

С.Д. Жантлесова* , Ж.Т. Мусабеков , Ж. Хамитқызы ,
А.Б. Талипова , А.С. Кистаубаева 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru

ЖАРКЕНТТІҢ ГЕОТЕРМАЛДЫҚ КӨЗДЕРІНЕН БӨЛІНГЕН ТЕРМОФИЛЬДІ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ ПЛАСТИКТІ ЫДЫРАТУ ӘЛЕУЕТІ

Пластикалық ластану – синтетикалық полимерлердің табиғи ыдырауға төзімділігі мен тұрақтылығының жоғары болуына байланысты жаһандық экологиялық маңызды проблема болып табылады. Олардың ішінде полиэтилентерефталат (ПЭТ) ең кең таралған пластиктердің бірі, бұл оның қоршаған ортада айтарлықтай жиналуына әкеледі. Термофильді микроорганизмдерді қолдану арқылы биологиялық ыдырау дәстүрлі жою әдістеріне перспективалы балама ұсынады. Осы зерттеуде Қазақстанның Жаркент өңіріндегі геотермалды көздерден ПЭТ ыдырату әлеуетін бағалау үшін термофильді бактериялар оқшауланды. 42–103 °С температуралы жерлерден алынған су, шөгінді және топырақ үлгілері ПЭТ-ті жалғыз көміртек көзі ретінде қамтитын минералды тұзды ортада байытылды. Нәтижесінде 16 термофильді бактериялық изолят алынды және пластикті ыдырату белсенділігіне қарай іріктелді. ПЭТ пленкалы дискілерін қолданған ыдырату сынақтары төрт термофильді изоляттың (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) полимердің салмағын айтарлықтай азайтатынын көрсетті, 28 күн бойы 65 °С температурада инкубацияланғаннан кейін 13,9–16,0 мг дейін азайды. Биохимиялық және морфологиялық сипаттау нәтижелері жоғары ыдырату қабілеті бар изоляттардың *Bacillus* тұқымдасына жататынын анықтады.

Түйін сөздер: термофильді бактериялар, полиэтилентерефталат, ПЭТ ыдырату, геотермалдық көздер, *Bacillus*, биодеградация.

S.D. Zhantlessova*, Zh.T. Mussabekov,
Zh. Khamitkyzy, A.B. Talipova, A.S. Kistaubayeva
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru

Potential for plastic degradation by thermophilic bacteria isolated from geothermal sources of Zharkent

Plastic pollution has become a critical worldwide environmental problem because of the exceptional stability and high resistance of synthetic polymers to natural degradation processes. Plastic waste containing polyethylene terephthalate (PET) is a major contributor to this problem, as PET is one of the most commonly used plastics, and its improper disposal results in its accumulation in nature. The use of thermophilic microorganisms for biotic degradation is one of the environmentally friendly methods that are expected to replace traditional disposal methods. This work aimed at checking the ability of thermophilic bacteria purified from the geothermal springs of the Zharkent region (Kazakhstan) to degrade PET. Water, sediment, and soil samples collected from areas where the temperature was between 42 and 103 °C were incubated in mineral salt medium with PET as the only carbon source. We obtained sixteen thermophilic bacterial strains and examined their potential of plastic degradation.

After testing the degradation of PET film discs, we found that only four out of those thermophilic strains (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) caused a significant reduction in the polymer weight, i.e., 13.9–16.0 mg, after 28 days of incubation at 65 °C.

The *Bacillus* genus was recognized as the source of the isolates with the outstanding degrading capability of the polymer based on their biochemical and morphological.

Keywords: thermophilic bacteria, polyethylene terephthalate, PET degradation, geothermal sources, *Bacillus*, biodegradation.

С.Д. Жантлесова*, Ж.Т. Мусабеков,
Ж. Хамитқызы, А.Б. Талипова, А.С. Кистаубаева

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

*e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru

Потенциал разложения пластика термофильными бактериями, выделенными из геотермальных источников Жаркента

Пластиковые отходы представляют собой одну из важнейших экологических проблем современного мира, так как синтетические полимеры обладают высокой химической прочностью и не могут быть быстро разрушены естественным путем. Полиэтилентерефталат (ПЭТ) относится к одной из наиболее распространенных групп пластмасс, вследствие чего практически во всех окружающих человека средах можно обнаружить накопления этого материала. Обезвреживание пластиковых отходов с помощью термофильных микроорганизмов является одним из перспективных направлений в области утилизации. В настоящей работе из геотермальных источников, расположенных в Жаркенте (Казахстан), были выделены термофильные бактерии с целью оценки их потенциала для деструкции ПЭТ. Образцы воды, осадков и почвы, взятые в горячих источниках с температурой от 42 до 103 °С, были инкубированы в минерально-солевой среде с использованием полиэтилентерефталата в качестве единственного источника углерода. В итоге было изолировано шестнадцать штаммов термофильных бактерий, которые проверяли на способность к разложению пластика. В экспериментах по разложению с использованием образцов из ПЭТ-пленки было установлено, что 4 изолята термофильных бактерий (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) обусловили значительную потерю массы полимеров в количестве от 13, 9 до 16, 0 мг после 28 дней инкубации при температуре 65 °С. Биохимическая характеристика и микроскопия показали, что изоляты с наивысшей активностью к разложению принадлежат к роду *Bacillus*.

Ключевые слова: термофильные бактерии, полиэтилентерефталат, деградация ПЭТ, геотермальные источники, *Bacillus*, биодegradация.

Кіріспе

Пластиктер беріктігі, әмбебаптығы және өндіріс құнының төмендігі арқасында әлемде ең көп қолданылатын материалдардың бірі болып табылады. Олардың қаптама өндірісінде, құрылыс саласында, электроникада және денсаулық сақтау жүйесінде кеңінен қолданылуы жаһандық пластик өндірісінің үздіксіз өсуіне әкеліп, жылына 390 миллион тоннадан асты (Boschi et al., 2024). Дегенмен, пластмассаларды құнды ететін қасиеттер, әсіресе олардың ыдырауға төзімділігі, ұзақ мерзімді қоршаған ортаның жиналуына ықпал етеді, бұл экологиялық және денсаулыққа қатысты елеулі мәселелер тудырады. Пластикалық қалдықтардың көп мөлшері қоқыс полигондарына, топыраққа және су экожүйелеріне түседі, онда олар ондаған жылдар бойы сақталып, азық-түлік тізбегіне енетін микропластиктерге және нанопластиктерге бөлінеді (Yang et al., 2025; Chaudhary et al., 2025). Қазақстанда пластикалық қалдықтардың жалпы көлемі жылына шамамен 625-730 мың тоннаға жетеді деп есептеледі. Бұл қоқыс полигонына тастау және өртеу сияқты дәстүрлі әдістер жеткіліксіз әрі қоршаған ортаға зиянды болғандықтан тиімдірек жою әдістерін әзірлеуді қажет етеді (Schulte & Busch, 2024). Пластикалық қал-

дықтардың көпшілігі ел ішінде қалады полигондарға тасталады немесе табиғи ортада жиналады. Жүргізіліп жатқан бастамаларға қарамастан сұрыпталған пластикалық қалдықтардың үлесі тек 9,9% құрайды бұл бүкіл ел бойынша қалдықтарды бөлудегі шектеулі прогресті көрсетеді (Kazakh Telegraph Agency, 2025).

Әртүрлі пластик түрлерінің ішінде полиэтилентерефталат (ПЭТ) ең көп өндірілетін және әлемде тұтынылатын полимерлердің бірі болып табылады. ПЭТ жоғары механикалық беріктігіне термиялық тұрақтылығына және мөлдірлігіне байланысты сусын бөтелкелерінде тамақ ыдыстарында синтетикалық талшықтарда кеңінен қолданылады (Benyathiar et al., 2022). Ол Қазақстандағы жылдық пластикалық қалдықтардың жалпы көлемінің шамамен 14%-ын құрайды (Kwan, 2025).

ПЭТ қалдықтарын қалпына келтірудің бір перспективасы бағыты – полимер негізін құрайтын эфирлік байланыстарды гидролиздеуге икемді микробтық ферменттерді қолдана отырып биологиялық деполимерлеу. ПЭТ-ыдырайтын ферменттердегі жетістіктер (мысалы ПЭТ гидролиздері және инженерлік деполимеразалар) ферментативті гидролиз химиялық қайта өңдеуге жарамды мономерлерді бере алатынын көрсетті ал ақуыз инженериясы саласындағы

соңғы жұмыстар каталитикалық тиімділік пен процеске қатысты жағдайларда термотұрақтылықты айтарлықтай жақсартты (Tournier et al., 2020; Arnal et al., 2023).

Термофильді микроорганизмдер ПЭТ биоөңдеу үшін ерекше қызықты, өйткені олардың термотұрақты ферменттері жоғары температурада жұмыс істей алады, бұл полимер тізбегінің қозғалғыштығын және реакция кинетикасын жақсартады, сонымен қатар биореакторлардағы ластану қаупін азайтады. Бүгінгі күнге дейін бүкіл әлемдегі ыстық бұлақтардан термофильді бактериялардың кең ауқымы бөлініп алынды және анықталды. Олардың ішінде *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Anoxybacillus*, *Geobacillus*, *Lysinibacillus* және *Brevibacillus* сияқты тұқымдастар жақсы белгілі және биотехнологияда әртүрлі қолданыстарды тапты (Ortega-Villar et al., 2024; Cirić & Šaraba, 2025). Термофильді пластикалық биодеградацияны қорытындылайтын шолулар мен эксперименттік зерттеулер мезофилдермен салыстырғанда термофилдерде ыдырау жылдамдығының және әртүрлі ферментативті репертуарлардың жоғарылағанын көрсетеді, бұл ыстыққа бейімделген ферменттердің бөлме температурасындағы биокатализдің кейбір шектеулерін жеңе алатынын көрсетеді (Yan et al., 2021).

Соңғы зерттеулер көрсеткендей, термофильді ферменттік жүйелер полимердің шынылану температурасына жақын ПЭТ гидролизін айтарлықтай жақсарта алады, мұнда тізбектің қозғалғыштығының жоғарылауы ферменттердің қолжетімділігі мен каталитикалық тиімділігін арттырады. Мысалы, ICCG сияқты модификацияланған термофильді ПЭТ гидролазалары процеске сәйкес жағдайларда жоғары белсенділік пен тұрақтылықты көрсетеді, бұл термофильді биокатализдің мезофильді жүйелерге қарағанда технологиялық артықшылығын растайды (Zeng et al., 2022).

Сондықтан геотермалдық бұлақтар мен басқа да жоғары температуралы мекендеу орталары жаңа термофильді штамдар мен термотұрақты ПЭТ-гидролазаларды іздеудің бай нысандары болып табылады. Жаркент геотермалдық бұлақтарының (Алматы облысы, Қазақстан) алдыңғы микробиологиялық және метагеномдық зерттеулері биотехнологиялық қолдану үшін перспективалы әртүрлі термофильді қауымдастықтар мен изоляттарды анықтады. Бұл жергілікті экожүйелердің жаңа ферменттік белсенділікті ашу үшін құнды бірақ аз зерттелген ресурс екенін көрсетеді (Mashzhan et al., 2021).

Бұл зерттеу Жаркент геотермалдық бұлақтарынан термофильді бактерияларды бөліп алуға және олардың бақыланатын зертханалық жағдайларда ПЭТ ыдырауын бастау әлеуетін бағалауға бағытталған. ПЭТ субстраттарының қатысуымен олардың өсуін, биохимиялық ерекшеліктерін және гидролитикалық белсенділігін зерттеу арқылы бұл жұмыс термофильді биоыдырау стратегияларын әзірлеуге үлес қоса алатын перспективалы штамдарды анықтауға бағытталған.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Сынамаларды жинау және бактерияларды оқшаулау. Су, шөгінді (лайлы) және топырақ үлгілері Жаркент ауданындағы (Алматы облысы) геотермалдық бұлақтардан алынды. Сынамаларды алу орындарының далалық өлшеулері 42°C-тан 103 °C-қа дейінгі температурада тіркелді. Мұнда екі типтік үлгі көрсетілген: таяз, ашық бассейннен жиналған органикалық заттарға бай шөгінді N1 үлгісі және ластануды азайту үшін асептикалық жағдайда жиналған шамамен 2385 м тереңдікте және 99,5 °C температурада алынған терең су үлгісі N2 үлгісі. Қосымша топырақ және лайлы шөгінділер жақын маңдағы ағып жатқан жерлерден жиналды. Үлгілер GPS координаттары және жергілікті параметрлер (температура, рН) көрсетілген стерильді 500 мл полипропилен бөтелкелеріне салынып, тығыздалып, өңдеу үшін зертханаға жеткізілді. Барлық үлгілер жиналғаннан кейін 24 сағат ішінде өңделді. Топырақ және шөгінді үлгілері гомогенделіп, стерильді тұзды ерітіндіде (0,85% NaCl) сериялық түрде сұйылтылды, ал су үлгілері микробтық биомассаны шоғырландыру үшін 0,45 мкм мембраналық сүзгілер арқылы сүзілді.

Өңделген үлгілердің аликвоталары келесі құрамдағы минералды тұзды ортаға егілді (г/л, егер басқаша көрсетілмесе): KH_2PO_4 – 1.5; K_2HPO_4 – 2.5; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 1.0; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.2; NaCl – 1.0; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0.02; микроэлементтер ерітіндісі ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 5.0 г/л, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 2.5 г/л, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.5 г/л, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0.2 г/л) – 1 мл/л Бастапқы өсіру үшін жалғыз көміртек көзі ретінде пластик (PET) ұнтағы (<500 мкм дейін еленген әр жағы бір сағат бойы ультракүлгін сәулемен стерильденген) 1 г/л мөлшерінде қосылды. Үлгілер термофильді микроорганизмдердің өсуін ынталандыру мақсатында 65°C температурада жеті күн бойы инкубацияланды. Инкубациядан кейін әрбір байытылған культу-

радан 100 мкл алынып бірізді сұйылту жасалды және колонияларды бөліп алу үшін минералды тұзды агарлы орта табақшаларына егілді. Табақшалар сол температуралық жағдайларда 72 сағат бойы инкубацияланды. Морфологиясы бойынша ерекшеленетін жеке колониялар таза термофильді изоляттарды бөліп алу үшін жаңа агарлы ортаға бірнеше рет қайта штрихтау арқылы егілді.

Таза изоляттар 0.1% (масс./көлем) ПЭТ қосылған қатты минералды тұзды ортада өсу қабілеті бойынша тексерілді. Әрбір бактериялық изоляттан ілмекпен алынған материал агар табақшасының ортасына егілді; барлық табақшалар 65°C температурада 72 сағат бойы инкубацияланды. Инкубация кезеңінен кейін әр изолят үшін бактериялық өсудің диаметрі анықталды. Өсу колония диаметрі мен көзге көрінетін таралуына негізделіп бағаланды. Изоляттар келесі санаттарға бөлінді: күшті (колония диаметрі > 2.5 см), орташа (колония диаметрі 1.0–2.5 см), әлсіз (колония диаметрі < 1.0 см), өсу анықталмады (ND). *ПЭТ ыдырауының сандық талдауы.*

ПЭТ пленкалы дискілер (диаметрі 1 см, □ 66 мг) коммерциялық ПЭТ бөтелкелерінен жасалған, 70% этанолмен және стерильді тазартылған сумен жуылған және стерильді жағдайда ауада кептірілген. Дискілер ультракүлгін сәулемен зарарсыздандырылды. Алдын ала өлшенген дискілер таңдалған бактериялық изоляттардың стандартталған жасушалық суспензиясымен (OD₆₀₀ = 0,1) егілген 20 мл сұйық ортасы (көміртегі көзі жок) бар 100 мл Эрленмейер колбаларында инкубацияланды. Колбалар 28 күн бойы 120 айн/мин жылдамдықпен шайқалған кезде 65°C температурада инкубацияланды. Бақылау колбаларында бактериялық егусіз стерильді ортада ПЭТ дискілері болды. Инкубациядан кейін ПЭТ дискілері алынып тасталды, бекітілген жасушаларды кетіру үшін тазартылған сумен мұқият жуылды, көлеңкеде кептірілді және қайта өлшенді. ПЭТ деградациясы дискілердің массасының жоғалуы (мг) өлшеу арқылы анықталды және бастапқы массаға қатысты пайыздық масса жоғалу түрінде есептелді: [(бастапқы масса – соңғы масса) / бастапқы масса × 100%].

Биохимиялық сипаттамасы.

Таңдалған изоляттар стандартты микробиологиялық сынақтар арқылы сипатталды: граммен бояу, жасушалар мен колониялардың морфологиясы, эндоспора түзілуі (Шеффер-

Фултон бояуы), каталаза (3% H₂O₂), оксидаза (Bactident®, Merck оксидаза жолақтары) және арнайы қоректік орталарда желатин, крахмал және казеин гидролизі. Цитратты қолдану және уреаза белсенділігі де тексерілді.

Статистикалық талдау.

Егер басқаша көрсетілмесе, барлық эксперименттік топтар үш данада талданды. Барлық статистикалық талдаулар SPSS бағдарламалық жасақтамасының көмегімен жүргізілді (28.0 нұсқасы, IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, АҚШ). P-мәні < 0,05 болған жағдайда статистикалық маңызды деп есептелді.

Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

ПЭТ-пластмассаны сәйкестендіру жүйесіне сәйкес жіктелген Пластмассалардың жеті негізгі санатының бірі. Бұл гидролитикалық ыдырауға ұшырайтын сомономерлі бірліктер мен алифатты сегменттерден тұратын жоғары молекулалы хош иісті полиэфир (Venkatachalam et al., 2012). Полиуретан, төмен тығыздықты полиэтилен (ТПЭ), полигидроксиалканаттар және басқа да биологиялық ыдырайтын пластмассалар сияқты басқа полимерлермен салыстырғанда, ПЭТ-тің микробтық ыдырауына бағытталған зерттеулер салыстырмалы түрде аз (Sangale, 2012; Sangeetha Devi et al., 2015). Сондықтан, бұл зерттеуде геотермалдық орта ПЭТ-ны ыдырату белсенділігі бар термофильді микроорганизмдердің көзі ретінде зерттелді.

Нәтижесінде, Жаркент аймағындағы геотермалдық бұлақтардан он алты термофильді бактериялық изолят сәтті алынды, олардың көпшілігі сулы ортадан шыққан (1-сурет).

Изоляттар оқшаулау көздеріне қарай жіктелді: W-DP (Терең геотермалдық су), W-SP (жазық бассейн суы), SED (жазық бассейндердің түнбасы) және S (жақын топырақ аумақтары) (2-сурет).

Таралу нәтижелері судан алынған изоляттардың айтарлықтай көп екенін көрсетеді, 16 изоляттың 9-ы (56%) сулы ортадан шыққан, бұл ыстық бұлақтардағы бай термофильді қауымдасстықты көрсетеді. Алдыңғы зерттеулер геотермалдық ортада әртүрлі пластикті ыдырататын микробтардың (ыстық бұлақтар, желдеткіштер және т.б.) мекендейтінін растайды, сондықтан бұл қуыстардан оқшаулау жаңа ыдыратушыларды табу ықтималдығын арттырады (Yuan et al., 2025).

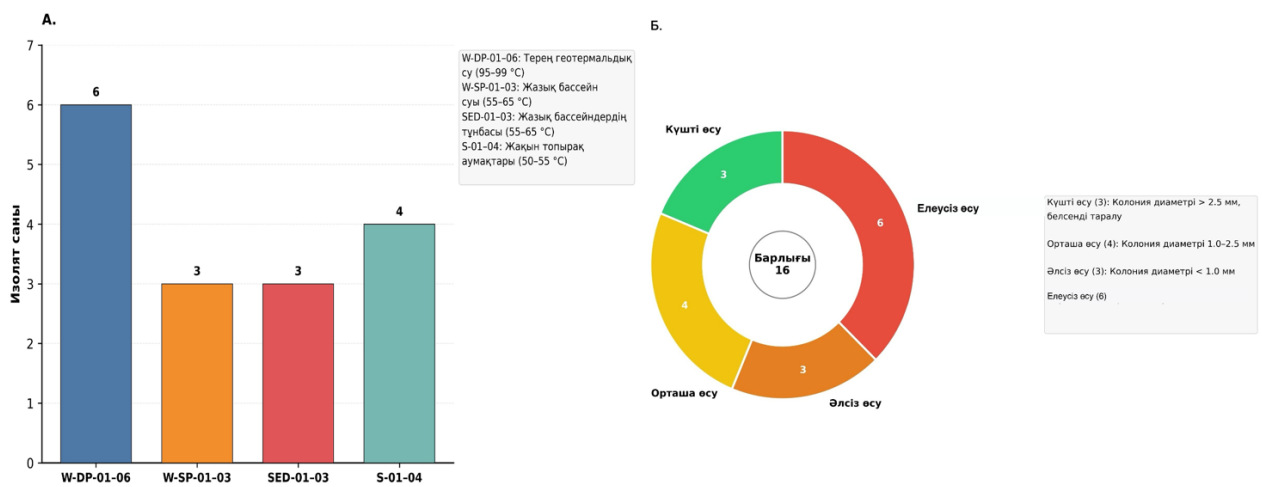
1-сурет

Қазақстандағы Жаркент (Алматы облысы) ауданындағы геотермалдық ыстық су көзі



2-сурет

Геотермалдық бұлақтардан алынған термофильді бактериялардың оқшаулау көздері (А) және ПЭТ-ыдырау әлеуетін алдын ала бағалау (В)



Колония морфологиясын талдау әртүрліліктің кең ауқымын көрсетті: ең жиі кездесетін колония түсі – ақ (7 изолят), одан кейін сары (5 изолят) және қоңыр-сары (4 изолят). Колониялардың өлшемдері, биіктіктері, жиектері және беткі текстуралары түгелдей әртүрлі екенін байқауға болады. Микроскопиялық сипаттама негізінде 12-сі грамоң (95%), ал 4-уі грамтеріс (25%) бактерия болды; таяқша тәрізді морфологияның орташа басымдығы (87%) байқалды. Грамоң таяқшалар эндоспора түзді және олар не түнбада (62%), не жоғары температуралы су изоляттары арасында (81%) басым болды.

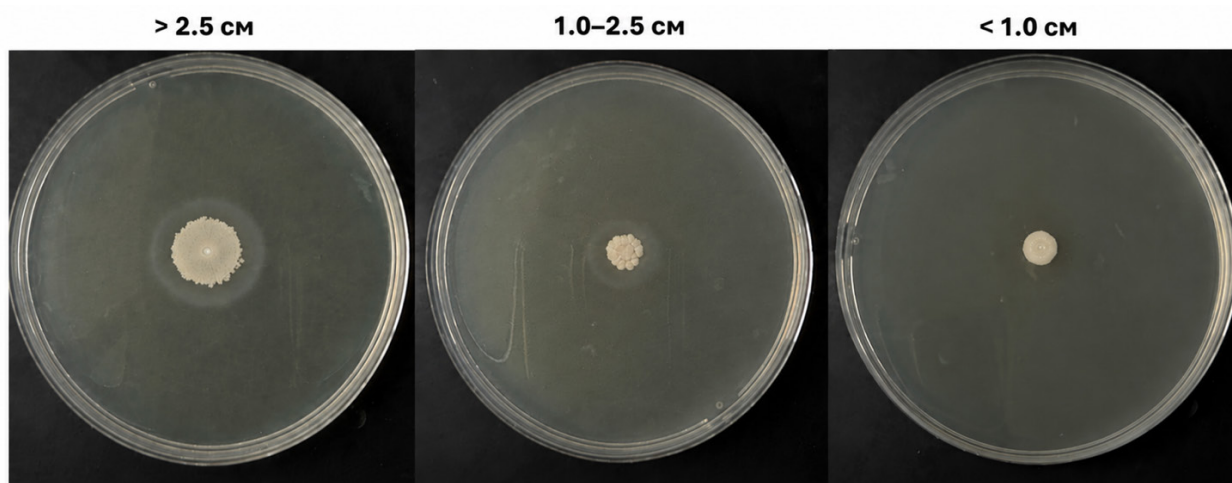
Изоляттар бактерия колонияларының өсу диаметрі бойынша деградация тиімділігіне бағаланды, бұл бұрын Hussein A. және т.б. (2019; Huang et al., 2022; Long et al., 2022) сипаттағандай. (Hussein et al., 2015). Олардың ішінде он

изолят PET құрамындағы қоректік ортасы бар табақшаларда жақсы өсіп шықты.

Осы пластикті субстраттармен немесе олардың үстінде қолдануға әлеуетін көрсетті (2, 3-суреттер). Үш оқшаулау (үш резервуардың әрқайсысынан біреуден) ұзартылған, айқын колониялармен мықты өсу көрсетті, ал төртеуі орташа өсу көрсетті. Үшеуі әлсіз болып аяқталды және бесеуі айтарлықтай өсу көрсетпеді, бұл PET-ден алынған қосылыстардың жағдайында қоспаланбайтынын, яғни жарамсыз екенін меңзейді. Бұл таңдау жалпы гидролитикалық ферменттік жүйелердің талаптарына байланысты болуы мүмкін: олар эфирлік байланыстары бар полимерлерді ыдырата алатындықтан, жоғары температура мен қоректік орта аз болған жағдайларда анағұрлым күрделі органикалық қосылыстарды және/немесе жасушадан тыс субстраттарды пайдалана алуы мезгілде таңдауы мүмкін.

3-сурет

0,1% (w/v) ПЭТ бар қатты минералды тұзды ортада өкілдік изоляттардың бактериялық өсуі



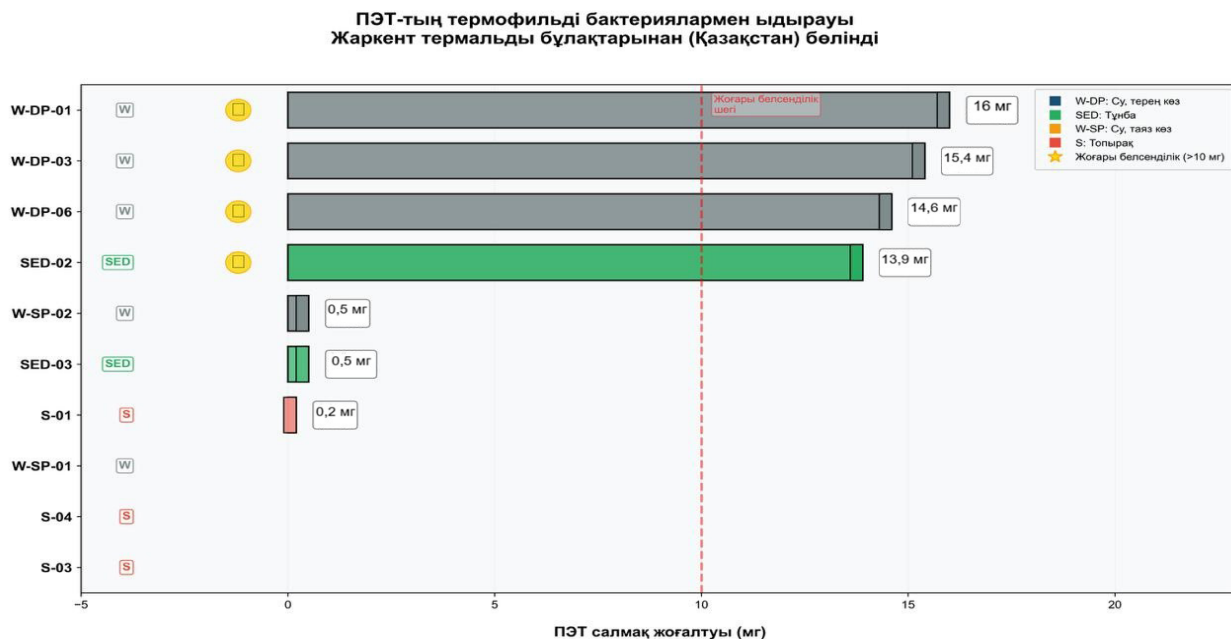
Өсу күшті (колония диаметрі > 2,5 см), орташа (1,0–2,5 см), әлсіз (< 1,0 см) және анықталмайтын өсу (ND) болып жіктелді.

Сандық тестілеу үшін таңдалған 10 термофильді изолятың ішінде тек төртеуі ғана ПЭТ-нің айқын ыдырауын көрсетті ($p < 0,05$), салмақ жоғалту мәндері 28 күн ішінде 13,9-дан

16,0 мг-ға дейін болды (4-сурет). Ең белсенді изоляттар терең геотермалдық су (W-DP) және жазық бассейндердің түнбасы (SED) үлгілерінен алынған.

4-сурет

Термофильді бактериялық изоляттармен инкубациядан кейін ПЭТ салмағының төмендеуі



Терең геотермалдық сулардың (95–99°C) экстремалды жағдайлары баяу ыдырайтын органикалық полимерлерден қоректік заттарды жинауға арналған берік және тұрақты гидроликалық ферменттік жүйелері бар микробтық консорциумдарға күшті селективті қысым көрсетуі мүмкін. Бұл экологиялық бейімделу мұндай изоляттардың ПЭТ сияқты синтетикалық полиэфирлерге шабуылына бағытталуы мүмкін.

Термофильді микробтық және ферменттік жүйелер жоғары температурада полимер тізбегінің қозғалғыштығын және ферменттік каталитикалық тиімділігін арттыру арқылы ПЭТ гидролизін айтарлықтай жақсартады. Мысалы, инженерлік термофильді жүйелердің дәстүрлі мезофильді ПЭТ-азалармен салыстырғанда 60–70°C температурада жоғары ыдырау жылдамдығына қол жеткізетіні көрсетілген, олар әдетте тұрақтылық үшін төмен температураны қажет етеді (Yan et al., 2021). Кутиназа және эстераза сияқты термофильді ферменттер әсіресе перспективалы, себебі олар ПЭТ-тің шыны өтпелі температурасына жақын термиялық жағдайлар-

да эфирлік байланыстарды тиімдірек үзе алады (Kawai, 2021). Жақында жүргізілген зерттеулер термофильді микроорганизм-фермент жүйесінің ПЭТ қалдықтарын жоғары жүктемелер мен жоғары температура кезінде толығымен ыдырата алатынын көрсетті, бұл зертханалық сынақтардан тыс термофильді биоыдырау қолданудың жоғары әлеуетін көрсетеді (Ян және т.б., 2024). Жоғары температурадағы ПЭТ ыдырауының артықшылықтары ферменттердің термиялық тұрақтылығынан тысқары. Мұндай жағдайларда полимердің физикалық және құрылымдық қасиеттерінің өзгеруі, каталитикалық жылдамдықтың жоғарылауы және субстраттар мен ыдырау өнімдерінің диффузиясының жоғарылауы төмен температуралы жүйелермен салыстырғанда ПЭТ деполимерленуінің тиімдірек болуына ықпал етеді (Атанасова және т.б., 2021).

Биохимиялық сипаттама үшін ең жоғары ыдырау тиімділігін көрсететін ПЭТ масса жоғалту талдауы негізінде төрт термофильді изолят (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) таңдалды.

5-сурет

ПЭТ-ді ыдырататын ең тиімді термофильді изоляттардың биохимиялық сипаттамалары

Бактериялық штаммдардың биохимиялық профильдері

	W-DP-01	W-DP-03	W-DP-06	SED-02
Грам бояуы	●	●	●	●
Жасуша морфологиясы	таяқша	таяқша	таяқша	таяқша
Эндоспора түзуі	●	●	●	●
Каталаза	●	●	●	●
Оксидаза	●	●	●	●
Желатин гидролизі	■	■	■	■
Крахмал гидролизі	●	▲	●	●
Казеин гидролизі	●	●	●	▲
Уреаза	■	■	■	■
Цитратты пайдалану	●	●	●	●

Нәтижелер

- Оң
- ▲ Әлсіз
- Теріс

Ең тиімді төрт изоляттың биохимиялық сипаттамасы аэробты метаболизмді қолдайтын тұрақты каталаза және оксидаза белсенділігі бар грам-позитивті, спора түзетін таяқшаларды көрсетті. Олардың крахмал мен казеинді гидролиздеу қабілеті полимердің ыдырау белсенділігімен танымал көптеген термофильді бактерияларға тән қасиет – жасушадан тыс гидролитикалық ферменттердің күшті өндірілуін көрсетеді. Бұл ферменттер, әсіресе жасушадан тыс эстеразалар және кутиназа тәрізді гидролаздар, ПЭТ-те беттік эрозияны бастауда механикалық тұрғыдан маңызды, бұл мономердің бөлінуіне және полимердің ішінара ыдырауына әкеледі (Benavides Fernández et al., 2022). Жалпы алғанда, байқалған фенотиптік және биохимиялық профиль Бергей нұсқаулығына сәйкес, метаболикалық әмбебаптығы және жасушадан тыс ферменттердің өндірілуімен танымал топ *Bacillus* тұқымдасына жататынын көрсетеді. Бұл бақылау ПЭТ-мен байланысты биодеграда-

циялық талдауларға *Bacillus* түрлерінің қатысуы туралы есеп берген бұрынғы зерттеулерге сәйкес келеді (Zeng et al., 2023; Dhaka et al., 2025; Khalil et al., 2025). Сонымен қатар, термофильді *Bacillus* штамдары полиэтилен (ПЭТ), төмен тығыздықты полиэтилен (ТППЭ) және жоғары тығыздықты полиэтилен (ЖТПЭ) сияқты басқа синтетикалық полимерлерді ыдырату қабілетімен танымал Dang et al., 2018; Zahari et al., 2025), бұл осы тұқымның кеңірек, бірақ әлі де жеткіліксіз сипатталған полимерді ыдырату әлеуетін көрсетеді.

Қорытынды

Бұл зерттеу Қазақстандағы Жаркент геотермалдық бұлақтарынан әртүрлі термофильді бактерияларды сәтті бөлініп алынды. Оқшауланған штаммдар жоғары температуралық ортада (ашық бассейндерден алынған терең геотермалдық су және шөгінді) барынша жоғары

белсенділік көрсетті, бұл термотөзімділік пен полимерлерді гидролиздеу қабілетінің әлеуеті арасындағы экологиялық байланысты меңзейді. Олар жасушадан тыс гидролитикалық ферменттер өндірумен сипатталатын биохимиялық профильге ие.

Бақыланған салмақтың кемуі (28 күн ішінде 13,9–16,0 мг) үміт күттіретін бастапқы нәтиже болды, бірақ келесі қадамдар мыналарды қамтиды: 1) 16S rRNA генін секвенирлеу арқылы ең жақсы нәтиже көрсеткен окшауланымдарды молекулалық анықтау; 2) бөлінетін жауапты арнайы ферменттерді сипаттау; және 3) ыдырау жағдайларын оңтайландыру (мысалы, рН, температура, ПЭТ-ті алдын ала өңдеу); және 4) ПЭТ мономерлерінің бөлінуін растау үшін ыдырау өнімдерін талдау. Бұл жергілікті термофильді ыдыратқыштардың ашылуы Қазақстанда және одан тыс жерлерде пластикалық қалдықтарды

басқару үшін тұрақты, биотехнологиялық шешімдерді әзірлеу үшін жаңа жол ашады.

Қаржыландыру

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті қаржыландырды (Грант №. АР26196959).

Авторлардың үлесі

Жантлесова С.Д.: Концептуализация, Жобаны басқару, Ресми талдау, Әдістеме, Бақылау, Мақаланың бастапқы нұсқасын жазу; Мусабеков Ж.Т.: Зерттеу, Деректерді өңдеу; Хамитқызы Ж.: Зерттеу, Ресурстармен қамтамасыз ету; Талипова А.Б.: Нәтижелерді тексеру, Көрнекі материалдар дайындау; Кистаубаева А.С.: Концептуализация, Қаржыландыру, Бақылау, Мәтінді редакциялау және толықтыру.

Әдебиеттер

- Arnal, G., Anglade, J., Gavalda, S., Tournier, V., Chabot, N., Bornscheuer, U. T., Weber, G., & Marty, A. (2023). Assessment of four engineered PET degrading enzymes considering large-scale industrial applications. *ACS Catalysis*, 13(20), 13156–13166. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c02922>
- Atanasova, N., Stoitsova, S., Paunova-Krasteva, T., & Kambourova, M. (2021). Plastic degradation by extremophilic bacteria. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 5610. <https://doi.org/10.3390/ijms22115610>
- Benavides Fernández, C. D., Guzmán Castillo, M. P., Quijano Pérez, S. A., & Carvajal Rodríguez, L. V. (2022). Microbial degradation of polyethylene terephthalate: A systematic review. *SN Applied Sciences*, 4(10), 263. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05143-4>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A review. *Polymers*, 14(12), 2366. <https://doi.org/10.3390/polym14122366>
- Boschi, A., Scieuzo, C., Salvia, R., Arias, C. F., Perez, R. P., Bertocchini, F., & Falabella, P. (2024). Beyond microbial biodegradation: Plastic degradation by *Galleria mellonella*. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(5), 2158–2177. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03084-6>
- Chaudhary, H. D., Shah, G., Bhatt, U., Singh, H., & Soni, V. (2025). Microplastics and plant health: A comprehensive review of sources, distribution, toxicity, and remediation. *npj Emerging Contaminants*, 1(8). <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00007-z>
- Ciric, M., & Šaraba, V. (2025). Plastic bioremediation potential of groundwater microbiomes. *Biotechnology for the Environment*, 2(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00031-8>
- Dang, T. C. H., Nguyen, D. T., Thai, H., Nguyen, T. C., Hien Tran, T. T., Le, V. H., Nguyen, V. H., Tran, X. B., Thao Pham, T. P., Nguyen, T. G., et al. (2018). Plastic degradation by thermophilic *Bacillus* sp. BCBT21 isolated from composting agricultural residual in Vietnam. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 9(1), 015014. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aaabaf>
- Dhaka, V., Singh, S., Rao, R., Garg, S., Samuel, J., Khan, N. A., Ramamurthy, P. C., & Singh, J. (2025). Statistical optimization of process variables for improved poly(ethylene terephthalate) plastic degradation by a rhizospheric bacterial consortium. *Scientific Reports*, 15(1), 14813. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99286-2>
- Hussein, A. A., Al-Mayaly, I. K., & Kudier, S. H. (2015). Isolation, screening and identification of low density polyethylene (LDPE) degrading bacteria from contaminated soil with plastic wastes. *Mesopotamia Environment Journal*, 1, 1–14.
- Kawai, F. (2021). The current state of research on PET hydrolyzing enzymes available for biorecycling. *Catalysts*, 11(2), 206. <https://doi.org/10.3390/catal11020206>
- Khalil, K., Mohamad Desa, A. L., Ruslan, N. A., Mohd Yasin, N. H., Anuar, F. H., & Aqma, W. S. (2025). Evaluation of *Bacillus*-associated polyethylene terephthalate (PET) surfaces for biodegradation. *Malaysian Applied Biology*, 54(2), 19–27. <https://doi.org/10.55230/mabjournal.v54i2.2822>
- Kwan, S. (2025). Study highlights plastic waste challenges in Kazakhstan. *The Times of Central Asia*. <https://timesca.com/study-highlights-plastic-waste-challenges-in-kazakhstan/>
- Mashzhan, A., Javier-López, R., Kistaubayeva, A., Savitskaya, I., & Birkeland, N.-K. (2021). Metagenomics and culture-based diversity analysis of the bacterial community in the Zharkent geothermal spring in Kazakhstan. *Current Microbiology*, 78(8), 2926–2934. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02554-7>
- Ortega-Villar, R., Escalante, A., Astudillo-Melgar, F., Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Hidalgo-Lara, M. E., & Coronel-Olivares, C. (2024). Isolation and characterization of thermophilic bacteria from a hot spring in the State of Hidalgo, Mexico, and geochemical analysis of the thermal water. *Microorganisms*, 12(6), 1066. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061066>

- Sangale, M. K. (2012). A review on biodegradation of polythene: The microbial approach. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 3(10), 1000164. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000164>
- Sangeetha Devi, R., Rajesh Kannan, V., Nivas, D., Kannan, K., Chandru, S., & Robert Antony, A. (2015). Biodegradation of HDPE by *Aspergillus* spp. from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India. *Marine Pollution Bulletin*, 96(1–2), 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.050>
- Schulte, M. L., & Busch, P. (2024). Plastic policies in Kazakhstan. *The SWITCH-Asia Programme*. https://www.switch-asia.eu/site/assets/files/4388/plastic_policies_kz_final.pdf
- Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M.-L., Texier, H., Gavaldà, S., et al. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216–219. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- Venkatachalam, S., Nayak, S. G., Labde, J. V., Gharal, P. R., Rao, K., & Kelkar, A. K. (2012). Degradation and recyclability of poly(ethylene terephthalate). In *Polyester* (p. 107). InTech. <https://doi.org/10.5772/48612>
- Volume of sorted waste in Kazakhstan increased by less than 1% within year. (2025). Kazakh Telegraph Agency. <https://kaztag.kz/en/news/volume-of-sorted-waste-in-kazakhstan-increased-by-less-than-1-within-year>
- Yan, F., Wei, R., Cui, Q., Bornscheuer, U. T., & Liu, Y. (2021). Thermophilic whole-cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered *Clostridium thermocellum*. *Microbial Biotechnology*, 14(2), 374–385. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13580>
- Yan, Z.-F., Feng, C.-Q., Zhou, J.-Q., Huang, Q.-S., Chen, X.-Q., Xia, W., & Wu, J. (2024). Complete degradation of PET waste using a thermophilic microbe-enzyme system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260(3), 129538. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129538>
- Yang, Y., Qiu, J., Zhang, H., He, P., & Lü, F. (2025). How soon will landfilled plastics integrate into the geological carbon cycle? *Environmental Science and Ecotechnology*, 26, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100590>
- Yuan, Z., Lv, R., Gudda, F., Mosa, A., Oleszczuk, P., Minkina, T., Gao, Y., & Tang, L. (2025). Impacts of high temperatures on microbial degradation of microplastics and strategies for optimization. *New Contaminants*, 1, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.newcon.2025.100003>
- Zahari, N. Z., Mei, L. Y., Kanapia, N. N., Yatim, A. N. M., Makmud, M. Z., & Rahman, A. B. A. (2025). Isolation and application of the thermophilic strain (*Bacillus cereus*) for plastic degradation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1489(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1489/1/012017>
- Zeng, C., Ding, F., Zhou, J., Dong, W., Cui, Z., & Yan, X. (2023). Biodegradation of poly(ethylene terephthalate) by *Bacillus safensis* YX8. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), 16434. <https://doi.org/10.3390/ijms242216434>
- Zeng, W., Li, X., Yang, Y., Min, J., Huang, J.-W., Liu, W., Niu, D., Yang, X., Han, X., Zhang, L., et al. (2022). Substrate-binding mode of a thermophilic PET hydrolase and engineering the enzyme to enhance the hydrolytic efficacy. *ACS Catalysis*, 12(5), 3033–3040. <https://doi.org/10.1021/acscatal.1c05800>

Авторлар туралы мәлімет:

Жантлесова Сирина Дүйсеновна (корреспонденттік автор) – PhD, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru).

Мусабеков Журабек Турдыбекұлы – PhD студент, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан).

Хамитқызы Жазира – магистр, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан).

Талипова Айжан Берікқызы – PhD, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан).

Кистаубаева Аида Сериковна – биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың профессоры (Алматы, Қазақстан).

Information about the authors:

Zhantlessova Sirina Duissenovna (corresponding author) – PhD, senior researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru).

Mussabekov Zhurabek Turdybekuly – PhD student, researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Khamitkyzy Zhazira – master’s degree, researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Talipova Aizhan Berikovna – PhD, senior researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Kistaubayeva Aida Serikovna – candidate of biological sciences, professor at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Сведения об авторах:

Жантлесова Сирина Дүйсеновна (корреспондентный автор) – PhD, старший научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru).

Мусабеков Журабек Турдыбекұлы – PhD студент, научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Хамитқызы Жазира – магистр, научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Талипова Айжан Берікқызы – PhD, старший научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Кистаубаева Аида Сериковна – кандидат биологических наук, профессор КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Келіп түсті: 3 желтоқсан 2025 жыл
Қабылданды: 15 маусым 2026 жыл