

Н.Е. Төлеген<sup>\*</sup>, Д.Ф. Оңдасынова, Қ. Бахытұлы, А.А. Ибатова

*Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*  
*\*Хат-хабарларға арналған автор: nurkhanymt@gmail.com*

## **Батыс Қазақстан кен орындарының мұнайпласт суларынан оқшауланған микроорганизмдердің таксономиялық әртүрлілігін шетелдік мұнай кен орындарымен салыстыру**

Мақалада әртүрлі мұнай кен орындарының мұнайпласт суларынан оқшауланған микроорганизмдер сипатталған, олар микробтық мұнай бергіштікті арттыру (MEOR) әдістерін зерттеудің негізгі объектілері болып табылады. Микроорганизмдер мұнайды алу үшін потенциалды пайдалы бірқатар метаболиттерді (биомасса, биосурфактанттар, биокышқылдар, биоеріткіштер, биополимер, биогаз) бөліп шығарады. Бұл метаболиттер мұнайдың тұтқырлығын және беттік белсенді зат ретінде мұнай мен су арасындағы фазааралық үйкелісті азайтуға, оның кеуектілігі мен өткізгіштігін арттыруға көмектеседі. Сонымен қатар үш белсенді «Жетібай», «Құлсары» және «Ақінген» кен орындары ұңғымаларының және бірнеше жыл бойы әлемнің әртүрлі мұнай кен орындарының мұнайпласт сулары микроорганизмдерінің таксономиялық биоәртүрлілігі туралы баяндалған. Мұнай микроорганизмдерінің маңызы, оларды зерттеу, MEOR процестерінің маңызы, халықаралық және Батыс Қазақстан мұнайпласт суларынан оқшауланған мұнай микробтарын өзара салыстыру және осы микроорганизмдердің болашағы туралы мәліметтер жинақталған. Сондай-ақ мақалада *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp. сияқты қоршаған ортаның қолайсыз өзгерістеріне қарсы, иммунитеті жоғары микроорганизмдер туралы ақпарат берілген. Бұл түрлер беттік белсенді заттар, газдар, спирттер, қышқылдар және биополимерлер бөліп шығарады. Батыс Қазақстандағы мұнай кен орындары микроорганизмдерінің таксономиялық биоалуантүрлілігінің ұқсастығы және олардың келешегі, сонымен қатар алыс елдердің мұнай кен орындарындағы микроағзаларды MEOR процестерінде пайдалану талқыланған.

*Кілт сөздер:* микробтық мұнай бергіштікті арттыру, MEOR, микроорганизмдер, мұнайпласт суы, таксономиялық әртүрлілік, мұнай кен орны, биотехнология.

### *Kіpіcne*

Қазақстан мұнай мен газ өндіру бойынша ең экстравагантты Батыс, Араб және басқа да елдермен бір деңгейде, сонымен қатар көмірсутегі шикізатын өндіру бойынша әлемдік жиырма ірі өндірушілер мен елдердің қатарында болып табылады.

Өзімізге белгілі Қазақстан қазіргі таңда кеш даму кезеңін бастан өткеруде. Еліміздің кен орындарының өндірісі сусыздандырудың 80–90 % жоғары деңгейінде, ал игерілмеген мұнай қорының ұңғымаларда қалған көлемі 60–70 %-ға жетеді. Осыған байланысты мұнайды қалпына келтірудің үшінші реттік әдістерін қолдану — мұнайдың табиғи ресурстарын ұтымды пайдалануға және қосымша мұнай өндіруден экономикалық нәтиже алуға мүмкіндік береді [1].

Үшіншілік әдістер немесе MEOR — бұл қабат қысымын жасанды түрде ұстап қана қоймай, сонымен қатар ығыстырушы агенттердің қасиеттерін немесе қабаттағы мұнайдың қасиеттерін өзгертетін әдістер болып табылады. Осылайша, біз қабаттан мұнай алу дәрежесін арттыруды қамтамасыз етеміз. Қазіргі уақытта мұнайды қалпына келтіру әдістерінің бұл топтары өнеркәсіптік ауқымда жеткілікті түрде игеріледі және қолданылады. Мұнайды жоғарылатудың бұл әдістері салыстырмалы түрде төмен капитал сыйымдылығымен, жоғары тиімділігімен және экологиялық қауіпсіздігімен назар аудартады.

Бұл бағытта дәстүрлі әдістермен қомақты қалдық мұнай қорын өндіру мүмкін болмайтын, тіпті қазірдің өзінде игерілген қабаттардың мұнай беруін арттыруға мүмкіндік беретін жаңа технологияларды әзірлеу мәселесін шешу маңызды. Сонымен бірге, экологиялық көрсеткіштер тұрғысынан көмірсутектермен ластанған әртүрлі орталарды тазартудың ең перспективалы жолы микробтық биопрепараттарды қолдануға негізделген биотехнологияларды қолдану болып табылады. Бұл биопрепарат технологиясының негізгі мәні — ластанған объектіге сырттан көмірсутекті қышқылдандыратын тірі микроорганизмдердің белсенді биомассасы енгізіледі, олар көмірсутектерді тек қоректену көзі ретінде пайдаланады және сонымен бірге табиғи экожүйелердің тұтастығы

қалпына келеді. Сонымен қатар, микробқа негізделген тазартқыштар *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Bifidobacterium*, *Saccharomyces* and *Rhodopseudomonas* сияқты микроорганизмдердің белгілі бір комбинациясын қамтиды [2].

Экологиялық мәселелерді биологиялық әдіспен шешудің маңызды процестерінің бірі мұнаймен ластанған суларды тазарту. Мұнаймен ластанған су — 99,9 % судан және 0,1 % қатты заттан тұратын және адамның шаруашылық және өнеркәсіптік қызметінде пайдаланылғаннан кейін ағызылатын су болып табылады [3]. Дүние жүзіндегі өндірілетін өнеркәсіптік және тұрмыстық ағынды сулардың көлемі жыл сайын 700 млрд м<sup>3</sup> жетеді [4]. Қазіргі кезде мұнай микроорганизмдері мен олардың бірлестіктерінің таусылмайтын зат алмасу потенциалының арқасында адам әртүрлі мақсаттарда, соның ішінде экологиялық мәселелерді шешуде пайдаланады. Осы мәселелерді шешуде биотехнологияның әлеуеті барған сайын маңызды бола түсуде.

Дүниежүзінің мұнай және мұнай өнімдері өнеркәсібі мұнай көмірсутектерін алу үшін көмірсутекті тотықтырғыш микроорганизмдер бірлестігінің биопрепараттарын кеңінен пайдаланады. Бұл көмірсутектер ең қауіпті, өте тез ыдырайтын және таралатын мұнай ластағыштары болып саналады [5]. Сондықтан мұндай мәселелерді шешуде мұнай тотықтырғыш микроорганизмдерді зерттеу өте маңызды және қазіргі заманның өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. Көмірсутектерді тотықтыратын белсенді микроорганизмдер көмірсутектерді пассивті диффузия арқылы ғана сіңіреді, ол субстратты орта затпен қаныққанда ғана ыдыратуы мүмкін. Сонымен бірге, *Pseudomonas* бактерияларының туысы экожүйедегі мұнай өнімдерінің тотығуында маңызды рөл атқарады [6]. *Pseudomonad* туысының көмірсутекті жоғары тотықтырғыш қабілеті тіпті, аэробтық жағдайларда, оттегінің аз мөлшерінде және оларды мұнаймен ластанған топырақ пен суды өңдеуде қолдануға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта биопрепараттар мен оларды қолдану технологияларының кең спектрі белгілі. Өнімдердің әрекеті мұнай және мұнай өнімдеріне қатысты микроб культураларының жоғары тотықтырғыш қасиеттеріне негізделген. Отандық және шетелдік тәжірибе нәтижесінде ластанған жерлерді тазарту және рекультивациялау үшін биопрепараттар әзірленді. Мысалы, Naftox өнімі ластанудың жоғары деңгейінде мұнайды ыдырату мүмкіндігін көрсетті. Бұл ретте ресейлік ғалымдар препараттың екі жаңа түрін әзірледі. Олар: Naftox 12-P, онда *Pseudomonas aeruginosa* тотықтырғыш бактерия ретінде пайдаланылса, екіншісі Naftox 48-U-де *Pseudomonas citronellolis* белсенді бактерия ретінде оқшауланған [7]. Сонымен қатар, қоршаған ортаны қалпына келтіруде микроорганизмдер негізіндегі «Путидойл», «Биодestructor», «Ногги» сияқты биопрепараттар тиімді қолданылады. Дегенмен, микроорганизмдердің жаңа түрлерін енгізген кезде, микробтық флораның тіршілік әрекетіне шешуші әсер ететін: топырақ түзілудің табиғи жағдайларын және топырақ типтерін ескеру қажет.

Қазақстан ғалымдары мұнай мен мұнай өнімдерінің 31–36 % ыдырататын «Мұнайбак» биопрепаратын да жасап шығарды [8]. Көмірсутектерді бұзатын микроорганизмдерден тұратын осы алуан түрлі микробтық препараттарды пайдалану — табиғи экожүйелерді мұнай мен мұнай өнімдерінен тазартудың маңызды биотехнологиялық әдістерінің бірі ретінде қолданылады. Қоршаған ортада мұнай көмірсутектерін ыдырату үшін микроорганизмдердің көптеген түрлері, соның ішінде: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Flavobacterium*, *Rhodacoccus*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Mycobacterium*, *Nocardia* және *Candida* қолданылады. Мұнайды қалпына келтірудің микробиологиялық әдістерін Titan Oil Recovery, Glori Energy together, Statoil, Total, Du Pont, Chevron компаниялары қолданады.

Ресейлік компаниялардың ішінде «Татнефть» микробиологиялық әдістерді белсенді түрде пайдаланады. Бұл ретте мұнайды қалпына келтіруді жоғарылатудың бұл әдістерін қолдану географиясы кең, атап айтсақ: АҚШ, Канада, Бразилия, Болгария, Әзірбайжан, Румыния, Германия, Ресей. Сондай-ақ Шығыс Азияда Қытай, Малайзия, Үндістан және Индонезия сияқты елдерде пилоттық сынақтар жүргізілді [9].

Жыл сайын барлық әлемде мұнай өндірудің жетілдірілген әдістеріне қызығушылық артып келеді, кен орындарын игерудің тиімді технологияларын таңдаудың ғылыми негізделген тәсілін табуға бағытталған зерттеулер әзірленуде.

ҚР Энергетика министрлігі мамандарының айтуынша, қазір мұнайдың 70 %-ға жуығы ішімізде қалып отыр, ал Норвегияда бұл көрсеткіш 50 %-дан аспайды. Мұнай өндірудің жаңа әдістерін кеңінен қолдану өндірілетін қорларды кем дегенде 15–20 %-ға арттырады [10].

Б. Жұмағұловтың есептеулері бойынша, Қазақстанда бар өндіру көлемдерімен мұнай өндіруді кемінде 1 %-ға арттыру жаңа ірі мұнай кен орнын пайдалануға берумен қатаң сәйкес келеді [11, 12].

Қазіргі уақытта мұнайды өндірудің 40–70 %-ға дейін жетуі мүмкін үшінші реттік күшейтілген әдістерін ExxonMobil, Royal Dutch Shell, Chevron, Conoco Phillips, Occidental Petroleum, Anadarko, Petrobras, Wintershall және ТРАО сияқты компаниялар қолданады. Түрлі технологиялар Египетте, Бразилияда, Индонезияда, Нидерландыда сынақтан өтті. Ал егер бұл үдеріске біздің мұнай компаниялары араласпаса, Қазақстан инновациялық технологияларды пайдалану жағынан басқа елдерден қалып қою қаупі бар [13].

Сондықтан алдағы уақытта ынтымақтастықты кеңейтіп, мұнай өндірудің жаңа әдістерін қолдануда шетелдік әріптестердің тәжірибесін алу қажет. Өйткені, болашақта мұнай мен газ өндірудің ішкі стратегиясы мұнай беру коэффициентін арттыру шаралары аясында жүзеге асырылуы тиіс. Еліміз мұнай қасиеттерінің, қабаттарының және аумақтық ерекшеліктерінің кең спектрі бар ресурс иелерінің қатарында. Осылайша, Қазақстанда мұнай өндіруді арттырудың әлеуеті әлі таусылған жоқ. Және бұл тұрғыда бізді бүкіл әлемдік мұнай қауымдастығының тәжірибесі қызықтырады.

#### *Батыс Қазақстан кен орындарының мұнай қабаты суларынан оқшауланған микроорганизмдер*

Микроорганизмдерді қолдану арқылы қалдық мұнай өндіру олардың физиологиялық және биохимиялық ерекшеліктерін мақсатты түрде пайдалануға негізделген. Бұндай ерекшеліктерге микроағзалардың температураның, қысымның, судың тұздылығының кең диапазонында, оттекті және оттегісіз жағдайда өсу қабілеті, көбею мен тіршілік үшін әртүрлі қоректік және энергия көздерін:  $H_2$ ,  $CO_2$ -ден мұнайға дейін пайдалану қабілеті жатады. Сондай-ақ олар әртүрлі метаболиттер түзе алады: газдар ( $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ), органикалық және май қышқылдары, еріткіштер, беттік белсенді заттар, ферменттер, әртүрлі полимерлер, соның ішінде полисахаридтер [14].

А.К. Ерназарова және оның командасының ғылыми-зерттеу жұмыстары бойынша аэробты және анаэробты жағдайларда мұнайды сұйылту және ығыстыру қасиеттері бар микроорганизмдердің штамдарын таңдау жұмыстары жүргізілді. Су айдау нәтижесінде консервацияланған «Ақінген» кен орнының мұнай қабаты суларынан оқшауланған микроорганизмдердің 31 штамы бөлініп, анықталды [15]. «Ақінген» мұнай кен орны Батыс Қазақстанның Атырау облысында, Құлсары қаласынан 40 шақырым жерде орналасқан. Кен орны 1980 жылы ашылды, игеру 1992 жылдың 1 қыркүйегінде басталды, қазіргі уақытта кеш игеру сатысында.

Игерілген және консервацияланған «Ақінген» кен орнының мұнай суынан оқшауланған, зерттелген микроорганизмдердің 31 штамынан кемінде екі мақсатты қасиетінің сәйкес келуімен (мұнай эмульсиясы, қышқыл түзілу, газ түзілу) келесі 16 микроорганизм штамы таңдалды. Бұл «Ақінген» кен орнының игерілген мұнай суларынан бөлінген бактериялардың 16 штамының генінің 16S рРНҚ фрагментінің тікелей нуклеотидтер тізбегін анықтау нәтижесінде барлық штамдар *Bacillus* және *Pseudomonas* тектеріне жатқызылды: *Bacillus paramycoides*, *Bacillus safensis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus haynesii*, *Bacillus paralicheniformis*, *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* subsp. *Spizizenii*, *Pseudomonas aeruginosa* [15].

16 штам арасындағы антагонистік байланыстарды зерттеу негізінде микроорганизмдердің келесі 5 штамы таңдалды: *P. aeruginosa* D5 — мұнай эмульгаторы, қышқыл түзуші, газ түзуші, *P. aeruginosa* D6 — мұнай эмульгаторы, қышқыл түзуші, газ түзуші, *Bacillus* sp. D1X — мұнай эмульгаторы, газдандырғыш, *B. licheniformis* SR1 — қышқылдандырғыш, газдандырғыш (анаэробты жағдай) және *B. licheniformis* CL1 — қышқылдандырғыш, газдандырғыш (анаэробты жағдай) [15].

2019 жылы зерттелген басқа жұмыстарға сәйкес «Жетібай» және «Құлсары» кен орындарындағы мұнай қабаты суларының үлгілерінен микроорганизмдердің 33 культурасы бөліп алынды. Микроорганизмдердің 33 культурасынан — 15 культура «Құлсары» кен орнының мұнай қабаты суларынан және «Жетібай» кен орнының үлгілерінен 18 микроорганизмдер культурасы бөлініп алынды [16]. Жұмыс істеп тұрған мұнай кен орындарының мұнай суларынан оқшауланған микроорганизмдер культуралары мұнай беруді жоғарылатудың биотехнологиялық әдістерін дамытудың перспективалық объектілері болып табылады.

Олар Батыс Қазақстанның мұнай шламынан бөлінген көмірсутекті тотықтырғыш микроорганизмдердің коллекциялық дақылдары арасында мұнай және гексан биоэмульгаторларын өндіруші микроорганизмдерді іздестірді: *Pseudomonas mendocina*, *Ps. aerogenosa*, *Bacillus* ssp., *Ps. ssp.* Субстраттар мен мұнайдың n-алкандарынан биосурфактанттарды түзетін аэробты мезофильді

бактериялардың алуан түрлілігі арасында көбінесе *Bacillus* және *Pseudomonas* тектес бактериялар болатыны белгілі болды [17, 18].

Микроорганизмдердің морфологиялық және дақылдық ерекшеліктерін зерттеу олардың тұқымдастығын анықтауға мүмкіндік берді, солайша микромицеттердің 4 дақылы *Candida* тұқымдасына, ал 29 бактерия дақылының ішінде: 18-і *Bacillus* тұқымдасының өкілдері, 6 дақылы *Pseudomonas* тұқымдасына және 5 дақылы — *Rhodococcus* тұқымдасына жататындығы анықталған [16].

«Құлсары» және «Жетібай» кен орындарының мұнай қабаты суларының аэробты микроорганизмдерінің осы экожүйелер үшін экологиялық маңызы бар екендігі көрсетілген, өйткені олардың саны көп, бұл олардың белсенді тіршілік әрекетін көрсетеді — сәйкесінше  $25,1 \times 10^6$  жасуша/мл және  $1,8 \times 10^6$  жасуша/мл., ал «Жетібай» сынамаларында анаэробты микроорганизмдер саны  $0,38 \times 10^5$  (колония түзуші бірлік) КТБ/мл, ал «Құлсары» үлгілерінде —  $0,5 \times 10^2$  КТБ/мл әлдеқайда аз [16].

Сонымен, микробтық күшейтілген мұнай өндіру саласында ілгерілеу үшін мұнай қабатында болатын микрофлораны түсіну және зерттеу маңызды. Мұнай қабаттарындағы микробтарды анықтау үшін культура негізіндегі типтік әдістер кеңінен қолданылады. Арнайы культуралық техникадағы шектеулерге байланысты тек біршама микроорганизмдерді тауып, оқшаулауға болады. Екінші жағынан, мұнай қабаттары сияқты экстремалды орталарда жағдай тіпті қиындайды, мұнда тек қолайсыз жағдайларға қарсы тұра алатын микроорганизмдер ғана өмір сүреді. Дегенмен, бүгінгі күні геномдық талдау сол ортаның биоәртүрлілігін көрсетудің жақсы құралы болып табылады. Ол зертханалық өсіру және жеке изоляттарды оқшаулау қажеттілігін жоққа шығарады [19]. Тұтастай алғанда, мұнай қабаттары улылығы жоғары, судың белсенділігі төмен, гидрофобты, жоғары температура, қысым және тұздылықтан тұратын микроорганизмдер үшін экстремалды орта екені белгілі. Алайда, қоймада қолайлы қоршаған орта жағдайлары пайда болғаннан кейін инъекцияланған микробтар белсенді түрде өсіп, олардың зат алмасу өнімдері мұнай қалдықтарын мобилизациялайды. Осыған қарамастан, бұл орта микроорганизмдердің әр түрлі түрлерінің, соның ішінде архейлердің, бактериялардың және метаногендердің тіршілік ету ортасын ұсынады [20].

*Алыс елдердегі кен орындарының мұнай қабаты суларынан оқшауланған микроорганизмдер*

Мұнай цистерналарындағы микробтардың тіршілігі бірнеше стресс факторлары бар қиын жағдайларға тап болады. Осы тұста микробтық биофильмдер табиғатта кең таралған және жер бетіндегі өмір сүрудің ең сәтті стратегияларының бірі болып табылады. Оған дәлел Кувейт шөліндегі мұнайлы көлі: аэробтық жағдайларда шикі мұнайдың болуы немесе теңіз суында цианобактериялармен микробтық төсеніштердің түзілуі арқылы биофильмдердің пайда болуы көрсетілген [21].

Микробтардың өсуіне температура, тұздылық және рН сияқты абиотикалық факторлар да әсер етеді. Кейбір бактериялар тек  $50^\circ\text{C}$  жоғары температурасы бар мұнай қоймаларында өмір сүре алады: *Nitrospira*, *Atribacteria* және *Acidobacteria*. Ал Гаммапротеобактериялардың көпшілігі мұнай қабаттарында  $50^\circ\text{C}$ -тан жоғары температурада көбірек салыстырмалы таралу көрсеткішін көрсетті.  $50^\circ\text{C}$  төмен мұнай қоймаларында *Spirochaetes*, *Synergistetes*, *Chloroflexi*, *Marinobacterium*, *Paracoccus*, *Donghicola* және *Planctomycetes* сияқты басқалары табылды. Сондай-ақ  $70^\circ\text{C}$ -тан жоғары мұнай қабаттарында өмір сүре алатын *Thermococcales* және *Archaeoglobales* сияқты термофильді организмдер бар. Жалпы алғанда, мұнай қабаттарындағы көмірсутектердің ыдырауы үшін қажетті ең жоғары температура  $82^\circ\text{C}$  шамасында болып саналады. Қытайдың 22 түрлі мұнай қоймаларында жүргізілген зерттеу жұмысы *Alphaproteobacteria*, *Deltaproteobacteria* және *Actinobacteria* рН мәндері 7,0–8,2, ал *Pseudomonas* 5,5–7,6 аралығында өсетіндігін көрсетті. *Gammaproteobacteria* және *Betaproteobacteria* сияқты басқалары қышқылды ортада (рН мәндері 5,5–6,5 арасында) жиналады [21].

Температураның, рН мен тұздылықтың өзгеруіне байланысты микробиотаның дифференциалануынан басқа, мұнай кен орындарының орналасуы да маңызды рөл атқарады. Әрбір мұнай кен орнындағы микроорганизмдердің әртүрлілігі әдетте бір-бірінен ерекшеленеді. Оның тамаша мысалы Бразилиядағы Потигуар бассейнінен алынған биоыдыраған (GMR75) және биоыдырамайтын (PTS1) жерүсті майларымен жүргізілген зерттеу болады. Осы жұмыстың нәтижесінде екі үлгінің 16S рРНҚ гендік кітапханалары олардың арасындағы үлкен айырмашылықтарды көрсетті. Мысалы, GMR75 үлгісі *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Deferribacteres*, *Spirochaetes*, *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Thermotogae* және *Synergistete* сияқты 8 туыс микроорганизмдерін қамтыса, PTS1 үлгісі *Actinobacteria*, *Prochlorofutemoir*, *Flaorobacteria*, *Pholorofutes* сияқты 5 туыстың микроорганизмдері жатады [22].

Р.Х. Беккер, Ю.А. Гуторов және А.М. Гареевтің Волга-Орал аймағының мұнай қабаттарында MEOR пайдалану мүмкіндіктері туралы зерттеулеріне сәйкес, біз АҚШ, Шығыс Германия, Венгрия, Польша, Ресей және басқа елдерде әр уақытта жүргізілген осы аймақтың болашағын көрсететін MEOR тәжірибелік-өнеркәсіптік жұмыстары туралы біле аламыз [23]. Сонымен қатар, бұл зерттеу мұнай өндіруді арттыру үшін микробты ынталандырудың екі нұсқасын көрсетеді: дайындалған микробиологиялық культура мен резервуар культурасын қолдану. Олар EOR екі әдісінің артықшылықтары мен кемшіліктерін талдады. Сондай-ақ, 1969 жылы Чехословакияда мұнай қабатын микробиологиялық өңдеуден кейін мұнай өндірудің 6,68 пайызға өскені туралы хабарланды. 1964-1976 жылдары Польшадағы мұнай кен орындарының 20 ұңғымасында әртүрлі микробиологиялық тәсілдер өнеркәсіптік бағаланды. Бактериялық өңдеу арқылы ұңғымадан 2–8 жыл ішінде 200 процент мұнай өндірудің өсіміне жетуге болатындығы көрсетілді. Сонымен бірге өндірілген мұнайдың физика-химиялық қасиеттерінің біршама жақсаруы байқалды. Гидравликалық бұрғылаудың микроағзалық өңдеумен үйлесуі оң нәтиже берді [23]. *Clostridium* және *Bacillus* тектес микроорганизмдер өнеркәсіптік микробиологиялық технологияларда сәтті қолданылады. Бұл туыстың өкілдері спора түзілу қабілетіне байланысты айтарлықтай әлеуетке ие. Олар мұнай резервуарларына микроорганизмдерді инъекциялауда сөзсіз туындайтын қоршаған ортаның қолайсыз өзгерістеріне төзімді. *Clostridium* туысы беттік белсенді заттар, газдар, спирттер мен қышқылдар шығарады, ал *Bacillus* туысы беттік белсенді заттар, қышқылдар мен биополимерлер шығарады [23].

Сондай-ақ, Татарстанда мелассаны айдау бойынша пилоттық сынақтар 2002–2004 жылдары «Ромашкин 302» Башкұрт кен орнында жүргізілгені атап өтілді. Бұл әдістің технологиялық тиімділігі 1 тонна айдалған мелассаға 4,58 тонна қосымша алынған мұнай болды. Бұл деректер MEOR-ды тиімді және мұнай өндіруде маңызды әлеуетке ие екенін түсінуге көмектеседі [23].

Сонымен қатар, А.В. Мاستин 2016 жылы «Микробиологиялық әдістерді қолдана отырып, қабаттардың мұнай беруін арттыру» атты жұмысында MEOR туралы баяндап берді. Мұнай өндіруді арттырудың микробиологиялық әдістері су айдау арқылы резервуарды толтырып, резервуарлардың мұнай беру коэффициентін арттыруы мүмкін делінген. Автор сонымен қатар бұл жүйенің технологиясы жоғарыда айтылғандай, су басу тиімділігі төмен орта және кеш сатыдағы мұнай кен орындарындағы айдау ұңғымаларына микроорганизмдердің биомассасын айдау әдісіне негізделгенін атап өтті. Бұл әдістің құрылымы бірқатар микробиологиялық, физика-химиялық және гидродинамикалық процестерден тұрады. Ыдыраған құрылымдарға енгізілген микробтық су жақсы қамтылған жерлерде инъекцияланған микроорганизмдер таралады, өседі, қалдық мұнайдың өткізгіштігін төмендетеді және тіпті өткізгіштігі нашар аймақтардың пайда болуына әкеледі. Сонымен қатар, көмірқышқыл газы, метан сияқты осы процестердің газ тәрізді компоненттері резервуар суларына қатты әсер етеді, осылайша қалдық мұнайдың ығысу коэффициентін арттырады [24].

Биосурфактанттарды алу процесі *in situ* мұнай өндіруді микробиологиялық арттыру процесінде әдетте үлкен энергия шығынын қажет етпейді және шикі мұнайдың әлемдік бағасына тәуелді емес [20].

Соңғы бірнеше жылда биологиялық беттік-белсенді қосылыстарға немесе биосурфактанттарға қажеттілік артып келеді, оларды көптеген микроорганизмдер шығарады, өйткені олар биологиялық ыдырау қабілетіне ие, уыттылығы төмен және химиялық беттік-белсенді заттармен салыстырғанда кеңінен қолданылады. Оларды эмульгаторлар, деэмульгаторлар, суландырғыштар, жеткізу агенттері, көбіктендіргіштер, жуғыш заттар және тағамдық қоспалар ретінде пайдалануға болады. Құмды тіректердегі зертханалық масштабтағы әртүрлі эксперименттер және далалық сынақтар MEOR-да биосурфактанттардың тиімділігін сәтті көрсетті [25].

MEOR-дің жетістігі көбінесе жергілікті микробтардың түрлері мен сипаттамаларына байланысты. «Май Сун» су қоймасында, ағынның жылдамдығы төмендейтін мұнай резервуарында жүргізілген зерттеуде резервуарлық бактериялардың биосурфактанттар түзуге қабілеттілігі зерттелді және рРНҚ-ның 16S Метагеномика гендерінің мәліметтер жиынтығы негізінде MEOR-мен байланысты функционалды гендерді болжау арқылы мәдени емес жергілікті бактериялардың MEOR-ды қолдау мүмкіндігі бағаланды. Бір туыс резервуардағы мұнай құм тастарынан алынған биосурфактант бактерияларына тиесілі болды: *Bacillus licheniformis*, олар беттік керілуді 72-ден 32 мН/м-ге дейін төмендетуі мүмкін. Бұл изоляттарда биосурфактант (licA 3), липаза (lipP1) және катехол 2,3-диоксигеназаға жауап беретін гендердің тізбегі табылды. Еноил-КоА гидратаза және алкан-1-моноксигеназа сияқты MEOR-пен байланысты функционалды ақуыздарды кодтайтын соңғы екі және басқа гендер формациялық құмтастарда өмір сүретін бактерия популяцияларында күтілді.

Бұл құмтастардың  $\text{KNO}_3$  және  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ -тен тұратын қоректік заттарға әсері кейбір функционалды гендер үлесінің күтілетін өсуіне әкелді. Осы зерттеуде көрсетілген тәсілдерді пайдалану сонымен қатар тиісті қоректік заттарды өңдеу арқылы жақсартуға болатын мұнай қабаттарында MEOR пайдаланудың орындылығын бағалауға көмектеседі [26].

*Actinobacteria*, *Fusobacteria*, *Nitrospira*, *Pseudomonadales* және *Thermodesulfobacteria*, ал су фазасынан: *Alphaproteobacteria*, *Atribacteria*, *Bacterioidetes*, *Betaproteobacteria*, *Campylobacteriales*, *Chloroflexi*, *Synergistetes* және *Thermotogae* табылды [27].

Мұнай қабаттарының микробтық қауымдастықтары жердің ежелгі және экстремалды биоценоздары ретінде жіктеледі, сондықтан мұнай қабаттарының микроорганизмдері биотехнологиялық әлеуетке ие, атап айтқанда, игерудің кейінгі кезеңінде игерілген кен орындарының қайталама мұнай беруін арттыру үшін биотехнологияны дамыту үшін маңызды.

#### Қорытынды

Зерттеу көрсеткендей, Батыс Қазақстан кен орындарындағы мұнай микроорганизмдері ұқсас таксономиялық әртүрлілікке ие, ал бүкіл әлем бойынша одан бірнеше есе көп түрлері бар.

Салыстыру барысында Батыс Қазақстанның мұнай кен орын суларында және әлемнің көптеген басқа мұнай өндіретін аймақтарында микроорганизмдердің мына топтары бар екендігі анықталды: споралы микроорганизмдер, микромицеттер, псевдомонадтар және *Bacillus* тұқымының өкілдері. Керісінше, сирек кездесетін *Bacillus paramycooides*, *Bacillus safensis*, *Bacillus haynesii*, *Bacillus paralicheniformis*, *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* subsp. *Spizizenii* Батыс Қазақстандағы мұнай кен орындарында, сондай-ақ әлемнің тек бірнеше елінде табылды. Алайда, Батыс Қазақстанның мұнай суларынан бөлінген микроорганизмдер бір-бірімен көптеген қауымдастықтар құрып, мұнай өндіруді ұлғайта алатындығы да дәлелденген.

Жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, микроорганизмдердің бұл дақылдары дәстүрлі әдістермен мұнайдың қалдық қорларын алу мүмкін болмайтын, қазірдің өзінде игеріліп жатқан қабаттардың қайталама мұнай беруін арттыру технологиясын құру үшін әлеуетті перспективалы биологиялық объектілер ретінде мақсатты қасиеттерді одан әрі зерттеуді қажет етеді.

Жақын болашақта әртүрлі мұнай қорларында кездесетін микроорганизмдердің барлық түрлерін анықтауға болады. Нәтижесінде мұнай тез және оңай өндірілу мүмкіндігіне ие. Осыған байланысты тереңірек көптеген ізденістер қажет. Мұндай жаңа зерттеу Қазақстанды мұнай өндіру көлемі бойынша көшбасшы ретінде танытуға мүмкіндік беретіні сөзсіз.

#### Әдебиеттер тізімі

- 1 Мурзаков Б.Г. Экологическая биотехнология для нефтегазового комплекса (теория и практика) / Б.Г. Мурзаков. — М.: Моск. гос. ун-та, 2005. — С. 76–88.
- 2 Spök A. Status of Microbial Based Cleaning Products in Statutory Regulations and Ecolabelling in Europe, the USA, and Canada / A. Spök, G. Arvanitakis, G. McClung // J. Food and Chemical Toxicology. — 2018. — Vol. 116. — P. 10–19.
- 3 Samer M. Biological and Chemical Wastewater Treatment Processes / M. Samer // Wastewater Treatment Engineering. — 2015. — Chapter 1. — P. 15–19.
- 4 Ручай Н.С. Экологическая биотехнология / Н.С. Ручай, Р.М. Маркевич. — Минск: Беларус. гос. технолог. ун-т, 2006. — 312 с.
- 5 Kuyukina M.S. Rhodococcus biosurfactants: biosynthesis, properties, and potential applications / M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina // In Biology of Rhodococcus. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. — P. 29.
- 6 Ambrazaitiene D. Biodegradation activity in the soil contaminated with oil products / D. Ambrazaitiene, A. Zukauskaitė, V. Jakubauskaitė, R. Reikaite, M. Zubrickaitė, D. Karcauskiene // Biology, Environmental Science. — 2013. — Vol. 100 (3). — P. 235–242.
- 7 Рогозина Е.А. Очистка нефтезагрязненных почв бактериями рода *Pseudomonas* — основой биопрепаратов Нафтокс 12–Р и Нафтокс 48–У / Е.А. Рогозина, И.Ф. Тимергазина, П.А. Моргунов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2014. — Т. 9, № 2. — С. 1–14.
- 8 Umbetov K.O. Evaluation of the environmental impact on the petrochemical biopreparation / K.O. Umbetov. — ECO-SAF LLP Атырау, 2018. — 48 р.
- 9 Osunde J.E. Micro-organisms in enhanced oil recovery / J.E. Osunde, S.A. Balogun // Journal of Science. — 2013. — P. 617–630.
- 10 Suleimanov B.A. A new microbial enhanced oil recovery (MEOR) method for oil formations containing highly mineralized water / B.A. Suleimanov, S.J. Rzayeva, S.S. Keldibayeva // Petroleum Science and Technology. — 2020. — P. 1–8.

- 11 Жумагулов Б. Что там на горизонтах? / Б. Жумагулов // Казахстанская правда. — 2015. — 5 с.
- 12 Васильянова Л.С. Некоторые особенности нефтей Казахстана / Л.С. Васильянова // Нефть и газ. — 2006. — № 2. — С. 85–92.
- 13 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kazpravda.kz/fresh/view/v-zone-osobogovnimaniya>
- 14 Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии / А.И. Нетрусов, М.А. Егорова, Л.М. Захарчук. — М.: Академия, 2005. — 608 с.
- 15 Kaiyrmanova G.K. Screening of microorganisms with oil diluting and oil-displacing properties / G.K. Kaiyrmanova, I. Swiecicka, Sh.Zh. Tapeshova, R.B. Magmiyev, U.T. Shaimerdenova, K.N. Satayeva, A.K. Yernazarova // KazNU Bulletin. Ecological series. — 2020. — № 2 (63). — P. 14–20.
- 16 Кайырманова Г.К. Изучение микрофлоры нефтепластовых вод месторождений Западного Казахстана / Г.К. Кайырманова, Ж. Дарменкулова, А.А. Жубанова, А.К. Ерназарова, Г. Жабасова, Ш. Тапешова // Вестн. Казах. нац. ун-та. Сер. биол. — 2017. — № 72 (3). — С. 104–113.
- 17 Abouseoud M. Evaluation of different carbon and nitrogen sources in production of biosurfactant by *Pseudomonas fluorescens* / M. Abouseoud, R. Maachi, A. Amrane, S. Boudergua, A. Nabi // Desalination. — 2008. — № 233. — P. 143–151.
- 18 Aparna A. Isolation, screening and production of biosurfactant by *Bacillus clausii* 5B / A. Aparna, G. Srinikethan, H. Smitha // Research in Biotechnology. — 2012. — № 3. — P. 49–56.
- 19 Shibulal B. Analysis of Bacterial Diversity in Different Heavy Oil Wells of a Reservoir in South Oman with Alkaline pH / B. Shibulal, S.N. Al-Bahry, Y.M. Al-Wahaibi // Environmental Biotechnology: Challenges, Applications, and Future Prospects. — 2018. — Vol. 2018. — Article ID 9230143. <https://doi.org/10.1155/2018/9230143>
- 20 Nikolova C. Use of Microorganisms in the Recovery of Oil from Recalcitrant Oil Reservoirs: Current State of Knowledge Technological Advances and Future Perspectives / C. Nikolova, T. Gutierrez // Front. Microbiol. — 2020. — Vol. 18. — Article ID 02996. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02996>
- 21 Pannekens M. Oil reservoirs, an exceptional habitat for microorganisms / M. Pannekens, L. Kroll, H. Müller, F.T. Mbow, R.U. Meckenstock // New Biotechnology. — 2019. — P. 1–9.
- 22 Silva T.R. Diversity analyses of microbial communities in petroleum samples from Brazilian oil fields / T.R. Silva, L.C. Verde, E.V. Santos Neto, V.M. Oliveira // International Biodeterioration & Biodegradation. — 2013. — P. 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.05>
- 23 Беккер Р.Х. Перспективы применения микробиологических методов повышения нефтеотдачи в условиях продуктивных коллекторов Урало-Поволжья / Р.Х. Беккер, Ю.А. Гуторов, А.М. Гареев // Разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2012. — № 3 (10). — С. 34–48.
- 24 Мастин А.В. Повышение нефтеотдачи пласта с помощью микробиологических методов / А.В. Мастин // Новая наука: Современное состояние и пути развития. — 2016. — № 3 (11). — С. 19–21.
- 25 Khire J.M. Bacterial biosurfactants, and their role in microbial enhanced oil recovery (MEOR) / J.M. Khire // AdvExp Med Biol. — 2010. — P. 146–157.
- 26 Phetcharat T. Biosurfactant-Producing Capability and Prediction of Functional Genes Potentially Beneficial to Microbial Enhanced Oil Recovery in Indigenous Bacterial Communities of an Onshore Oil Reservoir / T. Phetcharat, T.P. Dawkrajai, T. Chitov // CurrMicrobiol. — 2019. — P. 382–391.

Н.Е. Толеген, Д.Г. Ондасынова, К. Бахытулы, А.А. Ибатова

### **Сравнение таксономического разнообразия микроорганизмов, выделенных из нефтяных пластовых вод месторождений Западного Казахстана, с зарубежными месторождениями нефти**

В статье описаны микроорганизмы, выделенные из нефтяных вод различных нефтяных месторождений, которые являются основными объектами исследований по методам повышения микробной проницаемости нефти (MEOR). Микроорганизмы выделяют ряд потенциально полезных метаболитов (биомасса, биосурфактанты, биокислоты, биорастворители, биополимеры, биогаз) для извлечения нефти. Эти метаболиты помогают снизить вязкость масла и межфазное трение между нефтью и водой в качестве поверхностно-активного вещества, увеличивая ее пористость и проницаемость. В статье рассмотрены таксономическое биоразнообразие трех действующих скважин «Жетыбай», «Кульсары» и «Акинген», а также водонефтяные микроорганизмы различных месторождений мира в течение нескольких лет. Собраны данные о важности нефтяных микроорганизмов, их изучении, важности процессов MEOR, сравнение нефтяных микробов, выделенных из международных и западно-казахстанских нефтяных вод, и перспективы этих микроорганизмов. В статье представлена информация о микроорганизмах, обладающих высокой устойчивостью к неблагоприятным изменениям окружающей среды, таких как *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.* Эти виды выделяют поверхностно-активные вещества, газы, спирты, кислоты и биополимеры. Обсуждались сходства и перспективы таксономиче-

ского биоразнообразия микроорганизмов на месторождениях нефти в Западном Казахстане, а также использование микроорганизмов на месторождениях дальних стран в процессах MEOR.

*Ключевые слова:* микробиологическое повышение нефтеотдачи, микроорганизмы, нефтепластовая вода, таксономическое разнообразие, нефтяное месторождение, биотехнология.

N.Y. Tolegen, D.G. Ongdassynova, K. Bakhytulay, A.A. Ibatova

## Comparison of taxonomic diversity of microorganisms isolated from oil reservoir waters of Western Kazakhstan deposits with foreign oil fields

The article describes a variety of microorganisms, isolated from oil reservoir waters of different oilfields that are main objects in studying the microbial enhanced oil recovery (MEOR) methods. Microorganisms can generate a number of potentially useful metabolites (biomass, biosurfactants, bioacid, biosolvents, biopolymer, biogas) for oil recovery. These metabolites help to reduce the oil's viscosity and the interfacial friction between oil and water as a surfactant, increase its porosity and permeability. The article discusses the taxonomic biodiversity of microorganisms of oil-formation waters of three active wells of the "Zhetybai", "Kulsary", and "Akingen" fields and from different oil deposits across the world for several years. The significance of oil microorganisms, their research, the importance of MEOR processes, comparison of oil microbes between international and Western Kazakhstan oil reserves and future of these microorganisms are widely studied. The article provides information on microorganisms, such as *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, that are more immune to adverse shifts in environmental changes. These genera produce surfactants, gases, alcohols, acids, and biopolymers. The similarity of the taxonomic biodiversity of oil microorganisms of oilfields in Western Kazakhstan and their prospects, as well as the use of microorganisms from the distant countries' oilfields in the MEOR processes are analyzed.

*Keywords:* microbial enhanced oil recovery (MEOR), microorganisms, oil reservoir water, taxonomic diversity, oil field, biotechnology.

### References

- 1 Murzakov, B.G. (2005). *Ekologicheskaya biotekhnologiya dlia neftegazovogo kompleksa (teoriya i praktika)* [Ecological biotechnology for the oil and gas complex (theory and practice)]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet [in Russian].
- 2 Spök, A., Arvanitakis, G., & McClung, G. (2018). Status of Microbial Based Cleaning Products in Statutory Regulations and Ecolabelling in Europe, the USA, and Canada. *J. Food and Chemical Toxicology*, 116; 10–19.
- 3 Samer, M. (2015). Biological and Chemical Wastewater Treatment Processes. *Wastewater Treatment Engineering*, 15–19.
- 4 Ruchaj, N.S., & Markevich, R.M. (2006). *Ekologicheskaya biotekhnologiya* [Environmental biotechnology]. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 312 [in Russian].
- 5 Kuyukina, M.S., & Ivshina, I.B. (2010). Rhodococcus biosurfactants: biosynthesis, properties, and potential applications. In *Biology of Rhodococcus*. Springer, Berlin, Heidelberg, 291–313.
- 6 Ambrazaitiene, D., Zukauskaitė, A., Jakubauskaitė, V., Reikaite, R., Zubrickaitė, M., & Karcauskiene, D. (2013). Biodegradation activity in the soil contaminated with oil products. *Biology, Environmental Science*, 100 (3); 235–242.
- 7 Rogozina, E.A., Timergazina, I.F., & Morgunov, P.A. (2014). Oчistka neftezagiaznennykh pochv bakteriyami roda *Pseudomonas* — osnovoi biopreparatov Naftoks 12-R i Naftoks 48-U [Cleaning oil-contaminated soil by *Pseudomonas* bacteria — basis of biological products Naftoks 12-R and Naftoks 48-U]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika — Oil-gas geology. Theory and practice*, 9 (2); 1–14 [in Russian].
- 8 Umbetov, K.O. (2018). *Evaluation of the environmental impact on the petrochemical biopreparation*. ECO-SAF LLP Atyrau.
- 9 Osunde, J.E., & Balogun, S.A. (2013). Microorganisms in enhanced oil recovery. *Journal of Science*, 15 (3); 617–630.
- 10 Suleimanov, B.A., Rzayeva, S.J., & Keldibayeva, S.S. (2020). A new microbial enhanced oil recovery (MEOR) method for oil formations containing highly mineralized water. *Petroleum Science and Technology*, 1–8.
- 11 Zhumagulov, B. (2015). Chto tam na gorizontakh? [What's on the Horizon?]. *Kazhkhstanskaia pravda — Kazakhstan Truth*, 5 [in Russian].
- 12 Vasilianova, L.S. (2006). Nekotorye osobennosti neftei Kazhkhstana [Some features of oils in Kazakhstan]. *Neft i gaz — Oil and Gas*, 2; 85–92 [in Russian].
- 13 Retrieved from <https://www.kazpravda.kz/fresh/view/v-zone-osobogo-vnimaniya9> [in Russian].
- 14 Netrusov, A.I., Egorova, M.A., & Zaharchuk, L.M. (2005). *Praktikum po mikrobiologii* [Workshop on microbiology]. Moscow: Akademiia [in Russian].



- 15 Kaiyrmanova, G.K., Swiecicka, I., Tapeshova, Sh. Zh., Magmiyev, R.B., Shaimerdenova, U.T., Satayeva, K.N., & Yernazarova, A.K. (2020). Screening of microorganisms with oil diluting and oil displacing properties. *KazNU Journal, Ecological series*, 2 (63); 14–20.
- 16 Kaiyrmanova, G.K., Darmenkulova, Zh., Zhubanova, A.A., Yernazarova, A.K., Zhabasova, G., & Tapeshova, Sh. (2017). Izuchenie mikroflory nefteplastovykh vod mestorozhdenii Zapadnogo Kazakhstana [Study of the microflora petroleum stratal waters of deposits of Western Kazakhstan]. *Vestnik Kazakhskogo natsionalnogo universiteta. Seriya Biologiya — Kazakh National University Journal. Biology series*, 3 (72); 104–113 [in Russian].
- 17 Abouseoud, M., Maachi, R., Amrane, A., Boudergua, S., & Nabi, A. (2008). Evaluation of different carbon and nitrogen sources in production of biosurfactant by *Pseudomonas fluorescens*. *Desalination*, 233; 143–151.
- 18 Aparna, A., Srinikethan, G., & Smitha, H. (2012). Isolation, screening and production of biosurfactant by *Bacillus clausii* 5B. *Research in Biotechnology*, 3; 49–56.
- 19 Shibulal, B., Al-Bahry, S.N., & Al-Wahaibi, Y.M. (2018). Analysis of Bacterial Diversity in Different Heavy Oil Wells of a Reservoir in South Oman with Alkaline pH. *Environmental Biotechnology: Challenges, Applications, and Future Prospects*, 10.
- 20 Nikolova, C., & Gutierrez, T. (2020). Use of Microorganisms in the Recovery of Oil from Recalcitrant Oil Reservoirs: Current State of Knowledge Technological Advances and Future Perspectives. *Front. Microbiol.*, 18; 02996. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02996>
- 21 Pannekens, M., Kroll, L., Müller, H., Mbow, F.T., & Meckenstock, R.U. (2019). Oil reservoirs, an exceptional habitat for microorganisms. *New Biotechnology*, 1–9.
- 22 Silva, T.R., Verde, L.C., Santos Neto, E.V., & Oliveira, V.M. (2013). Diversity analyses of microbial communities in petroleum samples from Brazilian oil fields. *International Biodeterioration & Biodegradation*; 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.05>
- 23 Bekker, R.X., Gutorov, Yu.A., & Gareev, A.M. (2012). Perspektivy primeneniia mikrobiologicheskikh metodov povysheniia nefteotdachi v usloviakh produktivnykh kollektorov Uralo-Povolzhia. *Razrabotka neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii — Development of oil and gas fields*, 3 (10); 34–48 [in Russian].
- 24 Mastin, A.V. (2016). Povysenie nefteotdachi plasta s pomoshchiu mikrobiologicheskikh metodov. *Novaia nauka: Sovremennoe sostoianie i puti razvitiia — New science: modern state and ways of development*, 3 (11); 19–21 [in Russian].
- 25 Khire, J.M. (2010). Bacterial biosurfactants, and their role in microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Adv Exp Med Biol*, 146–157.
- 26 Phetcharat, T., Dawkrajai, T.P., & Chitov, T. (2019). Biosurfactant-Producing Capability and Prediction of Functional Genes Potentially Beneficial to Microbial Enhanced Oil Recovery in Indigenous Bacterial Communities of an Onshore Oil Reservoir. *Cur Microbiol.*, 382–391.