергии;

- Alphaproteobacteria – 1,95%;
- Unclassified (неклассифицированные) – 1,14%, что может указывать на наличие ранее неописанных или плохо изученных таксонов;
- Betaproteobacteria – 0,21%;
- Clostridia – 0,20%;
- Ktedonobacteria – 0,08%.

Таким образом, микробное сообщество пластовой воды характеризуется низким таксономическим разнообразием на уровне класса с доминированием *Actinobacteria* и *Gammaproteobacteria*. Эти данные подтверждают наличие в системе специализированных микроорганизмов, участвующих в трансформации углеводородов, а также адаптированных к экстремальным геохимическим условиям нефтеносных пластов.

На рисунке 4 представлено распределение микробного сообщества по родам, выявленных в образце пластовой воды месторождения «Терен-Узек». Согласно результатам таксономической классификации, основную долю сообщества составляют представители родов *Dietzia* (39,67%) и *Halomonas* (35,17%), что в совокупности составляет более 74% от общего количества идентифицированных последовательностей.

Top Genus Classification Results

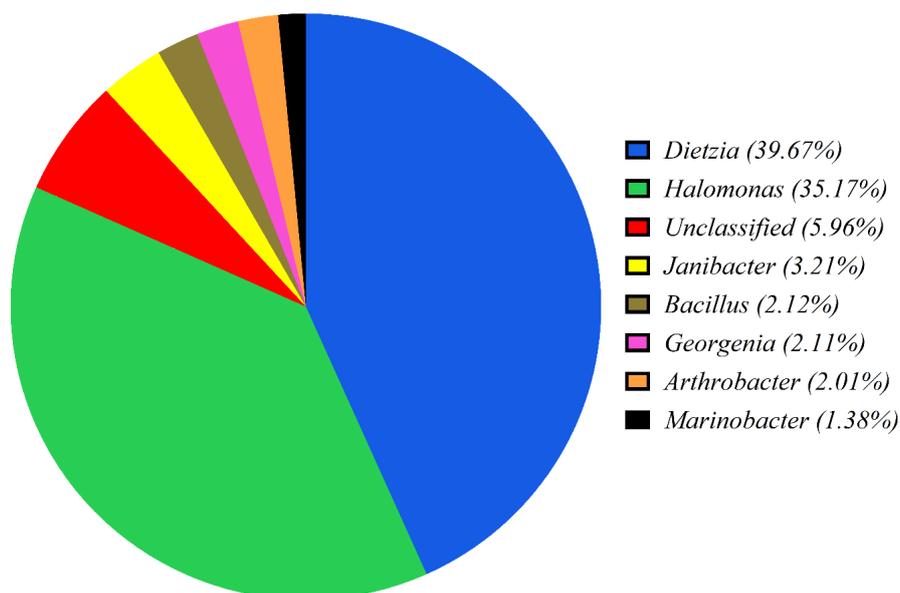


Рисунок 4 – Распределение микробного сообщества нефтепластовой воды месторождения «Терен-Узек» по родам

Доминирование представителей рода *Dietzia* в структуре микробного сообщества подтверждает ранее полученные данные о распространённости этого рода в нефтепластах. Представители р. *Dietzia*, в том числе вид *D.maris*, обладают выраженными метаболическими возможностями по деградации алканов и ароматических углеводородов, а также способностью к синтезу биосурфактантов, что делают их перспективными кандидатами для применения в технологиях микробиологического увеличения нефтеотдачи (MEOR) [25, 26, 28]. Аналогичное преобладание *Dietzia* отмечалось в нефтяных месторождениях Китая [29] и России [21]. Высокое содержание *Halomonas* также указывает на адаптацию микробного сообщества к экстремальным условиям резервуара, включая высокую минерализацию и осмотическое давление. Сходные данные о преобладании *Halomonas* были получены при изучении микробного состава пластовых вод Ромашкинского и Тенгизского месторождений [18, 30]. Остальные роды представлены в меньших количествах, среди которых *Janibacter* (3,21%), *Bacillus* (2,12%), *Georgania* (2,11%), *Arthrobacter* (2,01%) и *Marinobacter* (1,38%). Несмотря на их сравнительно низкую долю, данные таксоны могут играть важную вспомогательную роль в биогеохимических процессах, происходящих в

резервуаре. В частности, *Bacillus* известен как продуцент биосурфактантов и спор, устойчивых к экстремальным условиям [7], а *Marinobacter* – как активный участник окисления углеводородов в морских и нефтяных экосистемах [31].

Категория «Unclassified» (5,96%) указывает на наличие неклассифицированных последовательностей, что может свидетельствовать о присутствии новых или недостаточно изученных таксонов, характерных для уникальных условий месторождения «Терен-Узек».

Заключение

Таким образом, на основе определения микробного и физико-химического статуса заводненных нефтепластов месторождения «Терен-Узек», можно сделать вывод, что высокая минерализация с экстремально соленой средой на глубине 800-850 м при 21 °С формирует уникальные условия для существования адаптированных к ним микроорганизмов. Выявлено, что микробиота заводненных нефтепластов представлена исключительно доменом *Bacteria*, на уровне типа (Phylum) преимущественно состоит из представителей *Actinobacteria* и *Proteobacteria*. Показано низкое таксономическое разнообразие микробного сообщества

нефтепластов на уровне класса с доминированием Actinobacteria и Gammaproteobacteria. Установлено, что основную долю бактериального сообщества составляют представители родов *Dietzia* (39,67%) и *Halomonas* (35,17%), что в совокупности составляет более 74% от общего количества идентифицированных последовательностей, остальные роды представлены в меньших количествах: *Janibacter* (3,21%), *Bacillus* (2,12%), *Georgenia* (2,11%), *Arthrobacter* (2,01%) и *Marinobacter* (1,38%).

В целом, таксономическая структура микробного сообщества пластовой воды месторождения «Терен-Узек» согласуется с результатами, полученными в других нефтяных бассейнах, и отражает типичную адаптацию микробиоты к

экстремальным анаэробным с небольшим окислительным потенциалом (следы трёхвалентного железа), термофильным и солевым условиям. Обнаруженные таксоны представляют интерес для дальнейшего изучения в рамках биотехнологических разработок, направленных на повышение нефтеотдачи (МЕОР) и биоразложение загрязняющих соединений.

Источник финансирования

Данное исследование выполнено в рамках финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан Grant No. AP19577160 и BR24992814

Литература

1. Лебедева Е.Г., Челноков Г.А., Харитоновна Н.А. Особенности распределения различных функциональных групп бактерий и их численность в подземных холодных высокоминерализованных водах Приморского края // Успехи современного естествознания. 2018. № 12-1. С. 162-167;
2. Характеристика микробной составляющей подземных вод Республики Хакасия в условиях углеводородного загрязнения / Н. Г. Наливайко, Ю. С. Сыроватко, Е. М. Дутова, Д. С. Покровский // Вестник Томского государственного университета. 2007. № 300 (II). С. 190-193.
3. Kaiyрманова G. K., Tapeshova Sh. Zh., Shaimerdenova U. T., Magmiyayev R. B., Yernazarova A.K. Identification of microorganisms isolated from oil reservoir water of the Akingen field, Kazakhstan. Вестник КазНУ. Серия биологическая – №1 (90). – 2022. – 126-136 с.
4. Head, I. M., Jones, D. M., & Röling, W. F. M. (2003). Marine microorganisms make a meal of oil. *Nature Reviews Microbiology*, 1(3), 225–231.
5. Ж.Д. Дуйсебаев, Б. Т. Кожаметов, Г. А. Парамонова. Современное состояние нефтегазовых объектов прибрежной зоны аккумулятивных равнин северо-восточного прикаспия. Нефть и газ. Известия нан рк. Серия геологическая. 2007. №3. С. 55-63
6. Банзаракцаева Т.Г. Распространение и активность бактерий – деструкторов содовых озерах Забайкалья в зависимости от экологических условий: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Т.Г. Банзаракцаева; Бурят.гос. ун-т. – Улан-Удэ, 2002. – 20 с.
7. ГОСТ 26449.1-85. Методы химического анализа соленых вод.
8. МВИ № 13-2020. Титриметрический метод анализа проб.
9. ГОСТ 23268.11-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Метод определения ионов железа.
10. ГОСТ 23268.16-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения йодид-ионов.
11. ГОСТ 23268.15-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Методы определения бромид-ионов.
12. СТ РК ASTM D 445-2011. Метод определения кинематической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (расчет динамической вязкости).
13. Zhakipbekov M., et al. Hydrogeochemical characteristics of the Tengiz oilfield waters // *KazGeoJournal*. – 2016. – Vol. 2.– P. 71-78.
14. Aitkulov A., et al. Salinity and ionic composition of formation waters in the Caspian basin // *Petroleum Geology of Kazakhstan*. – 2019.
15. Baikenov A.N. Classification of reservoir waters of Kazakhstan oilfields // *Geology and Subsoil Use*. – 2015.
16. Ventosa A., Nieto J.J., Oren A. Halophilic microorganisms in saline environments // *Extremophiles*. – 1998. – Vol. 2, No. 1. – P. 85–90.
17. Muyzer G., Stams A.J.M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // *Nature Reviews Microbiology*. – 2008. – Vol. 6. – P. 441–454.
18. Nazina, T. N., Ivanova, A. E., Borzenkov, I. A., Belyaev, S. S., & Ivanov, M. V. Occurrence and geochemical activity of microorganisms in high-temperature, water-flooded oil fields of Kazakhstan and Western Siberia. *Geomicrobiology Journal*, 1995, 13(3), 181–192.

19. Magot M., Ollivier B., Patel B.K.C. Microbiology of petroleum reservoirs // *Antonie van Leeuwenhoek*. – 1997. – Vol. 77. – P. 103–116.
20. Nazina T.N., et al. Microbial community of formation water from Siberian oilfields // *Microbiology*. – 2006. – Vol. 75, No. 1. – P. 55–65.
21. Назина Т.Н. и др. Микроорганизмы карбонатной нефтяной залежи 302 Ромашкинского месторождения и их биотехнологический потенциал // *Микробиология*. 2013. Т. 82. № 2. С. 191–202.
22. Y.J. Liu, Y.P. Chen, P.K. Jin, X.C. Wang. Bacterial communities in a crude oil gathering and transferring system (China), *Anaerobe*, Volume 15, Issue 5, 2009, Pages 214–218.
23. Tang Y.Q., Li Y., Zhao J.Y., Chi C.Q., Huang L.X., Dong H.P., Wu X.L. Microbial communities in long-term, water-flooded petroleum reservoirs with different in situ temperatures in the Huabei Oilfield, China // *PLoS One*. – 2012. – Vol. 7, No. 3. – e33535.
24. Brakstad O.G., Kotlar H.K., Markussen S. Microbial communities of a complex high-temperature offshore petroleum reservoir // *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. – 2008. – Vol. 1, No. 3.
25. Nakano M, Kihara M, Iehata S, Tanaka R, Maeda H, Yoshikawa T. Wax ester-like compounds as biosurfactants produced by *Dietzia maris* from n-alkane as a sole carbon source. *J Basic Microbiol*. 2011 Oct;51(5):490-8. doi: 10.1002/jobm.201000420. Epub 2011 Mar 24. PMID: 21656811.
26. Venil CK, Malathi M, Devi PR. Characterization of *Dietzia maris* AURCCBT01 from oil-contaminated soil for biodegradation of crude oil. *3 Biotech*. 2021 Jun;11(6):291. doi: 10.1007/s13205-021-02807-7. Epub 2021 May 23. PMID: 34109094; PMCID: PMC8141481.
27. Nazina T.N. *et al.* Microbiological and production characteristics of the Dagang high-temperature heavy oil reservoir during trials of the biotechnology for enhanced oil recovery. *Microbiology (Russian Federation)*, 2017, 86(5), 653–665
28. Gharibzahedi, S.M.T., Razavi, S.H. & Mousavi, M. Potential applications and emerging trends of species of the genus *Dietzia*: a review. *Ann Microbiol*. 64, 421–429 (2014).
29. Hui, L., Ai, M., Han, S. *et al.* Microbial diversity and functionally distinct groups in produced water from the Daqing Oilfield, China. *Pet. Sci.* 9, 469–484 (2012).
30. А. А. Юсупова, М. В. Гируц, Д. С. Вылежанина, Е. М. Семенова, Г. Н. Гордадзе. Образование нефтяных углеводородов-биомаркеров из биомассы бактерий *Halomonas titanicae*, выделенных из нефти Ромашкинского месторождения // *Нефтехимия*, 2022, том 62, № 2, с. 241–247.
31. Т. П. Турова, Д. Ш. Соколова, Е. М. Семенова, А. П. Ершов, Д. С. Груздев, Т. Н. Назина. Геномные и физиологические характеристики галофильных бактерий родов *Halomonas* и *Marinobacter* из нефтяных пластов. *Микробиология*, 2022, Т. 91, № 3, стр. 285–299.

References

1. Aitkulov A., Baikenov A.N., Duisebaev Zh.D., Kozhakhmetov B.T., Paramonova G.A. (2019) Salinity and ionic composition of formation waters in the Caspian basin. *Petroleum Geology of Kazakhstan*.
2. Baikenov A.N. (2015) Classification of reservoir waters of Kazakhstan oilfields. *Geology and Subsoil Use*.
3. Banzaraksaeva T.G. (2002) Rasprostranenie i aktivnost' bakterii-destruktorov v sodovykh ozerakh Zabaikal'ya v zavisimosti ot ekologicheskikh uslovii. *Cand. Biol. Sci. Diss.* Ulan-Ude: Buryatsky Gos. Univ., 20 p.
4. Brakstad O.G., Kotlar H.K., Markussen S. (2008) Microbial communities of a complex high-temperature offshore petroleum reservoir. *Int. J. Oil, Gas Coal Technol.*, vol. 1(3), pp. 264–275.
5. Duisebaev Zh.D., Kozhakhmetov B.T., Paramonova G.A. (2007) Sovremennoe sostoyanie neftegazovykh ob'ektov pribrezhnoi zony akumulativnykh ravnin severo-vostochnogo Priskaspa. *Izv. NAN PK. Ser. Geol.*, no. 3, pp. 55–63.
6. Gharibzahedi S.M.T., Razavi S.H., Mousavi M. (2014) Potential applications and emerging trends of species of the genus *Dietzia*: a review. *Ann. Microbiol.*, vol. 64, pp. 421–429.
7. Head I.M., Jones D.M., Röling W.F.M. (2003) Marine microorganisms make a meal of oil. *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 1(3), pp. 225–231.
8. Hui L., Ai M., Han S. et al. (2012) Microbial diversity and functionally distinct groups in produced water from the Daqing Oilfield, China. *Pet. Sci.*, vol. 9, pp. 469–484.
9. Kайырманова Г.К., Ташешова Ш.Ж., Шаймерденова У.Т., Магмиязев Р.Б., Үернәзарова А.К. (2022) Identification of microorganisms isolated from oil reservoir water of the Akingen field, Kazakhstan. *Vestn. KazNU. Ser. Biol.*, no. 1(90), pp. 126–136.
10. Lebedeva E.G., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. (2018) Osobennosti raspredeleniya funktsional'nykh grupp bakterii v podzemnykh kholodnykh vodakh Primorskogo kraia. *Uspekhi Sovr. Estestvoznaniya*, no. 12–1, pp. 162–167.
11. Liu Y.J., Chen Y.P., Jin P.K., Wang X.C. (2009) Bacterial communities in a crude oil gathering and transferring system (China). *Anaerobe*, vol. 15(5), pp. 214–218.
12. Magot M., Ollivier B., Patel B.K.C. (1997) Microbiology of petroleum reservoirs. *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 77, pp. 103–116.
13. Muyzer G., Stams A.J.M. (2008) The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 6, pp. 441–454.
14. Nakano M., Kihara M., Iehata S. et al. (2011) Wax ester-like compounds as biosurfactants produced by *Dietzia maris* from n-alkane as a sole carbon source. *J. Basic Microbiol.*, vol. 51(5), pp. 490–498.

15. Naliyvaiko N.G., Syrovatko Yu.S., Dutova E.M., Pokrovskiy D.S. (2007) Kharakteristika mikrobnoy sostavlyayushchey podzemnykh vod Respubliki Khakasiya v usloviyakh uglevodorodnogo zagryazneniya. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ.*, no. 300(II), pp. 190–193.
16. Nazina T.N., Ivanova A.E., Borzenkov I.A., Belyaev S.S., Ivanov M.V. (1995) Occurrence and geochemical activity of microorganisms in high-temperature oil fields of Kazakhstan and Western Siberia. *Geomicrobiol. J.*, vol. 13(3), pp. 181–192.
17. Nazina T.N. et al. (2006) Microbial community of formation water from Siberian oilfields. *Microbiology*, vol. 75(1), pp. 55–65.
18. Nazina T.N. et al. (2017) Microbiological and production characteristics of the Dagang heavy oil reservoir during biotechnology application. *Microbiology*, vol. 86(5), pp. 653–665.
19. Nazina T.N., Sokolova D.Sh., Semenova E.M., Ershov A.P., Gruzdev D.S., Turova T.P. (2022) Genomic and physiological characteristics of halophilic bacteria *Halomonas* and *Marinobacter* from oil reservoirs. *Mikrobiologiya*, vol. 91(3), pp. 285–299.
20. ST RK ASTM D 445–2011. (2011) Metod opredeleniya kinemacheskoy vyazkosti zhidkostey (raschet dinamicheskoy vyazkosti).
21. Tang Y.Q., Li Y., Zhao J.Y. et al. (2012) Microbial communities in long-term, water-flooded petroleum reservoirs with different in situ temperatures. *PLoS ONE*, vol. 7(3), e33535.
22. Venil C.K., Malathi M., Devi P.R. (2021) Characterization of *Dietzia maris* AURCCBT01 from oil-contaminated soil. *Biotech*, vol. 11(6), Art. 291.
23. Ventosa A., Nieto J.J., Oren A. (1998) Halophilic microorganisms in saline environments. *Extremophiles*, vol. 2(1), pp. 85–90.
24. Yusupova A.A., Giruts M.V., Vylekzhanina D.S., Semenova E.M., Gordadze G.N. (2022) Formation of hydrocarbon biomarkers from biomass of *Halomonas titanicae*. *Neftekhimiya*, vol. 62(2), pp. 241–247.
25. Zhaksebekov Zh.D., Kozhakhmetov B.T., Paramonova G.A. (2007) Sovremennoe sostoyanie neftegazovykh ob'ektov Prikaspiya. *Izv. NAN RK. Ser. Geol.*, no. 3, pp. 55–63.
26. Zhakipbekov M., et al. (2016). Hydrogeochemical characteristics of the Tengiz oilfield waters. *KazGeoJournal*, 2, 71–78.
27. GOST 23268.11–78. (1978) Vody mineral'nye. Metod opredeleniya ionov zheleza.
28. GOST 23268.15–78. (1978) Vody mineral'nye. Metod opredeleniya bromid-ionov.
29. GOST 23268.16–78. (1978) Vody mineral'nye. Metod opredeleniya iodid-ionov.
30. GOST 26449.1–85. (1985) Metody khimicheskogo analiza solyonykh vod.
31. MVI No. 13–2020. (2020) Titrimetricheskyy metod analiza prob.

Информация об авторах:

Кайырманова Гульжан Кайыржановна – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: kайyрман@mail.ru.)

Асылбек Әлішер Ерланұлы – магистр, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: alisherasilbek162@gmail.com.)

Ерназарова Алия Кулахметовна – кандидат биологических наук, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: aliya.yernazarova@kaznu.edu.kz)

Шаймерденова Ұлжан Тұрғанбекқызы – PhD студент, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: shaimerdenovau@gmail.com.)

Нурканова Альмира Жанатовна – магистрант, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: almmmnur@gmail.com)

Information about authors:

Kaiyrmanova Gulzhan Kaiyrzhanovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kaiyrman@mail.ru)

Asylbek Alisher Yerlanuly – Master's Degree Holder, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: alisherasilbek162@gmail.com)

Yernazarova Aliya Kulakhmetovna – Candidate of Biological Sciences, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aliya.yernazarova@kaznu.edu.kz)

Shaimerdenova Ulzhan Turganbekkyzy – PhD Student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: shaimerdenovau@gmail.com)

Nurkanova Almira Zhanatovna – Master's Student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: almmmnur@gmail.com)

Поступило 6 марта 2025 года

Принято 20 мая 2025 года