

ISSN 2518-1483 (Online),
ISSN 2224-5227 (Print)

2025 • 2



«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫ» РҚБ

БАЯНДАМАЛАРЫ

ДОКЛАДЫ

РОО «НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»

REPORTS

OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

Editor-in-Chief:

ZHURINOV Murat Zhurinovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Acting President of RPA NAS RK, General Director of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky" (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

Editorial Board:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the International Science and Production Holding "Phytochemistry" (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

RAMAZANOV Tlekkabul Sabitovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

ABIEV Rufat, Doctor of Technical Sciences (Biochemistry), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

TIGINYANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>

SANG SU Kwak, PhD (Biochemistry, Agricultural Chemistry), Professor, Chief Scientist, Research Center for Plant Systems Engineering, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), (Daecheon, Korea), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

BERSIMBAYEV Rakhmetkazi Iskenderovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of NAS RK, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

BOSHKAEV Kuantai Avgyzevich, PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

QUEVEDO Hernando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

ZHUSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>

TAKIBAEV Nurgali Zhabagaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

KHARIN Stanislav Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

DAVLETOV Askar Erbulanovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Branch of NRNU MEPhI Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, First Deputy Director General of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky", (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Owner: RPA «National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan» (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of Information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan No. KZ31VPY00111215 issued 31. 01. 2025

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2025

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрыңұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҰҒА РҚБ президенті м.а., АҚ «Д.В. Сокольский атындағы Отын, катализ және электрохимия институтының» бас директоры (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

Редакция ұжымы:

ҚАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәліұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, «Фитохимия» халықаралық ғылыми-өндірістік холдингінің директоры (Қарағанды, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

РАМАЗАНОВ Тілекқабұл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі проректоры, (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

ӘБИЕВ Руфат, техника ғылымдарының докторы (биохимия), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты «Химиялық және биотехнологиялық аппаратураны оңтайландыру» кафедрасының меңгерушісі, (Санкт-Петербург, Ресей) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>

ОЛИВЬЕРО Росси Сезаре, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корей Биоғылым және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIBB), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

БЕРСІМБАЕВ Рахметқажы Ескендірұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. (Астана, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), нанокүрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

БОШКАЕВ Құнтай Ағвазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фарабиатындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

Бүркітбаев Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

ЖҮСІПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

ДАВЛЕТОВ Асқар Ербуланович, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, ҰЯЗУ МИФИ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арслан Зайнуталлаұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы "Отын, катализ және электрохимия институты" АҚ Бас директорының бірінші орынбасары, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

«Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының баяндамалары»

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Меншіктеуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» Республикалық қоғамдық бірлестігі (Алматы қ.).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі 31.01.2025 ж. берген № KZ31VPY00111215 Күзлік.

Тақырыптық бағыты: *физика, химия.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

© «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ, 2025

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. президента РОО НАН РК, Генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского» (Алматы, Казахстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

АДЕКЕНОВ Сергазы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор Международного научно-производственного холдинга «Фитохимия» (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

АБИЕВ Руфат, доктор технических наук (биохимия), профессор, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Санкт-Петербург, Россия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>

ОЛИВЬЕРО Росси Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>

САИГ-СУ Квак, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB), (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендерович, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

БОШКАЕВ Кунтайт Авгазыевич, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

БҮРКИТБАЕВ Мухамбеткали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>

ТАКИБАЕВ Нургали Жаббагаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

ДАВЛЕТОВ Аскар Ербуланович, кандидат физико-математических наук, доцент, Филиал НИЯУ МИФИ Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

АБИШЕВ Мелеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

АБИЛЬМАГЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич, кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан»

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы).

Свидетельство №**KZ31VPY0011215** о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан **31.01.2025**

Тематическая направленность: *физика, химия*.

Периодичность: 4 раза в год.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

© РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан», 2025

CONTENTS

PHYSICS

A.A. Gazizova, D.M. Nasirova, V.O. Kurmangaliyeva, Sh.I. Khamraev DISTRIBUTION OF PRESSURE AND TEMPERATURE IN NEUTRON STARS: NUMERICAL ANALYSIS.....	11
A. Dalelkhankyzy, G. Baimbetova, N. Koilyk, S. Toktarbay, A. Beisebayeva QUASISPIN FORMALISM OF INTERACTION BETWEEN BOSONS AND ITS APPLICATION IN NUCLEAR THEORY.....	22
N.K. Zhusupova, V.N. Zhumabekova, A.A. Zhadyranova DETERMINATION OF ANTINEUTRON-NUCLEAR SCATTERING AMPLITUDE.....	34
V. Mukamedenkyzy, B. Akberdiyev INVESTIGATION OF CONCENTRATION FIELDS IN BINARY GAS MIXTURES IN THE PRESENCE OF CONVECTIVE FLOWS.....	46
A.V. Serebryanskiy, Ch.B. Akniyazov, Ch.T. Omarov, S.Sittykova, D. Kadyrova SEARCHING FOR INNER-EARTH ASTEROIDS.....	62
G.B. Suliyeva, M.A. Makukov, E.G. Mychelkin TWO TYPES OF SCALAR BACKGROUND VISUALIZATION.....	79
U.A. Ualikhanova, A.M. Konys, A.B. Altaibayeva, Zh.M. Beisekeyeva DYNAMICAL SYSTEMS ANALYSIS OF $f(R,T) = R + \beta T^m$ COSMOLOGY.....	94
Zh.S. Umbetova, U.U. Abdizhalilova DYNAMICS OF THE EVOLUTION OF ANISOTROPIC COMPACT STARS IN $f(\tau)$ TELEPARALLEL GRAVITY.....	105
L.I. Shestakova, R.R. Spassyyuk DESTRUCTION OF SMALL BODIES COMPOSED OF SILICATES BY THERMAL STRESSES.THERMAL EMISSION OF DISRUPTION PRODUCTS.....	121
S.A. Shomshekova, L.K. Kondratyeva, I.V. Reva, L. Aktay, V.Y. Kim STUDIES OF THE MRK 766 GALAXY IN THE OPTICAL RANGE.....	138

CHEMISTRY

D.T. Altynbekova, B.K. Massalimova, B.E. Begenova, A. Darmenbayeva, M.D. Akanova SYNTHESIS AND STUDY OF PROTON CONDUCTIVITY OF NANOCOMPOSITES BASED ON COMPLEX OXIDES (LaNbO ₄) AND ALLOYS (NiCoOx, CuCoOx, NiCuOx).....	152
--	-----

D.Zh. Amantayeva, M.A. Dyusebayeva, B.K. Kopzhassarov, A.E. Berganayeva, G.E. Berganayeva PHYTOCHEMICAL COMPOSITION AND BIOLOGICAL ACTIVITY OF ULMUS PUMILA LEAVE.....	164
A. Assanov, S.A. Mameshova, G.S. Tatykhanova, T.A. Savitskaya CHEMICAL AND MINERALOGICAL ANALYSIS OF KAZAKHSTAN CLAYS AND STUDY OF THEIR HYDRODISPERSIVE PROPERTIES.....	182
G.S. Akhmetova, U.B. Issayeva, K.D. Praliyev, M.T. Omyrzakov, T.M. Seilkhanov TECHNOLOGY OF PRODUCING 1-(2-ETHOXYETHYL)-4- ADAMANTANECARBONYLOXY-PIPERIDINE HYDROCHLORIDE AND STUDY OF ITS CYTOTOXICITY.....	206
G.Zh. Baisalova, G.K. Token, B.B. Torsykbaeva, A.D. Dukenbayeva, N. Rakhmetova STUDYING THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE PHRAGMITES COMMUNIS PLANT BY GAS CHROMATOGRAPHY–MASS–SPECTROMETRY.....	218
A. Yedilova, Z. Inelova, N. Kurbatova, B. Turalin PHYTOCHEMICAL STUDY OF MEDICINAL PLANT - HUMULUS LUPULUS L., FOR THE PURPOSE OF OBTAINING BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES.....	229
A. Kuandykova, B. Taimasov, E. Potapova, B. Zhakipbayev, N. Zhanikulov STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF CLINKERS OBTAINED FROM METALLURGICAL SLAG.....	242
X.A. Leontyeva, G.M. Khussurova, D.S. Puzikova, A.N. Nefedov, M. Zhurynov PERFORMANCE AND APPLICATION OF ORGANIC CORROSION INHIBITORS IN THE PETROCHEMICAL INDUSTRY OF THE CIS COUNTRIES. REVIEW.....	258
L.K. Orazzhanova, Zh.S. Kassymova, Zh.Zh. Nurtazina, D.K. Asserzhanov, K.K. Kabdulkarimova SYNTHESIS AND APPLICATION OF IRON NANOPARTICLES FOR THE PRODUCTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES CHLORELLA VULGARIS.....	275
B.Kh. Khussain, A.R. Brodskiy, A.S. Sass, I.I. Torlopov, K.S. Rakhmetova SOLID CARBON DIOXIDE ADSORBENT BASED ON ALKALI METAL CARBONATES WITH PROMOTER ADDITIVES.....	291

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

А.А. Ғазизова, Д.М. Насирова, В.О. Құрманғалиева, Ш.И. Хамраев. НЕЙТРОНДЫ ЖҰЛДЫЗДАРДАҒЫ ҚЫСЫМ МЕН ТЕМПЕРАТУРАНЫҢ ТАРАЛУЫНА САНДЫҚ ТАЛДАУ.....	11
А. Дәлелханқызы, Г. Баймбетова, Н. Қойлық, С. Тоқтарбай, А. Бейсебаева БОЗОНДАР АРАСЫНДАҒЫ ӨЗАРА ӘСЕРЛЕСУДІҢ КВОЗИСПИНДІК ФОРМАЛИЗМІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЯДРОЛЫҚ ТЕОРИЯДАҒЫ ҚОЛДАНЫЛУЫ.....	22
Н.К. Жусупова, В.Н. Жумабекова, А.А. Жадыранова АНТИНЕЙТРОНДАРДЫҢ ЯДРОДАН ШАШЫРАУ АМПЛИТУДАСЫН АНЫҚТАУ.....	34
В. Мукамеденқызы, Б. Ақбердиев КОНВЕКТИВТІ АҒЫНДАР КЕЗІНДЕ БИНАРЛЫ ГАЗ ҚОСПАЛАРЫНДАҒЫ КОНЦЕНТРАЦИЯЛЫҚ ӨРІСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ.....	46
А.В. Серебрянский, Ч.Б. Акниязов, Ч.Т. Омаров, С. Ситтыкова, Д. Кадырова ІШКІ ЖЕР ОРБИТАСЫНДА АСТЕРОИДТАРДЫ ІЗДЕУ.....	62
Г.Б. Сулиева, М.А. Макуков, Э.Г. Мычелкин СКАЛЯРЛЫ ФОННЫҢ ЕКІ ТҮРЛІ ВИЗУАЛИЗАЦИЯСЫ.....	79
У.А. Уалиханова, А.М. Қоныс, А.Б. Алтайбаева, Ж.М. Бейсекеева $f(R,T) = R + \beta T^m$ КОСМОЛОГИЯСЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР ТАЛДАУЫ.....	94
Ж.С. Умбетова, У.У. Абдижалилова $f(\tau)$ -ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬ ГРАВИТАЦИЯСЫНДАҒЫ АНИЗОТРОПТЫ КОМПАКТТЫ ЖҰЛДЫЗДАРДЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫ.....	105
Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк СИЛИКАТТЫ ҚҰРАМДЫ ШАҒЫН ДЕНЕЛЕРДІҢ ТЕРМИЯЛЫҚ КЕРНЕУЛЕРДЕН БҰЗЫЛУЫ. БӨЛШЕКТЕНУ НӘТИЖЕСІНДЕ ПАЙДА БОЛАТЫН ӨНІМДЕРДІҢ ЖЫЛУЛЫҚ ЭМИССИЯСЫ.....	121
С.А. Шомшекова, Л.Н. Кондратьева, И.В. Рева, Л. Актай, В.Ю. Ким MRK 766 ГАЛАКТИКАСЫН ОПТИКАЛЫҚ ДИАПАЗОНДА ЗЕРТТЕУ.....	138

ХИМИЯ

- Д.Т. Алтынбекова, Б.К. Масалимова, Б.Е. Бегенова, А. Дарменбаева, М.Д. Аканова**
 КҮРДЕЛІ ОКСИДЕР (LaNbO_4) МЕН ҚҰЙМАЛАРДЫҢ (NiCoO_x , CuCoO_x , NiCuO_x)
 НЕГІЗІНДЕГІ НАНОКОМПОЗИТТЕРДІ СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ
 ПРОТОНӨТКІЗГІШТІГІН ЗЕРТТЕУ.....152
- Д.Ж. Амантаева, М.А. Дюсебаева, Б.К. Копжасаров, А.Е. Берганаева, Г.Е. Берганаева**
 ULMUS PUMILA ЖАПЫРАҚТАРЫНЫҢ ФИТОХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫ
 ЖӘНЕ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ.....164
- А. Асанов, С.А. Мамешова, Г.С. Татыханова, Т.А. Савицкая**
 ҚАЗАҚСТАН САЗДАРЫНЫҢ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ ТАЛДАУЫ
 ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ГИДРОДИСПЕРСИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ.....182
- Г.С. Ахметова, Ұ.Б. Исаева, Қ.Ж. Пірәлиев, М.Т. Омырзаков, Т.М. Сейлханов**
 1-(2-ЭТОКСИЭТИЛ)-4-АДАМАНТАНКАРБОНИЛОКСИ-ПИПЕРИДИН
 ГИДРОХЛОРИДІН АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЦИТОУЫТТЫЛЫҚ
 ӨСЕРІН ЗЕРТТЕУ.....206
- Г.Ж. Байсалова, Г.Қ. Төкен, Б.Б. Торсыкбаева, А.Д. Дукенбаева, Н. Рахметова**
 ГАЗ ХРОМАТОГРАФИЯ–МАСС–СПЕКТРОМЕТРИЯ ӘДІСІМЕН PHRAGMITES
 COMMUNIS ӨСІМДІГІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ.....218
- А. Едилова, З. Инелова, Н. Күрбатова, Б. Туралин**
 ДӘРІЛІК HUMULUS LUPULUS L. ӨСІМДІГІНЕН БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ
 ЗАТТАРДЫ АЛУ МАҚСАТЫНДАҒЫ ФИТОХИМИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ.....229
- А. Қуандыкова, Б. Таймасов, Е. Потапова, Б. Жакипбаев, Н. Жаникулов**
 МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ШЛАКТАРДАН АЛЫНАТЫН КЛИНКЕРЛЕРДІҢ
 МИКРОҚҰРЫЛЫМЫН ЗЕРТТЕУ.....242
- К.А. Леонтьева, Г.М. Хусурова, Д.С. Пузикова, А.Н. Нефедов, М. Жұрынов**
 ТМД ЕЛДЕРІНІҢ МҰНАЙ-ХИМИЯ ӨНЕРКӘСІБІНДЕ КОРРОЗИЯҒА ҚАРСЫ
 ОРГАНИКАЛЫҚ ИНГИБИТОРЛАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІ ЖӘНЕ
 ҚОЛДАНЫЛУЫ. ШОЛУ.....258
- Л.К. Оразжанова, Ж.С. Касымова, Ж.Ж. Нуртазина, Д.Қ. Әсержанов,**
К.К. Кабдулкаримова
 CHLORELLA VULGARIS БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ЗАТТАРЫН АЛУ
 ҮШІН ТЕМІР НАНОБӨЛШЕКТЕРІН СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ.....275
- Б.Х. Хусаин, А.Р. Бродский, А.С. Сасс, И.И. Торлопов, К.С. Рахметова**
 ПРОМОУТЕРЛІК ҚОСПАЛАРЫ БАР СІЛТІЛІ МЕТАЛЛ КАРБОНАТТАРЫНА
 НЕГІЗДЕЛГЕН КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗЫНЫҢ ҚАТТЫ АДСОРБЕНТІ.....291

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

А.А. Газизова, Д.М. Насирова, В.О. Курмангалиева, Ш.И. Хамраев РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗДАХ: ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ.....	11
А. Далелханкызы, Г. Баймбетова, Н. Койлык, С. Токтарбай, А. Бейсебаева КВАЗИСПИНОВЫЙ ФОРМАЛИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БОЗОНОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЯДЕРНОЙ ТЕОРИИ.....	22
Н.К. Жусупова, В.Н. Жумабекова, А.А. Жадыранова ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ АНТИНЕЙТРОН-ЯДЕРНОГО РАССЕЯНИЯ.....	34
В. Мукамеденкызы, Б. Акбердиев ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В БИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ПРИ НАЛИЧИИ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ.....	46
А.В. Серебрянский, Ч.Б. Акниязов, Ч.Т. Омаров, С. Ситтыкова, Д. Кадырова ПОИСК АСТЕРОИДОВ ВНУТРИ ЗЕМНОЙ ОРБИТЫ.....	62
Г.Б. Сулиева, М.А. Макуков, Э.Г. Мычелкин ДВА ТИПА ВИЗУАЛИЗАЦИИ СКАЛЯРНОГО ФОНА.....	79
У.А. Уалиханова, А.М. Коныс, А.Б. Алтайбаева, Ж.М. Бейсекеева АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ $f(R,T) = R + \beta T^m$ КОСМОЛОГИИ.....	94
Ж.С. Умбетова, У.У. Абдижалилова ДИНАМИКА ЭВОЛЮЦИИ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПАКТНЫХ ЗВЕЗД В $f(\tau)$ -ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ГРАВИТАЦИИ.....	105
Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк РАЗРУШЕНИЕ МАЛЫХ СИЛИКАТНЫХ ТЕЛ ТЕПЛОВЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ. ТЕПЛОВАЯ ЭМИССИЯ ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ.....	121
С.А. Шомшекова, Л.Н. Кондратьева, И.В. Рева, Л. Актай, В.Ю. Ким ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЛАКТИКИ MRK 766 В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ.....	138

ХИМИЯ

Д.Т. Алтынбекова, Б.К. Масалимова, Б.Е. Бегенова, А. Дарменбаева, М.Д. Аканова СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ (LaNbO_4) И СПЛАВОВ (NiCoO_x , CuCoO_x , NiCuO_x).....	152
---	-----

Д.Ж. Амантаева, М.А. Дюсебаева, Б.К. Копжасаров, А.Е. Берганаева, Г.Е. Берганаева ФИТОХИМИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛИСТЬЕВ ULMUS PUMILA.....	164
А. Асанов, С.А. Мамешова, Г.С. Татыханова, Т.А. Савицкая ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЛИН КАЗАХСТАНА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИХ ГИДРОДИСПЕРСИЙ.....	182
Г.С. Ахметова, Ұ.Б. Исаева, Қ.Ж. Пралиев, М.Т. Омырзаков, Т.М. Сейлханов ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИДРОХЛОРИДА 1-(2-ЭТОКСИЭТИЛ)-4- АДАМАНТАНКАРБОНИЛОКСИ-ПИПЕРИДИНА И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО ЦИТОТОКСИЧНОСТИ.....	206
Г.Ж. Байсалова, Г.К. Токен, Б.Б. Торсыкбаева, А.Д. Дукенбаева, Н. Рахметова ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РАСТЕНИЯ RHAGMITES COMMUNIS МЕТОДОМ ГАЗ ХРОМАТОГРАФИИ–МАСС–СПЕКТРОМЕТРИИ.....	218
А. Едилова, З. Инелова, Н. Курбатова, Б. Туралин ФИТОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТЕНИЯ – HUMULUS LUPULUS L. С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ.....	229
А. Куандыкова, Б. Таймасов, Е. Потапова, Б. Жакипбаев, Н. Жаникулов ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КЛИНКЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ.....	242
К.А. Леонтьева, Г.М. Хусурова, Д.С. Пузикова, А.Н. Нефедов, М. Журинов ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРАН СНГ. ОБЗОР.....	258
Л.К. Оразжанова, Ж.С. Касымова, Ж.Ж. Нуртазина, Д.К. Асержанов, К.К. Кабдулкаримова СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ CHLORELLA VULGARIS.....	275
Б.Х. Хусаин, А.Р. Бродский, А.С. Сасс, И.И. Торлопов, К.С. Рахметова ТВЁРДЫЙ АДсорбЕНТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ КАРБОНАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРОМОТИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ.....	291

© A.A. Gazizova^{1*}, D.M. Nasirova¹, V.O. Kurmangaliyeva²,
Sh.I. Khamraev¹, 2025.

¹ Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan;

² Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: askarkyzy_94@mail.ru

DISTRIBUTION OF PRESSURE AND TEMPERATURE IN NEUTRON STARS: NUMERICAL ANALYSIS

Gazizova A.A. — PhD student of the Abai Kazakh National Pedagogical University; Master of Pedagogical Sciences, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: askarkyzy_94@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4849-5118>;

Nasirova D.M. — Associate Professor of the Department of Physics, Abai Kazakh National Pedagogical University; Almaty, Kazakhstan,

E-mail: diana-nasirova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3349-0128>;

Kurmangaliyeva V.O. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University; Almaty, Kazakhstan,

E-mail: venera_baggi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8046-8508>;

Khamraev Sh.I. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Abai Kazakh National Pedagogical University; Almaty, Kazakhstan,

E-mail: hamraev_sh@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8171-4360>.

Abstract. This article presents a numerical modeling of the internal structure of neutron stars, considering various equations of state (EOS) and initial conditions, including pressure and temperature in the central regions. The relevance of this study is due to the need to refine theoretical models of ultra-dense matter under conditions close to real astrophysical scenarios, which is especially important in the context of observations from NICER, FAST, and LIGO missions. The study examines key physical processes that determine the behavior of neutron matter under extreme densities and pressures, including possible instabilities and energy bursts. The aim of the study is to evaluate the impact of different EOS models (SLy, APR, DD2) and initial parameters (pressure $P_{\text{center}}=10^{34}\text{Pa}$, temperature $T_{\text{center}}=10^9\text{K}$) on the distribution of macroscopic parameters such as mass, radius, and stability of a neutron star. The methodology is based on the numerical integration of hydrostatic and heat transfer equations using the fourth-order Runge–Kutta method. Special attention is paid to phase transitions, including the formation of hyperon and quark matter, as well as thermal fluctuations in the stellar core. The key hypothesis is that EOS variations significantly affect the structure and evolution of the object. The practical significance

lies in interpreting observable characteristics of neutron stars and refining theoretical models considering rotation and magnetic fields.

Keywords: neutron stars, nuclear structure, pressure, temperature, hydrostatics, heat transfer, numerical simulation

©А.А. Ғазизова^{1*}, Д.М. Насирова¹, В.О. Құрманғалиева²,
Ш.И. Хамраев¹, 2025.

¹Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: askarkyzy_94@mail.ru

НЕЙТРОНДЫ ЖҰЛДЫЗДАРДАҒЫ ҚЫСЫМ МЕН ТЕМПЕРАТУРАНЫҢ ТАРАЛУЫНА САНДЫҚ ТАЛДАУ

А.А. Ғазизова — Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің PhD докторанты, педагогика ғылымдарының магистрі, Алматы, Қазақстан,

E-mail: askarkyzy_94@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4849-5118>;

Д.М. Насирова — физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: diana-nasirova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3349-0128>;

В.О. Құрманғалиева — физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: venera_baggi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8046-8508>;

Ш.И. Хамраев — техника ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің физика кафедрасының доценті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: hamraev_sh@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8171-4360>.

Аннотация. Бұл мақалада нейтрон жұлдыздарының ішкі құрылымын сандық модельдеу нәтижелері келтіріледі. Зерттеу әртүрлі күй теңдеулері (EOS) мен бастапқы параметрлерді, соның ішінде орталық аймақтардағы қысым мен температураны ескере отырып жүргізілді. Бұл зерттеудің өзектілігі — қазіргі астрофизикалық байқау нәтижелеріне (мысалы, NICER, FAST және LIGO миссиялары) сәйкес келетін шынайы жағдайларда аса тығыз материяның қасиеттерін нақтылау қажеттілігімен түсіндіріледі. Жұмыста экстремалды қысым мен тығыздық жағдайындағы нейтрондық материяның мінез-құлқын анықтайтын негізгі физикалық үдерістер қарастырылады. Бұған ықтимал тұрақсыздықтар, энергия жарылыстары және фазалық ауысулар жатады. Зерттеудің мақсаты – әртүрлі күй теңдеулері модельдерінің (SLy, APR, DD2) және бастапқы параметрлердің (орталық қысым $P_{\text{center}} = 10^{14}$ Па және температура $T_{\text{center}} = 10^9$ К) нейтрон жұлдызының макропараметрлеріне, мысалы, массасы, радиусы мен тұрақтылығына әсерін бағалау. Модельдеу барысында 4-реттік Рунге–Кутта әдісі арқылы гидростатикалық және жылуөткізгіштік теңдеулері сандық тұрғыдан интегралданды. Ерекше назар фазалық ауысуларға, гиперондық және кварктік материяның пайда болуына, сондай-ақ орталық аймақтардағы жылулық флуктуацияларға аударылды. Зерттеудің негізгі гипотезасы –

тандалған EOS модельдерінің әртүрлілігі нейтрон жұлдызының құрылымы мен эволюциясына елеулі әсер ететіні. Сандық талдау нәтижелері қысым мен температураның үлестірілуі модельдерге және бастапқы параметрлерге өте сезімтал екенін көрсетті. Зерттеу нәтижелерінің практикалық маңыздылығы – алынған модельдерді нейтрон жұлдыздарының, соның ішінде FBOT типтес объектілердің бақылау сипаттамаларын түсіндіруге қолдануға болатынында. Сонымен қатар, оларды айналу мен магнит өрістерін ескеретін нақтыланған теориялық модельдер жасау үшін де пайдалануға болады.

Түйін сөздер: нейтронды жұлдыздар, ядролық құрылым, қысым, температура, гидростатика, жылу беру, сандық модельдеу

©А.А. Газизова^{1*}, Д.М. Насирова¹, В.О. Курмангалиева²,
Ш.И. Хамраев¹, 2025.

¹Казахский национальный педагогический университет им. Абая,
Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

*E-mail: askarkyzy_94@mail.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗДАХ: ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

А.А. Газизова — PhD докторант Казахского Национального Педагогического Университета имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: askarkyzy_94@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4849-5118>;

Д.М. Насирова — ассоциированный профессор кафедры физики, Казахский Национальный Педагогический Университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: diana-nasirova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3349-0128>;

В.О. Курмангалиева — кандидат физико-математических наук, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: venera_baggi@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8046-8508>;

Ш.И. Хамраев — кандидат технических наук, доцент кафедры физики Казахского Национального Педагогического Университета имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: hamraev_sh@bk.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8171-4360>.

Аннотация. В данной статье проводится численное моделирование внутренней структуры нейтронных звёзд с учётом различных уравнений состояния (EOS) и начальных условий, включая давление и температуру в центральных областях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью уточнения теоретических моделей сверхплотной материи в условиях, приближенных к реальным астрофизическим сценариям, что особенно важно в контексте наблюдений миссий NICER, FAST и LIGO. В работе рассматриваются ключевые физические процессы, определяющие поведение нейтронной материи при экстремальных плотностях и давлениях, включая возможные неустойчивости и энергетические всплески. Целью исследования является оценка влияния различных моделей EOS (SLy, APR,

DD2) и начальных параметров (давление $P_{\text{center}}=10^{34}$ Па и температура $T_{\text{center}}=10^9$ К) на распределение макропараметров, таких как масса, радиус и устойчивость нейтронной звезды. В методологии используется численное интегрирование уравнений гидростатики и теплопередачи методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Особое внимание уделено фазовым переходам, включая образование гиперонной и кварковой материи, а также тепловым флуктуациям в центральной области. Ключевая гипотеза состоит в том, что вариации EOS существенно влияют на структуру и эволюцию объекта. Результаты численного анализа подтверждают высокую чувствительность распределений давления и температуры к выбранным моделям и параметрам. Практическая значимость результатов работы заключается в применимости модели для интерпретации наблюдаемых характеристик нейтронных звёзд, в том числе объектов типа FBOT, а также для построения уточнённых теоретических моделей с учётом вращения и магнитных полей.

Ключевые слова: нейтронные звезды, ядерная структура, давление, температура, гидростатика, теплопередача, численное моделирование

Исследование проводилось при поддержке КазНПУ имени Абая (приказ N 05-04/250 от 03.04.2025г.)

Введение. Нейтронные звёзды представляют собой одни из самых плотных объектов во Вселенной, образующихся в результате коллапса массивных звёзд. Их внутренняя структура определяется уравнением состояния вещества при экстремальных давлениях и плотностях (Haensel, et al., 2007:91; Lattimer, 2001:115). В отличие от обычных звёзд, где давление поддерживается термоядерными реакциями, в нейтронных звёздах устойчивость обеспечивается вырожденным давлением нейтронов и сложными ядерными взаимодействиями (Lattimer, 2007:133). Одним из ключевых вопросов при исследовании структуры нейтронных звёзд является определение взаимосвязи между плотностью и давлением внутри звезды. Различные модели уравнения состояния приводят к различным предсказаниям относительно массы, радиуса и других физических характеристик нейтронных звёзд (Akmal, и др., 1998: 1806; Chamel, 2008: 745). Фазовые переходы в сверхплотном веществе также могут играть значительную роль в формировании внутренней структуры этих объектов, оказывая влияние на наблюдаемые параметры (Takibayev, и др., 2012: 20). Кроме того, процессы взаимодействия частиц в ядре звезды могут приводить к образованию экзотических фаз материи, таких как кварковая или гиперонная материя (Baum, и др., 2018: 13), что изменяет уравнение состояния и влияет на её эволюцию.

Численные методы моделирования позволяют исследовать внутреннюю структуру нейтронных звёзд, используя различные модели уравнения состояния. Важно учитывать начальные условия, такие как центральное давление и плотность, поскольку они существенно влияют на распределение параметров внутри звезды (Oppenheimer, и др., 1939: 376). Современные методы

расчётов, включая метод Рунге-Кутты 4-го порядка, позволяют с высокой точностью интегрировать уравнения, описывающие поведение вещества в экстремальных условиях (Press, и др., 2007: 913). В данной работе проведено численное моделирование структуры нейтронных звёзд с учётом влияния уравнения состояния на распределение давления. Использованы численные методы решения дифференциальных уравнений, что позволило получить точные профили давления внутри звезды. Проведено сравнение полученных результатов с опубликованными данными, что позволило оценить достоверность предложенной модели (Haensel, и др., 2007: 94; Takibayev, и др., 2012: 22). Дополнительно рассмотрены фазовые переходы в сверхплотном веществе и их возможное влияние на термодинамические характеристики нейтронных звёзд. Будущие исследования могут быть направлены на дальнейшую детализацию моделей, включая влияние вращения и магнитных полей на структуру и эволюцию нейтронных звёзд (Lattimer, 2022: 7).

Материалы и методы

Для исследования структуры нейтронных звёзд и анализа воздействия плотности и температуры на их макроскопические характеристики была использована численная модель, основанная на уравнении состояния (EOS) и методах решения дифференциальных уравнений, описывающих внутренние условия объектов (Haensel, и др., 2007: 89; Chamel и Haensel, 2008: 747). В данной работе применены как классические подходы, так и современные численные методы, позволяющие учитывать сложные физические процессы, происходящие при экстремальных условиях, присущих нейтронным звёздам. Численные расчёты выполнены в среде Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib. Методология включает следующие этапы:

Уравнение состояния (EOS)

Уравнение состояния (EOS) определяет взаимосвязь между давлением, плотностью и температурой внутри нейтронной звезды. В данной работе рассмотрены различные модели уравнения состояния (EOS), включая барионную и кварковую фазы материи, с учетом их влияния на структуру нейтронных звезд (Fischer, и др., 2022: 4; Pereira, и др., 2021: 10). Для высоких плотностей в ядре звезды учитывались фазовые переходы, такие как переход к гиперонной материи (Baym, и др., 2018: 15). Важно отметить, что при плотностях выше ядерной температура зачастую не оказывает значительного влияния на EOS, так как система становится вырожденной, и давление определяется в первую очередь плотностью (Haensel, и др., 2007: 97). Также учитывалась роль взаимодействий между частицами, влияющих на устойчивость структуры звезды (Rios, и др., 2019: 6).

Уравнение состояния для нейтронной материи может быть представлено в следующем виде:

$$P = P(\rho, T)$$

где P — давление, ρ — плотность, а T — температура. Для более точного моделирования были использованы параметры, экспериментально определён-

ные для экстремальных значений плотности и температуры (Haensel, et al., 2007:100).

Численные методы решения уравнений

Для численного решения системы уравнений, описывающих внутреннее состояние нейтронных звёзд, использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Данный метод является широко применяемым в астрофизических расчетах и позволяет с высокой точностью интегрировать дифференциальные уравнения, описывающие гидростатику и теплопередачу (Press, и др., 2007: 922).

Метод Рунге-Кутты 4-го порядка задаётся следующим образом:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

где:

$$k_1 = hf(t_n, y_n),$$

$$k_2 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}),$$

$$k_3 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}),$$

$$k_4 = hf(t_n + h, y_n + k_3).$$

Здесь h — шаг интегрирования, а $f(t,y)$ — функция, определяющая правую часть дифференциального уравнения.

Метод Рунге-Кутты был применён для интегрирования уравнений гидростатики и теплопередачи, что позволило получить численные профили давления и температуры в недрах нейтронной звезды с высокой точностью. В качестве литературного источника для описания метода использовалась книга Press et al. (2007) *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*.

Выбор параметров и начальных условий:

Для численного моделирования были приняты следующие начальные условия: давление в центре нейтронной звезды $P_{\text{center}}=10^{34}$ Па и температура $T_{\text{center}}=10^9$ К что типично для центральных областей массивных нейтронных звёзд, имеющих высокие плотности и температуры (Oppenheimer, 1939:378). Эти параметры могут варьироваться в зависимости от модели, однако выбранные значения обеспечивают адекватное представление о физике процесса в исследуемых диапазонах. Светимость $L(r)$ и коэффициент теплопроводности $k(r)$ были установлены как постоянные величины. В дальнейшем, для более точных оценок, можно будет включить зависимость этих параметров от радиуса и других физических условий внутри звезды.

Влияние плотности и температуры на ядерную структуру

Во время моделирования учтены изменения плотности и температуры в центре и на внешних слоях звезды. Исследования показали, что с увеличением плотности изменяются термодинамические параметры, такие как давление, температура и химический состав. Эти изменения оказывают влияние на состояние вещества в различных слоях звезды. В частности, увеличение плотности может привести к возникновению фазовых переходов в ядре звезды, что существенно влияет на её устойчивость и динамику. Для анализа влияния плотности на структуру звезды были рассчитаны профили давления и температуры в зависимости от радиуса. Результаты показывают, что плотность играет ключевую роль в формировании внутренней структуры нейтронных звёзд, определяя условия для различных термоядерных процессов и энергетического баланса звезды. Кроме того, термодинамические свойства материи в разных слоях звезды оказывают влияние на механизм её охлаждения и возможные всплывочные процессы, такие как фотовспышки (FBOTs).

Использование Python для численных вычислений

Численные расчёты и построение графиков были выполнены с использованием среды Python. Для визуализации результатов численного моделирования были построены графики зависимости давления и температуры от радиуса звезды.

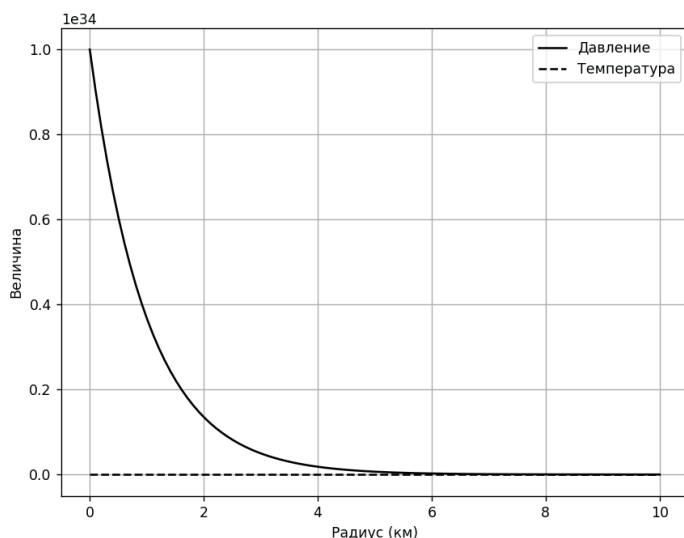


Рисунок 1. Изменение давления и температуры в зависимости от радиуса нейтронной звезды (Давление - сплошная линия, а температура — пунктирная линия)

График иллюстрирует изменения давления и температуры в недрах нейтронной звезды как функции радиуса от её центра до поверхности. График построен с использованием численного решения системы уравнений гидростатики и теплопередачи с помощью метода интегриции в SciPy (solve_ivp). Модели давления, плотности, температуры и теплопередачи основаны на

стандартных приближениях, включая уравнение состояния вида $P = \rho \cdot T$, где P — давление, ρ — плотность, а T — температура.

Результаты. Анализ полученных численных данных показал, что распределение давления внутри нейтронной звезды зависит от уравнения состояния и начальных условий. Графики численного моделирования показывают, что давление убывает монотонно от центра к периферии, достигая минимальных значений на поверхности звезды, что соответствует теоретическим ожиданиям. Сравнение с опубликованными результатами, включая работы Такибаева Н.Ж. и др. (2012), Baym et al. (2018) и Haensel et al. (2007), подтвердило достоверность численного моделирования. Однако включение фазовых переходов и вариативности начальных условий выявило дополнительные особенности в распределении плотности, которые могут объяснить некоторые наблюдаемые явления, такие как вспышки рентгеновского излучения в аккрецирующих нейтронных звёздах.

Обсуждение

Результаты численного моделирования показали, что плотность и уравнение состояния играют ключевую роль в формировании внутренней структуры нейтронных звёзд. Варьирование начальных условий, таких как центральное давление и плотность, привело к заметным изменениям в профиле давления внутри звезды. Это подтверждает, что уравнение состояния оказывает решающее влияние на характеристики объекта, включая его массу и радиус. Включение фазовых переходов в моделирование выявило дополнительные особенности в распределении плотности. В частности, переход к более плотным фазам вещества в ядре звезды влияет на градиент давления и, следовательно, на стабильность звезды. Данные эффекты могут объяснить некоторые наблюдаемые явления, включая коллапс массивных нейтронных звёзд и вспышки излучения в бинарных системах. Сравнение с опубликованными результатами показывает, что предложенная модель согласуется с современными теоретическими представлениями о строении нейтронных звёзд. Однако остаётся ряд открытых вопросов, связанных с включением эффектов вращения и магнитного поля, что может стать предметом будущих исследований. Дальнейшее развитие модели позволит более точно предсказывать наблюдаемые характеристики нейтронных звёзд и уточнить теоретические модели их эволюции.

Как показано в методологическом разделе, начальные условия, такие как температура и давление в центре звезды, играют важную роль в формировании её внутренней структуры. Повышение этих параметров в центральных областях нейтронной звезды приводит к изменению градиента давления и температуры, что оказывает значительное влияние на эволюцию звезды. В частности, увеличение давления в центре может способствовать образованию более плотных ядерных фаз, а температура определяет интенсивность теплопередачи и возможное возникновение конвективных процессов. Исследования показывают, что изменения начальных условий могут приводить к значительным различиям в распределении плотности и температуры по радиусу звезды. Эти параметры

определяют не только внутреннюю структуру, но и динамику звезды в процессе её эволюции. Например, модели показывают, что небольшие изменения начальных условий могут существенно изменить предсказания относительно устойчивости звезды и её дальнейшей судьбы.

Численное решение системы уравнений, выполненное методом Рунге-Кутты, продемонстрировало высокую точность. Однако при работе с более сложными моделями или дополнительными физическими эффектами, такими как магнитные поля или вращение звезды, возможны дополнительные источники погрешностей. Использование адаптивных методов интегрирования, таких как алгоритм адаптивного шага по времени, позволяет минимизировать численные ошибки и повысить точность расчётов. Также проведён анализ устойчивости численного метода, показывающий, что выбор шага интегрирования и параметров начальных условий оказывает влияние на стабильность решений. Для повышения точности расчётов возможно дальнейшее использование методов уточнённой интерполяции данных, а также внедрение корректировок в уравнения состояния, учитывающих дополнительные физические процессы, такие как взаимодействие частиц при сверхвысоких плотностях.

Результаты моделирования показывают, что предложенный численный метод достаточно точен для исследования структуры нейтронных звёзд, однако дальнейшие работы могут включать сравнение с более сложными моделями, учитывающими дополнительные эффекты, такие как релятивистская динамика и взаимодействия в многокомпонентной среде звезды.

Заключение.

В данной работе проведено численное моделирование структуры нейтронных звёзд с учётом уравнения состояния. Полученные результаты подтвердили значительное влияние плотности на распределение давления внутри звезды. Численный анализ показал, что вариации в уравнении состояния и начальных условиях могут приводить к заметным изменениям в макроскопических параметрах звезды, влияя на её устойчивость и эволюцию. Кроме того, выявлено, что выбор начальных параметров, таких как плотность и давление в центре звезды, оказывает влияние на конечные характеристики объекта, включая его массу и радиус. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение дополнительных физических факторов, таких как магнитные поля и релятивистские эффекты, которые также могут оказывать влияние на внутреннюю структуру нейтронных звёзд.

Данные исследования могут внести вклад в понимание природы компактных звёздных объектов и развитие теорий строения ультраплотного вещества, что представляет интерес для фундаментальной астрофизики. Также дальнейшее моделирование с учетом дополнительных факторов, таких как вращение звезды и её магнитное поле, может привести к более точным прогнозам относительно наблюдаемых характеристик нейтронных звёзд. Это, в свою очередь, позволит уточнить существующие модели строения и эволюции данных объектов, а также дать новые интерпретации астрономических наблюдений, связанных с компактными звёздами.

Литература

- Akmal A., Pandharipande V.R., & Ravenhall D.G. (1998) The equation of state of nucleonic matter and neutron stars. *Physical Review C*, — 58(3), — P. 1804-1828. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.58.1804>.
- Baym G., et al. “The equation of state of dense nuclear matter.” — *Physics Reports*, — 2018.
- Chamel N., & Haensel P. (2008) Equation of state of dense matter in neutron stars. *Nuclear Physics A*, — 787(3). — P. 739-750. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2007.11.005>.
- Chatzopoulos E., et al. “The astrophysical implications of fast blue optical transients.” — *Astrophysical Journal*, 2020.
- Douchi, F., & Haensel P. (2001) A unified equation of state of dense matter and neutron star structure. — *Astronomy & Astrophysics*, — 380(2), — P. 151-168. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011486>.
- Fischer T., et al. “Numerical methods for neutron star simulations.” *Astrophysical Journal*, 2022.
- Haensel P., Potekhin A.Y., & Yakovlev D.G. (2007) — *Neutron Stars 1: Equation of State and Structure*. Springer.
- Lattimer J.M., & Prakash M. (2007) Neutron star matter. — *Physics Reports*. — P. 442(1-2), 109-165.
- Lattimer J.M., & Prakash M. (2001) Neutron star structure and the equation of state of matter at high densities. *The Astrophysical Journal*, — 550(1). — P. 426-442. <https://doi.org/10.1086/319580>.
- Lattimer J.M., & Steiner A.W. — “Neutron star equations of state and the equation of state of matter at nuclear densities.” *Nature Reviews Physics*, 2022.
- Miller M.C., et al. “Magnetic fields in neutron stars.” — *Astrophysical Journal*, 2021.
- Oppenheimer J.R., & Volkoff G.M. (1939) On Massive Neutron Cores. *Physical Review*, — 55(4). — P. 374-381.
- Oppenheimer J.R., & Volkoff G.M. (1939) — On massive neutron cores. *Physical Review*, — 55(4). — P. 374-381. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.374>.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., & Flannery B.P. (2007) — *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.
- Pereira S., et al. “Advanced equations of state for neutron stars.” — *Nuclear Physics*, 2021.
- Rios A., et al. “Neutron star matter and EOS constraints.” — *Journal of Astrophysics*, 2019.
- Shapiro S.L., and Teukolsky S.A. — *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*. Wiley-Interscience, 2004.
- Такибаев Н.Ж., Като К., Такибаева М., Сарсембаева А., Курмангалиева В., Насирова Д. (2012). — Изучение равновесных состояний в оболочках нейтронных звезд. *Вестник КазНУ. Серия физическая*, — 3(42). — P. 16-25.

References

- Akmal A., Pandharipande V.R., Ravenhall D.G. (1998) The equation of state of nucleonic matter and neutron stars. *Physical Review C*, — 58(3). — P. 1804-1828. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.58.1804>. (in Eng.)
- Baym G., et al. (2018) The equation of state of dense nuclear matter. — *Physics Reports*. (in Eng.)
- Chamel N., Haensel P. (2008). Equation of state of dense matter in neutron stars. *Nuclear Physics A*, — 787(3). — P. 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2007.11.005> (in Eng.)
- Chatzopoulos E., et al. (2020) The astrophysical implications of fast blue optical transients. — *Astrophysical Journal*. (in Eng.)
- Douchin F., Haensel P. (2001) A unified equation of state of dense matter and neutron star structure. — *Astronomy & Astrophysics*, — 380(2). — P. 151–168. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011486> (in Eng.)
- Fischer T., et al. (2022) Numerical methods for neutron star simulations. — *Astrophysical Journal*. (in Eng.)
- Haensel P., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. (2007) — *Neutron Stars 1: Equation of State and Structure*. Springer. (in Eng.)
- Lattimer J.M., Prakash M. (2007) Neutron star matter. — *Physics Reports*, — 442(1–2). — P. 109–165. (in Eng.)
- Lattimer J.M., Prakash M. (2001) Neutron star structure and the equation of state of matter at high

densities. — *The Astrophysical Journal*, — 550(1). — P. 426–442. <https://doi.org/10.1086/319580> (in Eng.)

Lattimer J.M., Steiner A.W. (2022) — Neutron star equations of state and the equation of state of matter at nuclear densities. *Nature Reviews Physics*. (in Eng.)

Miller M.C., et al. (2021) Magnetic fields in neutron stars. *Astrophysical Journal*. (in Eng.)

Oppenheimer J.R., Volkoff G.M. (1939). On Massive Neutron Cores. *Physical Review*, — 55(4). — P. 374–381. (in Eng.)

Oppenheimer J.R., Volkoff G.M. (1939) — On massive neutron cores. *Physical Review*, — 55(4). — P. 374–381. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.374> (in Eng.)

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. (2007) — *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. (in Eng.)

Pereira S., et al. (2021) Advanced equations of state for neutron stars. — *Nuclear Physics*. (in Eng.)

Rios A., et al. (2019) Neutron star matter and EOS constraints. — *Journal of Astrophysics*. (in Eng.)

Shapiro S.L., Teukolsky S.A. (2004) — *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*. Wiley-Interscience. (in Eng.)

Takibayev N.Zh., Kato K., Takibayeva M., Sarsembayeva A., Kurmangaliyeva V., Nasirova D. (2012) — *Izucheniye ravnovesnykh sostoyanii v obolochkakh nejtronnykh zvezd* [Study of equilibrium states in neutron star crusts]. *Vestnik KazNU. Seriya fizicheskaya*, — 3(42). — P. 16–25. (in Russian.)

© A. Dalelkhankyzy¹, G. Baimbetova², N. Koilyk¹, S. Toktarbay³,
A. Beisebayeva⁴, 2025.

¹Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan;

²Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan;

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

⁴Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com

QUASISPIN FORMALISM OF INTERACTION BETWEEN BOSONS AND ITS APPLICATION IN NUCLEAR THEORY

A. Dalelkhankyzy — PhD, Senior Lecturer at Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4974-2860>;

G.A. Baimbetova — Physics and Mathematics, Head of the Department for Research and Training of Scientific Personnel at Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: bgulzada_74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4922-5310>;

N.O. Koilyk — Physics and Mathematics, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: nurgali.koilyk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0096>;

S. Toktarbay — PhD, Senior Lecturer at Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: toktarbay.saken@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5699-4476>;

A.S. Beisebayeva — Physics and Mathematics, Associate Professor at Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: a.s.beisebayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0004-6097-5384>.

Abstract. In the field of nuclear physics, the nature of the forces between nucleons has not yet been fully revealed. Therefore, the movement of nucleons in the medium field and their effective interaction currently play an important role in explaining the basic properties of these nuclear systems. Because of this, nucleons can be arranged in pairs in quantum state shells that correspond to energy levels, such as atomic electrons, as a result of strong mutual effects. Over the past decades, the Interacting Boson Model (IBM) has gained wide application for describing nuclear structure. This model has proven particularly effective in analyzing low-energy levels in nuclear spectroscopy. The simplicity of the algebraic structure and the fundamental concepts underlying the IBM provide extensive opportunities for studying collective excitations in the nucleus. Early theoretical approaches linked nuclear deformations with the geometrical distribution of nucleons; however, modern interpretations view these excitations as energy levels arising from interactions between bosons within the

nucleus. At present, the IBM is regarded as one of the leading tools for describing nuclear structure. The simplest version of this model considers only the interactions of s- and d-bosons, which is sufficient to explain the structure of low-energy states in heavy nuclei. The relevance of the study is important. Despite the diversity of approaches to describing the nature of nuclear interactions in many-particle systems, most early theories were phenomenological in nature. Among them, the Interacting Boson Model occupies a special place, providing a solid foundation for interpreting new experimental data and addressing modern scientific and technological challenges.

Keywords: nucleus, states of the nucleus, Hamiltonian of the nuclear reaction, atomic nucleus, the spectra, gamma transitions

© А. Дәлелханқызы¹, Г. Баймбетова², Н. Қойлық¹, С. Токтарбай³,
А. Бейсебаева⁴, 2025.

¹Қазақ ұлттық педагогикалық қыздар университеті, Алматы, Қазақстан;

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан;

³Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

⁴Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com

БОЗОНДАР АРАСЫНДАҒЫ ӨЗАРА ӘСЕРЛЕСУДІҢ КВОЗИСПИНДІК ФОРМАЛИЗМІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЯДРОЛЫҚ ТЕОРИЯДАҒЫ ҚОЛДАНЫЛУЫ

А. Дәлелханқызы — PhD, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан,

E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4974-2860>;

Г.А. Баймбетова — ф.-м.ғ.к., Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университетінің ҒЗЖ және ғылыми кадрларды даярлау басқармасының басшысы, Алматы, Қазақстан,

E-mail: bgulzada_74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4922-5310>;

Н.О. Қойлық — ф.-м.ғ.к., Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: nurgali.koilyk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0096>;

С. Токтарбай — PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан

E-mail: toktarbay.saken@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5699-4476>;

А.С. Бейсебаева — ф.-м.ғ.к., Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің қауымдастырылған профессоры, Алматы, Қазақстан,

E-mail: a.s.beisebayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0004-6097-5384>.

Аннотация. Ядролық физика саласында нуклондар арасындағы күштердің табиғаты әлі толық ашылған жоқ. Сондықтан нуклондардың орта өрістегі қозғалысы және олардың тиімді өзара әрекеттесуі қазіргі кезде осы ядролық жүйелердің негізгі қасиеттерін түсіндіруде маңызды рөл атқарады. Осыған байланысты нуклондар күшті өзара әсерлердің нәтижесінде атомдық электрондар сияқты энергия деңгейлеріне сәйкес келетін кванттық күй қабықшаларында жұп болып орналасуы мүмкін. Соңғы онжылдықтарда өзара әрекеттесетін бозон моделі (ӘБМ) ядролық құрылымды сипаттау үшін кеңінен қолданыла бастады.

Бұл модель ядролық спектроскопиядағы төмен энергия деңгейлерін талдауда әсіресе тиімді екенін дәлелдеді. Алгебралық құрылымның қарапайымдылығы және ӘБМ негізіндегі іргелі ұғымдар ядроғағы ұжымдық қозуларды зерттеуге кең мүмкіндіктер береді. Ертедегі теориялық тәсілдер ядролық деформацияларды нуклондардың геометриялық таралуымен байланыстырды; дегенмен, қазіргі заманғы интерпретациялар бұл қозуларды ядро ішіндегі бозондардың өзара әрекеттесуінен туындайтын энергия деңгейлері ретінде қарастырады. Қазіргі уақытта әрекеттесетін бозондар моделі ядролық құрылымды сипаттайтын жетекші құралдардың бірі болып саналады. Бұл модельдің қарапайым нұсқасы тек s - және d -бозондарының өзара әрекеттесуін қарастырады, бұл ауыр ядролардағы төмен энергиялы күйлердің құрылымын түсіндіру үшін жеткілікті болып табылады. Зерттеудің өзектілігі маңызды. Көп бөлшекті жүйелердегі ядролық өзара әрекеттесу сипатын сипаттауға арналған тәсілдердің алуан түрлілігіне қарамастан, алғашқы теориялардың көпшілігі феноменологиялық сипатта болды. Олардың ішінде өара әрекеттесетін бозон моделі ерекше орын алады, бұл жаңа эксперименттік деректерді интерпретациялауға және заманауи ғылыми-техникалық мәселелерді шешуге берік негіз береді.

Түйін сөздер: ядро, ядро күйлері, ядролық реакция гамильтониан, атом ядросы; спектрлер, гамма ауысу

© А. Далелханкызы¹, Г. Баймбетова², Н. Койлык¹, С. Токтарбай³,
А. Бейсебаева⁴, 2025.

¹Казахский национальный женский педагогический университет,
Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
Алматы, Казахстан;

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

⁴Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com

КВАЗИСПИНОВЫЙ ФОРМАЛИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БОЗОНОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЯДЕРНОЙ ТЕОРИИ

А. Далелханкызы — PhD, старший преподаватель Казахского национального женского педагогического университета, Алматы, Казахстан,
E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4974-2860>;

Г.А. Баймбетова — кандидат физико-математических наук, начальник управления НИР и подготовки научных кадров Казахского национального педагогического университета имени Абая, Алматы, Казахстан,
E-mail: bgulzada_74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4922-5310>;

Н.О. Койлык — кандидат физико-математических наук, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: nurgali.koilyk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0281-0096>;

С. Токтарбай — PhD, старший преподаватель Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,



E-mail: toktarbay.saken@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5699-4476>;

А.С. Бейсебаева — кандидат физико-математических наук, доцент Казахского национального технического исследовательского университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,

E-mail: a.s.beisebayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0004-6097-5384>.

Аннотация. В области ядерной физики природа взаимодействий между нуклонами до конца еще не раскрыта. Поэтому движение нуклонов в поле среды и их эффективное взаимодействие в настоящее время играют важную роль в объяснении основных свойств этих ядерных систем. Благодаря этому нуклоны могут располагаться парами в оболочках квантовых состояний, соответствующих энергетическим уровням, таким как атомные электроны, в результате сильных взаимных эффектов. За последние десятилетия модель взаимодействующих бозонов (ВМБ) получила широкое применение для описания структуры ядра. Эта модель оказалась особенно эффективной при анализе низкоэнергетических уровней в ядерной спектроскопии. Простота алгебраической структуры и фундаментальные концепции, лежащие в основе IBM, предоставляют широкие возможности для изучения коллективных возбуждений в ядре. Ранние теоретические подходы связывали ядерные деформации с геометрическим распределением нуклонов; однако современные интерпретации рассматривают эти возбуждения как энергетические уровни, возникающие в результате взаимодействий между бозонами внутри ядра. В настоящее время ВМБ считается одним из ведущих инструментов для описания структуры ядра. Простейшая версия этой модели рассматривает только взаимодействия s- и d-бозонов, чего достаточно для объяснения структуры низкоэнергетических состояний в тяжелых ядрах. Актуальность исследования важна. Несмотря на разнообразие подходов к описанию природы ядерных взаимодействий в многочастичных системах, большинство ранних теорий были феноменологическими по своей природе. Среди них модель взаимодействующих бозонов занимает особое место, обеспечивая прочную основу для интерпретации новых экспериментальных данных и решения современных научных и технологических задач.

Ключевые слова: ядро, состояния ядра, гамильтониан ядерной реакции, атомное ядро, спектры, гамма-переходы

Кіріспе. Көп нуклонды жүйелердің ішкі құрылымы мен қасиеттерін сипаттау үшін нуклондардың күшті өзара әрекеттесуіне және олардың жұптасу құбылысына негізделген бірыңғай микроскопиялық фермиондық теория жасалды. Осы мақсатта Фермион операторларын бозондық кеңістігіне проекциялау әдісі қолданылды, ол Отсука–Арима–Якелло (ОАЯ) схемасына негізделген. Бұл әдіс арқылы фермион матрицасының элементтері негізінде ӘБМ гамильтонианындағы ерікті параметрлерді анықтау мүмкіндігі берілді. (Arima, et al., 1978) Құрылған теория жеңіл және орташа ядролық массасы бар сфералық изотоптардың құрылымын талдауда қолданылды. Теориялық тұрғыдан алынған физикалық шамалар эксперименттік нәтижелермен және әдебиеттегі балама әдістермен алынған мәліметтермен салыстырылды және олардың өзара

сәйкестігін талдады. Осы зерттеудің нәтижесінде ұсынылған тәсіл ӘБМ феноменологиясының негіздерін тереңірек түсіндіріп қана қоймайды, сонымен қатар ядролық құрылымның жаңа тенденцияларын ашады және оларды бейбіт ядролық технологияларда тиімді пайдалануға мүмкіндік береді (Baktybaev, et al., 1985).

Сфералық ядролардағы бозондар мен коллективтік күйлердің өзара байланысы

Бозондардан тұратын жүйелерді сипаттайтын SU(6) симметриялы гамильтонианның асимптотикалық шегі көптеген жағдайларда реал ядролардың қасиеттерін толық бейнелей алмайды. Себебі көптеген ядролар үшін асимптотикалық симметриялар айқын сақталмайды. Мысалы, сфералық ядроларды қарастыру кезінде SU(5) симметриясында ε, C_L соңғы екі мүшелер параметрлерінен айтарлықтай көп деп алып: $\varepsilon, C_L > \nu_0, \nu_2$, соңғы екі мүшені есептен шығарып тастап отырады. Мұндай симметрия жағдайында гамильтонианның бастапқы екі мүшесі жүйенің энергетикалық сипаттамасын анықтаса, кейінгі мүшелері параметрлік түрленулерге тәуелді болады. Бұл – жүйенің нақты күйін бейнелеу үшін жеткіліксіз. Барреттің зерттеулерінде, Se изотоптарындағы ядролық күй сипаттамаларын SU(5) симметриясы аясында бозондық үлгімен түсіндірудің шектеулері көрсетілген. Аталған теория E2 типті электромагниттік ауысулар ықтималдығын $B(E2, 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ анықтауға негізделеді. Дегенмен, эксперименттік деректер бұл мәндердің теориялық нәтижелермен толық сәйкес келмейтінін көрсетті (Pannet, et al., 1985). Бұл – квадрупольдік күйлердің фондық күйлермен күрделі араласуының жеткілікті түрде ескерілмегенін аңғартады.

Аталған қиындықтарды айналып өту үшін, коллективтік ядролық қозғалыстарды дәлірек сипаттауға мүмкіндік беретін кеңейтілген үлгілер ұсынылған. Мысалы, Бақтыбаев және әріптестері d-бозондармен қатар f-бозондарды да енгізіп, модельге теріс октупольдік күй элементтерін қосуды ұсынды. Бұл тәсіл Se изотоптарының кейбір күйлерін дәлірек сипаттауға мүмкіндік бергенімен, тәжірибе нәтижелерімен толық сәйкес келетін жалпылама шешім бола алған жоқ. Қазіргі жұмыс аясында E2 – өту интенсивтігін және γ -сәулелену сипаттамаларын сандық жолмен есептеп, алынған теориялық нәтижелерді нақты эксперименттік деректермен салыстыру мақсатын көздейді. Сонымен қатар, f-бозондардың модельдегі үлес салмағы мен маңызын анықтау үшін қосымша тексерулер жүргізіледі.

Негізгі әдістер мен материалдар. Зерттеуде қарастырылатын модель екі түрлі бозоннан — квадрупольдік және октупольдік — құралған жүйеге негізделеді. Мұндай жүйелерде гамильтонианды және сәйкес электромагниттік операторларды диагональдық түрде бейнелеу мүмкіндігі артады. Себебі, физикалық тұрғыдан маңызды болып табылатын конфигурациялар тек белгілі бір түрдегі бозондардың (мысалы, $(d^+)^{Nd} * f^+$ өзара әрекеттесуінен құралады. Бұл жағдайда E1-типті ауысулар, яғни $(d^+)^{N+1}$ конфигурациясынан пайда болған күйлер, экспериментте байқалатын теріс жұптылықтағы күйлерге сәйкес келеді және көбіне негізгі күймен бірге байқалады.

$$H = H_d + H_f + V_{fd} \quad (1)$$

Аталған конфигурациялардың гамильтонианын былайша бейнелеуге болады:

• H_d – дәстүрлі s және d бозондар үшін жазылған квадрупольдік гамильтониан;

• H_f — октупольдік күйді сипаттайтын f -бозон гамильтонианы;

• V_{fd} — квадруполь және октуполь бозондары арасындағы өзара әрекеттесу бөлімі.

Бұл өзара әсер гамильтонианы келесі түрде өрнектеледі:

$$V_{fd} = \sum_L w_L [(d^+ f^+)^{(L)} (df)^{(L)}]^{(0)} + w'_L [(d^+ s + s^+ d)^{(L)} (f^+ f)^{(L)}]^{C_0} \quad (2)$$

Квадрупольдік бозондармен шектелетін қарапайым жағдайларда бұл өрнектің тек бірінші қосындысы, яғни w_L параметрі ғана басты рөл атқарады. Ал берілген жұмыс аясында гамильтонианның толық құрылымы қарастырылады, мұндағы w_L ($L = 12345$) мәндеріндегі параметрлер арқылы әр түрлі өзара әсер процестері сипатталады. Енді толық гамильтонианды

$$\begin{aligned} H = & \varepsilon_d \sum_m d_m^+ d_m + \sum_L \frac{1}{2} (2L+1)^{\frac{1}{2}} C_L [(d^+ d^+)^{(L)} * (d)^{(L)}]^{(0)} + \\ & + \varepsilon_f \sum_m f_m^+ f_m + \sum_{L,m} \frac{1}{2} (2L+1)^{\frac{1}{2}} C_L [(f^+ f^+)^{(L)} (f)^{(L)}]^{(0)} + \\ & + \sum_L w_L [(d^+ f^+)^{(L)} (df)^{(L)}]^{(0)} \end{aligned} \quad (3)$$

Осы зерттеу аясында есептеулерді оңтайландыру мақсатында келесі қарапайым шектеу қойылды: жүйеде тек бір квадрупольдік бозон N_d – және бір ғана октупольдік бозон $N_f = 1$ қарастырылды. Мұндай шектеу қойылған модель үшін гамильтонианның диагональдық элементі келесі түрде өрнектеледі:

$$E(d^{N_d} I_d = 2N_d, f, I = 2N_d + 3) = E(d^{N_d}) + \varepsilon_f + N_d w_L \quad (4)$$

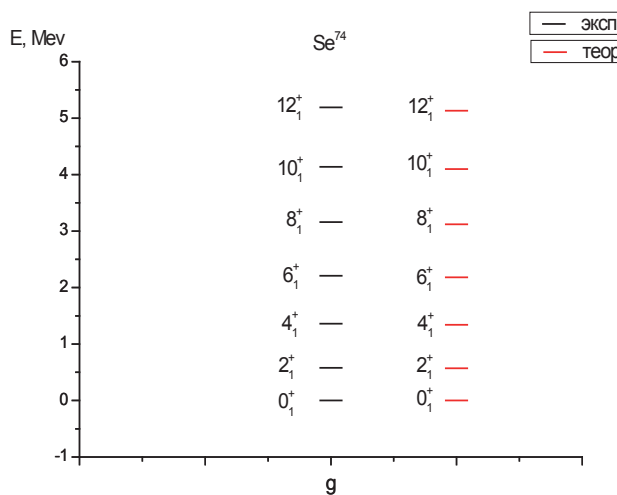
$E(d^{N_d})$ – квадрупольдік бозондар есебінен қалыптасқан негізгі жолақ күйінің энергиясы; соңғы мүше — d -бозон мен f -бозон арасындағы өзара әсер энергиясын сипаттайды.

Осылайша құрастырылған модель тек бір октупольдік бозон қосылған жүйеге негізделіп, селеннің изотоптарындағы теріс жұптылықты күйлер мен олардың энергетикалық жолақтарының табиғатын сипаттауға мүмкіндік береді. Мұндай үлгі теориялық параметрлердің алдын ала белгілі мәндеріне негізделіп құрастырылған және олар тәжірибелік мәндермен сәйкестендіріліп елеулі түзетулер енгізуді қажет етпеді.

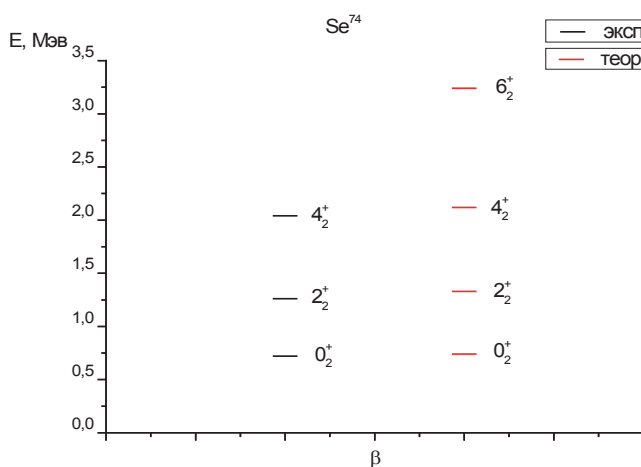
Пайдаланылған гамильтониан параметрлерінің нақты мәндері:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.62 \text{ МэВ}, & C_4 &= 0.10 \text{ МэВ}, & C_2 &= -0.001 \text{ МэВ} \\ C_0 &= -0.40 \text{ МэВ}, & \varepsilon_3 &= 2.2 \text{ МэВ}, & w_L &= -0.07 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

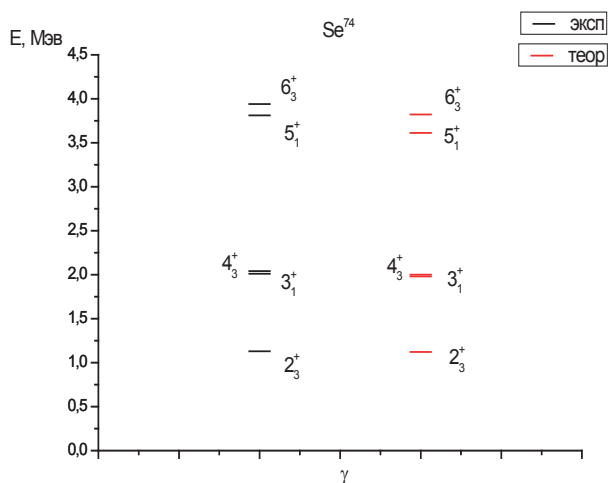
Жоғарыда көрсетілген параметрлерге сүйене отырып, $^{74}_{34}\text{Se}_{40}$ изотопының төменгі энергетикалық күйлерінен құралған спектрі есептелді. Қорытынды нәтижелер 1–4 суреттерде келтірілген. Эксперименттік мәліметтерден барлық ядролар үшін тек Y^{00}, Y^{10}, Y^{01} жолақтарының энергетикалық деңгейлері анықталған және олар энергия бірлігі ретінде МэВ-пен берілген. Бұл жолақтар геометриялық Бор–Маттельсон жіктеу жүйесі бойынша $g-, \beta-, \gamma$ -типтегі ауысулар ретінде белгіленген (Bohr, et al., 1971).



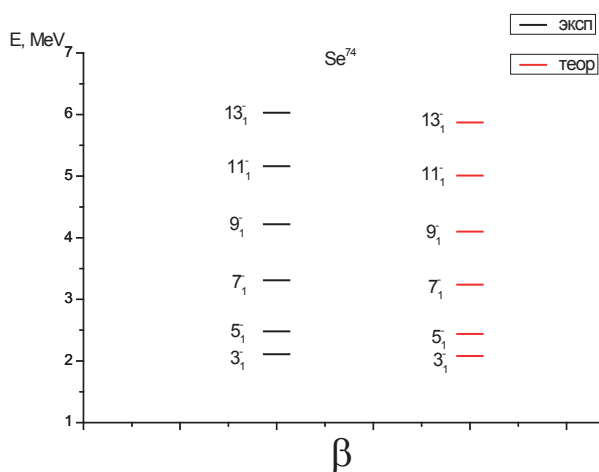
Сурет 1. Теориялық модельмен және тәжірибе арқылы анықталған $^{74}_{34}\text{Se}_{40}$ Ядроның g-жолағы спектрі (МэВ)



Сурет 2. Теориялық модельмен және тәжірибе арқылы анықталған $^{74}_{34}\text{Se}_{40}$ Ядроның β -жолағы спектрі (МэВ)



Сурет 3. Теориялық модельмен және тәжірибе арқылы анықталған $^{74}\text{Se}_{40}$ Ядроның γ - жолағы спектрі (МэВ)



Сурет 4. Теориялық модельмен және тәжірибе арқылы анықталған $^{74}\text{Se}_{40}$ Ядроның β - жолағының түрленуі (МэВ)

Қарастырылып отырған ядроның энергетикалық спектрі қолданылған теориялық әдістің тиімділігін дәлелдейді. Әрбір күйдің толқындық функциясының сипаттамалары нақты күйлермен дұрыс сәйкестенуі қажет. Бұл үшін толқындық функцияларды талдауда $B(E1)$, $B(E2)$ электромагниттік ауысу ықтималдықтарын есептеу арқылы толықтыру қажет. Анықталған ықтималдықтарды тек тәжірибелік нәтижелермен салыстырумен шектелмей, өзге теориялық әдістермен алынған мәліметтермен де салыстырған жөн. Мұндай балама теория ретінде Давыдов пен оның шәкірті Чобанның Бор–Моттelson моделіне негізделген γ гамма-асимметриялы ядроларға арналған геометриялық феноменологиялық тұжырымдамасын қарастыруға болады.

А.С. Давыдовтың теориясында β, γ, μ – параметрлері асимметриялы ядролардың сипаттамасы ретінде енгізіледі. Бұл шамалар ядроның симметрия осіндегі деформациясын, айналмалы қозғалыс бағытындағы динамикасын және тербеліс амплитудасын сипаттайды. Алдында айтылғандай, ^{74}Se изотопының негізгі g-жолағымен қатар β, γ жолақтары мен жұптылығы теріс күй деңгейлері арасындағы E(2) квадрупольдік γ -ауысуларының ықтималдығы біз қолданған ӘБМ әдісімен, сондай-ақ Давыдов моделімен есептелді. Бұл теориялық бағалар эксперименттік нәтижелермен салыстырылып, 1-кестеде берілген.

1 – Кесте. $^{74}\text{Se}_{40}$ ядросындағы гамма – ауысуларындағы $B(E2)$ мәндерін тәжірибеде жүзінде салыстыру

γ – ауысу	$B(E2), 10^{-50} e^2 cm^2$			
$I \rightarrow I'$	$E_I \rightarrow E_{I'} (МэВ)$	экспер	ӘБМ	мдч, $\mu = 0.5 \quad \gamma = 25^\circ$
1	2	3	4	5
$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$	0.64→0	74(3)	74	74
$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	1.36→0.64	148(6)	128	128
$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	2.23→1.36	83(20)	105	193
$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	3.20→2.23	97(7)	110	252
$10_1^+ \rightarrow 8_1^+$	4.26→3.20	88(13)	104	298
$12_1^+ \rightarrow 10_1^+$	5.44→4.26	87(11)	102	360
$14_1^+ \rightarrow 12_1^+$	6.74→5.44	73(12)	93	-
$16_1^+ \rightarrow 14_1^+$	8.12→6.74	90(27)	121	-
$4_2^+ \rightarrow 2_2^+$	1,88→1,27	120(5)	110	62
$6_2^+ \rightarrow 4_2^+$	2,66→1,88	77(35)	115	-
$8_2^+ \rightarrow 6_2^+$	3,53→2,66	49(20)	83	-
$10_2^+ \rightarrow 8_2^+$	4,45→3,53	67(30)	102	-
$12_2^+ \rightarrow 10_2^+$	1,88→0,64	8.2(35)	2.2	-
$4_2^+ \rightarrow 2_1^+$	2,66→1,36	3.3(15)	5.3	-
$6_2^+ \rightarrow 4_1^+$				
$3_1^+ \rightarrow 2_2^+$	1.88→1.27	120(5)	104	191
$5_1^+ \rightarrow 3_1^+$	2.66→1.88	77(35)	85	-
$7_1^+ \rightarrow 5_1^+$	3.53→2.66	49(20)	76	-
$9_1^+ \rightarrow 7_1^+$	4.55→3.53	67(30)	87	-
$11_1^+ \rightarrow 9_1^+$	1.88→0.64	8.2(35)	3.0	9.2
$3_1^+ \rightarrow 2_1^+$	2.66→1.36	3.3(15)	2.0	-
$5_1^+ \rightarrow 4_1^+$	1.88→1.36	81(35)	54	90
$3_1^+ \rightarrow 4_1^+$				

Нәтижелер мен талқылау. Жүргізілген салыстырмалы талдаулар негізінде, біз ұсынған кванттық бозондық модель – яғни квадрупольдік және октупольдік бозондарды бірлесіп қарастыратын теория – ядроның E2 түріндегі ауысуларының ықтималдықтарын дәл сипаттай алатыны анық байқалады. Бұл теория тек негізгі ипасит-жолаққа тән энергетикалық деңгейлер үшін ғана емес,

сонымен қатар күрделі құрылымды, теріс жұптылыққа ие күй жолақтары үшін де энергетикалық сипаттамаларды нақты бере алады. Бұл нәтиже ұсынылған моделіміздің кең ауқымды физикалық жүйелерге қолдануға жарамды екенін көрсетеді. Жалпы алғанда, Давыдов–Чобан моделі ядролық құрылымды сипаттау үшін белгілі бір тиімділікке ие әрі физикалық тұрғыда түсінікті, қанағаттанарлық тәсіл болып табылады. Алайда, бұл теорияның әлсіз тұстары да бар екенін эксперименттік мәліметтермен салыстыру барысында байқауға болады. Атап айтқанда, Давыдов–Чобан моделінде спин саны артқан сайын ауысу ықтималдықтары да сызықтық түрде ұлғая береді, ал тәжірибеде мұндай заңдылық орындалмайды. Бұл теориялық болжамның физикалық шындықпен толық үйлеспейтінін білдіреді.

Электромагниттік ауысулар ықтималдығы бойынша есептелген мәндер мен нақты эксперименттік нәтижелердің арасындағы сәйкестік біздің кеңейтілген бозондық моделімізде анағұрлым жоғары. Мысалы, электромагниттік бозондық теория (ЭБТ) шеңберінде есептелген энергетикалық деңгейлердің тәжірибе нәтижелерімен айырмасы бар болғаны 0.015–0.017 МэВ шегінде ғана. Бұл – жоғары дәлдік көрсеткіші. Керісінше, Давыдов–Чобан моделінде бұл айырма орташа алғанда 0.25 МэВ-қа дейін жетеді, бұл – айтарлықтай ауытқу. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Давыдов–Чобан моделі теріс жұптылыққа ие күйлер арасындағы квадрупольдік ауысулардың ықтималдықтарын дәл сипаттай алмайды. Мұндай айырмашылықтарды осы модельдің параметрлерін өзгерту арқылы азайту да мүмкін емес екені анықталды. Бұл жағдай, өз кезегінде, моделдің құрылымдық шектеулерін көрсетіп, күрделі ядролық жүйелерге оны қолдануда белгілі бір шектеулер бар екенін білдіреді.

Қорытынды. Асимптотикалық шек теориясын симметриялы бозондық модельдерге сүйене отырып, сферикалық ядролардың қасиеттерін талдауға қолдану тиімді нәтижелер беретіндігі тәжірибе жүзінде айқындалды. Осы зерттеуде $SU(6)$ - симметриялы бозондық тәсілдің әмбебаптығы тек сферикалық ядроларға ғана емес, сондай-ақ сферикалық пен деформацияланған ядролардың аралығында орналасқан нуклидтерге де таралатыны қарастырылды. Алайда, мұндай өтпелі ядроларға $SU(6) \supset SU(5)$ асимптотикалық симметрияны толық күйінде қолдану физикалық тұрғыдан шектеулі екендігі анықталды. Сондықтан, бұл симметрияны тек оның спонтанды түрде ішінара бұзылған формасында ғана пайдалану ядроның ішкі құрылымын дәл сипаттауға мүмкіндік беретіні белгілі болды. Зерттеу барысында сферикалық конфигурацияларға жақын ядролардың қасиеттерін сипаттау мақсатында, квадрупольді $SU(5)$ - симметриялы гамильтонианға бір немесе екі октупольді бозондық операторларды қосу арқылы жасалған модельдің жоғары деңгейде тиімділік танытатыны дәлелденді. Құрастырылған гамильтониан көмегімен зерттелген ядролардың төмен энергиялы күйдегі спектрлері және сол спектр деңгейлері арасындағы квадрупольдік $E2$ электромагниттік көшу ықтималдықтары есептелді. Бұл модель $^{74}_{34}\text{Se}_{40}$ ұсынылған ядролық жүйелердің энергетикалық құрылымын сандық тұрғыдан дәл сипаттай алатын қуатты құрал екендігін көрсетті.

Әдебиет

- Бор О., Моттelson Б. (1971) Структура атомного ядра. — Т.1,2. — С. 455-664.
- Arima A., & Iachello F. (1978) Interacting boson model of collective states. *Annals of Physics*, — Vol. 123. — P. 468–492.
- Baktybaev K.B., & Kabulov A.B. (1985) The role of particle-particle dipole model of collective motions in heavy nuclei. *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, №11(4). — P. 63–67.
- Iachello F., & Jackson, A. D. (1982) A phenomenological approach to clustering in heavy nuclei. *Physics Letters B*, №108(3). — P.151–154. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)91162-5](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)91162-5).
- Vergados J.D. (1968) SU (3) R(3) Wigner coefficients in the 2s-1d shell. *Nuclear Physics A*, №111(3). — P. 681–682. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(68\)90249-2](https://doi.org/10.1016/0375-9474(68)90249-2).
- Voronov V.V., & Solovyev A.G. (1983) The basic equations of the quasiparticle-phonon model of the nucleus. *Theoretical and Mathematical Physics*, №57. — P. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01028176>.
- Pannet W., Ring P., & Gambhir Y.K. (1985) An analysis of angular momentum-projected Hartree-Fock-Bogoliubov wave functions in IBM. *Nuclear Physics A*, №443(2). — P. 189–191. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90259-3).
- Baktybaev K.K., Dalelkhankyzy A., Koilyk N.O., Ramankulov K.E., Koilyk N.O., & Baktybaev M.K. (2013) The nucleon-pair shell description of collective excitations of spherical nuclei. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, Phys. — Vol. 7, №12. — P. 595-603. <https://m-hikari.com/astp/astp2013/astp9-12-2013/dalelkhankyzyASTP9-12-2013>.
- Baktybaev K.K., Dalelkhankyzy A., Koilyk N.O., Ramankulov K.E., & Baktybaev M.K. (2014). Description of collective states of 102,104,106,108,110Pd isotopes in the nucleon-pair model. *Adv. Studies Theor. Phys.* — Vol. 8, №10. — P. 475-484. <https://m-hikari.com/astp/astp2014/astp9-12-2014/dalelkhankyzyASTP9-12-2014>.
- Бактыбаев К.Б., Абельдина Ж.К. (1978) Структура состояний изотопов с $\Phi=89-94$ в оболочечной модели с обобщенной сеньорити. *Изв.АН СССР, сер.физ.*, — Т.42, — С.116. (орысша).
- Baktybaev K.K., Dalelkhankyzy A., Koilyk N.O. (2015). Methods Strongly-Connected Channels and the Inelastic of Alpha Particles on Nuclei ^{28, 30, 32} Si. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, Phys. — Vol. 9, №10. — P. 483-493. <https://www.m-hikari.com/astp/astp2015/astp9-12-2015/p/dalelkhankyzyASTP9-12-2015>.
- Бекжанов Р.Б. (1989) Справочник по ядерной физике. Книга 1.
- Lederer C.M., & Shirley V.S. (1978) Table of isotopes (7th ed.). New York. <https://escholarship.org/content/qt28m305b5/qt28m305b5.pdf#page=170>.
- Luo, Y. A., Pan, F., Bahri, C., & Dayer, I. P. (2005). Pair shell model and the interacting boson model. *Physical Review* — C. 71, 044304. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.71.044304>.
- Takada K. & Tazaki S. Yosumoto S. (2006) Dyson Boson Mapping and Shell-Model Calculations for Even-Even Nuclei. *Progress of Theoretical Physics*, №1. 1, — Vol. 16. — P. 107.10.1143/PTP.116.107. <https://doi.org/10.1143/PTP.116.107>.

References

- Bor O., Mottel'son B. (1971) Struktura atomnogo yadra [The structure of the atomic nucleus]. Moscow: Mir, — Т.1,2. — С. 455-664. (in Russian)
- Arima A., & Iachello F. (1978) Interacting boson model of collective states. *Annals of Physics*, — Vol. 123. — P. 468–492. (in Eng.).
- Baktybaev K.B., & Kabulov A.B. (1985) The role of particle-particle dipole model of collective motions in heavy nuclei. *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, №11(4). — P. 63–67. (in English)
- Iachello F., & Jackson A.D. (1982) A phenomenological approach to clustering in heavy nuclei. *Physics Letters B*, №108(3), — P.151–154. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)91162-5](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)91162-5). (in English)
- Vergados J.D. (1968) SU (3) R(3) Wigner coefficients in the 2s-1d shell. *Nuclear Physics A*, №111(3). — P. 681–682. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(68\)90249-2](https://doi.org/10.1016/0375-9474(68)90249-2). (in English)
- Voronov V.V., & Solovyev A.G. (1983) The basic equations of the quasiparticle-phonon model of the nucleus. *Theoretical and Mathematical Physics*, №57. — P. 75–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01028176>. (in English)

Pannet W., Ring P., & Gambhir Y.K. (1985) An analysis of angular momentum-projected Hartree-Fock-Bogoliubov wave functions in IBM. Nuclear Physics A, №443(2). — P.189–191. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(85\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(85)90259-3). (in English)

Baktybaev K.K., Dalelkhankyzy A., Koilyk N.O., Ramankulov K.E., Koilyk N.O., & Baktybaev M.K. (2013) The nucleon-pair shell description of collective excitations of spherical nuclei. Advanced Studies in Theoretical Physics, Phys. — Vol. 7, №12. — P. 595-603. <https://m-hikari.com/astp/astp2013/astp9-12-2013/dalelkhankyzyASTP9-12-2013>. (in English)

Baktybaev K.K., Dalelkhankyzy A., Koilyk N.O., Ramankulov K.E., & Baktybaev M.K. (2014) Description of collective states of 102,104,106,108,110Pd isotopes in the nucleon-pair model. Adv. Studies Theor. Phys. — Vol. 8, №10. — P. 475-484. <https://m-hikari.com/astp/astp2014/astp9-12-2014/dalelkhankyzyASTP9-12-2014>. (in English)

Baktybaev K.B., Abel'dina ZH.K. (1978) Struktura sostoyanij izotopov s $F=89-94$ v obolochечноj modeli s obobshchennoj sen'oriti [The structure of isotope states with $F=89-94$ in the shell model with generalized seniority] Izv.AN SSSR, ser.fiz., — T.42. — S.116. (in Russian)

Baktybaev K.B., Dalelkhankyzy A., Koilyk N.O. (2015) Methods Strongly-Connected Channels and the Inelastic of Alpha Particles on Nuclei ^{28, 30, 32} Si. Advanced Studies in Theoretical Physics, Phys. — Vol. 9, №10. — P. 483-493. <https://www.m-hikari.com/astp/astp2015/astp9-12-2015/p/dalelkhankyzyASTP9-12-2015>.

Bekzhanov R.B. (1989) Spravochnik po yadernoj fizike. Kiniga [Handbook of Nuclear Physics] (in Russian)

Lederer, C. M., & Shirley, V. S. (1978). Table of isotopes (7th ed.). New York. <https://escholarship.org/content/qt28m305b5/qt28m305b5.pdf#page=170>

Luo Y.A., Pan F., Bahri C., & Dayer I.P. (2005). Pair shell model and the interacting boson model. Physical Review — C. 71. 044304. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.71.044304>.

Takada K. & Tazaki S. Yosumoto S. (2006). Dyson Boson Mapping and Shell-Model Calculations for Even-Even Nuclei. Progress of Theoretical Physics, №1. 1, — Vol. 16. — P. 07.10.1143/PTP.116.107.<https://doi.org/10.1143/PTP.116.107>.

© N.K. Zhusupova^{1*}, V.N. Zhumabekova^{1,2}, A.A. Zhadyranova³, 2025.

¹Kazakh National Pedagogical University named after Abay, Almaty, Kazakhstan;

²Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan;

³L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

E-mail: zhnaz88@gmail.com

DETERMINATION OF ANTINEUTRON-NUCLEAR SCATTERING AMPLITUDE

Zhusupova Nazym — doctoral student, department of Physics KazNPU named Abay, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>;

Zhumabekova Venera — PhD (Physics), senior lecturer of the department of theoretical and nuclear physics KazNU named al-Farabi, Almaty, Kazakhstan; Kazakh National Pedagogical University named after Abay, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: zh.venera@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>;

Zhadyranova Aliya — PhD, senior lecturer of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com, Orcid: 0000-0003-1153-3438;

Abstract. This work considers the problem of theoretical determination of the amplitude of antineutron scattering on nuclei at low energies. Based on the quantum-mechanical approach and optical-type potentials, an analysis of the interaction of an antineutron with a nucleus is carried out. Antineutrons, having no electrical charge, are a unique tool for probing nuclear matter because they penetrate deeper into the nuclear potential without the electromagnetic and Coulomb distortions inherent in charged particles. There is so little data on the antineutron nucleus that it is impossible to perform partial wave analysis of the data with sufficient accuracy. To predict the low-energy antineutron regime, it is necessary to develop a theoretical model that can also describe α_{NA} amplitude of antineutron-nuclear scattering. Most of the data on this system consists of data on antiproton-nucleus scattering and cross sections for the complete annihilation of antiprotons with energies of 10–100 MeV, and experimental data on antineutron-nucleus interactions at low energies are sparse. Expressions for scattering amplitudes are obtained within the framework of the distorted wave model, and a comparison with known experimental and theoretical data is made. The values of the scattering lengths of antineutrons in nuclei and, in particular, the imaginary parts of the scattering lengths are analyzed. The results demonstrate the influence of the nuclear structure and antineutron energy on the shape of the amplitude and the scattering cross-

section. The analysis can be useful for studies of antineutron optics and can be applied in problems of nuclear astrophysics, antimatter physics, and in planning fundamental experiments with antineutrons in the future.

Key words: neutron-antineutron oscillations, baryon number violation, antineutron-nuclear scattering, the core, antineutron

© Н.К. Жусупова¹, В.Н. Жумабекова^{1,2}, А.А. Жадыранова³, 2025.

¹Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

³Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

E-mail: zhnaz88@gmail.com

АНТИНЕЙТРОНДАРДЫҢ ЯДРОДАН ШАШЫРАУ АМПЛИТУДАСЫН АНЫҚТАУ

Жусупова Назым — Абай атындағы ҚазҰПУ, физика кафедрасының докторанты (физика), Алматы, Қазақстан,

E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>;

Жумабекова Венера — PhD (физика), әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-нің теориялық және ядролық физика кафедрасының аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан; Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: zh.venera@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>;

Жадыранова Алия — PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com, Orcid: 0000-0003-1153-3438.

Аннотация. Бұл жұмыста төмен энергиялардағы антинейтрондардың ядролық шашырау амплитудасын теориялық анықтау мәселесі қарастырылған. Кванттық-механикалық тәсілмен оптикалық потенциалдар негізінде антинейтронның ядромен әрекеттесуіне талдау жасалды. Антинейтрондар электр заряды болмағандықтан, ядролық материяны зерттеудің бірегей құралы болып табылады, өйткені олар зарядталған бөлшектерге тән электромагниттік және кулондық бұрмалануларсыз ядролық потенциалға тереңірек енеді. Антинейтрон-ядро әсерлесуі туралы деректердің аздығы соншалық, мәліметтердің жартылай толқындық талдауын жеткілікті дәлдікпен жүргізу мүмкін емес. Төмен энергиялы антинейтрондық режимді болжау үшін антинейтронның ядродан шашырауын және α -шашырау амплитудасын сипаттай алатын теориялық модельді жасау қажет. Бұл жүйедегі деректердің көпшілігі антипротонның ядродан шашырауы және 10–100 МэВ энергиясы бар антипротондардың толық жойылуының көлденең қималары туралы мәліметтерден тұрады, ал төмен энергиялардағы антинейтронның ядролармен әрекеттесуі туралы тәжірибелік деректер сирек. Бұрмаланған толқын моделі шеңберіндегі шашырау амплитудаларының өрнектері алынып, белгілі эксперименттік және теориялық мәліметтермен салыстыру жүргізілді. Кешенді шашырау амплитудасын шашырау қималары, фазалық ығысулар, бұрыштық таралулар және аннигиляция параметрлері сияқты өлшенген шамалар негізінде

кайта құруға ерекше назар аударылады. Ядролардағы антинейтронның шашырау ұзындықтарының мәндеріне және, атап айтқанда, шашырау ұзындықтарының жанама бөліктеріне талдау жасалды. Ядродағы антинейтронның шашырауын сипаттау үшін Шредингер теңдеуін сандық шешу әдістері қолданылды. Нәтижелер ядро құрылымы мен антинейтрон энергиясының шашырау амплитудасы мен кимасы пішініне әсерін көрсетеді. Талдау антинейтрондық оптиканы зерттеу үшін пайдалы болуы мүмкін және оны ядролық астрофизика, антиматерия физикасы мәселелерінде және болашақта антинейтрондармен іргелі эксперименттерді жоспарлауда қолдануға болады.

Түйін сөздер: нейтрон-антинейтрондық түрленулер, барион санының бұзылуы, антинейтрон-ядролық шашырау, ядро, антинейтрон

© Н.К. Жусупова^{1*}, В.Н. Жумабекова^{1,2}, А.А. Жадыранова³, 2025.

¹Казахский Национальный педагогический университет им. Абая,
Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан.

E-mail: zhnaz88@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ АНТИНЕЙТРОН-ЯДЕРНОГО РАССЕЯНИЯ

Жусупова Назым — докторант (физики), кафедра физики КазНПУ имени Абая, Алматы, Казахстан,
E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>;

Жумабекова Венера — PhD (физики), старший преподаватель кафедры теоретической и ядерной физики КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; Казахский Национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: zh.venera@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>;

Жадыранова Алия — PhD, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1153-3438;

Аннотация. В работе рассматривается задача теоретического определения амплитуды рассеяния антинейтронов на ядрах при низких энергиях. На основе квантово-механического подхода и потенциалов оптического типа проведён анализ взаимодействия антинейтрона с ядром. Антинейтроны, не обладая электрическим зарядом, являются уникальным инструментом для зондирования ядерной материи, поскольку они проникают глубже в ядерный потенциал без электромагнитных и кулоновских искажений, присущих заряженным частицам. Данные по антинейтрон-ядру настолько мало, что невозможно выполнить частичный волновой анализ данных с достаточной точностью. Для прогноза режима антинейтронов низкой энергии необходимо разработать теоретическую модель, которая также может описывать амплитуды антинейтрон-ядерного рассеяния. Большая часть данных об этой системе состоит из данных об



антипротон-ядерных рассеяниях и сечениях полной аннигиляции антипротонов с энергией 10–100 МэВ. Получены выражения для амплитуд рассеяния в рамках модели искажённых волн, а также выполнено сравнение с известными экспериментальными и теоретическими данными. Особое внимание уделяется реконструкции комплексной амплитуды рассеяния на основе измеряемых величин — сечений рассеяния, фазовых сдвигов, угловых распределений и параметров аннигиляции. Проанализированы значения длин рассеяния антинейтронов в ядрах и, в частности, мнимые части длин рассеяния. Для описания рассеяния антинейтрона на ядре были использованы методики численного решения уравнения Шрёдингера. Результаты демонстрируют влияние ядерной структуры и энергии антинейтрона на форму амплитуды и сечение рассеяния. Проведённый анализ может быть полезен для исследований антинейтронной оптики и могут быть применимы в задачах ядерной астрофизики, физики антивещества, а также при планировании фундаментальных экспериментов с антинейтронами в будущем.

Ключевые слова: нейтрон-антинейтронные осцилляции, нарушение барионного числа, антинейтрон-ядерное рассеяние, ядро, антинейтрон

Кіріспе. Нейтрондардың антинейтрондарға түрленуін бақылау элементар бөлшектер физикасы мен космология үшін іргелі маңызы бар зерттеу болып табылады. n - $\bar{n}$ түрленуін бақылау барион санының (B) екі бірлікке бұзылатынын көрсетеді (Sakharov, 1967; Kuzmin, 1970; Arnold, 2013; Babu, 2013; Canetti, 2013; Herrero-Garcia, 2014; Berezhiani, 2016; Grojean, 2018; Berezhiani, 2021; Girmohanta and Shrock, 2019; Girmohanta and Shrock, 2020; Girmohanta and Shrock, 2020). Бұл ғаламдағы бариондық асимметрияны түсінуге мүмкіндік береді. Антинейтрон – бұл нейтронның антибөлшегі. Ол $\bar{n}$ түрінде белгіленеді. Ол бір анти-жоғары және екі анти-төмен кварктардан құралады, сондықтан массасы бойынша нейтронға тең және бариондық саны бойынша қарама-қарсы болады (нейтрон үшін $B = 1$ және антинейтрон үшін $B = -1$). Антинейтрон электрлік бейтарап бөлшек және массасы нейтрон массасымен бірдей ($m_n = m_{\bar{n}} = 939,56$ МэВ/ c^2). Оның магнит моменті шамасы жағынан нейтронның магнит моментіне тең, бірақ қарама-қарсы болады.

Антинейтрондарды тікелей бақылау өте қиын, өйткені олардың таза электрлік зарядтары жоқ. Тәжірибелерде антинейтрондар қарапайым заттардың ядрада жұтылуы кезіндегі жойылған өнімдерімен тіркеледі. Антинейтрон ең алғаш 1956 жылы Брюс Корк, Глен Р. Ламбертсон, Орест Пиччиони және Уильям А. Венцель тобымен ашылған (Gabathulera and Pavlopoulos for the CPLEAR Collaboration, 2004). Олардың қондырғыларында антинейтрондар Беватрон үдеткішінде антипротондардың соқтығысуы кезіндегі заряд алмасуының нәтижесінде пайда болған. Олар екі әртүрлі детекторларды қарастырды: қорғасыннан жасалған черенков есептегіші, антинейтрон аннигиляциясын анықтауға арналған әйнек пен сұйық сцинтиллятор (Cork and Lambertson, 1956). Элементар бөлшектер физикасында электрлік бейтарап бөлшектердің түрленуі таңқаларлық емес. Нейтрон және антинейтрон сияқты бейтарап бариондардың бір біріне түрленуі

әбден мүмкін. Бейтарап мезондар (K^0 , B^0 , $\bar{K}^0$, $\bar{B}^0$) және бейтарап фермиондар осцилляциясы (ν_μ -дан ν_τ -ға дейін) (Gabathulera and Pavlopoulosb for the CPLEAR Collaboration, 2004; Cork and Lambertson, 1956; Aubert et al. (BABAR Collaboration, 2001) жұмыстарындағы тәжірибелерде анықталған.

Ядролардың басым көпшілігі үшін антинуклондық әрекеттесу үшін потенциалды модельдің бір түрін пайдалану қажет. Олардың ішінде күшті аннигиляциясы бар модель және ядролық беттік диффузияның қарапайым бір параметрлі моделі ядролық потенциалдың өте үлкен жанама бөлігіне ие және өте қарапайым геометриялық интерпретацияға ие нәтижелер береді. Ядроның бетінде антинейтрондардың жойылу ықтималдығы жоғары болғандықтан ол ядроның ішіндегі толқындық функцияны іс жүзінде «жояды», сондықтан алынатын нәтижелер негізінен ядроның шеткі бөлігіне сезімтал болады. Ядролық потенциалдың нақты бөлігі ядроның шеткі бөлігіне сәйкес келетін таза $A^{1/3}$ -тәуелділікке ие. Бұл модель бойынша шашырау ұзындықтары: $Rea_0^S = (1,54 \pm 0,03) \cdot A^{0,311 \pm 0,05}$ Фм және $Ima_0^S = (1,00 \pm 0,04)$ Фм (Shufan Lu, 2023).

Материалдар мен әдістер. Шағылысу кезінде айна ортасының ішінен өтетін екі нейтронның әртүрлі уақытын есептеу үшін нейтрондық оптика теориясын қолданамыз. Мұндай уақыт кешігуін локализацияланбаған (демек, физикалық емес) жазық толқындар үшін бағалауға болмайтынын ескерейік және есептеу толқындық пакеттер арқылы жасалуы керек. Міне, біз осы идеяны ұсынамыз. Сәуле тек екі толқын арқылы пайда болған, оның толқындық векторлары бағыты бойынша аздап ерекшеленеді, ал шамалары бірдей. Толқындық пакетті толқын компоненттерінің осындай жұптарының таралуынан тұрады деп қарастыруға болады. Біз толқындық функцияның басқа бағыттағы әрекетін елемейміз және жай ғана айна бетіне параллель болу үшін тандалған x осі бойынша тәуелділікке назар аударамыз.

$$\bar{\psi}_x = e^{-ik_x x} + e^{-i(k_x + \Delta k_x)x} \quad (1)$$

Айна бетінде фазалық ығысулар жоқ

$$\psi_x = e^{-ik_x x} + e^{-i(k_x + \Delta k_x)x} \quad (2)$$

сондықтан осы толқындық функция суперпозициясымен байланысты ықтималдылық

$$\begin{aligned} I = \psi_x^* \psi_x &= [e^{ik_x x} + e^{i(k_x + \Delta k_x)x}] [e^{-ik_x x} + e^{-i(k_x + \Delta k_x)x}] \\ &= 2 + e^{-i\Delta k_x x} + e^{i\Delta k_x x} \\ &= 2(1 + \cos \Delta k_x x) \end{aligned} \quad (3)$$

x_0 нүктелерінде максималды болып табылады, мұндағы

$$\Delta k_x x_0 = 2\pi\nu \quad (4)$$

Алайда нейтрондық оптика теориясынан (Shufan Lu, 2023), толық шағылу кезінде k_x және $k_x + \Delta k_x$ импульстары аздап әртүрлі шағылған сәулелер сәйкесінше ϕ және $\phi + \Delta\phi$ қосымша фазалық ығысуларға ие болады

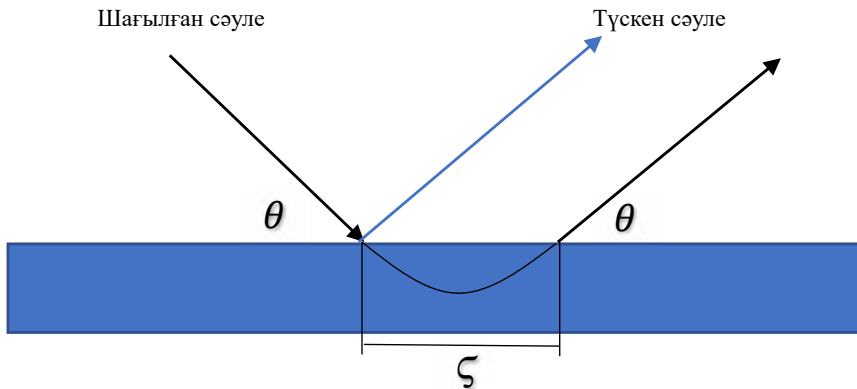
$$\begin{aligned} \psi_x &= e^{ik_x x + \phi} + e^{i(k_x + \Delta k_x)x + \Delta\phi} \\ &= e^{i(k_x x + \phi)}(1 + e^{i(\Delta k_x x + \Delta\phi)}) \end{aligned} \quad (5)$$

Максималды интенсивтілік шарты енді төмендегідей болады

$$\Delta k_x x + \Delta\phi = 2\pi\nu \quad (6)$$

$x - x_0$ ығысуы айна бетінің бойындағы толқындық пакет күйінде оптикада Гусь-Хэнхен ығысуы деп аталады. Гусь-Хэнхен эффектісі – жарықтың толық ішкі шағылысуы кезінде пайда болатын ерекше оптикалық құбылыс. Бұл эффект 1947 жылы Герман Гусь және Хильда Хэнхен есімді неміс ғалымдарының тәжірибелік зерттеулері арқылы ашылған. Бұл эффект кезінде шағылысқан жарық толқыны өзінің идеал геометриялық оптикалық жолынан аздап бүйірге ығысады. Яғни, жарық сәулесі шекарада шағылғаннан кейін бұрынғы орнына қарағанда сәл жылжып кетеді. Бұл эффект тек жарықтың тығыз оптикалық ортадан (мысалы, шыны немесе су) оптикалық тығыздығы аз ортаға (мысалы, ауаға) өткен кезде және толық ішкі шағылысу болған жағдайда байқалады. Бұл эффект жарықтың толқындық табиғатына байланысты. Шағылысу кезінде электромагниттік толқынның туннельденуі (немесе ену тереңдігі) жарықтың толқындық фазасына әсер етеді, нәтижесінде сәуле белгілі бір қашықтыққа ығысады.

$$\zeta = x - x_0 = -\frac{\Delta\phi}{\Delta k_x} = -\frac{d\phi}{dk_x} \quad (7)$$



Сурет-1. Гусь-Хэнхен эффектісінің иллюстрациясы

Болжамымыз бойынша $k_0^2 = k_x^2 + k_y^2$ у тұрақты болып табылады. Сонда $k_x dk_x + k_y dk_y = 0$.

$$\zeta = \frac{k_x}{k_y} \frac{d\phi}{dk_y} \quad (8)$$

Бұл өрнек Артман-Картер-Хор формуласы ретінде белгілі (Shufan Lu, 2023). Толқындық пакет үшін де нәтиже сондай, тек айырмашылығы k_x және k_y толқындық пакеттің импульс векторының компоненттерінің орташа мәндері болады.

Осылайша, ζ бойлық сәуле ығысуын $k_{\parallel}$ толқын санының параллель құраушысына қатысты ϕ фазалық ығысуының туындысын алу арқылы алуға болады: $\zeta = -\frac{d\phi}{dk_{\parallel}}$. Сонымен қатар оны толқындық пакеттің кешігу уақыты τ мен параллель жылдамдық құраушысының $v_{\parallel}$, $\zeta = \tau v_{\parallel}$ көбейтіндісі ретінде де жазуға болады. Сәйкесінше, τ кешігу уақытын толқын санының параллель құраушысына және $v_{\parallel}$ жылдамдықтың параллель құраушысына қатысты ϕ фазалық ығысуының туындысы арқылы өрнектей аламыз. $E_{\parallel} = \hbar^2 k_{\parallel}^2 / 2m$ және $v_{\parallel} = \hbar k_{\parallel} / m$ болғандықтан, кешігу уақытын $\tau = -\frac{d\phi}{v_{\parallel} dk_{\parallel}} = -\frac{\hbar d\phi}{dE_{\parallel}}$ түрінде алуға болады. Шағылысу кезінде кинетикалық энергия сақталады деп болжайық, яғни $E_{\perp} + E_{\parallel} = \text{const}$, кешігу уақытын енді былай жазуға болады

$$\tau = \frac{\hbar d\phi}{dE_{\perp}} \quad (9)$$

Енді нақты да, және кешенді оптикалық потенциал үшін де τ анықтайық. Баяу нейтрондар үшін жақын мандағы нейтрон-ядролық резонанстардың болмауы кезінде U_n оптикалық потенциалды жуықтап алуға болады, сондықтан бірінші осы жағдайды қарастырамыз. $U_n = U > E_{\perp}$ деп болжайық, ол нейтронның барлық толқындық функциясының шағылуын қамтамасыз етеді. Шағылғанға дейін перпендикуляр толқындық сан $k = \sqrt{2mE_{\perp}}$. Сәуле потенциалдық тосқауылға түскеннен кейін толқындық сан жанама болады, оны ік ретінде анықтаймыз, сонымен қатар $k_n = \sqrt{2m(U - E_{\perp})}$. Ал шағылған толқындық функция қосымша ϕ_n фазалар ығысуына ие болады. Осы екі бөліктегі Шредингер теңдеуінің есебін шеше отырып, $\phi_n = 2 \arctan \frac{k}{k_n}$ ала аламыз. k және k_n өрнегін қойып, ϕ_n төмендегідей жазуға болады

$$\phi_n = \arctan \frac{2\sqrt{E_{\perp}(U - E_{\perp})}}{U - 2E_{\perp}} \quad (10)$$

Сәйкесінше, нейтронның қалу уақытын анықтауға болады

$$\tau_n = \frac{d\phi_n}{dE_{\perp}} = \frac{d}{dE_n} \left(2 \arctan \frac{k}{k_n} \right) = \frac{1}{\sqrt{E_{\perp}(U - E_{\perp})}} \quad (11)$$

Антинейтронның ядродан шашырауын бейнелеу үшін Шредингер теңдеуі пайдаланылады, ондағы $U(r)$ потенциалы антинейтронның ядромен әсерлесуін ескереді. Шредингер теңдеуі:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right)\psi(r) = E\psi(r) \quad (12)$$

мұндағы $\psi(r)$ – толқындық функция, $U(r)$ – антинейтронның ядромен әсерлесу потенциалы, E – толық энергия, m – антинейтрон массасы.

Нәтижелер және талқылау. Антинейтрондар үшін жағдай нейтрондарға қарағанда біршама ерекшеленеді. Антинейтронның жұтылу кимасы нейтронның жұтылу кимасынан бірнеше рет жоғары, сондықтан антинейтронның оптикалық потенциалы үлкен жанама бөлікке ие. Айнаның оптикалық потенциалы (Fedorov, 2004)

$$U = V - iW = (2\pi\hbar^2/m)\sum_l N_l b_l \quad (13)$$

және де $V > E_{\perp}$. Сәйкесінше, перпендикуляр толқындық сан $k_{\bar{n}} = \sqrt{2m(V - iW - E_{\perp})}$ енді комплексті болып табылады. Оны былай жазайық $k_{\bar{n}} = k' - ik''$, мұндағы $k' = \sqrt{m(\alpha + (V - E_{\perp}))}$, $k'' = \sqrt{m(\alpha - (V - E_{\perp}))}$ және $\alpha = \sqrt{(V - E_{\perp})^2 + W^2}$. Шредингер теңдеуінен шағылған антинейтронның фазалық ығысуын түрінде $\varphi_{\bar{n}} = \arctan \frac{2kk'}{k'^2 + k''^2 - k^2}$ өрнектеуге болады. k' және k'' қойып, фазалық ығысуды $\varphi_{\bar{n}} = \arctan \frac{\sqrt{2E_{\perp}(\alpha + (V - E_{\perp}))}}{\alpha - E_{\perp}}$ ретінде жазуға болады. Сәйкесінше, жалпы жағдайда қалу уақытын былай анықтауға болады

$$\tau_{\bar{n}} = \frac{d\varphi}{dE_{\perp}} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{\alpha + (V - E_{\perp})}{2E_{\perp}}} \quad (14)$$

$E_{\perp} = \hbar^2 k_z^2 / 2m$ — материал шекарасына нормаль болатын импульске байланысты, түскен нейтронның кинетикалық энергиясының үлесі. Нейтрондардың өзара әрекеттесуінде потенциалдық шашырау да, резонанстық шашырау да болады. Резонанс нейтрондарды жұтады және нейтрондардың шашырау амплитудасының бір құрамдас бөлігінің үлкен бейнесін қосады. n-A резонанстары бар болған кезде $f = f_{pot} + f_{res}$ толық шашырау амплитудасының f_{res} резонансты бөлігі үшін өрнек төмендегідей болады (Landau and Lifshits, 2001)

$$f_{res} = \sum_j \frac{g_{\pm j}}{2k_j} \frac{\Gamma_{n,j}}{[(E' - E_j) + i\Gamma_j/2]} \quad (15)$$

мұндағы $\Gamma_{n,j}$ және $\Gamma_j - E_j$ энергиясы кезіндегі нейтрон ені және толық резонанс ені, ал $k' = \mu k/m$ — келтірілген массасы μ массалар центрі жүйесіндегі толқындық вектор, E' — байланыс энергиясы, $g_{+,j} = (I+1)/(2I+1)$ және $g_{-,j} = I/(2I+1)$ — $J = I \pm 1/2$ толық бұрыштық момент каналындағы энергиясы E_j резонанс үшін статистикалық салмақ коэффициенттері.

Берілген потенциал үшін $f(\theta)$ шашырау амплитудасы фазалық ығысулар арқылы анықталады (Dzheparov, 2012):

$$f(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) e^{i\delta_l} \sin(\delta_l) P_l(\cos\theta) \quad (16)$$

мұндағы $P_l(\cos\theta)$ – Лежандр полиномдары.

$f = f' + if''$ шашырау амплитудасы f'' жанама бөлікке ие болады. Шашырау амплитудасының жанама бөлігі шамасы оны толық шашырау қимасымен байланыстыратын оптикалық теоремадан шығады. Оптикалық теорема нейтрон ағынының сақталуын көрсетеді: радиусы r сфераға түскен нейтрондардың толық ағыны, шыққан және жұтылған бөлшектердің толық ағындарының қосындысына тең. Баяу нейтрондардың ядродан шашырауы үшін оптикалық теореманы қарастырайық, $l=0$ үшін s -толқындық нейтрондарға сәйкес келетін түскен жазық толқындар бөлігі мынаған тең:

$$\frac{1}{4\pi} \int \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}) d\Omega = \frac{1}{2} \int_0^\pi \exp(ikr \cos\theta) \sin\theta d\theta = \frac{\exp(ikr) - \exp(-ikr)}{2ikr} \quad (17)$$

Осылайша, тек нөлдік бұрыштық моменті бар нейтрондарды ескере отырып, толқындық функция үшін мынаны аламыз

$$\psi_s = \frac{i}{2k} \frac{e^{-ikr}}{r} + \left(f - \frac{i}{2k}\right) \frac{e^{ikr}}{r} \quad (18)$$

Мұнда бірінші мүше жинақтаушы толқынға, ал екіншісі – диверсиялық (таралған) толқынға сәйкес келеді.

$$\sigma_a = 4\pi(|i/(2k)|^2 - |f - i/(2k)|^2) = -4\pi|f|^2 + \frac{4\pi}{k} \text{Im}f \quad (19)$$

Толық шашырау қимасы үшін өрнекті ескере отырып (Dzheparov, 2012), нейтрондардың ядродан шашырауы үшін оптикалық теорема аламыз

$$\text{Im}f = \frac{k}{4\pi} (\sigma_a + \sigma_{sc}) = \frac{k}{4\pi} \sigma_t \quad (20)$$

мұндағы σ_t – нейтронның ядромен әсерлесуінің толық қимасы, σ_a – нейтрондардың жұтылу қимасы, σ_{sc} – нейтрондардың шашырау қимасы. Жалпы жағдайда шашырау амплитудасы шашырау бұрышына тәуелді $f = f(\theta)$, және оптикалық теорема мына түрге келеді

$$\text{Im}f(0) = \frac{k}{4\pi} \sigma_t \quad (21)$$

Оптикалық теоремадан, нейтрондарды қарпып алу болмаған жағдайда шашырау амплитудасының жанама бөлігі өте аз болады:

$$\left| \frac{f''}{f} \right| = \left| \frac{k\sigma_t}{4\pi f'} \right| \approx |kf'| = 2\pi \frac{|f'|}{\lambda} \approx 2\pi \frac{|f|}{\lambda} \quad (22)$$

^9Be ядросы үшін, энергиясы $E = 0,025$ эВ жылу нейтрондарының жұтылу кимасы (және, сәйкесінше, толқын ұзындығы $\lambda = 580 \cdot 10^{-10}\text{м}$) $\sigma_a = 3.5$ барн және $f = 0,78 \cdot 10^{-14}\text{м}$ тең, сонда: $\left| \frac{f''}{f} \right| = \frac{\sigma_a}{2\lambda f} = 0.0039$.

Қорытынды

Антинейтронның ядродан шашырау ұзындығын анықтаудың теориялық тәсілдері талданды. Бұл жұмыста Гусь-Хенхен эффектісі қарастырылды, яғни бұл эффект бойынша нейтронның ядродан шашырауы кезінде кейбір нейтрон ядроға еніп, ығысу құбылысы байқалады. Айна материалдарының көпшілігі үшін декогеренттілік жылдамдығы төмен. Осылайша, n және $\bar{n}$ амплитудасының салыстырмалы фазалық ығысуы айналық шағылысу кезінде әлі де «квази-еркін» күйді сақтай алады.

Берилий ядросы үшін шашырау ұзындығының жанама бөлігінің шашырау ұзындығына қатынасы есептелді. Осыдан нейтрондардың берилий ядросынан шашырауы кезінде өте аз бөлігі жұтылатынын көруге болады. Сондықтан берилий ядросы нейтрон-антинейтрондық түрленуді зерттеу үшін басқа ядроға қарағанда қолайлырақ, өйткені жұтылу процесі осцилляцияны тежемейді. Бұл нейтрон-антинейтрон түрленулерін іздейтін болашақ эксперименттер үшін өте маңызды нәтиже, өйткені бұл негізінен сәулелі нейтрондық айналар арқылы басқаруға болатынын білдіреді.

Әдебиеттер

- A.D. Sakharov, (1967) CP инварианттылығы, C асимметриясы және ғаламның бариондық асимметриясының бұзылуы. — JETP Lett. 5. — Б. 24-27. DOI: 10.1070/PU1991v034n05ABEN002497
- V.A. Kuzmin, (1970) CP-инварианттылық және ғаламның бариондық асимметриясы. — JETP Lett. 12. — Б. 335-337.
- J.M. Arnold, B. Fornal, and M. B. Wise, (2013). Скалярлық лептокварктардың феноменологиясы. — Phys. Rev. D 87, 075004.
- K.S. Babu, P.S.B. Dev, E.C.F.S. Fortes, and R.N. Mohapatra, (2013) Сфалероннан кейінгі бариогенез және нейтрон-антинейтрондық түрлену уақытының жоғарғы шегі. — Phys. Rev. D 87, 115019. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.115019
- L. Canetti, M. Drewes, T. Frossard, and M. Shaposhnikov, (2013) Қара материя, бариогенез және оң қолды нейтринолардан нейтрино түрленулері. — Phys. Rev. D 87, 093006. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.093006>
- A. de Gouvea, J. Herrero-Garcia, and A. Kobach, (2014). Нейтрино массасы, Ұлы бірігу және барион санының бұзылуы. — Phys. Rev. D 90, 016011. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.016011>
- Z. Berezhiani, (2016) Нейтрон-антинейтрондық түрлену және бариондық мажор: кіші масштабты өздігінен барионды бұзылу. — Eur. J. Phys. — 76 6. DOI 10.1140/epjc/s10052-016-4564-0
- C. Grojean, B. Shakya, J.D. Wells, and Z. Zhang, (2018). Жақсартылған нейтрон-антинейтрондық



түрленудің бариогенезді іздеу салдары: минималды тиімді теорияның талдауы. — *Phys. Rev. Lett.* 121 6. 171801. DOI:10.1103/PhysRevLett.121.171801

Z. Berezhiani, (2021) Айна әлемі арқылы нейтрон-антинейтрондық түрленудің ықтимал төте жолы. — *Eur. Phys. J.C.* — Vol. 81. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08824-9>

S. Girmohanta and R. Shrock, (2019) Нуклондардың ыдырау режимдері үшін жартылай өмір сүру уақытының жақсартылған төменгі шекаралары. — *Phys. Rev. D* 100, 115025. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.115025>

S. Girmohanta and R. Shrock, (2020) Динуклондардың дилептондарға ыдырауын бұзатын барион санының жақсартылған жоғарғы шегі. — *Phys. Lett. Vol. 803*, 135296. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135296>

S. Girmohanta and R. Shrock, (2020) Үлкен қосымша өлшемдері бар модельде барион санын бұзатын нуклон мен динуклонның ыдырауы. — *Phys. Rev. D* 101, 015017. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.015017>

G. Bressi et al., (2011) Сфералық резонаторда акустикалық құралдармен заттың бейтараптығын тексеру. — *Phys. Rev. A* 83, 052101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.83.052101>

E. Gabathulera, and P.Pavlopoulos for the CPLEAR Collaboration. (2004) The CPLEAR experiment. — *Physics Reports.* — Б. 303-321. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.08.020

Bruce Cork, Glen R. Lambertson, Oreste Piccioni, and William A. Wenzel, (1956) Заряд алмасу соқтығыстарында антипротондардан алынатын антинейтрондар. — *Phys. Rev.* 104, 1193. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1193>

B. Aubert et al. (BABAR Collaboration), (2001). Measurement of CP -Violating Asymmetries in B^0 Decays to CP Eigenstates. — *Phys. Rev. Lett.* 86, 2515. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.2515>

Shufan Lu, (2023) Quantum description of mode-entangled single neutron Interferometry and decoherence analysis of two-state neutron Superpositions with absorption. PhD диссертациясы. — Блумингтон. — 150 б.

В.В. Федоров, (2004) Нейтрондық оптика. Оқу құралы. — St. Petersburg: Publishing House PNPI. — 334 б. <https://org/2015040283733/neitronnaya-fizika-uchebnoe-posobie-fedorov-v-v-2004.html>

Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, (2001) Кванттық механика. Релятивистік емес теория (Серия: Теориялық физика). — Volume 3. — 750 б. https://pierre.ag.gerard.web.ulb.be/textbooks/books/Landau_Lifshitz_T3.pdf

Ф.С. Джепаров, Д.В. Львов, (2012) Конденсацияланған күйлердегі нейтрондық зерттеулер, оқу құралы. — М.: National Research Nuclear University MEPhI. — 188 б.

References

A.D. Sakharov, (1967) Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. — *JETP Lett.* 5. — Pp. 24-27. DOI: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002497 (in English)

V.A. Kuzmin, (1970) CP-noninvariance and baryon asymmetry of the universe. *JETP Lett.* 12. —P. 335-337. (in English)

J. M. Arnold, B. Fornal, and M. B. Wise, (2013) Phenomenology of scalar leptoquarks. — *Phys. Rev. D* 87, 075004. (in English)

K.S. Babu, P.S.B. Dev, E.C.F. S. Fortes, and R. N. Mohapatra, (2013). Post-sphaleron baryogenesis and an upper limit on the neutron-antineutron oscillation time. — *Phys. Rev. D* 87, 115019. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.115019 (in English)

L. Canetti, M. Drewes, T. Frossard, and M. Shaposhnikov, (2013) Dark matter, baryogenesis and neutrino oscillations from right-handed neutrinos. — *Phys. Rev. D* 87, 093006. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.093006> (in English)

A. de Gouvea, J. Herrero-Garcia, and A. Kobach, (2014) Neutrino Masses, Grand Unification, and Baryon Number Violation. — *Phys. Rev. D* 90, 016011. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.016011> (in English)

Z. Berezhiani, (2016) Neutron-antineutron oscillation and baryonic majoron: low scale spontaneous baryon violation. — *Eur. J. Phys.* — 76 p. 705. DOI 10.1140/epjc/s10052-016-4564-0 (in English)

C. Grojean, B. Shakya, J. D. Wells, and Z. Zhang, (2018) Implications of an Improved Neutron-



Antineutron Oscillation Search for Baryogenesis: A Minimal Effective Theory Analysis. — Phys. Rev. Lett. 121, 171801. DOI:10.1103/PhysRevLett.121.171801 (in English)

Z. Berezhiani, (2021) A possible shortcut for neutron–antineutron oscillation through mirror world. — Eur. Phys. J. C, — Vol. 81. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08824-9> (in English)

S. Girmohanta and R. Shrock, (2019) Improved lower bounds on partial lifetimes for nucleon decay modes. — Phys. Rev. D 100, 115025. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.115025> (in English)

S. Girmohanta and R. Shrock, (2020) Improved upper limits on baryon-number violating dinucleon decays to dileptons. — Phys. Lett. — Vol. 803, 135296. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135296> (in English)

S. Girmohanta and R. Shrock, (2020) Baryon-number-violating nucleon and dinucleon decays in a model with large extra dimensions. — Phys. Rev. D 101, 015017. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.015017> (in English)

G. Bressi et al., (2011). Testing the neutrality of matter by acoustic means in a spherical resonator. — Phys. Rev. A 83, 052101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.83.052101> (in English)

E.Gabathulera, and P.Pavlopoulosb for the CPLEAR Collaboration. (2004) The CPLEAR experiment. — Physics Reports. P. 303-321. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.08.020 (in English)

Bruce Cork, Glen R. Lambertson, Oreste Piccioni, and William A. Wenzel, (1956) Antineutrons Produced from Antiprotons in Charge-Exchange Collisions. — Phys. Rev. 104, 1193. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.1193> (in English)

B. Aubert et al. (BABAR Collaboration), (2001) Measurement of CP -Violating Asymmetries in B^0 Decays to CP Eigenstates. — Phys. Rev. Lett. 86, 2515. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.2515> (in English)

Shufan Lu, (2023) Quantum description of mode-entangled single neutron Interferometry an decoherence analysis of two-state neutron Superpositions with absorption. PhD dissertations. — Bloomington, United States. — 150 p. (in English)

V.V. Fedorov, (2004) Neitronnaya fizika [Neutron physics]. — St. Petersburg: Publishing House PNPI. — 334 p. <https://org/2015040283733/neitronnaya-fizika-uchebnoe-posobie-fedorov-v-v-2004.html> (in Russian)

L.D. Landau, E.M. Lifshits, (2001) Kvantovaya mekhanika. Nereyativistskaya teoriya [Quantum mechanics. Nonrelativistic theory]. — Series: Theoretical physics. — Volume 3. — 750 p. https://pierre.ag.gerard.web.ulb.be/textbooks/books/Landau_Lifshitz_T3.pdf (in Russian)

F.S. Dzheparov, D.V. Lvov, (2012) Nejtronnye issledovaniya v kondensirovannykh sostoyaniyakh [Neutron studies of condensed matter]. — Textbook. M.: National Research Nuclear University MEPhI. — 188 p. (in Russian)



REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 2. Number 354 (2025), 46–61

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.343>

MPHTH 29.17.15

УДК 533.1

© V. Mukamedenkyzy¹, B. Akberdiyev², 2025.

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Abay Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: bekzhan_akberdiyev@mail.ru

INVESTIGATION OF CONCENTRATION FIELDS IN BINARY GAS MIXTURES IN THE PRESENCE OF CONVECTIVE FLOWS

Mukamedenkyzy Venera — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: mukameden@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3921-2812>;

Akberdiyev Bekzhan — PhD student, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: bekzhan_akberdiyev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2108-9556>.

Abstract. The article examines the processes of formation and evolution of concentration fields in binary gas mixtures under convective flow conditions. The relevance of this research lies in the need for a deeper understanding of mass transfer mechanisms in multicomponent gaseous environments, which is essential for the development of efficient technologies for gas purification, heat exchange, and gas separation. The objective of this study is to conduct a numerical analysis of the formation of concentration fields and the transition of the system from molecular diffusion to convective mass transfer, as well as to determine the conditions under which mechanical instability arises in gas mixtures under varying pressures. A numerical simulation of the spatiotemporal evolution of concentration fields was carried out, enabling the identification of critical parameters at which convective flows emerge in binary gas systems. The dynamics of concentration fields were modeled using the ANSYS Fluent software package, which provided a detailed examination of the kinetics of convective flow development and the delineation of mechanical equilibrium stability limits. The study yielded data on the structural characteristics of concentration fields at different stages of convective flow evolution, identifying distinct regimes of their formation and the conditions under which intensive mixing occurs. The results demonstrated that an increase in pressure significantly alters the structure of concentration fields and initiates the formation of stable convective currents. These results exhibit a high degree of agreement, thereby confirming the adequacy of the proposed model. The revealed patterns of transition from the diffusion regime to convective transport are of considerable significance both for fundamental research in the field of hydrodynamic stability and for applied tasks such as atmospheric modeling, analysis of gas mixtures

in confined volumes, and the development of technologies based on natural convection phenomena.

Keywords: instability, binary mixture, diffusion, convection, ANSYS Fluent

© В. Мукамеденкызы¹, Б. Ақбердиев², 2025.

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: bekzhan_akberdiev@mail.ru

КОНВЕКТИВТІ АҒЫНДАР КЕЗІНДЕ БИНАРЛЫ ГАЗ ҚОСПАЛАРЫНДАҒЫ КОНЦЕНТРАЦИЯЛЫҚ ӨРІСТЕРДІ ЗЕРТТЕУ

Венера Мукамеденкызы — физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: mukameden@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3921-2812>;

Бекжан Ақбердиев — PhD докторант, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: bekzhan_akberdiev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2108-9556>.

Аннотация. Мақалада конвективті ағындар жағдайында бинарлы газ қоспаларындағы концентрациялық өрістердің түзілуі және эволюциялық процестері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі көпкомпонентті газ қоспаларындағы массатасымалдану механизмдерін тереңірек түсінуге деген қажеттілікпен негізделеді. Бұл мәселе газдарды тазарту, жылу алмасу және газдарды бөлу сияқты тиімді технологияларды әзірлеу үшін айрықша маңызға ие. Концентрациялық өрістердің түзілу үдерістерін және жүйенің молекулалық диффузиядан конвективті массаалмасуға өтуін сандық талдау, сондай-ақ әртүрлі қысым жағдайларындағы газ қоспаларында механикалық тұрақсыздықтың пайда болу шарттарын анықталуы зерттеудің негізгі мақсаты болып табылады. Концентрациялық өрістердің кеңістіктік-уақыттық эволюциясын сандық есептеу жүргізіліп, бинарлы газ жүйелерінде конвективті ағындардың қалыптасуына алып келетін шекті параметрлер айқындалды. Концентрациялық өрістер динамикасын модельдеу үшін ANSYS Fluent бағдарламалық кешені қолданылып, конвективті ағындардың даму кинетикасын жан-жақты зерттеуге және механикалық тепе-теңдіктің тұрақтылық шектерін анықтауға мүмкіндік берді. Конвективті ағындардың әртүрлі даму сатыларындағы концентрациялық өрістердің құрылымы жөнінде деректер алынып, олардың түзілуіне тән режимдер мен қарқынды араласу шарттары анықталды. Жүргізілген зерттеулер қысымның артуы концентрациялық өрістердің құрылымына елеулі түрде әсер ететінін және тұрақты конвективті ағындардың пайда болуына түрткі болатынын көрсетті және алынған нәтижелер ұсынылған модельдің дұрыстығын дәлелдейтін жоғары деңгейдегі сәйкестікпен сипатталады. Диффузиялық режимнен конвективтік күйге өту заңдылықтары гидродинамикалық тұрақтылық саласындағы іргелі зерттеулер үшін де, атмосфералық үдерістерді модельдеу, жабық көлемдердегі газ қоспаларын талдау және табиғи конвекция құбылыстарына негізделген

технологияларды әзірлеу сияқты қолданбалы міндеттер үшін де ерекше маңызға ие.

Түйін сөздер: тұрақсыздық, бинарлы қоспа, диффузия, конвекция, ANSYS Fluent

© В. Мукамеденкызы¹, Б. Акбердиев², 2025.

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
Алматы, Казахстан.

E-mail: bekzhan_akberdiev@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В БИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ПРИ НАЛИЧИИ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Венера Мукамеденкызы — кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: mukameden@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3921-2812>;

Бекжан Акбердиев — PhD докторант, Казахский Национальный Педагогический Университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: bekzhan_akberdiev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2108-9556>.

Аннотация. В статье рассматриваются процессы формирования и эволюции концентрационных полей в бинарных газовых смесях в условиях конвективных течений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью более глубокого понимания механизмов массопереноса в многокомпонентных газовых средах, что имеет важное значение для разработки эффективных технологий очистки газов, теплообмена и газоразделения. Целью работы является численный анализ процессов формирования концентрационных полей и перехода системы от молекулярной диффузии к конвективному массопереносу, а также определение условий возникновения механической неустойчивости в газовых смесях при различных давлениях. Выполнен численный расчёт пространственно-временной эволюции концентрационных полей, что позволило установить критические параметры, при которых формируются конвективные течения в бинарных газовых системах. Для моделирования динамики концентрационных полей использован программный комплекс ANSYS Fluent, обеспечивший детализированное изучение кинетики развития конвективных потоков и определение пределов устойчивости механического равновесия. Получены данные о структуре концентрационных полей на различных стадиях развития конвективных течений, определены характерные режимы формирования, а также условия возникновения интенсивного смешения. Полученные результаты показали, что повышение давления существенно изменяет структуру концентрационных полей и инициирует образование устойчивых конвективных течений и обладают высокой степенью совпадения, что подтверждает адекватность предложенной модели. Выявленные закономерности перехода от диффузионного режима к

конвективному имеют значимость как для фундаментальных исследований и в области гидродинамической устойчивости, так и для прикладных задач – моделирования атмосферных процессов, анализа газовых смесей в замкнутых объемах и разработки технологий, основанных на явлениях естественной конвекции.

Ключевые слова: неустойчивость, бинарная смесь, диффузия, конвекция, ANSYS Fluent

Введение. Исследование бинарных газовых смесей является одной из ключевых проблем современной теоретической и прикладной гидродинамики, поскольку механизмы массопереноса в таких системах определяют динамические свойства стратифицированных сред и оказывают фундаментальное влияние на широкий спектр физических и технологических процессов (Косов, et al., 2002). В частности, детальное понимание процессов переноса в бинарных газовых смесях играет существенную роль в таких дисциплинах, как аэродинамика, астрофизика, климатология, химическая технология и физика горения. Нестабильность механического равновесия в бинарных газовых смесях определяется совокупным воздействием ряда факторов, среди которых можно выделить температурные градиенты, дифференциальное сжатие и внешние механические воздействия. При превышении критических параметров в системе наблюдаются режимы, характеризующиеся переходом от молекулярной диффузии к конвективным формам движения. В частности, в гравитационно стратифицированных системах разность плотностей компонентов смеси инициирует процессы естественной конвекции, сопровождающиеся формированием сложных макроскопических структур течения (Косов, et al., 2005).

Ранее проведенные экспериментальные и теоретические исследования, реализованные, в том числе, с использованием двухколбовых аппаратов (Косов, et al., 2002; Косов, et al., 2005) позволили выявить ключевые закономерности эволюции бинарных газовых смесей в замкнутых объемах. Установлено, что вероятность перехода от диффузионного механизма массопереноса к конвективному режиму коррелирует с временными характеристиками процесса смешивания, что обусловлено снижением интенсивности и выравниванием концентрационного градиента. Тем не менее, имеющиеся экспериментальные данные не обеспечивают полного описания кинетики данного перехода, поскольку регистрация локальных потоков в таких системах требует высокой временной и пространственной разрешающей способности измерений (Косов, et al., 2005). Таким образом, одной из актуальных задач современной гидродинамики является разработка детализированной модели, позволяющей описать условия возникновения конвекции в бинарных газовых смесях и выявить критические параметры, определяющие границы устойчивости механического равновесия. Решение данной проблемы представляет собой значительный интерес не только с точки зрения фундаментальной науки, но и в контексте прикладных задач, связанных с прогнозированием атмосферных явлений, анализом газодинамики

в замкнутых средах и разработкой технологических процессов, использующих эффекты естественной конвекции (Косов, et al., 2020).

Цель настоящего исследования заключается в изучении концентрационных полей в бинарных газовых смесях при наличии конвективных течений, а также в разработке и численном анализе модели кинетики массообмена в бинарной газовой системе с учетом параметрической изменчивости условий механического равновесия. Особое внимание уделено выявлению критических значений безразмерных критериев, характеризующих переход системы из диффузионного режима в конвективный. Стабильность механического равновесия анализируется в рамках гидродинамической теории устойчивости с использованием численного моделирования, основанного на решении системы уравнений Навье-Стокса, уравнения диффузии и уравнения неразрывности (Косов, et al., 2020).

Для решения поставленной задачи используются вычислительные методы, реализованные в программном комплексе ANSYS Fluent, что позволяет детально исследовать пространственно-временную динамику концентрационных градиентов и границ устойчивости механического равновесия в бинарных газовых смесях. Численный эксперимент проводится с учетом граничных условий, соответствующих лабораторным установкам, и охватывает широкий диапазон давлений, при котором фиксируется переход от диффузионного массопереноса к режиму конвективной неустойчивости (ANSYS, 2024). Полученные результаты обладают ключевой ролью как для фундаментальной науки, так и для прикладных исследований, поскольку позволяют не только количественно охарактеризовать кинетические особенности массопереноса в бинарных системах, но и уточнить условия их устойчивости в различных термодинамических режимах. В дальнейшем предполагается использование разработанных методологических подходов для анализа многокомпонентных газовых смесей (Кульжанов, 2002), что откроет перспективы для углубленного изучения процессов переноса в стратифицированных средах и системах с гравитационной стратификацией.

Материалы и методы. Для исследования процессов массопереноса в бинарных газовых смесях применялся двухколбовый метод, обеспечивающий возможность детального анализа кинетики диффузионно-конвективных переходов. Экспериментальная установка (Косов, et al., 2002), представленная на Рисунке 1, включает две соединённые колбы одинакового объёма ($V_b = V_n = 69,5 \text{ см}^3$), которые объединены диффузионным каналом диаметром $d = 3,4 \text{ мм}$ и длиной $L = 70 \text{ мм}$. Исследование проводилось при постоянной температуре $T = 298 \text{ К}$ для бинарной газовой смеси гелий – азот ($N_2\text{-He}$). В соответствии с экспериментальными условиями, более тяжёлый газ (N_2) всегда располагался в верхней колбе, что обеспечивало начальную стратификацию смеси и позволяло изучать динамику нарушений механического равновесия аппаратов (Косов, et al., 2005).

В ходе эксперимента варьировался диапазон давления от 0,338 МПа до 1,49 МПа, что позволило анализировать переходные процессы и выявлять критические параметры, при которых система изменяет кинетический режим массообмена. Измерения проводились с контролем распределения концентраций

компонентов смеси в различных участках установки, что обеспечивало возможность регистрации перехода от диффузионного режима к конвективному. Методологическая база эксперимента позволила оценить влияние давления на процессы массопереноса, а также выявить условия, при которых бинарная газовая система теряет устойчивость механического равновесия и переходит в режим гравитационной конвекции (Косов, et al., 2002).

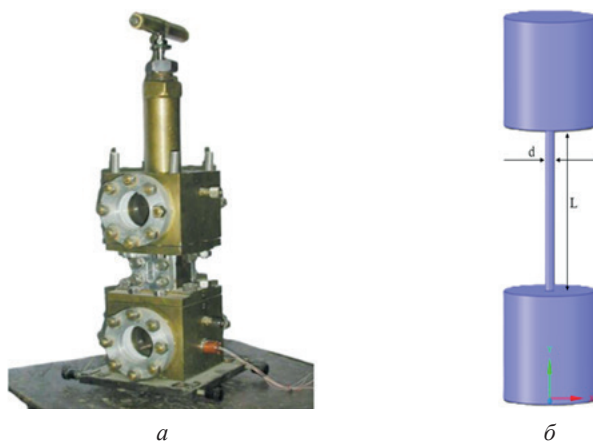


Рисунок 1. а) двухколбовый аппарат, на котором проводился эксперимент
б) 3D-модель двухколбового аппарата

В ходе эксперимента были получены данные, представленные на Рисунке 2, демонстрирующие влияние увеличения давления на поведение бинарной газовой смеси N_2 -He. При низких значениях давления наблюдается соответствие между расчетными и экспериментальными концентрационными значениями, что свидетельствует о преобладании диффузионного механизма массообмена. Однако с увеличением давления концентрация компонентов возрастает, и в определённых критических пределах наблюдается нарушение этой тенденции, что указывает на утрату устойчивости изотермического механического равновесия системы. При дальнейшем увеличении давления зафиксирована стабильность конвективных потоков, что подтверждает переход системы в новый режим массообмена (Косов, et al., 2005).

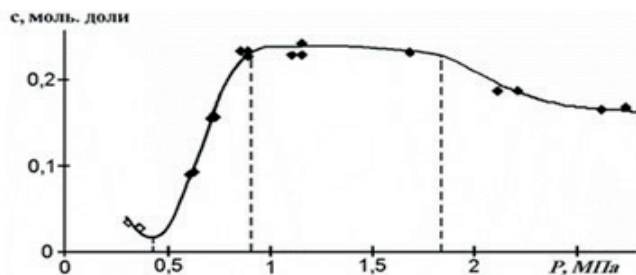


Рисунок 2. Зависимость концентрации лёгкого компонента (He) в нижний колбе от давления.
Точки - экспериментальные данные

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при достижении критических значений давления в системе наблюдается переход от диффузионного режима к концентрационной конвекции. В определённые моменты времени происходит формирование конвективных потоков, что является ключевым индикатором нарушения механического равновесия системы. Данный процесс согласуется с теоретическими данными, полученными в рамках анализа конвективной устойчивости (Косов, et al., 2020). Динамика макроскопического движения бинарной газовой смеси в изотермических условиях описывается системой гидродинамических уравнений, включающей уравнение Навье-Стокса, уравнение неразрывности и уравнение диффузии. Уравнение Навье-Стокса описывает движение вязкой жидкости или газа с учетом сил давления, вязкости и внешних сил, уравнение неразрывности отражает закон сохранения массы, обеспечивая согласованность поля скоростей и плотности, а уравнение переноса описывает эволюцию концентрации компонента смеси во времени. Эта система служит фундаментом для моделирования изотермической динамики бинарных смесей в условиях гравитационной стратификации, в частности — в конфигурации двухколбового аппарата, где возможен переход от чисто диффузионного переноса к гравитационно-обусловленной конвекции (Косов, et.al., 2020):

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla \vec{u}) \right] &= -\nabla p + \eta \Delta \vec{u} + \left(\frac{\eta}{3} + \xi \right) \nabla \operatorname{div} \vec{u} + \rho \vec{g} \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= D_{12} \Delta c \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

В приведённых уравнениях используются следующие физические величины: $\vec{u}$ - вектор скорости макроскопического движения газовой смеси, определяющий её кинематические характеристики и направление массообмена в системе; ρ - плотность бинарной газовой смеси, зависящая от давления, температуры и состава компонентов; P - давление, являющееся основным термодинамическим параметром, определяющим механическое равновесие системы; $\tilde{n}$ - концентрация компонента смеси, описывающая его относительное содержание в объёме и играющая ключевую роль в процессах диффузии и конвекции; $\vec{g}$ - ускорение свободного падения, учитываемое в уравнении Навье-Стокса как гравитационная сила, влияющая на конвективные потоки; η, ξ - динамическая и объемная вязкости, характеризующие сопротивление среды движению газа и определяющие диссипативные процессы в системе; D_{12} - коэффициент взаимной диффузии, отвечающий за интенсивность перемешивания компонентов газовой смеси на молекулярном уровне.

Если систему уравнений (1) дополнить уравнением состояния среды:

$$\rho = \rho(c, p) \quad (2)$$

Уравнение состояния связывает плотность газа с давлением и концентрацией компонентов. Принимается, что температура постоянна, и следовательно, изменение плотности обусловлено только вариациями давления и состава. Это приближение оправдано в рамках низкомаховых течений и умеренных давлений, где сжимаемость можно учитывать частично. Если принять выбранную концентрацию компонента и давление за термодинамические переходы, то:

$$c = \langle c \rangle + \tilde{c}, p = \langle p \rangle + \tilde{p} \quad (3)$$

Здесь $\langle \tilde{n} \rangle, \langle p \rangle$ - среднее значение, принятое на начальный момент расчёта, $\tilde{n}, \tilde{p}$ - случайные числа. Предполагается, что давление может быть представлено как сумма среднего значения и малой случайной флуктуации. Эти флуктуации могут инициировать развитие неустойчивости в системе и, следовательно, переход к конвекции. Изменение плотности, вызванное неравномерностью давления, может быть относительно незначительным по сравнению с изменением давления при смешении газов. Следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} &= -\nabla p + \Delta \bar{u} + Rc\bar{\gamma} \\ P \frac{\partial c}{\partial t} - (\bar{u}\bar{\gamma}) &= \Delta c \\ \text{div} \bar{u} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Соответствующий критерий - диффузионное число Рэлея $R = \frac{g\beta A d^4}{\nu D_{12}}$ и число Прандтля $P = \frac{\nu}{D_{12}}$. Уравнение (4) показывает изменение плотности, обусловленное давлениями, не оказывает существенного влияния по сравнению с общим градиентом давления, вызванным различием молярных масс. Это позволяет использовать приближение Буссинеска, при котором плотность считается постоянной повсюду, кроме содержащих гравитацию. Для определения параметров массопереноса в диффузионном канале необходимо дополнить систему уравнением переноса. Данное уравнение описывает баланс конвективной диффузии и позволяет прогнозировать локальное распределение массовых долей каждого компонента в смеси. В общем виде оно представляется следующим образом и уравнение описывает локальный баланс массы компонента i -го в движущейся смеси (Abd Halim, et.al., 2018; Wilcox, 2007):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \bar{v} u_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

В данном выражении: R_i - скорость образования i -го компонента в результате протекания химической реакции, определяемая кинетическими параметрами системы; S_i - обобщённая переменная, характеризующая произвольную физическую величину, задаваемую пользователем в зависимости от условий моделирования, J_i - диффузионный поток i -го компонента, величина которого рассчитывается исходя из градиентов плотности и температуры в соответствии с законами диффузии и уравнением переноса массы. Следующее приближение используется в численных методах при моделировании турбулентных течений, но в данной работе его применение возможно лишь в критических режимах при высоком давлении, где может возникнуть нестабильная конвекция (Marsoux, et.al., 2005):

$$\bar{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i}) \nabla Y_i - D_{t,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (6)$$

В данном выражении: μ_t - коэффициент турбулентной вязкости, характеризующий влияние турбулентных флуктуаций на перенос импульса в газовой среде; Sc_i - турбулентное число Шмидта, определяющее соотношение между турбулентной вязкостью и турбулентной диффузией в рассматриваемой системе; $D_{t,i}$ - коэффициент турбулентной диффузии, описывающий процесс перемешивания в условиях развитой турбулентности.

Величина бинарного коэффициента диффузии рассчитывается на основе кинетической теории газов в рамках приближения Чепмена-Энскога, учитывающего межмолекулярные взаимодействия и динамические характеристики газовой смеси, выражение даёт расчет взаимного коэффициента диффузии на основе кинетической теории газов (Marsoux, et.al., 2005).

$$D_{ij} = 0.00186 \frac{[T^3 (\frac{1}{M_{w,i}} + \frac{1}{M_{w,j}})]^{\frac{1}{2}}}{p_{abc} \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \quad (7)$$

В данной модели: $M_{w,i}$ - молярная масса, определяющая инерционные свойства молекул компонентов газовой смеси; Ω_D - безразмерный интеграл столкновений, являющийся функцией межмолекулярного потенциала и температуры, используемый в рамках кинетической теории газов для описания процессов диффузии.

В рамках численного моделирования массообменных процессов в бинарной газовой смеси N_2 -He в качестве начальных и граничных условий принята конфигурация, при которой верхняя колба заполнена азотом, а нижняя - гелием. Такой выбор обусловлен различием молекулярных масс рассматриваемых компонентов, что приводит к гравитационной стратификации системы и создает

условия для анализа механизмов утраты механического равновесия (Happert, 1984). Для обеспечения строгого соответствия модели физическим процессам, протекающим в системе, предполагается неизменность ключевых физико-химических параметров газов, включая динамическую и кинематическую вязкость, коэффициенты молекулярной и взаимной диффузии, а также удельную теплоёмкость. Численные значения данных параметров были определены с использованием программного комплекса ANSYS Fluent, реализующего метод конечных элементов и обеспечивающего решение уравнений массопереноса с высокой степенью точности. Такой подход позволяет корректно учитывать диффузионно-конвективные взаимодействия в системе и прогнозировать эволюцию распределения концентраций компонентов в различных термодинамических режимах.

Модель предполагает строго изотермические условия, что исключает учет тепловой конвекции и температурной стратификации. Это ограничивает применимость результатов к реальным процессам, в которых температурные градиенты играют существенную роль, например, в атмосфере или технологических системах с нагревом или охлаждением. Так же рассматриваемая система (N_2 -He) моделируется как химически инертная, без учета химических реакций между компонентами. В реальных многокомпонентных средах возможны реакции, меняющие состав и тепловые характеристики смеси, что делает модель неприменимой к реакционно - способным средам как в горении или каталитических процессах.

Численные результаты. Для численного моделирования данных процессов использовалась гибридная сеточная структура, в которой верхняя и нижняя цилиндрические области дискретизировались с помощью треугольных элементов, а диффузионный канал - четырёхугольными элементами. Данный метод позволил адаптировать расчётную сетку к геометрическим особенностям системы, обеспечивая её высокую точность. Размер элемента сетки был установлен равным 1 мм, что обеспечило детализированное представление геометрии исследуемой системы и высокую точность численного анализа (ANSYS, 2024). Одним из критериев, используемых для определения границы перехода между различными кинетическими состояниями системы, является давление (Косов, et al., 2005). Результаты, представленные в Таблице 1, демонстрируют, что в диапазоне давления от 0,338 МПа до 0,518 МПа массообмен в системе преимущественно осуществляется за счёт молекулярной диффузии, что соответствует устойчивому состоянию механического равновесия. Однако при дальнейшем увеличении давления до 1,49 МПа фиксируется возникновение конвективных потоков, что свидетельствует о переходе системы в неустойчивый режим, сопровождающийся усилением гравитационной конвекции. Полученные данные в Таблице 1 (Косов, et al., 2005) позволяют количественно охарактеризовать влияние давления на процессы массообмена в бинарных газовых смесях, а также определить критические условия, при которых диффузионный механизм транспортировки вещества утрачивает доминирующую роль, уступая место конвективным структурам течения:

Таблица 1. Концентрации продиффундировавшего азота из одной колбы в другую для системы N_2 -He при различных давлениях и $T=298$ К, $\tau = 17$ минут

Р, МПа	Концентрация компонентов, молярная доля		
	$C_{\text{эк}}$	$C_{\text{теор}}$	$C_{\text{Ansys Fluent}}$
0,338	0,065	0,064	0,069
0,437	0,051	0,051	0,055
0,518	0,043	0,046	0,040
0,798	0,161	0,030	0,165
1,03	0,244	0,024	0,226
1,49	0,273	0,016	0,239

Сопоставление экспериментальных данных с рассчитанными зависимостями концентрации подтверждает, что начальный этап диффузии происходит в интервале времени, значимом для процесса смешивания, и полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями. В исследуемой системе в диапазоне давления от 0,338 МПа до 0,518 МПа доминирующим механизмом переноса вещества является молекулярная диффузия, характеризующаяся установившимся режимом статического баланса. Диффузионная картина точно передает суть процесса смешивания газов на молекулярном уровне представленными на Рисунке 3:

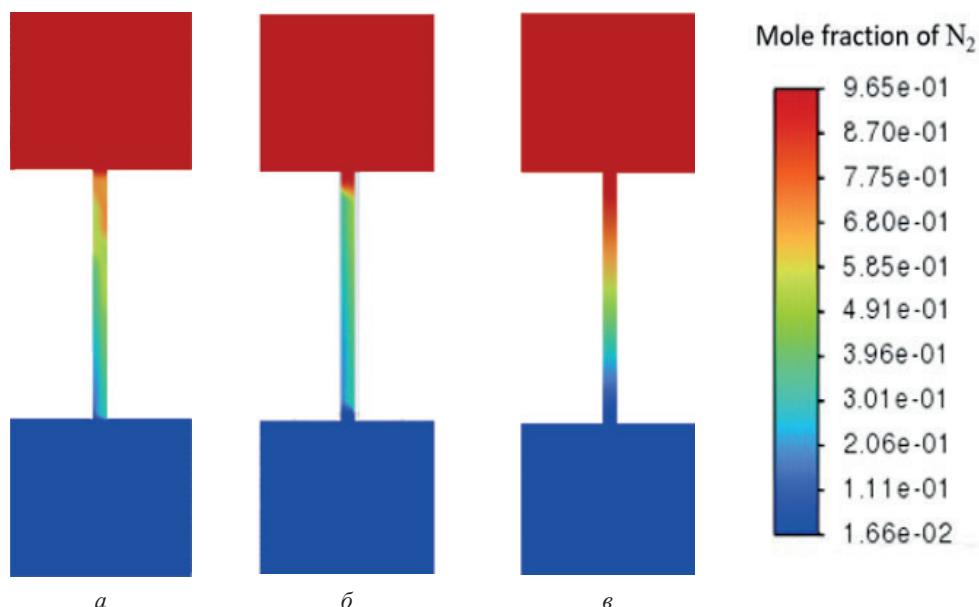


Рисунок 3. Молекулярные диффузионные потоки, образующиеся в канале для системы N_2 -He при $p=0,518$ МПа, $T=298$ К, $\tau = 17$ минут:

- а) Момент смешения газов в осевом сечении диффузионного канала при $\tau = 300$ с;
- б) Момент смешения газов в осевом сечении диффузионного канала при $\tau = 750$ с;
- в) Момент смешения газов в осевом сечении диффузионного канала при $\tau = 960$ с;

Верификация корректности численного моделирования кинетического перехода «диффузия – конвекция» при различных уровнях давления проведена посредством сравнительного анализа расчетных данных с экспериментальными результатами, представленными на Рисунке 4:

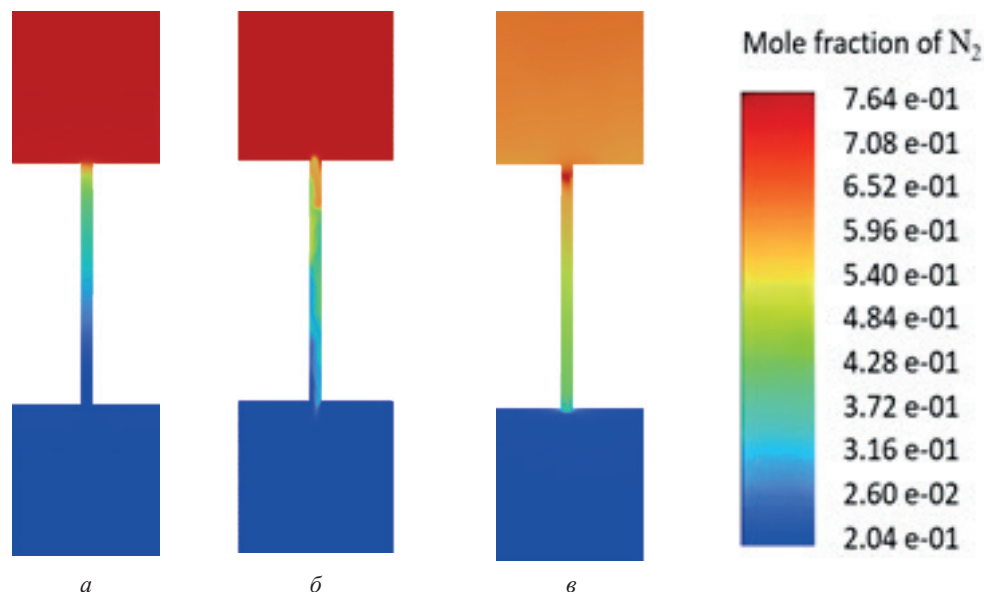


Рисунок 4. Конвективные потоки, образующиеся в диффузионном канале для системы системы N_2 -He при $p=1,49$ МПа, $T=298$ К, $\tau = 17$ минут:

- а) Момент смешения газов в осевом сечении диффузионного канала при $\tau = 540$ с;
- б) Момент смешения газов в осевом сечении диффузионного канала при $\tau = 660$ с;
- в) Момент смешения газов в осевом сечении диффузионного канала при $\tau = 960$ с;

Анализ изображений, представленный на Рисунке 4, иллюстрирует специфические характеристики конвективных течений, формирующихся вследствие нарушения механического равновесия в бинарной газовой смеси. Данные визуализации позволяют идентифицировать ключевые параметры гидродинамической неустойчивости, возникающей при градиентных изменениях состава и температуры исследуемой системы. Начиная с определенного момента процесса смешивания, фиксируется монотонное увеличение концентрации всех компонентов, что является характерным признаком конвективного массопереноса. На рисунке 4а представлена симмуляция возникших в этом случае конвективных течений. Заметно фиксируются восходящие и нисходящие конвективные потоки, турбулизируя, до этого времени, смесь находящуюся в состоянии механического равновесия. Спустя $\tau=540$ с в системе реализуется кинетический переход, который регистрирует переход от одного типа конвекции к другому. На рисунке 4б в момент времени около $\tau=660$ с регистрируются различные по плотности области газовой смеси. В рисунке 4в, в момент времени $\tau=960$ с в системе реализуется диффузия отличная на рисунке 4в монотонными изоконцентрационными распределениями.

Обсуждение результатов анализа. Результаты эксперимента показали, что бинарная газовая смесь N_2 -He в условиях изотермического режима при низких давлениях ведет себя предсказуемо в рамках классической диффузии. Однако с увеличением давления наблюдается значительное изменение структуры потоков, что свидетельствует о переходе системы в новый режим, характеризующийся проявлением конвективной неустойчивости. Ключевым критерием, определяющим устойчивость механического равновесия бинарной газовой смеси, является критическое давление 0,798 МПа, при котором начинается активное формирование конвективных структур. Согласно полученным данным, этот переходный процесс сопровождается резким увеличением градиентов концентрации компонентов в диффузионном канале, что указывает на нарушение диффузионного механизма массопереноса.

Численные расчеты, выполненные в ANSYS Fluent, позволили детализировать распределение концентраций компонентов смеси и выявить критические границы механической устойчивости системы. Анализ экспериментальных данных показал, что для значений давления в пределах 0,338 – 0,518 МПа массоперенос преимущественно осуществляется за счет молекулярной диффузии, что подтверждается соответствием концентрационных полей расчетных и экспериментальных значений. При увеличении давления до 1,49 МПа наблюдается принципиально иное поведение системы, выражающееся в нарушении первоначального градиента концентраций и формировании направленных потоков. В этот момент диффузионный механизм становится вторичным, уступая место гравитационной конвекции. Этот эффект подтверждается наблюдаемыми изменениями концентрации компонентов в экспериментальных данных и численных расчетах. Сопоставление экспериментальных кривых и численных решений уравнений Навье-Стокса и диффузии демонстрирует высокую степень корреляции, что подтверждает адекватность предложенной модели массообмена в бинарных газовых смесях (Косов, et al., 2005). Анализ влияния давления на поведение бинарной газовой смеси позволил установить, что устойчивость механического равновесия определяется величиной диффузионного числа Релея и числа Прандтля. При низких значениях давления система характеризуется малыми значениями этих чисел, что соответствует стабильному диффузионному режиму. При достижении критических значений давления происходит увеличение числа Релея, что приводит к развитию конвективных течений. В частности, наблюдается формирование характерных структур, соответствующих автоколебательному режиму течения. Этот результат имеет важное значение для понимания механизмов формирования массообменных процессов в закрытых объемах, где доминируют гравитационные силы (ANSYS, 2024).

Заключение

Полученные численные результаты подтверждают, что с увеличением давления наблюдается переход от молекулярной диффузии к конвективному режиму массопереноса, что сопровождается нарушением концентрационного градиента и формированием направленных потоков. Численное моделирование подтвердило

наличие критического давления, при котором система теряет механическую устойчивость, а конвекция становится доминирующим механизмом массообмена. Сравнение расчетных и экспериментальных данных продемонстрировало высокую степень соответствия, что подтверждает правильность предложенной модели и примененных расчетных методов.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение параметрического анализа влияния температуры и молекулярных характеристик компонентов смеси на переходные процессы массопереноса. Кроме того, важным направлением является анализ турбулентных эффектов и их влияние на кинетику конвективного течения в бинарных газовых системах.

Литература

Abd Halim M.A, N.A.R. Nik Mohd, M.N. Mohd Nasir and M.N. Dahalan (2018) The evaluation of k- ϵ and k- ω Turbulence Models in Modelling Flows and Performance of S-shaped Diffuser. — *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, — 15(2) — P. 5160-5176 <https://doi.org/10.15282/ijame.15.2.2018.2.0399>

Косов В.Н., Федоренко О.В., Жаврин Ю.И., Мукамеденкызы В. (2014) Неустойчивость механического равновесия при диффузии в трехкомпонентной газовой смеси в вертикальном цилиндре кругового сечения. - *Журнал технической физики*, том 84(4). — С.15. <https://journals.ioffe.ru/articles/27195>

Косов В.Н., Альтенбах Х. (2023) Диффузионные механизмы конвективной неустойчивости в смесях жидкостей и газов. — *Z Angew Math Mech.*, — С. 103 <https://doi.org/10.1002/zamm.20230080>

Косов В.Н., Кульжанов Д.У., Анкушева Н.Б., Жаврин Ю.И. (2002) Неустойчивость механического равновесия изотермических бинарных газовых смесей при различных давлениях, — *Известия НАН РК. Сер. физ.-мат.* — № 2. — С. 81-87.

Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Анкушева Н.Б. (2005) Аномальная гравитационная конвекция и диффузия в изотермических тройных газовых смесях. — *Международная конференция по вычислительному тепло и массообмену*, 17-20 мая 2005 г. Труды конференции. — Париж-Кашан. — Т. 2. — С. 794-799.

Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Кульжанов Д.У., Анкушева Н.Б. (2005) Неустойчивость механического равновесия изотермических бинарных газовых смесей в наклонном канале. — *Известия НАН РК. Сер. физ.* — № 6. — С. 34-39.

Косов В.Н., Жаврин Ю.И., Кульжанов Д.У., Каратаева К.К., Анкушева Н.Б., Поярков И.В. (2002) Концентрационная гравитационная конвекция и диффузия в бинарных и многокомпонентных газовых смесях: Труды 3-й 100 Российской нац. конф. по теплообмену. — Москва, — Т. 3. — С. 91-94.

Косов В.Н., О.В. Федоренко, М.К. Асембаева и В. Мукамеденкызы (2020) Изменение диффузионно-конвективных режимов в тройных смесях с газом-разбавителем, *Теорет. обосн. хим. инж.*, 54, 2. — С.289-296.

Косов В.Н., Мукамеденкызы В., Жусанбаева А. Құрамында метан бар газ қоспаларының конвективті тұрақсыздық жағдайында изотермиялық көпкомпонентті араласу ерекшеліктері. — *Вестник КазНПУ. Серия физ.-мат. н и.* — 2020. — № 3(71). — С. 61-63.

Кульжанов Д.У. (2002) Устойчивость механического равновесия в бинарных газовых смесях при различных температурах, — *Вестник КазГУ. Сер. физ.* — № 2. — С. 115-118.

Marcoux M., Desrayaud G., Pagano A., Fichera A. (2005) Numerical And Analytical Solution For The Stationary Behaviour Of Binary Mixtures In A Horizontal Annular Cavity Heated From Inside. — *International Conference Computational Heat and Mass Transfer. Conference proceedings.* — Paris-Cachan, 2005. — V. 1. — P. 24-27.

User's ANSYS Fluent Guide, Release 2024. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA. Available at: <https://www.ansys.com/>

13. Happert G., Turner J. (1984) Convection due to double diffusion. Modern hydrodynamics. Successes and problems. — M.: Mir, 1984. — P. 414-452.

Wesfreid J. E. Henri Bénard. (2017) Thermal convection and vortex shedding; Comptes Rendus Mécanique. — Volume 345, Issue. — P. 446-466.

Wilcox. D.C. (2007) «Formulation of the $k-\omega$ turbulence model revisited». — 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA. AIAA. — P. 1400-1408.

References

Abd Halim M.A., N.A.R. Nik Mohd, M.N. Mohd Nasir and M. N. Dahalan (2018) The evaluation of $k-\epsilon$ and $k-\omega$ Turbulence Models in Modelling Flows and Performance of S-shaped Diffuser., International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, — 15(2). — P. 5160-5176 (in English) <https://doi.org/10.15282/ijame.15.2.2018.2.0399>

Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Yu.I., Mukamedenkyzy V. (2014) Neustojchivost' mekhanicheskogo ravnovesiya pri diffuzii v trekhkomponentnoj gazovoj smesi v vertikal'nom cilindre krugovogo secheniya [Instability of mechanical equilibrium during diffusion in a ternary gas mixture in a vertical cylinder of circular cross-Section] – Journal of technical physics, — tom 84(4), — S.15. (in Russian) <https://journals.ioffe.ru/articles/27195>

Kosov V., Al'tenbah, H. (2023) Diffuzionnye mekhanizmy konvektivnoj neustojchivosti v smesyah zhidkostej i gazov [Diffusion Mechanisms of Convective Instability in Liquid and Gas Mixtures] Z Angew Math Mech.. — S. 103. (in Russian) <https://doi.org/10.1002/zamm.20230080>

Kosov V.N., Kul'zhanov D.U., Ankusheva N.B., Zhavrin Yu.I. (2002) Neustojchivost' mekhanicheskogo ravnovesiya izotermicheskikh binarnykh gazovykh smesey pri razlichnykh davleniyah [Mechanical equilibrium instability of isothermal binary gas mixtures at various pressures]. Izvestiya NAN RK. Ser. fiz.-mat. — № 2. — S. 81-87. (in Russian)

Kosov V.N., Zhavrin Yu.I., Ankusheva N.B. (2005) Anomal'naya gravitacionnaya konvekciya i diffuziya v izotermicheskikh trojnykh gazovykh smesyah [Anomalous Gravitational Convection and Diffusion in Isothermal Ternary Gas Mixtures]. Mezhdunarodnaya konferenciya po vychislitel'nomu teplo i massobmenu, 17-20 may 2005 g. Trudy konferencii. — Parizh-Kashan. — T. 2. — S. 794-799. (in Russian)

Kosov V.N., Zhavrin Yu.I., Kul'zhanov D.U., Ankusheva N.B. (2005) Neustojchivost' mekhanicheskogo ravnovesiya izotermicheskikh binarnykh gazovykh smesey v naklonnom kanale [Mechanical equilibrium instability of isothermal binary gas mixtures in an inclined channel]. Izvestiya NAN RK. Ser. fiz. — № 6. — S. 34-39. (in Russian)

Kosov V.N., Zhavrin Yu.I., Kul'zhanov D.U., Karataeva K.K., Ankusheva N.B., Poyarkov I.V. (2002) Koncentracionnaya gravitacionnaya konvekciya i diffuziya v binarnykh i mnogokomponentnykh gazovykh smesyah [Concentration-Driven Gravitational Convection and Diffusion in Binary and Multicomponent Gas Mixtures] Trudy 3-j 100 Rossijskoj nac. konf. po teploobmenu. Moskva. — M., — T. 3. — S. 91-94. (in Russian)

Kosov V.N., O. V. Fedorenko, M. K. Asembaeva i V. Mukamedenkyzy (2020) Izmenenie diffuzionno-konvektivnykh rezhimov v trojnykh smesyah s gazom-razbavitelem [Transition of Diffusion-Convection Regimes in Ternary Mixtures with a Diluent Gas] Teoret. obosn. him. inzh., — 54, 2, — C.289-296. (in Russian)

Kosov V.N., Mukamedenkyzy V., Zhusanbaeva A. quramynda metan bar gaz kospalarynyng konvektivti turaqsyzydyq zhagdajynda izotermiyalyq kopkomponentti aralasu erekshelekteri. [Features of Isothermal Multicomponent Mixing under Convective Instability Conditions in Methane-Containing Gas Mixtures] — Vestnik KazNPU. Seriya fiz.-mat. n i. — 2020. — № 3(71). — S. 61-63. (in Kazakh)

Kul'zhanov D.U. (2002) Ustojchivost' mekhanicheskogo ravnovesiya v binarnykh gazovykh smesyah pri razlichnykh temperaturah [Stability of Mechanical Equilibrium in Binary Gas Mixtures at Various Temperatures] . Vestnik KazGU. Ser. fiz. — № 2. — S. 115-118. (in Russian)

Marcoux M., Desrayaud G., Pagano A., Fichera A. (2005) - Numerical And Analytical Solution For The Stationary Behaviour Of Binary Mixtures In A Horizontal Annular Cavity Heated From Inside. - International Conference Computational Heat and Mass Transfer. Conference proceedings. — Paris-Cachan, 2005. — V. 1. — P. 24-27. (in English)

User's ANSYS Fluent Guide, Release 2024. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA. Available at: <https://www.ansys.com/> (in English)

Happert G., Turner J. (1984), Convection due to double diffusion. Modern hydrodynamics. Successes and problems. — M.: Mir, 1984. — P.414-452. (in English)

Wesfreid J. E. Henri Bénard. (2017), Thermal convection and vortex shedding; Comptes Rendus Mécanique. — Volume 345, Issue. — P. 446-466. (in English)

Wilcox. D.C. (2007) - «Formulation of the $k-\omega$ turbulence model revisited». - 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA. AIAA. — P. 1400-1408. (in English)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 2. Number 354 (2025), 62–78

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.344>

УДК 629.78.075.001.14; 629.78:001.891

ГПНТИ 89.17.15

© A.V. Serebryanskiy^{1*}, Ch.B. Akniyazov^{1,2}, Ch.T. Omarov¹, S. Sittykova¹,
D. Kadyrova¹, 2025.

¹Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan;

²Te Punaha Atea - Space Institute, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
E-mail: aserebryanskiy@gmail.com

SEARCHING FOR INNER-EARTH ASTEROIDS

Serebryanskiy A.V. — PhD, Head of the Observational Astrophysics Department Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: serebryanskiy@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4313-7416>;

Akniyazov Ch.B. — PhD student, Acting Head of the Satellite Observations and Information Systems Laboratory, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan; Te Punaha Atea - Space Institute, University of Auckland, Auckland, New Zealand,

E-mail: akniyazov@yahoo.com, cahn210@aucklanduni.ac.nz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6325-0213>.

Omarov Ch.T. — Professor, PhD, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: chingis.omarov@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1672-894X>;

Sittykova S. — engineer, Fesenkov Astrophysical Institute. Almaty, Kazakhstan,

E-mail: sofiasittykova@gmail.com;

Kadyrova D. — engineer, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: kadyrova.daiana@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3821-742X>, WoS Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/IZQ-0275-2023>.

Abstract. This paper examines the current state of knowledge about potentially hazardous asteroids (PHAs) located in orbits closer to the Sun than Earth's orbit. The recent discovery of relatively large bodies in these orbits, which pose a significant collision risk to Earth, has increased the focus on these asteroids. Additionally, events like the Chelyabinsk meteor highlight the limitations in our understanding of the number of objects in these inner orbits. Detecting these objects using ground-based observatories or low-Earth orbit telescopes is challenging, making high-orbit telescopes a promising solution. This study investigates the feasibility of missions using infrared telescopes with apertures under 50 cm, taking into account technical capabilities, risks, and other factors. Preliminary calculations for asteroid detection using an orbiting telescope have been performed for asteroid diameters ranging from 50 meters (similar to the Chelyabinsk meteor) to 1 km (with 98% of larger objects already cataloged). Based on an analysis of system effectiveness for detecting potentially hazardous asteroids approaching from the direction of the Sun, the paper recommends that the concept for the Kazakhstan cislunar telescope should include a telescope with a 20-25 cm aperture,



capable of operating in both visible and infrared (4-6 microns) wavelengths. Such a telescope could provide valuable early warning for objects larger than 150 meters at a distance of less than 750,000 km.

Keywords: potentially hazardous asteroids, inner-Earth orbits, asteroid detection, infrared telescopes, space-based observations

© **А.В. Серебрянский^{1*}, Ч.Б. Акниязов^{1,2}, Ч.Т. Омаров¹, С. Ситтыкова¹,
Д. Кадырова¹, 2025.**

¹В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы, Қазақстан;

²Te Punaha Atea – Ғарыш институты, Окленд университеті, Окленд,

Жаңа Зеландия.

E-mail: aserebryanskiy@gmail.com

ІШКІ ЖЕР ОРБИТАСЫНДА АСТЕРОИДТАРДЫ ІЗДЕУ

А.В. Серебрянский — PhD, Астрофизика бақылау бөлімінің бастығы, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: serebryanskiy@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4313-7416>;

Ч.Б. Акниязов — PhD докторанты, Жасанды Жер серіктерін және ақпараттық жүйелерді бақылау зертханасының меңгеруші міндетін атқарушы, В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы, Қазақстан; Te Punaha Atea – Ғарыш институты, Окленд университеті, Окленд, Жаңа Зеландия,

E-mail: akniyazov@yahoo.com, cahn210@aucklanduni.ac.nz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6325-0213>;

Ч.Т. Омаров — профессор, PhD, В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: chingis.omarov@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1672-894X>;

С. Ситтыкова — инженер, В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: sofiasittykova@gmail.com;

Д. Кадырова — инженер, В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: kadyrova.daiana@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3821-742X>.

Аннотация. Бұл жұмыста Жердің орбитасына қатысты ішкі орбиталарда орналасқан ықтимал қауіпті астероидтар туралы хабардар болудың қазіргі жағдайына талдау жасалады. Жермен соқтығысуға айтарлықтай қауіп төндіретін өте үлкен денелердің осы орбиталарда табылуына байланысты, астероидтарға назар соңғы уақытта өсті. Сонымен қатар, Челябинск суперболиді сияқты оқиғалар да ішкі орбиталардағы объектілер саны туралы толық біліміміздің болмауының салдары болып есептеледі. Бұл объектілерді жердегі обсерваториялар мен төменгі жерге жақын орбиталарындағы телескоптардан табу айтарлықтай қиын болғандықтан, бұл мәселені шешу жоғары орбиталық телескоптарды пайдалану аясында тиімді көрінеді. Бұл жұмыста техникалық мүмкіндіктерді, тиісті тәуекелдерді және басқа да бірқатар факторларды ескере отырып, апертурасы 50 см-ден кіші телескоптармен ИҚ аймақта миссияларды іске асыру мүмкіндігі қарастырылады. 50 метрден 1 км-ге дейінгі аймақтағы (шамамен Челябински метеоритінің класына жататын объектілер) астероидтың диаметрінің мәндері үшін

орбитальный телескопом астероиды анықтаудың алдын-ала есептеулері жүргізілді (қазіргі уақытта олардың популяциясының 98%-на дейін үлкен объектілері белгілі). Күнгей жағынан ықтимал қауіпті астероидтарды анықтау міндеті үшін жүйенің тиімділігіне жүргізілген талдау нәтижелеріне сүйене отырып, қазақстандық айға жақын орбитадағы телескоп тұжырымдамасы үшін көрінетін диапазонда және 4-6 мкм ИҚ диапазонында жұмыс істейтін апертурасы 20-25 см болатын телескопты әзірлеудің орындылығы туралы қорытынды жасалды. Мұндай кіші апертуралы телескоп "ескерту" режимінде жұмыс істегенде, объектінің аппараттан 750 000 км-ден аз қашықтықта өлшемі 150 метрден асатын объектілерді анықтау кезінде пайдалы болады.

Түйін сөздер: ықтимал қауіпті астероидтар, ішкі орбиталар, астероидтарды іздеу, инфрақызыл телескоптар, ғарыштық бақылаулар

© А.В. Серебрянский^{1*}, Ч.Б. Акниязов^{1,2}, Ч.Т. Омаров¹, С. Ситтыкова¹,
Д. Кадырова¹, 2025.

¹Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан;

²Te Punaha Atea – Космический институт, Окленд, Новая Зеландия.

E-mail: aserebryanskiy@gmail.com

ПОИСК АСТЕРОИДОВ ВНУТРИ ЗЕМНОЙ ОРБИТЫ

А.В. Серебрянский — PhD, Начальник отдела наблюдательной астрофизики, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: serebryanskiy@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4313-7416>;

Ч.Б. Акниязов — докторант PhD, и.о. заведующего лабораторией наблюдений ИСЗ и информационных систем, Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан; Te Punaha Atea – Космический институт Оклендского университета, Окленд, Новая Зеландия,

E-mail: akniyazov@yahoo.com, cakn210@aucklanduni.ac.nz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6325-0213>;

Ч.Т. Омаров — профессор, PhD, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, E-mail: chingis.omarov@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1672-894X>;

С. Ситтыкова — инженер, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, E-mail: sofiasittykova@gmail.com.

Д. Кадырова — инженер, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, E-mail: kadyrova.daiana@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3821-742X>.

Аннотация. В работе приводится анализ современного состояния осведомлённости о потенциально опасных астероидах, находящихся на орбитах, внутренних по отношению к орбите Земли. В последнее время внимание к этим объектам возросло в связи с обнаружением на таких орбитах довольно крупных тел, которые могут представлять серьёзную угрозу столкновения с Землёй. Кроме того, такие события, как Челябинский суперболид, указывают на неполноту существующих данных о числе объектов на внутренних орбитах. Поскольку их обнаружение затруднено с помощью наземных обсерваторий и телескопов на низких околоземных орбитах, решение данной задачи предполагается за счёт использования высокоорбитальных телескопов. В статье рассматривается

возможность реализации миссий с телескопом апертурой менее 50 см в инфракрасном диапазоне с учётом технических возможностей, рисков и других сопутствующих факторов. Проведены предварительные расчёты способности орбитального телескопа обнаруживать астероиды диаметром от 50 м (примерно соответствующих классу объектов Челябинского метеорита) до 1 км (более крупные объекты в настоящее время известны примерно на 98 %). На основе анализа эффективности системы обнаружения потенциально опасных астероидов с подсолнечной стороны сделан вывод о целесообразности разработки для концепции казахстанского окололунного аппарата телескопа с апертурой 20–25 см, работающего в видимом диапазоне и инфракрасном диапазоне 4–6 мкм. Такой телескоп может быть использован в режиме предупреждения для обнаружения объектов размером более 150 м на расстоянии менее 750 000 км от аппарата.

Ключевые слова: потенциально опасные астероиды, внутренние орбиты, обнаружение астероидов, инфракрасные телескопы, космические наблюдения

Финансирование. Работа выполняется в рамках Программы № BR24992759 "Разработка концепции первого казахстанского орбитального окололунного телескопа - Этап I", финансируемого МНВО РК.

Введение. Задача обнаружения и изучения потенциально опасных астероидов (РНА, Potentially Hazard Asteroids) представляет не только интерес для фундаментальной науки, но важна и с точки зрения безопасности нашего существования. Этот вопрос дважды, в 2003 и 2017 годах, рассматривался Группой по Выработке Научного подхода к Объектам, Сближающихся с Землей Центра NASA по расчету орбит астероидов и комет, а также вероятности их столкновения с Землей (CNEOS) (Stokes, et al., 2003; Stokes, et al., 2017). В докладах CNEOS отмечалось, что имеющиеся модели населения потенциально опасных астероидов предсказывают наличие популяций, которые до сих пор нами не обнаружены. Некоторые из этих необнаруженных объектов могут столкнуться с Землей в течение следующего столетия, представляя потенциальную угрозу жизни людям и нанесения ущерба инфраструктуре.

В октябре 2024 года каталог MPC¹ содержал более 36,268 околоземных объектов. Большинство из этих объектов представляют собой астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). При этом большая часть АСЗ наблюдалась впервые именно в момент их минимального расстояния от Земли. Из-за относительно небольшого размера, почти половина из обнаруженных АСЗ наблюдалась менее 7 дней, что не позволяет точно оценить их орбитальные характеристики и требует повторного обнаружения и идентификации. Для этих целей развиваются как наземные программы обнаружения АСЗ, так и соответствующие космические миссии. Эта задача приобрела значимую актуальность после того, как были проанализированы результаты миссии «Spaceguard» и сформулированы новые критерии опасности АСЗ (Stokes, et al., 2003; Stokes, et al., 2017). В частности, было принято решение,

¹ [Minor Planet Center](https://minorplanetcenter.org/).

что АСЗ диаметром более 140 м должны стать целью следующего поколения поисковых исследований, поскольку такие объекты, при столкновении с Землей, способны вызвать серьезные глобальные последствия. Уровень угрозы от падения астероида определяется энергетикой удара, которая, в свою очередь зависит от третьей степени диаметра АСЗ. По этой причине, цели для поисков опасных АСЗ, прописанные в государственных законодательных актах² и доктринах миссий³ определяются именно размером астероидов. Астероид диаметром 140 метров приведет к взрыву с эквивалентной энергией равной примерно 200 мегатонн тротила (Mainzer, et al., 2023). При этом общее число АСЗ диаметром от 140 метров и больше оценивается приблизительно в 25,000. Количество АСЗ, способных достичь поверхности Земли, не сгорая полностью в ее атмосфере (около 50 метров в диаметре для неметаллических объектов), оценивается примерно в полмиллиона с частотой столкновений примерно один раз в тысячу лет (Stokes, et al., 2017). Очевидно, что обнаружение всех этих потенциально опасных объектов не позволит устранить опасность столкновения с ними, но даст нам явное преимущество в виде осведомленности о возможности таких событий в краткосрочной и долгосрочной перспективе. При этом ставится задача увеличить время оповещения о потенциально опасном астероиде с нескольких часов до нескольких дней — минимальное необходимое время реагирования, по оценке агентств по борьбе со стихийными бедствиями (Boslough, et al., 2015).

Результаты статистического анализа показывают, что значительная часть пока еще не обнаруженных АСЗ, вероятнее всего, относится к классу астероидов, орбиты которых лежат внутри орбиты Земли. Это, в частности, астероиды класса Атон и Атира. Атоны имеют большую полуось < 1 а.е. и расстояние в афелии $Q > 0,983$ а.е. (Grav, et al., 2023). В настоящее время известно ~1500 таких объектов и, скорее всего, общее число объектов с диаметром более 100 метров в 10 раз больше. Таким образом общее количество опасных АСЗ на внутренних орбитах может исчисляться десятками тысяч. (Wallace B. et al., 2014). В обобщенном каталоге астероидов MPC класс Аполлонов составляет около 51,2%; около 40,8% каталогизированных MPC АСЗ относятся к классу Аморов, а около 7,8% — к классу Атонов (Grav, et al., 2023; Sheppard, et al., 2022). При этом темпы обнаружения внутренних астероидов значительно уступают темпам обнаружения АСЗ из других семейств.

Такое положение дел определяется в основном труднодоступностью этих объектов для наблюдений, особенно, с поверхности Земли или околоземных орбит (de La Fuente Marcos, et al., 2014). Тем временем этот класс астероидов может содержать объекты крупнее Челябинского супербоида, показавшего в 2013 году весь потенциал возможных угроз от таких объектов (Sheppard, et al., 2022) (см. Рисунок 1).

² H. Rept. 109-158 - GEORGE E. BROWN, JR. NEAR-EARTH OBJECT SURVEY ACT | Congress.gov

³ [NEO Search & Follow-Up](#) | [The Spaceguard Centre](#)

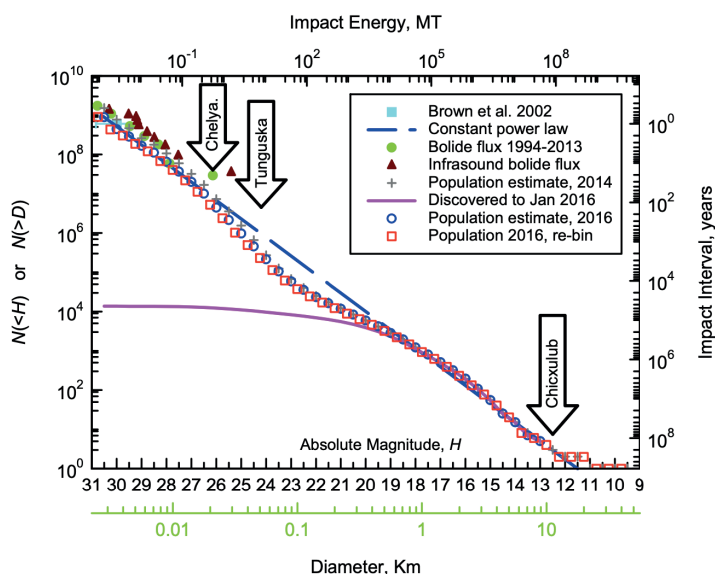


Рисунок 1 - Зависимость количества астероидов (N) от диаметра (Diameter), абсолютной звездной величины (H), частоты падений (Impact Interval) и выделяемой энергии при ударе (Impact Energy), из работы (Stokes, et al., 2017) Figure 2-B-2.

При этом очень важно понимать динамику таких тел как Челябинский суперболид и источник их происхождения. Для Челябинского объекта ее удалось проследить с достаточной высокой достоверностью и выяснить, что его родительским телом был астероид с орбитальным резонансом 3:1 с Юпитером (de La Fuente Marcos, et al., 2014). Одним из следствий такой динамики является то, что, оказавшись в неблагоприятном для наблюдения с Земли положении (близость Солнца в поле наблюдения, большая воздушная масса) во время своего сближения, объект может так и оставаться невидимым для нас в течение десятилетий. В этом случае единственным способом обнаружения такого объекта будут космические наблюдения (de La Fuente Marcos, et al., 2014). В рамках разрабатываемой в Казахстане концепции околосолнечного аппарата одной из задач предлагается разработка методологии наблюдений и концепции телескопа для обнаружения таких АСЗ.

Обзор разрабатываемых и существующих миссий, постановка задачи.

Принимая во внимание технические возможности, соответствующие риски и ряд других сопутствующих факторов, в данной работе мы рассматриваем реализацию миссий с телескопом апертурой менее 50 см. Кроме того, мы рассматриваем реализацию, при которой будет использоваться инфракрасный (ИК) диапазон. Этот выбор продиктован тем фактом, что такая система обладает преимуществами по сравнению с системами видимого диапазона, включая более высокую чувствительность при обнаружении астероидов. Следует также отметить, что проведение наблюдений в ИК диапазоне наземными средствами фактически невозможно из-за влияния атмосферы и, следовательно, космические

ИК наблюдения могут являться существенным дополнением оптическим наблюдениям с обсерваторий на Земле. Однако за преимущества наблюдений в инфракрасном диапазоне приходится платить усложнением системы, связанным с охлаждением телескопа и приемного оборудования.

Космические инфракрасные телескопы, помимо хорошо известных инструментов больших миссий, таких как James Webb Space Telescope (JWST) — орбитальная инфракрасная обсерватория, также широко используются для обнаружения и определения характеристик малых тел солнечной системы (Mainzer, et al., 2015). Этому в первую очередь способствовало развитие технологий в изготовлении новых ИК-детекторов, которые за последние два десятилетия прошли путь от небольших лабораторных приемников размером несколько десятков элементов до цельнокристаллических матриц размером 1024 x 1024. Это позволило на несколько порядков повысить эффективность ИК-систем для поиска АСЗ. Длина волны, на которой излучение тела максимально, зависит от гелиоцентрического расстояния объекта и его термодинамических характеристик. Для большинства малых тел солнечной системы, орбиты которых лежат ближе орбиты Сатурна, их максимальное тепловое излучение лежит приблизительно в диапазоне длины волны от 4 мкм до 20 мкм. Длина волны больше ~4 мкм характерна для астероидов, орбиты которых лежат в пределах ~4 а.е. (1 а.е. ≈ 150 млн. км), на более коротких длинах волн регистрируется как тепловое излучение, так и отраженный солнечный свет. Однако, последний факт может не играть существенной роли при наблюдении астероидов внутренних к орбите Земли, поскольку они наблюдаются обычно при большом фазовом угле. Кроме того, излучение АСЗ в ИК диапазоне почти не зависит от альбеда астероида (см. Figure 2 в Mainzer, et al., 2015), что очень важно для их эффективного обнаружения.

Благодаря развитию радиометрического моделирования наблюдения в ИК диапазоне могут быть использованы для определения физических параметров объектов, таких, например, как эффективный сферический диаметр. Определение диаметра АСЗ при независимости от альбеда для разных астероидов позволит напрямую строить зависимости количества объектов от их размера и орбитальных параметров (Mainzer, et al., 2015). Наблюдения в ИК диапазоне могут быть также использованы в определении тепловой инерции астероидов, которая является ключевой характеристикой для понимания природы реголита астероидов. При наличии спектральных данных в ИК диапазоне, можно изучать особенности эмиссии и поглощения поверхности астероидов в тех диапазонах, в которых это невозможно сделать с наземных обсерваторий (Mainzer, et al., 2015). В настоящее время существует несколько космических миссий, в задачи которых входит поиск внутренних АСЗ. Это в первую очередь такие проекты, как NEOSSat⁴ (Hildebrand, et al., 2004; Laurin, et al., 2008) и WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer)/NEOWISE (Near-Earth Object WISE) (Mainzer, et al., 2011a; Mainzer, et al., 2011b). Проект WISE был проектом НАСА, запущенным в 2009 году на низкую околоземную орбиту для поисковых миссий в ИК диапазоне на длинах

⁴ NEOSSat -The Near Earth Object Space Surveillance Satellite

волн 3.4, 4.6, 12 и 22 мкм с телескопом апертурой 40 см. В 2013 году проект продолжил свою работу уже в качестве инструмента NEOWISE для исследований объектов в околоземном пространстве. Среди разрабатываемых концепций стоит упомянуть такие как NEO Surveyor (NEOS⁵) (Mainzer, et al., 2023). Миссия NEOS — это космический телескоп, предназначенный для поиска, каталогизации и исследования потенциально опасных объектов, включая объекты с низким альбедо, а также долго- и короткопериодические кометы. Аппарат включает в себя 50-см телескоп инфракрасного диапазона, работающий в двух каналах, в которых преобладает тепловое инфракрасное излучение типичных околоземных объектов, с эффективной температурой от 200 до 300 К на протяжении большей части своих орбит.

Wang, et al. (2022) предложили концепцию использования нескольких аппаратов, движущихся впереди Земли по ее орбите, что должно значительно повысить эффективность обнаружения объектов вблизи Солнца, а также обеспечить непрерывное наблюдение соответствующей области. В концепции, в том числе, ставится задача обнаружения АСЗ диаметром 25–50 м.

Материалы и методы исследований. По результатам миссии NEOSat был представлен список предложений по будущим орбитальным платформам, которые необходимо учитывать в разрабатываемой концепции окололунного аппарата. Во-первых, это контроль температуры приемного оборудования и фокальной плоскости телескопа. Во-вторых, это наличие дополнительного резервирования аппаратного обеспечения для минимизации последствий сбоев на орбите. В-третьих, это наличие датчиков грубого позиционирования (датчик солнца, звездные датчики) и двух вариантов десатурации, обеспечивая уровень резервирования системы позиционирования. В-четвертых, необходимость усовершенствовать программное обеспечение для автоматизированной обработки данных. Stokes, et al. (2017) рассмотрели несколько вариантов космического телескопа для обнаружения АСЗ и, в частности ИК телескоп с апертурой 20 см, находящийся на геостационарной орбите и телескоп апертурой 50 см в точке Лагранжа L1 (Земля - Солнце).

В качестве оптической системы для телескопов апертурой 50 см и 20 см рассматривается трех-зеркальный анастигмат, дающий большое поле зрения при минимальной дисторсии. Для рассматриваемой нами системы небольшой апертуры это выгодная оптическая схема, так как не имеет экранирования. В работе отмечается, что вся система может быть собрана в цельно-алюминиевой конфигурации, что должно значительно снизить зависимость от коэффициента температурного расширения. Предполагаемое поле зрения системы ~12 кв. градусов при использовании приемника 4000x 4000 с масштабом 3 уг.сек/пиксель. В качестве детектора предлагается решение на базе матрицы HgCdTe (теллурид кадмия-ртути). Детектор работает в диапазоне от ~0.4 мкм до 10 мкм. В интересующем нас диапазоне между 3 мкм и 5 мкм (средний ИК) темновой ток для >90% пикселей ~0.01 е-/сек при температуре ~50 К и ~0.3 е-/сек при температуре

⁵ [NEO Surveyor - NASA Science](#)

~75 К. Для ИК диапазона от 5 мкм до 10 мкм темновой шум может достигать значений <200 е-/сек при температуре 40 К. Детекторы на базе теллурида кадмия-ртути использовались на нескольких космических аппаратах. Например, матрица HgCdTe размером 1024x 1024 для области среднего ИК использовалась в миссии WISE в двух каналах на 3.4 мкм и 4.6 мкм. Камеры с чипом HgCdTe размером 2048x 2048 используются для двух инструментов телескопа JWS (Near-Infrared Spectrometer, Near-Infrared Camera). Еще одно возможное решение предлагает компания Teledyne⁶ - детектор HAWAII-2RG⁷ и контроллер SIDECAR ASIC⁸.

Для поддержания температур на уровне ~75 К требуется система охлаждения. Из-за сильных ограничений по полезной нагрузке (как по массе, так и по габаритам) решения с дьюарами для жидкого гелия и жидкого азота не представляются возможными. Для цели охлаждения в нашем случае следует выбрать криоохладители с импульсной трубкой⁹. У таких охладителей довольно хорошая износостойкость, есть защита от вибраций. Однако окончательное решение требует дополнительных исследований в этой области и поиска доступных на рынке решений.

Некоторые решения для разрабатываемой концепции могут быть заимствованы у проекта NEOSSat¹⁰. При весе 72 кг и размерах 0.9x0.3x0.6 метра полезной нагрузкой NEOSSat является оптический телескоп Максутова с 15-сантиметровой апертурой и полем зрения 0.85x0.85 градусов. Телескоп оснащен двумя ПЗС камерами E2V размером 1024x 1024 пикселей с масштабом 3 уг.сек./пиксель. Одна ПЗС-матрица (E2V 47-20 AIMO CCD¹⁰) используется для научных данных, а вторая — для специализированного звездного датчика, установленного параллельно оптической оси телескопа. Этот специальный звездный датчик, работая автономно с бортовым звездным каталогом, содержащим 2 миллиона звезд вплоть до 14-й визуальной звездной величины, обеспечивает высокоточное наведение на объект и точное отслеживание быстро движущихся объектов (Abbasi, et al., 2019). При благоприятных условиях наблюдений (правильное планирование, корректная обработка данных) ожидается, что телескоп может обнаруживать объекты до 19 звездной величины при экспозиции около 100 секунд.

Результаты и анализ. Для оценки эффективности телескопа и обоснованности выбора орбит аппарата, необходимо получить предварительные оценки возможности обнаружения объектов при разных конфигурациях оборудования, расположения объекта относительно наблюдателя и ряда дополнительных параметров.

Наиболее важным параметром при поиске потенциально опасных астероидов является их диаметр, поскольку энергетика столкновения астероида с Землей зависит в первую очередь от его размера. Для оптических наблюдений размер астероида можно оценить по значению абсолютной звездной величины H и значения геометрического альбеда, p_v :

⁶ [Infrared and Visible FPAs](#)

⁷ [Teledyne Imaging Sensors H2RG™ Visible & Infrared Focal Plane Array](#)

⁸ [SIDECAR™ ASIC](#)

⁹ [Pulse Tube Cryocoolers \(2003\)](#)

¹⁰ [CCD47-20 Back Illuminated AIMO Frame-Transfer High Performance CCD Sensor](#)

$$D \text{ (km)} = 10^{(3.1236 - 0.5 \lg(p_v) - 0.2H)}$$

Абсолютная звездная величина астероида связана с наблюдаемой звездной величиной выражением:

$$m = H + 5 \lg \left(\frac{d_{BS} d_{BO}}{d_0^2} \right) - 2.5 \lg q(\alpha)$$

где d_{BS} – расстояние астероида от Солнца, d_{BO} – расстояние наблюдателя от астероида, d_0 – среднее расстояние Земли от Солнца (1 а.е.). Величина $q(\alpha)$ называется фазовым интегралом и зависит от фазового угла, под которым наблюдается астероид. Его можно получить из следующих выражений:

$$q(\alpha) = (1 - G)\phi_1(\alpha) + G\phi_2(\alpha)$$

$$\phi_i(\alpha) = \exp \left(-A_i (\tan \alpha / 2)^{B_i} \right)$$

где $A_1 = 3.332$, $A_2 = 1.862$, $B_1 = 0.631$, $B_2 = 1.218$. Эти соотношения верны при фазовом угле менее 120° . Параметр G называется “наклоном” и отвечает за описание изменения яркости астероида, когда тот находится в оппозиции. Значение G лежит в широком диапазоне значений с медианным значением равным около 0.14 (см. Figure 2-6 в Stokes, et al., 2017). В наших расчетах на данном этапе мы принимаем его равным 0.14.

Еще одним важным аспектом является тот факт, что наблюдения планируется проводить в ИК диапазоне. Поскольку все вышеприведенные выражения привязаны к видимой части спектра (V – полоса пропускания по Джонсону), то такой параметр как p_v нужно пересчитать в p_{ir} . Значение этого параметра зависит от типа астероида (Mainzer, et al., 2011a; Mainzer A., Masiero, et al., 2012): для C-комплекса $p_{ir}/p_v \sim 1$, для S-комплекса, $p_{ir}/p_v \sim 1.7$, для D-типа $p_{ir}/p_v \sim 2.2$, для В-типа $p_{ir}/p_v = 1$. Кроме того, при работе в ИК диапазоне само влияние фазового угла может отличаться, поскольку в этом случае большую роль играют термодинамические параметры материала астероида, например его теплопроводность и теплоемкость, а также насколько быстро он вращается. Тем не менее для предварительной оценки эффективности телескопа и получения “консервативных” оценок, мы принимаем фазовый угол равным $\alpha = 100^\circ$ - достаточно большой для учета условий видимости и не превышающий критического значения 120° .

Расчеты выполнены для значений диаметра астероида, $D(\text{km})$, в диапазоне от 50 метров (приблизительно класс объектов Челябинского метеорита) до 1 км (более крупные объекты в настоящее время известны до 98% от их популяции). Рассматриваются значения визуального геометрического альbedo от 0.05 до 0.30 с шагом 0.05. Расстояние астероида от Солнца, d_{BS} , принято равным 1 а.е., поскольку потенциально опасными являются объекты, подлетающие к Земле на расстояние порядка 7 млн. км., а это лишь 5% от расстояния Земля-Солнце,

d_0 . Для расстояний наблюдателя от астероида, d_{BO} , мы рассматриваем значения от 0.003 а.е. до 0.02 а.е. Минимальное расстояние в 0.005 а.е. продиктовано тем фактом, что оно соответствует приблизительно 750 тыс. км., то есть двойному расстоянию Земля-Луна. Если аппарат будет находиться на окололунной орбите, то астероид будет находиться на расстоянии примерно в 380 тыс. км от Земли и при скорости астероида порядка 20 км/сек его подлетное время составит около 5 часов. И, последнее, мы рассматриваем телескоп с апертурой 20 см, для которого предельной звездной величиной, учитывая время экспозиции и возможность следить за объектом, будет порядка $m = 12$.

Ниже (Рисунок 2, (а)) показаны соответствующие результаты расчетов. Из рисунка видно, что в такой конфигурации мы сможем зарегистрировать астероиды размером порядка 200 метров и больше на расстоянии порядка 0.005 а.е. от Земли. Такие объекты, во-первых, малочисленны (из теории эволюции солнечной системы и статистического анализа событий), а во-вторых, современные наземные миссии и орбитальные телескопы скорее всего смогут увидеть эти объекты намного раньше. Высокой эффективности достигает телескоп с апертурой 20 см если он находится на одной из DRO орбит и расстояние между наблюдателем и объектом будет гораздо меньше (Рисунок 2, (б)). Еще одной альтернативой (возможность которой стоит проверить на предмет реализации платформы) является возможность долгих экспозиций при малых угловых скоростях наблюдаемых астероидов. Соответствующий результат показан на Рисунке 2, (в).

Эти расчеты выполнены из условия, что наблюдаемый объект представляет из себя точечный источник, что не совсем верно, поскольку АСЗ имеет некоторое видимое угловое движение относительно наблюдателя. По оценке значение этой угловой скорости может быть более 100 угловых секунд за 3600 секунд, что при 100 секундах экспозиции дает растягивание изображения астероида на ~ 3 угловые секунды. При масштабе порядка 3 угловых секунд на пиксель предположение о точности объекта все еще будет выполняться.

Более серьезной задачей является распознавание объектов в поле ПЗС кадра, обработка изображения и передача данных с борта аппарата для дальнейшего анализа. Следует отметить, что методы и сам процесс калибровки ПЗС изображений и идентификация источников в летном программном обеспечении с использованием ограниченных ресурсов обработки данных и хранения изображений для окололунных миссий, все еще находится на стадии теоретических разработок и не была полноценно опробована. Задачу передачи большого массива полученных данных (изображений) с борта аппарата частично можно было бы решить выделением на изображениях отдельных патчей, содержащих интересующие нас объекты. Такой подход применялся, например, в миссии «Кеплер». Однако объектами исследований миссии «Кеплер» были звезды – неподвижные объекты в поле, положение которых известно заранее с высокой точностью. В случае наблюдений за АСЗ, объекты движутся и их положение либо неизвестно, либо известно с более низкой точностью. Кроме того, как было сказано выше, ограниченный ресурс бортового компьютера космического

аппарата не позволяет использовать высокоэффективные алгоритмы обнаружения объектов, требующие анализа большого массива данных. Возможным решением этой задачи может быть адаптация NSDS (NEO Surveyor Survey Data System), которая была разработана в Science & Data Center for Astrophysics & Planetary Sciences¹¹. NSDS — это высокоавтоматизированная, высокопроизводительная аппаратная, программная и операционная система, оптимизированная для идентификации потенциальных движущихся объектов. Элементы NSDS тесно связаны с системами данных, разработанными и используемыми для WISE/NEOWISE и ZTF (Zwicky Transient Facility).

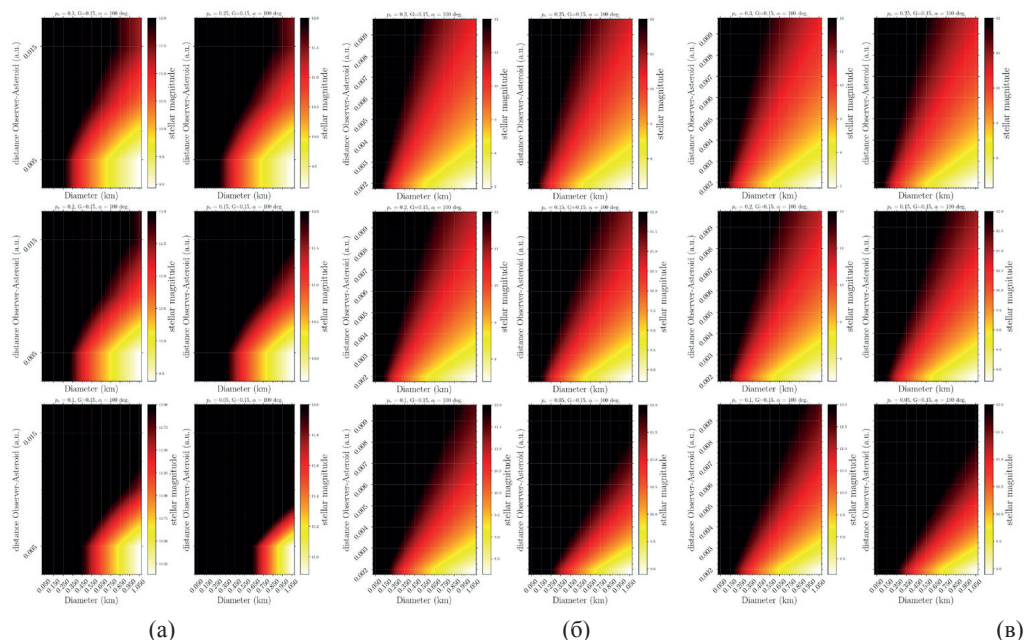


Рисунок 2 - Зависимость звездной величины астероида от его размеров и расстояния до наблюдателя (телескоп с апертурой 20 см) для разных значений геометрического альbedo астероида и фазового угла 100°

Одной из главных задач миссий по обнаружению АСЗ является оценка их опасности столкновения с Землей и космическими аппаратами, включая орбитальные станции и другие элементы окололунной инфраструктуры. Для этого необходимо уметь максимально оперативно определять орбиты обнаруживаемых АСЗ с последующим их уточнением и отождествлением объекта в имеющихся каталогах. Поскольку в нашем случае мы имеем дело с угловыми измерениями, то нас будут интересовать соответствующие алгоритмы, использующие угловые положения объектов, измеренные оптическими средствами мониторинга. Поскольку большинство АСЗ во внутренней области солнечной системы движутся по Кеплеровским орбитам, к ним могут быть применимы различные модификации

¹¹ [IPAC-Caltech](https://ipac.caltech.edu/)

метода Гаусса, вариационные методы (Mironov, et al., 2019), метод Гудинга (Gooding, 1993) и др. Для уверенной идентификации астероида необходимо иметь 3-4 трека его наблюдений. Желательно чтобы эти треки охватывали достаточную часть орбиты АСЗ. Для этого, при наблюдении определенной области и обнаружения в ней объекта, ее наблюдения повторно проводятся еще дважды на протяжении последующих примерно 20 дней. Полученные данные необходимо отождествить с одним и тем же объектом для построения трека и последующего определения по этому треку первоначальной орбиты объекта. Такая процедура уже отработана алгоритмами MPC (Minor Planet Center). При последующих наблюдениях в таком же режиме орбиты могут уточняться. Было отмечено, что если два трека, полученные с перерывом в 20 дней, можно согласовать между собой, то они могут быть использованы для оценки опасности столкновения и расчетов эфемерид на ближайшие даты даже без наличия третьего измерения. Орбиты, построенные по длине дуги порядка 20 дней достаточно точные для оценки опасности АСЗ даже на десятилетия вперед, особенно если эти орбиты получены на данных с хорошей астрометрической точностью.

Обсуждение и выводы. При планировании космических миссий в каждом конкретном случае рассматривается вопрос эффективности предложенного решения с использованием так называемого среднемирового значения VSL (Value of Statistical Life), учитывая, что столкновения с астероидом могут произойти в любой точке мира. В докладе 2017 года было предложено рассмотреть эффективность системы с точки зрения снижения неопределенности относительно риска для жизни, получения травм и нанесения ущерба имуществу или инфраструктуре в результате падения потенциально опасного астероида на Землю в течение 100-летнего периода. При этом эффективность системы обнаружения и мониторинга потенциально опасных астероидов складывается из двух главных аспектов:

- 1) снижение неопределенности в оценке вероятности столкновения с астероидом путем каталогизации тех из них, которые не представляют угрозы столкновения с Землей;

- 2) обнаружение и каталогизация тех астероидов, для которых столкновение с Землей наиболее вероятно, тем самым предоставляя возможность для своевременного принятия мер по смягчению последствий столкновения.

Проведенные исследования по оценке полноты каталогов опасных астероидов, полученных только на основе наблюдений в видимом свете, показали, что они имеют большую неопределенность по сравнению с каталогами, полученными с использованием ИК-измерений. При этом космические ИК-системы и совместные программы с использованием ИК диапазона и видимой области спектра, как правило, достигают цели быстрее, чем одна или несколько наземных систем в видимом диапазоне спектра, даже при наличии телескопов большой апертуры (см. Figure 8-6 в Stokes, et al., 2017).

ИК-системы имеют еще одно преимущество перед системами в видимом диапазоне – они позволяют значительно точнее определять диаметр обнаруженного

объекта (поскольку зависимость от альбедо минимальна) и, тем самым, давать более точную информацию по потенциальной угрозе от возможного столкновения этого объекта с Землей (см. Figure 9-3 в Stokes, et al., 2017).

Интерес представляет также результат оценки эффективности системы в зависимости от финансовых затрат на ее создание, поддержание и остаточной неопределенности в смысле потенциальных угроз от астероидов после 10 лет работы телескопов. Было показано (см. Figure 9-4 в Stokes, et al., 2017), что 20 см телескоп в ИК диапазоне, работающий на геостационарной орбите намного выгоднее наземных телескопов 2-х, 4-х и 8-и метрового класса!

В Таблице XXX приведено соответствующее отношение «прибыли» к «затратам» смоделированных систем, где видно, что телескоп с апертурой 20 см, работающий в ИК диапазоне конкурирует с точки зрения эффективности с наземными телескопами намного большего диаметра уже на второй год своей эксплуатации.

Таблица 1 - отношение выгоды к затратам (эффективность) для смоделированных систем поиска околоземных объектов, по результатам работы (Stokes, et al., 2017)

Система	2024 год	2025 год	2026 год	2027 год	2028 год
Наземный 2-м телескоп	2.0	5.1	8.9	13.1	17.7
Наземный 4-м телескоп	1.4	3.5	6.0	8.8	11.9
Наземный 4-м телескоп + ИК 20-см телескоп на ГСО	0.8	1.8	3.0	4.3	5.6
Наземный 8-м телескоп	0.7	1.9	3.3	4.8	6.4
ИК 20-см телескоп на ГСО	0.7	1.7	3.1	4.7	6.3

Основываясь на результатах проведенного анализа эффективности системы для задачи обнаружения потенциально опасных астероидов с подсолнечной стороны, мы считаем целесообразным для концепции казахстанского окололунного телескопа разрабатывать инструмент с апертурой 20-25 см, работающий в видимом диапазоне и в ИК диапазоне от 4-6 мкм. Телескоп такой апертуры будет полезен при работе в режиме “предупреждения” при детектировании объектов размером более 150 метров на расстоянии объекта от аппарата менее 750 000 км. Приведенные оценки стоит считать достаточно консервативными, поскольку не учитывают возможности длительных экспозиций. При этом эффективность системы для обнаружения объектов в непосредственной близости довольно высокая (порядка 50% для 50-метровых объектов) по сравнению даже с системой из наземного телескопа 4-метрового класса и аппарата в точке L1 с апертурой 50 см (порядка 60% для 50-метровых объектов). Детальное описание последовательности выполнения задачи, результаты тестовых исследований, включая более полный радиометрический анализ и результаты, полученные на искусственных данных, будут проведены после окончательного выбора параметров телескопа для окололунной миссии Казахстана.

Литература

Abbasi V., Thorsteinson S., Balam D., Rowe J., Laurin D., Scott R. L., Doyon M. (2019) The NEOSat Experience: 5 years in the life of Canada's space surveillance telescope. 1st NEO and Debris Detection Conference ESA2019. — P.91. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/neosst1/paper/494/NEOSST1-paper494.pdf>

de La Fuente Marcos C., de La Fuente Marcos R. (2014) Reconstructing the Chelyabinsk event: pre-impact orbital evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 443. — P.L39-L43 — DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/slu07>

Gooding R. H. (1993) A new procedure for orbit determination based on three lines of sight: Angles only. NASA STI/Recon Technical Report — 94. — P.21224. — url: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993STIN...9421224G>

Grav T., Mainzer A.K., Masiero J.R., Dahlen D.W., Spahr T., Bottke W.F., Masci F.J. (2023) The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model. *The Planetary Science Journal* — 4. — P. 228 — DOI: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad072e>

Hildebrand A.R., Carroll K.A., Tedesco E.F., Faber D.R., Cardinal R.D., Matthews J.M., Kuschnig R., Walker G.A.H., Gladman B., Pazder J., Brown P.G., Larson S.M., Worden S.P., Wallace B.J., Chodas P. W., Muinonen K., Cheng A. (2004) Advantages of Searching for Asteroids from Low Earth Orbit: the NEOSat Mission. *Earth Moon and Planets* — 95. — P.33-40. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11038-005-9016-z>

Laurin D., Hildebrand A., Cardinal R., Harvey W., Tafazoli S. (2008) NEOSat: a Canadian small space telescope for near Earth asteroid detection. *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter*. — 7010. — P.701013. — DOI: <https://doi.org/10.1117/12.789736>

Mainzer A.K., Masiero J.R., Abell P.A., Bauer J.M., Bottke W., Buratti B.J., Carey S.J., Cotto-Figueroa D., Cutri R.M., Dahlen D., Eisenhardt P.R.M., Fernandez Y.R., Furfaro R., Grav T., Hoffman T.L., Kelley M.S., Kim Y., Kirkpatrick J.D., Lawler C.R., Lilly E., Liu X., Marocco F., Marsh K.A., Masci F.J., McMurtry C.W., Pourrahmani M., Reinhard L., Ressler M. E., Satpathy A., Schambeau C.A., Sonnett S., Spahr T.B., Surace J.A., Vaquero M., Wright E.L., Zengilowski G.R. (2023) NEO Surveyor Mission Team The Near-Earth Object Surveyor Mission. *The Planetary Science Journal*. — 4. — P.224 — DOI: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad0468>

Mainzer A., Bauer J., Grav T., Masiero J., Cutri R. M., Dailey J., Eisenhardt P., McMillan R.S., Wright E., Walker R., Jedicke R., Spahr T., Tholen D., Alles R., Beck R., Brandenburg H., Conrow T., Evans T., Fowler J., Jarrett T., Marsh K., Masci F., McCallon H., Wheelock S., Wittman M., Wyatt P., DeBaun E., Elliott G., Elsbury D., Gautier T., Gomillion S., Leisawitz D., Maleszewski C., Micheli M., Wilkins A. (2011) Preliminary Results from NEOWISE: An Enhancement to the Wide-field Infrared Survey Explorer for Solar System Science. *The Astrophysical Journal*. — 731. — P.53 — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/731/1/53>

Mainzer A., Grav T., Bauer J., Masiero J., McMillan R.S., Cutri R.M., Walker R., Wright E., Eisenhardt P., Tholen D.J., Spahr T., Jedicke R., Denneau L., DeBaun E., Elsbury D., Gautier T., Gomillion S., Hand E., Mo W., Watkins J., Wilkins A., Bryngelson G.L., Del Pino Molina A., Desai S., Gómez Camus M., Hidalgo S.L., Konstantopoulos I., Larsen J.A., Maleszewski C., Malkan M.A., Mauduit J.-C., Mullan B.L., Olszewski E.W., Pforr J., Saro A., Scotti J.V., Wasserman L.H. (2011) NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*. — 743. — P.156. — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/156>

Mainzer A., Grav T., Masiero J., Hand E., Bauer J., Tholen D., McMillan R. S., Spahr T., Cutri R. M., Wright E., Watkins J., Mo W., Maleszewski C. (2011). NEOWISE Studies of Spectrophotometrically Classified Asteroids: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*. — 741. — P.90, — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/741/2/90>

Mainzer A., Masiero J., Grav T., Bauer J., Tholen D. J., McMillan R. S., Wright E., Spahr T., Cutri R. M., Walker R., Mo W., Watkins J., Hand E., Maleszewski C. (2012). NEOWISE Studies of Asteroids with Sloan Photometry: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*. — 745. — P.7 — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/1/7>

Mainzer A., Usui F., Trilling D. E. (2015). Space-Based Thermal Infrared Studies of Asteroids. *Asteroids IV*, — 89-106. — DOI: https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch005



Mark Boslough, Barbara Jennings, Brad Carvey, William Fogleman (2015). FEMA Asteroid Impact Tabletop Exercise Simulations. *Procedia Engineering*. — 103. — P.43-51. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.007>, [url:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815006815](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815006815)

Sheppard S.S., Tholen D. J., Pokorný P., Micheli M., Dell'Antonio I., Fu S., Trujillo C.A., Beaton R., Carlsten S., Drlica-Wagner A., Martínez-Vázquez C., Mau S., Santana-Ros T., Santana-Silva L., Sifón C., Simha S., Thirouin A., Trilling D., Vivas A.K., Zenteno A. (2022). A Deep and Wide Twilight Survey for Asteroids Interior to Earth and Venus. *The Astronomical Journal*. — 164. — P.168 — DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac8cff>

Stokes G.H., Yeomans D.K. (2003). A Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for NEOs to Smaller Limiting Diameters: Report of a NASA Science Definition Team. AGU Fall Meeting Abstracts, 2003. — 51E-02 https://cneos.jpl.nasa.gov/doc/SDT_report_2003.html

Stokes, G.H., Barbee, B.W., Bottke W.F., et al. (2017). Update to Determine the Feasibility of Enhancing the Search and Characterization of NEOs. Report of the Near-Earth Object Science Definition Team, NASA https://cneos.jpl.nasa.gov/doc/SDT_report_2017.htm

Wallace B., Scott R., Sale M. (2014). The Near Earth Object Surveillance Satellite: Mission status and CCD evolution after 18 months on-orbit. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, E30.

Wang, X. et al., (2022). “Warning of Asteroids Approaching Earth from the Sunward Direction using Two Earth-leading Heliocentric Orbiting Telescopes. — *Icarus*. — 377. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114906>

В.И. Миронов, Ю.В. Миронов, Д.К. Херай (2019). Оптимальное определение орбиты космических объектов по угловым измерениям наземных оптико-электронных станций. SPIRAS Proceedings, — 18, 5. ISSN 2078-9181, DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1239-1263>

References

Abbasi V., Thorsteinson S., Balam D., Rowe J., Laurin D., Scott R. L., Doyon M. (2019) The NEOSat Experience: 5 years in the life of Canada's space surveillance telescope. 1st NEO and Debris Detection Conference ESA2019. — P.91. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/neosst1/paper/494/NEOSST1-paper494.pdf> (in English).

de La Fuente Marcos C., de La Fuente Marcos R. (2014) Reconstructing the Chelyabinsk event: pre-impact orbital evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 443. — P.L39-L43 — DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/slu07> (in English).

Gooding R. H. (1993) A new procedure for orbit determination based on three lines of sight: Angles only. NASA STI/Recon Technical Report — 94. — P.21224. — url: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993STIN...9421224G> (in English).

Grav T., Mainzer A.K., Masiero J.R., Dahlen D.W., Spahr T., Bottke W.F., Masci F.J. (2023) The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model. *The Planetary Science Journal* — 4. — P. 228 — DOI: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad072e> (in English).

Hildebrand A.R., Carroll K.A., Tedesco E.F., Faber D.R., Cardinal R.D., Matthews J.M., Kuschnig R., Walker G.A.H., Gladman B., Pazder J., Brown P.G., Larson S.M., Worden S.P., Wallace B.J., Chodas P. W., Muinonen K., Cheng A. (2004) Advantages of Searching for Asteroids from Low Earth Orbit: the NEOSat Mission. *Earth Moon and Planets* — 95. — P.33-40. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11038-005-9016-z> (in English).

Laurin D., Hildebrand A., Cardinal R., Harvey W., Tafazoli S. (2008) NEOSat: a Canadian small space telescope for near Earth asteroid detection. *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter*. — 7010. — P.701013. — DOI: <https://doi.org/10.1117/12.789736> (in English).

Mainzer A.K., Masiero J.R., Abell P.A., Bauer J.M., Bottke W., Buratti B.J., Carey S.J., Cotto-Figueroa D., Cutri R.M., Dahlen D., Eisenhardt P.R.M., Fernandez Y.R., Furfaro R., Grav T., Hoffman T.L., Kelley M.S., Kim Y., Kirkpatrick J.D., Lawler C.R., Lilly E., Liu X., Marocco F., Marsh K.A., Masci F.J., McMurtry C.W., Pourrahmani M., Reinhard L., Ressler M. E., Satpathy A., Schambeau C.A., Sonnett S., Spahr T.B., Surace J.A., Vaquero M., Wright E.L., Zengilowski G.R. (2023) NEO Surveyor Mission Team The Near-Earth Object Surveyor Mission. *The Planetary Science Journal*. — 4. — P.224 — DOI: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad0468> (in English).

Mainzer A., Bauer J., Grav T., Masiero J., Cutri R. M., Dailey J., Eisenhardt P., McMillan R.S., Wright E., Walker R., Jedicke R., Spahr T., Tholen D., Alles R., Beck R., Brandenburg H., Conrow T., Evans T., Fowler J., Jarrett T., Marsh K., Masci F., McCallon H., Wheelock S., Wittman M., Wyatt P., DeBaun E., Elliott G., Elsbury D., Gautier T., Gomillion S., Leisawitz D., Maleszewski C., Micheli M., Wilkins A. (2011) Preliminary Results from NEOWISE: An Enhancement to the Wide-field Infrared Survey Explorer for Solar System Science. *The Astrophysical Journal*. — 731. — P.53 — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/731/1/53> (in English).

Mainzer A., Grav T., Bauer J., Masiero J., McMillan R.S., Cutri R.M., Walker R., Wright E., Eisenhardt P., Tholen D.J., Spahr T., Jedicke R., Denneau L., DeBaun E., Elsbury D., Gautier T., Gomillion S., Hand E., Mo W., Watkins J., Wilkins A., Bryngelson G.L., Del Pino Molina A., Desai S., Gómez Camus M., Hidalgo S.L., Konstantopoulos I., Larsen J.A., Maleszewski C., Malkan M.A., Mauduit J.-C., Mullan B.L., Olszewski E.W., Pforr J., Saro A., Scotti J.V., Wasserman L.H. (2011) NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*. — 743. — P.156. — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/156> (in English).

Mainzer A., Grav T., Masiero J., Hand E., Bauer J., Tholen D., McMillan R. S., Spahr T., Cutri R. M., Wright E., Watkins J., Mo W., Maleszewski C. (2011). NEOWISE Studies of Spectrophotometrically Classified Asteroids: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*. — 741. — P.90, — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/741/2/90> (in English).

Mainzer A., Masiero J., Grav T., Bauer J., Tholen D. J., McMillan R. S., Wright E., Spahr T., Cutri R. M., Walker R., Mo W., Watkins J., Hand E., Maleszewski C. (2012). NEOWISE Studies of Asteroids with Sloan Photometry: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*. — 745. — P.7 — DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/1/7> (in English).

Mainzer A., Usui F., Trilling D. E. (2015). Space-Based Thermal Infrared Studies of Asteroids. *Asteroids IV*, — 89-106. — DOI: https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch005 (in English).

Mark Boslough, Barbara Jennings, Brad Carvey, William Fogleman (2015). FEMA Asteroid Impact Tabletop Exercise Simulations. *Procedia Engineering*. — 103. — P.43-51. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.007>, url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705815006815> (in English).

Sheppard S.S., Tholen D. J., Pokorný P., Micheli M., Dell'Antonio I., Fu S., Trujillo C.A., Beaton R., Carlsten S., Drlica-Wagner A., Martínez-Vázquez C., Mau S., Santana-Ros T., Santana-Silva L., Sifón C., Simha S., Thirouin A., Trilling D., Vivas A.K., Zenteno A. (2022). A Deep and Wide Twilight Survey for Asteroids Interior to Earth and Venus. *The Astronomical Journal*. — 164. — P.168 — DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac8cff> (in English).

Stokes G.H., Yeomans D.K. (2003). A Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for NEOs to Smaller Limiting Diameters: Report of a NASA Science Definition Team. AGU Fall Meeting Abstracts, 2003. — 51E-02 https://cneos.jpl.nasa.gov/doc/SDT_report_2003.html (in English).

Stokes, G.H., Barbee, B.W., Bottke W.F., et al. (2017). Update to Determine the Feasibility of Enhancing the Search and Characterization of NEOs. Report of the Near-Earth Object Science Definition Team, NASA https://cneos.jpl.nasa.gov/doc/SDT_report_2017.htm (in English).

Wallace B., Scott R., Sale M. (2014). The Near Earth Object Surveillance Satellite: Mission status and CCD evolution after 18 months on-orbit. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, E30. (in English).

Wang, X. et al., (2022). “Warning of Asteroids Approaching Earth from the Sunward Direction using Two Earth-leading Heliocentric Orbiting Telescopes. — *Icarus*. — 377. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114906> (in English).

Mironov V.I., Mironov Yu.V., Khegay D.K. (2019) Optimalnoe opredelenie orbity kosmicheskikh ob'ektov po uglovym izmereniyam nazemnykh optiko-elektronnykh stanciy [Optimal determination of the orbit of space objects based on angular measurements of ground-based optoelectronic stations]. *SPIRAS Proceedings*. — 18. — 5. ISSN 2078-9181 DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1239-1263> (in Russian)

© **G.B. Suliyeva**^{1,2}, **M.A. Makukov**^{1*}, **E.G. Mychelkin**¹, 2025.

¹«Fesenkov Astrophysical Institute» LLP, Almaty, Kazakhstan;

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: makukov@fai.kz

TWO TYPES OF SCALAR BACKGROUND VISUALIZATION

G.B. Suliyeva — PhD student at Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; junior researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: suliyeva@fai.kz; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5072-7898>;

M.A. Makukov — Senior researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Acting Head of the Laboratory of Cosmology, Stellar Dynamics and Computational Astrophysics, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: makukov@fai.kz; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3643-9368>;

E.G. Mychelkin — Senior researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: mychelkin@fai.kz; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2400-5768>.

Abstract. This paper examines the specific features of incorporating a scalar field into the framework of general relativity (GR) in the antiscalar regime, in which the energy-momentum tensor of the scalar field enters the Einstein equations with the opposite sign. It is shown that this leads to a stable solution in the form of the exponential Papapetrou metric, which admits an interpretation as a traversable wormhole. The traditional method of visualizing the geometry of such a spacetime, based on embedding two-dimensional sections into Euclidean space, as proposed in the Misner–Thorne–Wheeler approach, is analyzed. The limitations of this method are identified, in particular the presence of unphysical mirror symmetry along the axis that arises in the visualization of the profiles. An alternative visualization algorithm is proposed, based on direct axial construction of radial profiles of geometric objects like curvature tensor invariants (such as the Ricci, Kretschmann, and Gauss–Bonnet invariants). This method avoids the aforementioned symmetry and preserves physically significant information about the spatial distribution of the background field’s characteristics. Particular attention is paid to the extreme scales (throats) arising in the scalar metric, which turn out to differ between the metric itself and the curvature invariants—potentially leading to observable consequences. It is demonstrated that both considered methods - embedding and axial visualization - complement each other and provide topologically equivalent yet geometrically distinct representations. The proposed visualization scheme is important from both a theoretical and practical standpoint, as it allows for a deeper understanding of the scalar background structure

and the possible physical effects resulting from its interaction with gravity within the framework of GR.

Keywords: visualization, embedding, antiscalar field, traversable wormholes, curvature invariants

© Г.Б. Сулиева^{1,2}, М.А. Макуков¹, Э.Г. Мычелкин¹, 2025.

¹«В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институт» ЖШС,
Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: makukov@fai.kz

СКАЛЯРЛЫ ФОННЫҢ ЕКІ ТҮРЛІ ВИЗУАЛИЗАЦИЯСЫ

Г.Б. Сулиева — PhD докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; кіші ғылыми қызметкер, Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан,

E-mail: suliyeval@fai.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5072-7898>;

М.А. Макуков — аға ғылыми қызметкер, Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Космология, жұлдызды динамика және есептеуіш астрофизика зертханасы меңгерушісінің міндетін атқарушы, Алматы, Қазақстан,

E-mail: makukov@fai.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3643-9368>;

Э.Г. Мычелкин — аға ғылыми қызметкер, Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан,

E-mail: mychelkin@fai.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2400-5768>.

Аннотация. Скалярлық өрісті жалпы салыстырмалық теориясы (ЖСТ) схемасына антискалярлық режимде енгізудің ерекшеліктері қарастырылады, мұнда скалярлық өрістің энергия-импульс тензоры Эйнштейн теңдеулеріне кері таңбамен енеді. Мұндай енгізу Папапетрудің экспоненциалды метрикасы түріндегі орнықты шешімге алып келетіні көрсетіледі, бұл шешімді өткенге болатын құрт тесігі ретінде интерпретациялауға болады. Мұндай кеңістіктің геометриясын визуализациялаудың дәстүрлі әдісі – Мизнер–Торн–Уиллер тәсіліне сәйкес екі өлшемді қималарды евклидтік кеңістікке ендіру алгоритмі – талданады. Бұл әдістің шектеулері, атап айтқанда, профильдерді визуализациялау кезінде пайда болатын физикалық емес айналық симметрия, анықталады. Альтернативті визуализация алгоритмі ұсынылады, ол радиалдық профильдерді тікелей аксиалдық түрде құруға негізделген және геометриялық объектілермен қатар кеңістік-уақыт қисықтығы тензорының инварианттарын (Риччи, Кречман, Гаусс–Бонне инварианттары және т.б.) да қамтиды. Бұл әдіс аталған симметриядан арылуға мүмкіндік береді және фондық өрістің кеңістіктік таралуы жөніндегі физикалық маңызды ақпаратты сақтайды. Ерекше назар скалярлық метрикада пайда болатын экстремалды масштабтарға (горловиналарға) аударылады, олардың мәндері метрика мен қисықтық инварианттары үшін әртүрлі болуы мүмкін, бұл болса бақылауға болатын салдарға әкелуі ықтимал. Екі қарастырылған әдістің – ендіру және аксиалдық визуализация – бір-бірін

толықтыратыны және топологиялық тұрғыдан эквивалентті, бірақ геометриялық жағынан әртүрлі бейнелер беретіндігі көрсетіледі. Ұсынылған визуализация схемасы теориялық тұрғыдан да, практикалық қолдану үшін де маңызды, себебі ол скалярлық фон құрылымын және оның гравитациямен өзара әсерлесуінен туындайтын ықтимал физикалық салдарларды тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: визуализация, ендіру, антискалярлық өріс, өтуге болатын құрт тесіктері, қисықтық инварианттар

© Г.Б. Сулиева^{1,2}, М.А. Макуков^{1*}, Э.Г. Мычелкин¹, 2025.

¹ТОО «Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова», Алматы, Казахстан;

²Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: makukov@fai.kz

ДВА ТИПА ВИЗУАЛИЗАЦИИ СКАЛЯРНОГО ФОНА

Г.Б. Сулиева — PhD докторант Казахского Национального Университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; младший научный сотрудник Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: suliyeva@fai.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5072-7898>;

М.А. Макуков — старший научный сотрудник Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова, и.о. заведующего лабораторией космологии, звездной динамики и вычислительной астрофизики, Алматы, Казахстан,

E-mail: makukov@fai.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3643-9368>;

Э.Г. Мычелкин — старший научный сотрудник Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: mychelkin@fai.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2400-5768>.

Аннотация. Рассматриваются особенности включения скалярного поля в схему общей теории относительности (ОТО) в антискалярном режиме, при котором тензор энергии-импульса скалярного поля входит в уравнения Эйнштейна с обратным знаком. Показано, что это приводит к устойчивому решению в виде экспоненциальной метрики Папаетру, которая допускает интерпретацию проходимой кротовой норы. Анализируется традиционный метод визуализации геометрии такого пространства на основе алгоритма вложения двумерных сечений в евклидово пространство, как это предлагается в подходе Мизнера–Торна–Уиллера. При этом выявлены ограничения этого метода, в частности, наличие нефизической зеркальной симметрии по оси, возникающей при визуализации профилей. Предлагается альтернативный алгоритм визуализации, основанный на прямом аксиальном построении радиальных профилей таких геометрических объектов, как инварианты тензора кривизны (инварианты Риччи, Кречмана, Гаусса-Бонне и др.). Этот метод позволяет избежать упомянутой симметрии и сохраняет физически значимую информацию о пространственном распределении характеристик фона. Особое внимание уделено экстремальным масштабам (горловинам), возникающим в скалярной

метрике, которые оказываются различными для метрики и для инвариантов кривизны, что может иметь наблюдательные последствия. Демонстрируется, что оба рассмотренных метода – вложение и аксиальная визуализация – дополняют друг друга и дают топологически эквивалентные, но геометрически различающиеся представления. Предложенная схема визуализации оказывается важной как с теоретической, так и с практической точки зрения, поскольку позволяет глубже понять структуру скалярного фона и возможные физические эффекты, вытекающие из его взаимодействия с гравитацией в рамках ОТО.

Ключевые слова: визуализация, вложение, антискалярное поле, проходимые кротовые норы, инварианты кривизны

***Благодарность.** Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19678165 и программа № BR21881880).*

Введение. Уравнения Эйнштейна на скалярном фоне в статическом случае представляют специальный интерес в антискалярном режиме (когда тензор энергии-импульса скалярного поля входит в уравнения со знаком, противоположным традиционному), потому что это приводит к устойчивому экспоненциальному решению Папаетру. Наблюдательные эффекты, вытекающие из этого решения, практически неотличимы при сегодняшней точности от эффектов, связанных с вакуумным решением Шварцшильда (см. (Mychelkin, et al., 2024) и содержащиеся там ссылки). Заметим, что вопрос о происхождении и, тем самым, реальном существовании скалярного фона до сих пор остается открытым. В то же время, в данном подходе возникают принципиальные физические следствия, что привлекает все большее внимание к проблеме. В частности, ввиду отсутствия горизонтов, речь идет о более простом строении вакуума (в отличие от метрик Шварцшильда и Керра) в результате сглаживающего действия скалярного поля (Makukov, et al., 2018).

Далее, ньютоновский потенциал в этом подходе является не приближенным, а точным решением полной системы уравнений Эйнштейна-Клейна-Гордона, т. е. физическим законом в пространстве-времени Папаетру. При этом несмотря на то, что данный потенциал сам по себе сингулярен, все геометрические инварианты кривизны, как и предложенное недавно представление экспоненциальной метрики в виде проходимой кротовой норы (TWN - traversable wormhole) (Boonserm, et al., 2018), в целом указывают на регулярное поведение скалярного фона, включая отсутствие “голой” сингулярности. С физической точки зрения, данное обстоятельство стимулирует углубленный анализ поведения геометрических инвариантов и их физических аналогов. При этом оказывается, что экстремальные значения указанных инвариантов имеют место на масштабе, вдвое меньшем критического координатного расстояния для горловины TWN ($r=M$).

Все эффекты, возникающие в данном подходе, зависят от пространственного

распределения скалярного фона, и соответствующая визуализация могла бы иметь большое значение. Однако, напрямую визуализацию искривленных пространственных гиперповерхностей (типа 3-сфер в модели TWH) на 4-мерном многообразии реализовать невозможно. Традиционным является метод вложения 2-мерных пространственных сечений во вспомогательное плоское 3-мерное цилиндрическое евклидово пространство, чтобы отобразить такие геометрические особенности, как критический масштаб TWH-горловины. Мы применяем данный алгоритм вложения к экспоненциальной метрике (следуя рекомендациям работы (Misner, et al., 1973)) с учетом влияния скалярного фона. Чтобы избежать таких недостатков стандартного подхода как нефизическая зеркальная -симметрия, мы предлагаем метод прямой аксиальной визуализации исходных профилей, при котором сохраняется вся информация о радиальной зависимости исследуемых характеристик скалярного фона.

В целом, речь идет о пространственном распределении как геометрических, так и физических характеристик фона. В данной работе мы ограничиваемся только геометрическими объектами.

Методы и материалы. Экспоненциальная метрика Папаметру (Papapetrou, 1954) в системе Эйнштейна-Клейна-Гордона,

$$ds^2(r) = e^{-2\varphi(r)} dt^2 - e^{2\varphi(r)} (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2), \quad \varphi(r) = M/r, \quad (1)$$

является решением уравнений Эйнштейна для безмассового скалярного поля $\varphi(r)$ в антискалярном режиме, где φ -поле подчиняется уравнению Клейна-Гордона:

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}^{SF}(\varphi), \quad \square\varphi \equiv \varphi_{;\alpha}{}^{;\alpha} = 0, \quad T_{\mu\nu}^{SF}(\varphi) = \frac{1}{4\pi} \left(\varphi_\mu \varphi_\nu - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \varphi^\alpha \varphi_\alpha \right), \quad (2)$$

где $\kappa = 8\pi$ (мы работаем в единицах $G = c = 1$), $\varphi_\mu \equiv \partial_\mu \varphi$, и $\epsilon = (+1, 0, -1)$ для скалярной, вакуумной и антискалярной мод, соответственно, а $T_{\mu\nu}^{SF}(\varphi)$ представляет собой минимальный тензор энергии и импульса скалярного поля (SF).

Систему (2) можно представить в виде: $R_{\mu\nu} = 0$ (вакуум, «эйнштейновский закон гравитации» (Dirac, 1996), §15), а для скалярного сектора (в устойчивом антискалярном режиме)

$$R_{\mu\nu} = -2\kappa \varphi_\mu \varphi_\nu, \quad \square\varphi = 0 \quad (3)$$

где первое уравнение соответствует условиям геометризации Кучара-Райнича (Kuchar, 1963).

В пространстве-времени (1) выберем минимальную площадь A_0 из инвариантного семейства (в смысле (Stachel, 1968) и (Gautreau, 1969)) эквипотенциальных поверхностей с $t = \text{const}$, $g_{00} = \text{const}$, в форме функции площадей:

$$A(r) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{g_{\theta\theta}g_{\phi\phi}} d\theta d\phi = 4\pi r^2 e^{2M/r}, \quad A'(r) = 0 \Rightarrow r = M, \quad (4)$$

где из условия $A'(r) = 0$ находится критическое значение радиальной координаты $r = M$ и стандартное «условие раструба» $A''(r = M) > 0$, что необходимо для существования TWH-горловины в смысле Морриса и Торна (Morris, et al., 1988).

С другой стороны, если ввести эффективный («физический») радиус $\rho(r)$, такой что

$$A_0 = \min\{A(\rho)\} = \min\{4\pi\rho^2(r)\} = 4\pi\rho_0^2 = 4\pi(eM)^2, \quad (5)$$

тогда $\rho(r)$ и обратный профиль $\rho^{-1}(r)$ (см. рисунке 1) имеют экстремумы на том же критическом координатном масштабе $r = M$, что и для TWH-горловины:

$$\rho(r) = re^{M/r} \Rightarrow \min\{\rho(r)\} \equiv \rho(M) = eM = 2.71828M. \quad (6)$$

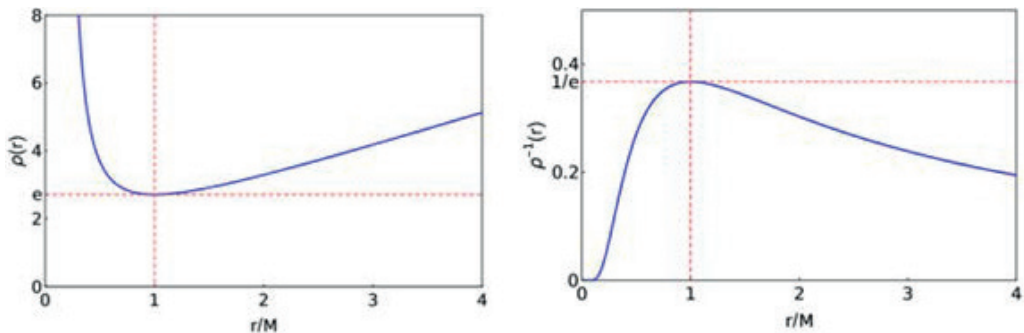


Рисунок 1 – Регулярный «колодеобразный» (слева) и «колоколообразный» (справа) $\rho(r)$ и $\rho^{-1}(r)$ профили (см. (6)), представляющие собой аналоги «shape functions», рассмотренных в (Morris, 1988).

Теперь функция площадей (4) запишется в терминах 3-мерного евклидова пространства: $A(r) \rightarrow A(\rho) = 4\pi\rho^2(r)$. Такой подход с разделением координатного и физического масштабов имеет место в работе (Gao, et al., 2024) в разделе, посвященном TWH в космологии де Ситтера. В целом, работа (Gao, et al., 2024) основана на переходе к чисто мнимому скалярному полю, аналогично предыдущей работе (Makukov, et al., 2018).

Соотношение (6) может быть получено независимо в рамках одномерного алгоритма, описанного в работе (Ruppeiner, 1995). Тогда для собственной длины произвольной окружности при $\theta = \pi/2$ (Gautreau, 1969) в статических координатах (t, r, θ, ϕ) , обозначаемых как $(0, 1, 2, 3)$, можно записать криволинейный интеграл

$$C = \int_{\gamma} ds = \int_0^{2\pi} \left| g_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\phi} \frac{dx^\nu}{d\phi} \right|^{1/2} d\phi, \quad (7)$$

то есть в экспоненциальной метрике это дает профиль

$$C(r) = \int_0^{2\pi} |g_{33}|^{\frac{1}{2}} \left(r, \theta = \frac{\pi}{2} \right) d\phi = 2\pi r e^{\varphi(r)} = 2\pi r e^{M/r} = 2\pi \rho(r), \quad (8)$$

из которого на масштабе $r = M$ следует минимальная длина окружности

$$C_0 = \min\{C(\rho)\} = \min\{2\pi\rho(r)\} = 2\pi\rho_0 = 2\pi(eM) \quad (9)$$

с тем же минимальным физическим радиусом ρ_0 , что и для горловины в (5)-(6), так что, вообще говоря, изменение размерности (включая инверсию – см. рисунок 1, справа) не влияет на критические координатные и физические масштабы, что в дальнейшем будет использовано в алгоритмах аксиальной визуализации.

Результаты и обсуждение. Визуализация в алгоритме вложения. I. Рассмотрим традиционный алгоритм (Misner, et al., 1973), когда 2-мерное сечение кротовой норы вкладывается в 3-мерное цилиндрическое евклидово пространство, на примере метрики Шварцшильда в координатах кривизн,

$$ds^2 = b^2(R)dt^2 - a^2(R)dR^2 - R^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2), \quad a^2 = b^{-2} = (1 - 2M/R)^{-1}.$$

Тогда, например, 2-мерное сечение $t = \text{const}, \theta = \pi/2$, с метрикой $ds^2 = -a^2 dR^2 - R^2 d\phi^2$ следует вложить в 3-мерное пространство с координатами $\bar{r} \in [0, \infty), \bar{z} \in (-\infty, \infty), \bar{\phi} \in [0, 2\pi]$:

$$d\bar{s}^2 = -(d\bar{z}^2 + d\bar{r}^2 + \bar{r}^2 d\bar{\phi}^2) = -(d\bar{z}^2 + d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2). \quad (10)$$

Отсюда при $\phi = \bar{\phi}$ получаем $R = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} = \bar{r} \Rightarrow d\bar{z}^2 + d\bar{r}^2 = (\bar{z}'^2 + 1)dR^2 = a^2 dR^2$, т. е. $\bar{z}'^2 = a^2 - 1$, и, следовательно, двузначную формулу вложения $\bar{z}(R)$ и затем ее инверсию $R(\bar{z})$, совпадающую в данном случае с профилем $\bar{r}(\bar{z})$, то есть

$$\bar{z}(R) = \pm \int_0^R \sqrt{\frac{2M/R}{1 - 2M/R}} dR = \pm 4M \left(\frac{R}{2M} - 1 \right)^{1/2} \Rightarrow \bar{r}(\bar{z}) = R = \frac{16M^2 + \bar{z}^2}{8M}. \quad (11)$$

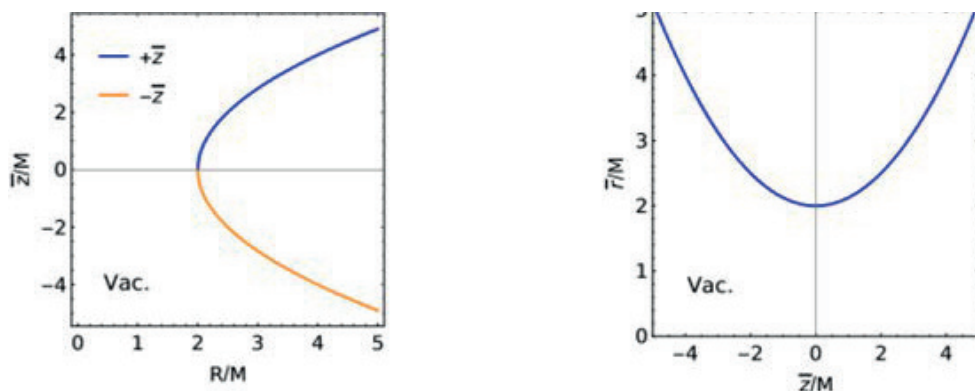


Рисунок 2 – Слева: Две разные ветви формулы вложения $\pm \bar{z}(R)$, согласно (11). Справа: Однозначный профиль $R(\bar{z}) = \bar{r}(\bar{z})$ внутри эффективного 3-мерного евклидова пространства (см. правую часть (11)).

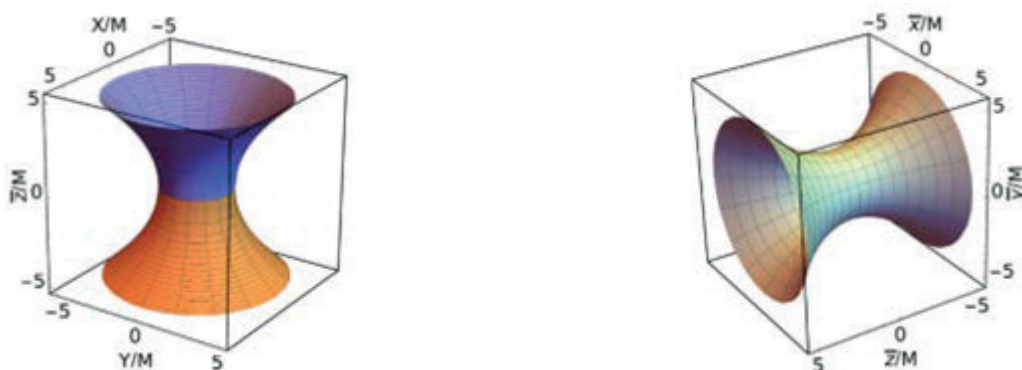


Рисунок 3 – Аксиальная форма функции $\pm \bar{z}(R)$ (слева) и профиля $\bar{r}(R) = R(\bar{z})$ (справа), согласно (11), при $\bar{r}(\bar{z})$ совпадающим с $R(\bar{z})$ в координатах кривизн.

На рисунке 2, слева показана функция $\bar{z}(R)$, и ее аксиальная форма – на рисунке 3, слева. Визуализируемый профиль $\bar{r}(\bar{z})$ в (11) показан на рисунке 2, справа, а его аксиальная форма – на рисунке 3, справа. Тривиальный характер зависимости $\bar{r}(R) = R$ является артефактом использования координат кривизн.

II. В работе (Misner, et al., 1973), задача 37.1(c), предложено реализовать алгоритм вложения для исходных изотропных координат с интервалом $ds^2 = B(r)^2 dt^2 - A(r)^2 (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2)$ так, чтобы 2-мерное сечение $t = \text{const}$, $\theta = \pi/2$, с интервалом $ds^2 = -A^2 dr^2 - A^2 r^2 d\phi^2$ вкладывалось в 3-мерное цилиндрическое евклидово пространство (10), аналогично рассмотренному случаю I в координатах кривизн.

Рассмотрим два физически различных случая, когда $A = (1 + M/2r)^2$, для решения Шварцшильда в вакууме, либо $A = e^{M/r}$, для экспоненциальной метрики Папапетру на скалярном фоне. При общем условии $\phi = \bar{\phi}$, получим $\bar{r} = Ar \Rightarrow d\bar{r} = (A'r + A)dr \equiv Ddr$. Тогда из $\bar{z}'^2 \equiv \left(\frac{d\bar{z}}{dr}\right)^2 = A^2 - D^2$ и (10) следует двузначная формула вложения для евклидовой координаты $\bar{z}(r)$, т. е.

$$\bar{z}(r) = \pm \bar{z} = \pm \int_0^r \sqrt{A^2 - D^2} dr, \quad (12)$$

которая для изотропной метрики Шварцшильда показывает пересечение ветвей в точке $r = M/2$ и перестает быть гладкой (см. рисунок 4, слева и сравни с предыдущим пунктом I), а именно:

$$\bar{z}(r) = \pm \int_0^r \sqrt{\frac{M(M+2r)^2}{2r^3}} dr = \pm 2r \left(1 - \frac{M}{2r}\right) \sqrt{\frac{2M}{r}}. \quad (13)$$

В случае экспоненциальной метрики Папаетру общая формула вложения (12) дает:

$$\bar{z}_{\pm}(r) = \pm \int_0^r \sqrt{\frac{e^{2M/r} 2M(1 - M/2r)^2}{r}} dr. \quad (14)$$

Данный интеграл мы интегрируем численно при $r > M/2$. Результат представлен на рисунке 4, справа.

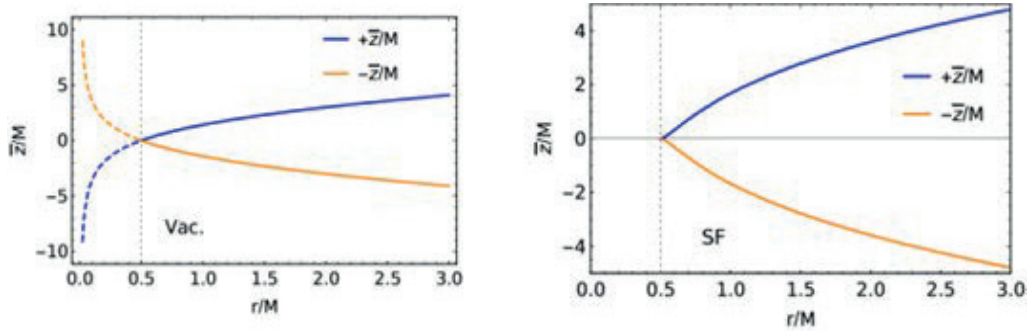


Рисунок 4 – Слева: Двухзначная функция вложения в изотропных координатах Шварцшильда (13), в отличие от координат кривизн на рисунках 2 и 3, нарушает гладкий характер визуализации $\bar{z}(r)$ из-за пересечения ветвей. Справа: Аналогично, в экспоненциальной метрике численным интегрированием в (14) находится двухзначный (не гладкий) график $\bar{z}(r)$ на расстояниях $r > M/2$.

III. Для получения искомых профилей $\bar{r}(\bar{z})$ необходимо инвертировать найденную выше функцию вложения $\bar{r} = Ar$. В изотропных шварцшильдовских координатах мы приходим к двухзначной формуле инверсии:

$$\bar{r} = r \left(1 + \frac{M}{2r}\right)^2 \Rightarrow r = r_{\pm} = \frac{1}{2} \left[\bar{r} - M \pm \sqrt{\bar{r}(\bar{r} - 2M)} \right], \quad (15)$$

а в случае скалярного фона также возникает двухзначная инверсия, но теперь в терминах функции Ламберта $W(x)$ (см. рисунок 5, справа):

Практический интерес представляет только основная ветвь, W_0 .

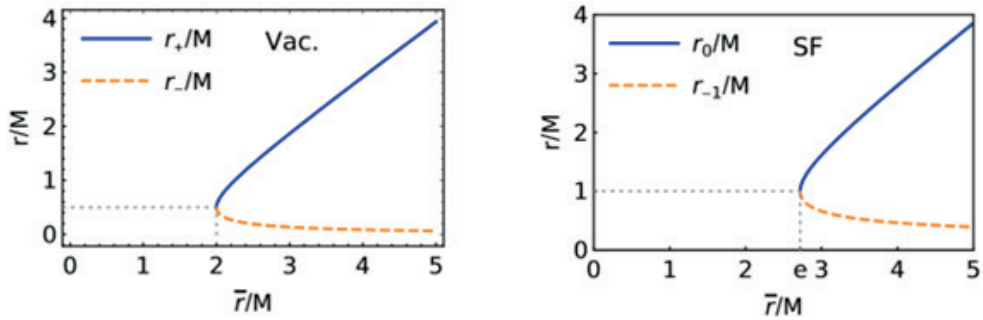


Рисунок 5 – Слева: Двухзначная инверсия функции $\bar{r} = Ar$ в изотропных шварцшильдовских координатах, в соответствии с (15). Справа: Двухзначная ламбертовская инверсия радиальной координаты в экспоненциальной метрике Папаетру, в соответствии с (16).

Промежуточную функцию $\bar{z}(\bar{r})$ в изотропных координатах Шварцшильда можно получить двумя эквивалентными способами. Первый означает подстановку (15) в интеграл (13), что даст:

$$\bar{z}(\bar{r}) = \pm \bar{z} = \pm \int_0^{\bar{r}} \sqrt{\frac{A^2}{D^2} - 1} d\bar{r} = \pm \int_0^{\bar{r}} \sqrt{\frac{2M}{\bar{r} - 2M}} d\bar{r} = \pm 2\sqrt{2M(\bar{r} - 2M)}. \quad (17)$$

Второй способ, то есть прямая подстановка последней формулы (15) в правую часть (13) дает четырехзначный результат:

$$\bar{z}(\bar{r}) = \pm \bar{z}(r_{\pm}) = \pm 2 \left(\bar{r} - 2M \pm \sqrt{\bar{r}(\bar{r} - 2M)} \right) \sqrt{\frac{M}{\bar{r} - M \pm \sqrt{\bar{r} - 2M}}}. \quad (18)$$

Однако, в итоге получается однозначная зависимость $\bar{z}^2(\bar{r}) = 8M(\bar{r} - 2M)$, что после инверсии дает профиль вложенной поверхности:

$$\bar{r}(\bar{z}) = (16M^2 + \bar{z}^2)/8M, \quad (19)$$

который показывает ту же зависимость, что и ранее в пункте I (см. (11) и рисунок 3, справа). Это совпадение связано с тем, что инвертируемая функция (15) функционально совпадает со стандартным преобразованием к координатам кривизн, где типичный масштаб горловины $\bar{r}_{min} = 2M$ при $\bar{z} = 0$. Очевидно, нет необходимости строить отдельной график данной зависимости в вакууме.

В случае скалярного фона Папаетру ламбертовская подстановка (16) с $W = W_0$ в (14) приводит к пересчету $\bar{z}_{\pm}(r)$ в промежуточную функцию $\bar{z}_{\pm}(r)$:

$$\bar{z}(\bar{r}) = \pm \int_0^{\bar{r}} \left[\frac{1}{\left(1 + W_0\left(-\frac{M}{\bar{r}}\right)\right)^2} - 1 \right]^{1/2} d\bar{r}. \quad (20)$$

Выражение (20) интегрируется численно (см. рисунок 6, слева) и после инверсии дает итоговый профиль $\bar{r}(\bar{z})$ для сечения TWH, вложенного в 3-мерное евклидово пространство, как показано на рисунке 6, справа. Все это согласуется с основной зависимостью для горловины (6) и, в свою очередь, приводит к аксиальной визуализации, качественно аналогичной рисунку 3.

К сожалению, данный метод содержит нефизическую зеркальную $\pm z$ -симметрию, которая, в силу квадратичности по $\bar{z}$ в промежуточных вычислениях, неизбежна в рассматриваемом алгоритме вложения.

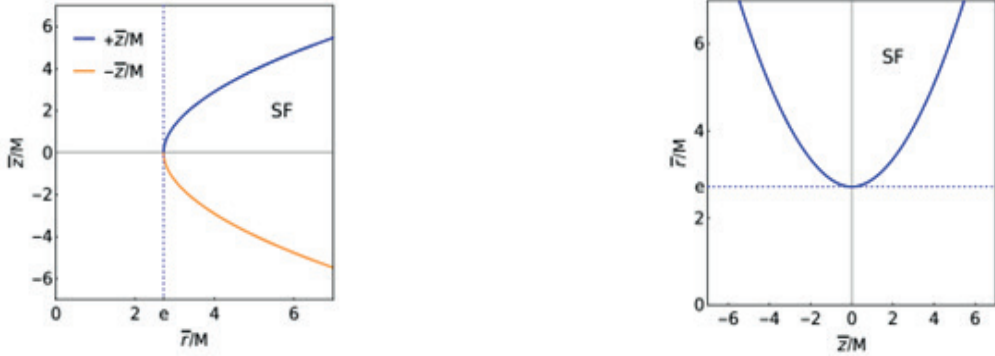


Рисунок 6 – Слева: Промежуточные функции $\bar{z}_{\pm}(\bar{r})$, вычисленные согласно (20). Справа: Результирующий профиль $\bar{r}(\bar{z})$ для области $\bar{r}/M > e$ при численной инверсии формулы (20).

Аксиальный вариант визуализации инвариантов кривизны. Продолжим анализ инвариантов кривизны, начатый в работах (Boonserm, et al., 2018) и (Turimov, et al., 2022), здесь – в контексте прямого сопоставления с TWH Морриса-Торна.

Для графического сопоставления критерия (4) с инвариантами кривизны мы масштабируем их в соответствии с характеристикой Эйлера (см. (23) ниже) и приводим их к профилям с одинаковыми размерностями $[r]$ и $[r^1]$. При этом учитываем, что в экспоненциальной метрике существует прямая связь между инвариантом Кречмана $K \equiv R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu}$ и квадратом скаляра Риччи $R \equiv R^{\alpha}_{\alpha}$, а именно:

$$K^{1/4} = \left[R^2 \left(7 - \frac{16r}{M} + \frac{12r^2}{M^2} \right) \right]^{1/4} \Leftrightarrow \frac{1}{K^{1/4}} = \left[R^2 \left(7 - \frac{16r}{M} + \frac{12r^2}{M^2} \right) \right]^{-1/4}. \quad (21)$$

Переходя в скаляре Риччи к минимизированным размерностям $[1/r] \Leftrightarrow [r]$ также получаем:

$$R^{1/2} = \frac{\sqrt{2}M}{r\rho(r)} = \frac{\sqrt{2}Me^{-M/r}}{r^2} \Leftrightarrow \frac{1}{R^{1/2}} = \frac{r^2 e^{M/r}}{\sqrt{2}M}. \quad (22)$$

Как известно, инвариант Гаусса-Бонне $\mathcal{G}$ связан с характеристикой Эйлера χ (Buzano, et al., 2015):

$$\chi = \frac{1}{32\pi^2} \int \mathcal{G} dV = \alpha^4 \int \mathcal{G} dV, \quad (23)$$

где множитель $1/32\pi^2 = \alpha^4$ используется на рисунке 7 для соответствующего масштабирования (нормализации) геометрических инвариантов¹. Этот фундаментальный скаляр имеет структуру:

$$\mathcal{G} = K - \mathcal{E}, \quad (24)$$

в форме комбинации инварианта Кречмана K (21) и термодинамического инварианта,

$$\mathcal{E} = 4R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu} - R^2 = 3R^2 = \frac{12M^4}{r^8} e^{-\frac{4M}{r}}. \quad (25)$$

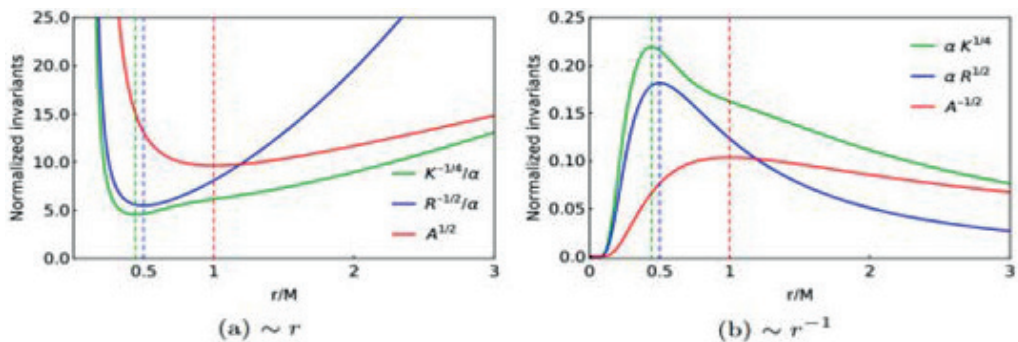


Рисунок 7 - Профили инвариантов Кречмана K (21), Риччи R (22), и площадей A^{-1} TWH Морриса-Торна, полученные из (4).

Профили приведены к размерностям $[r]$ (слева), $[r^{-1}]$ (справа) и масштабированы в соответствии с (23). Вертикальные пунктиры фиксируют критические (экстремальные) масштабы при $r_K = 0.442M$ (зеленый), $r_R = M/2$ (синий) и $r_A = M$ (красный).

¹ В (Turimov, et al., 2022) применялось безразмерное представление инвариантов кривизны. Вместо множителя M^4 размерности $[r^4]$ в (Turimov, et al., 2022), мы используем безразмерный множитель α^4 , следующий из топологического соотношения (23), что в соответствующих случаях приводит к численно эквивалентным результатам.

Если сферически симметричные функции, такие как TWH и геометрические профили, вытекающие из экспоненциальной метрики Папапетру, известны аналитически или численно, как, например, показано на рисунке 7 (а), то их можно визуализировать в терминах 3-мерного евклидова пространства (10) в форме регулярных поверхностей вращения, показанных на рисунке 8 (сверху). Обратные (по размерности) профили 1/r-типа на рисунке 7 (b) также представляются в виде аксиальных поверхностей на рисунке 8 (снизу). Соответствующие экстремумам (минимальные или максимальные) сечения фиксируются вертикальными полупрозрачными плоскостями.

В операционном смысле, для построения поверхностей вращения можно перейти в метрике Папапетру от сферических координат к аксиально-симметричным координатам типа Вейля-Льюиса (Lewis, 1932). В результате вместо (1) будем иметь

$$ds^2 = e^{-2\varphi(\rho,z)} dt^2 - e^{2\varphi(\rho,z)} (d\rho^2 + dz^2 + \rho^2 d\phi^2), \quad \varphi = M/r = M/\sqrt{\rho^2 + z^2}. \quad (26)$$

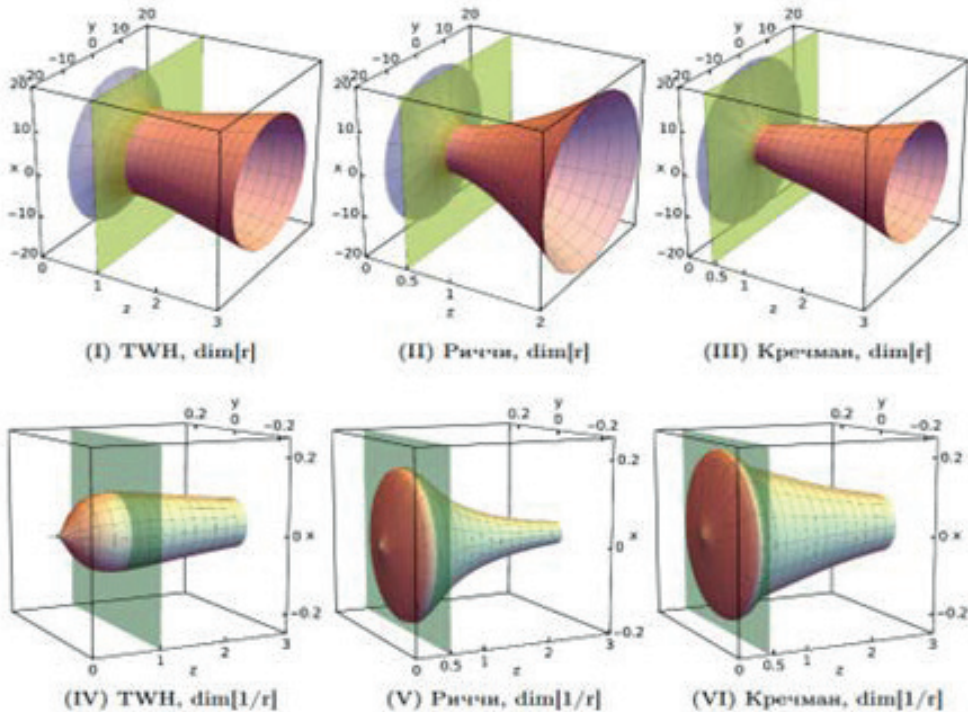


Рисунок 8 - Вверху: Аксиальные поверхности, соответствующие различным [r]-профилям скалярного поля на рисунке 7 (а), т. е. TWH (I) и геометрических инвариантов (II), (III), в единицах г/М. Полупрозрачные плоскости фиксируют физические минимумы (или максимумы) при $r_A = M$, $r_R = M/2$ и $r_K = 0.442M$, соответственно. Внизу: Аксиальные поверхности для обратных [1/r]-профилей на рисунке 7 (b) TWH (IV) и геометрические инварианты (V), (VI) демонстрируют отсутствие сингулярностей. Вертикальные плоскости фиксируют максимумы на соответствующих радиальных расстояниях.

Таким образом, как показано на рисунках 7 и 8, приведенные к степенным размерностям типа $[r^{\pm n}]$ профили инвариантов Кречмана и Риччи имеют физические экстремумы на радиальных расстояниях, близких друг к другу $r_k = 0.442M$ (зеленый) и $r_R = M/2$ (синий), что полностью согласуется с результатами (Turimov, et al., 2022). В то же время, напомним, что в случае TWH соответствующий критический координатный масштаб оказывается вдвое больше, $r_A = M$ (красный).

Предложенный метод позволяет визуализировать параметры рассматриваемых профилей, избегая упомянутую искусственную зеркальную $\pm z$ -симметрию. В частности, координатные расстояния, связанные с горловиной типа $r_A = M$ для TWH и $r_R = M/2$ для инвариантов, связанных со скаляром Риччи (Kraniotis, 2022), автоматически сохраняются вместе с соответствующими физическими радиальными масштабами. Рассмотренные здесь виды аксиальной визуализации топологически эквивалентны и в определенном смысле дополняют друг друга, давая достаточно наглядное представление скалярного фона, индуцированного метрикой Папапетру. Главное в этой картине, это демонстрация несингулярного поведения геометрических инвариантов в экспоненциальной метрике несмотря на то, что сопутствующее уравнение Клейна–Гордона удовлетворяется сингулярным ньютоновским потенциалом.

Заключение. Как показано в работе (Boonserm, et al., 2018), экспоненциальная метрика Папапетру, независимо от её происхождения, математически может рассматриваться как проходима кротовая нора (TWH), с минимальным масштабом (горловиной) при $r = M$. В то же время, скаляр Риччи и другие геометрические инварианты тензора кривизны, порождаемые в указанной метрике непосредственно уравнениями Эйнштейна, формируют вдвое меньший экстремальный масштаб $r = M/2$, который, в отличие от TWH, может приводить к наблюдаемым физическим эффектам. В частности, это касается термодинамических величин, связанных со скалярным фоном (Makukov, et al., 2018). Для изучения специфических особенностей этих сферически-симметричных геометрических объектов эффективным методом оказывается визуальное представление соответствующих радиальных профилей. В данной работе это сделано двумя независимыми, но топологически эквивалентными способами. Первый, традиционный метод вложения, предложенный Мизнером, Торном и Уилером (Misner, et al., 1973), мы детально проработали применительно к скалярному фону. На основе второго, прямого ротационного метода, было показано, как вся информация, содержащаяся в радиальных профилях, может быть сохранена при визуализации соответствующих поверхностей вращения. В целом, данный метод оказывается не только достаточно информативен, но и важен также с практической точки зрения, так как позволяет получить наиболее адекватные представления о допуске пространственном распределении фундаментального скалярного фона в рамках рассматриваемой модели как необходимой предпосылки для изучения в дальнейшем вытекающих отсюда физических следствий.

Литература

- Boonserm P., Ngampitipan T., Simpson A., Visser M. (2018) Exponential metric represents a traversable wormhole. *Physica Review D*. — Vol. 98(8). — P. 084048. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.024050> (in Eng.)
- Buzano R., Nguyen H.T. (2015). The Chern–Gauss–Bonnet formula for singular non-compact four-dimensional manifolds. *Communications in Analysis and Geometry*. — Vol. 27(8). — P. 1697-1736. DOI: <https://doi.org/10.4310/cag.2019.v27.n8.a2> (in Eng.)
- Dirac P.A.M. (1996). *General theory of relativity*. – Princeton University Press. DOI: <https://doi.org/10.1515/978140088419> (in Eng.)
- Gao C., Qiu J. (2024) From the Janis–Newman–Winicour Naked Singularities to the Einstein–Maxwell Phantom Wormholes. *Universe*. — Vol. 10(8). — P. 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe10080328> (in Eng.)
- Gautreau R. (1969) Coupled Weyl gravitational and zero-rest-mass scalar fields. *Il Nuovo Cimento B*. — Vol. 62(2). — P. 360-370. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02710144> (in Eng.)
- Kraniotis G.V. (2022) Curvature invariants for accelerating Kerr–Newman black holes in(anti-) de Sitter spacetime. *Classical and Quantum Gravity*. — Vol. 39(14). — P. 145002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac750a> (in Eng.)
- Kuchar K.V. (1963) On the Rainich geometrization of scalar meson fields. *Czech J Phys*. — Vol. 13. — P. 551-557. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01689553> (in Eng.)
- Lewis T. (1932) Some special solutions of the equations of axially symmetric gravitational fields. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. — Vol. 136(829). — P. 176-192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1932.0073> (in Eng.)
- Makukov M.A., Mychelkin E.G. (2018) Simpler than vacuum: Antiscalar alternatives to black holes. *Physical Review D*. — Vol. 98(6). — P. 064050. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.064050> (in Eng.)
- Misner C.W., Thorne K.S., Wheeler J.A. (1973) *Gravitation*. – Freeman W. H. and Company, San Francisco. ISBN: 9780716703440 (in Eng.)
- Morris M.S., Thorne K.S. (1988) Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity. *American Journal of Physics*. — Vol. 56(5). — P. 395-412. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.15620> (in Eng.)
- Mychelkin E., Makukov M., Suliyeva G., Jafari N. (2024) On the weak and strong field effects in antiscalar background. *General Relativity and Gravitation*. — Vol. 56(4). — P. 44. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10714-024-03227-7> (in Eng.)
- Papapetrou A. (1954) Eine theorie des gravitationsfeldes mit einer feldfunktion [Gravitation field theory with field function]. *Zeitschrift für Physik*. — Vol. 139(5). — P. 518-532. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01374560> (in Ger.)
- Ruppeiner G. (1995) Riemannian geometry in thermodynamic fluctuation theory. *Reviews of Modern Physics*. — Vol. 67(3). — P. 605-659. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.67.605> (in Eng.)
- Stachel J. (1968) Structure of the Curzon metric. *Physics Letters A*. — Vol. 27(1). — P. 60. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(68\)91338-8](https://doi.org/10.1016/0375-9601(68)91338-8) (in Eng.)
- Turimov B., Turaev Y., Ahmedov B., Stuchlik Z. (2022) Circular motion of test particles around wormhole represented by exponential metric. *Physics of the Dark Universe*. — Vol. 35. — P. 100946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dark.2021.100946> (in Eng.)
- Visser M., Hochberg D. (1997) Generic wormhole throats. *Annals of the Israel Physical Society*. — Vol. 13. — P. 249. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.gr-qc/9710001> (in Eng.)

©U.A. Ualikhanova*, A.M. Konys, A.B. Altaibayeva, Zh.M. Beisekeyeva, 2025.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

DYNAMICAL SYSTEMS ANALYSIS OF $f(R, T) = R + \beta T^m$ COSMOLOGY**Ualikhanova Ulbossyn** — PhD, senior lecturer of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com, Orcid: 0000-0002-2351-0658;

Konys Aiaulym — student of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: aiaulym.qonys@icloud.com Orcid: 0009-0006-5349-8596;

Altaibayeva Aziza — PhD, associate professor of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, Orcid: 0000-0001-9254-7027;

Beisekeyeva Zhanna — PhD, senior lecturer of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Astana, Kazakhstan,

E-mail: sagidullayeva.zh@gmail.com, Orcid 0000-0001-9722-4016.

Abstract. We present a systematic dynamical systems analysis of flat Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) cosmological models in $f(R, T) = R + \beta T^m$ gravity, where R is the Ricci scalar and T is the torsion scalar. This approach makes it possible to gain a deeper understanding of the model's evolutionary possibilities, including stable phase solutions, conditions for accelerated expansion, and singularity scenarios. The phase space is reduced to two dimensions using dimensionless variables, and the conditions for de Sitter fixed points, accelerated expansion and finite time singularities are derived. We show that this model allows transitions between radiation-dominated, matter-dominated, and dark energy-dominated eras, but prohibits cyclic or oscillating universes. The stability of fixed points and the role of the parameter m are thoroughly investigated. This hybrid modification of gravity introduces novel interactions between curvature and torsion terms, leading to distinct dynamical behavior. We systematically investigate the stability of critical points and analyze the impact of the parameter m on cosmic evolution. Notably, for $m > 0.5$, late-time acceleration is naturally achieved through de Sitter attractors. However, the model does not permit phantom crossing, as the effective dark energy equation of state depends explicitly on m and matter-radiation interactions. Furthermore, we classify possible finite time singularities and their dependence on the model parameters. Our findings suggest that the $f(R, T) = R + \beta T^m$ framework offers a viable alternative



for explaining late-time acceleration without exotic components. The findings indicate that the model is physically viable and can be further tested against observational data. Practically, this study contributes to a better understanding of cosmic evolution and provides a foundation for the development of new theories of gravity.

Keywords: cosmology, dark energy, dark matter, observational constraints, $f(R, T)$ gravity

©У.А. Уалиханова*, А.М. Қоныс, А.Б. Алтайбаева, Ж.М. Бейсекеева, 2025.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

$f(R, T) = R + \beta T^m$ КОСМОЛОГИЯСЫНЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР ТАЛДАУЫ

Уалиханова Улбосын — PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2351-0658;

Қоныс Аяулым — Жалпы және теориялық физика кафедрасының студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: aiaulym.qonys@icloud.com, ORCID: 0009-0006-5349-8596;

Алтайбаева Азиза — PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9254-7027;

Бейсекеева Жанна — PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: sagidullayeva.zh@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9722-4016.

Аннотация. Біз берілген жұмыста $f(R, T) = R + \beta T^m$ гравитациясындағы жазық Фридман-Леметр-Робертсон-Уокер (ФЛРУ) космологиялық модельдерін жүйелі динамикалық жүйелер әдісімен талдаймыз. Бұл тәсіл модельдің эволюциялық мүмкіндіктерін, оның ішінде тұрақты фазалық шешімдерді, үдемелі ұлғаю шарттарын және сингулярлық сценарийлерін тереңірек түсіндіруге мүмкіндік береді. Мұнда R - Риччи скаляры және T - бұралу скаляры. Фазалық кеңістік өлшемсіз айнымалыларды пайдалана отырып, екі өлшемге дейін қысқартылды және де Ситтер нүктелерінің шарттары, үдемелі ұлғаю және шекті уақыт сингулярлықтары анықталды. Бұл модельдің радиацияға, материяға және күңгірт энергияға басымдық беретін эволюциялар арасында ауысуға мүмкіндік беретіні, бірақ айналмалы немесе тербелмелі ғаламдарды жоққа шығаратыны көрсетілді. Тұрақты нүктелердің тұрақтылығы мен параметр m -нің рөлі жан-жақты зерттелді. Бұл гибриді гравитациялық модель қисықтық пен бұралуды байланыстыратын жаңа өзара әрекеттесулерді енгізеді, нәтижесінде ғаламның динамикасы өзгеше сипат алады. Біз жүйенің критикалық нүктелерінің орнықтылығын зерттеп, m параметрінің ғаламның кеңеюіне әсерін қарастырамыз. Егер $m > 0.5$ болса, онда ғаламның кеш кезеңдегі жеделдетілуі де Ситтер аттракторы арқылы жүзеге асады. Бірақ модельде фантомдық шекараның қиылысуы болмайды, өйткені күңгірт энергияның тиімді күй теңдеуі

m және материя мен сәулеленудің әсерлесуіне тәуелді. Сонымен қатар, біз соңғы уақыттық сингулярлықтардың түрлерін жіктеп, олардың модель параметрлеріне қалай тәуелді екенін анықтаймыз. Алынған нәтижелер $f(R, T) = R + \beta T^m$ түріндегі гравитациялық модификация ғаламның кеш кезеңдегі үдемелі ұлғаюын экзотикалық энергия құрамдастарынсыз түсіндіре алатынын көрсетеді. Алынған нәтижелер бұл модельдің физикалық жағынан жарамды екенін және нақты бақылау деректерімен салыстырып тексеруге болатынын көрсетеді. Практикалық маңызы ретінде, бұл модель ғаламның эволюциясын түсіндірумен қатар, гравитацияның жаңа түрлерін зерттеуге негіз болады.

Түйін сөздер: космология, күңгірт энергия, күңгірт материя, бақылау шектері, $f(R, T)$ гравитациясы

Алғыс: зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыруымен жүзеге асты (жоба № AP26101851).

©У.А. Уалиханова*, А.М. Коныс, А.Б. Алтайбаева, Ж.М. Бейсекеева, 2025.

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан.

E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ $f(R, T) = R + \beta T^m$ КОСМОЛОГИИ

Уалиханова Улбосын — PhD, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2351-0658;

Коныс Аяулым — студент кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: aiaulym.qonys@icloud.com, ORCID: 0009-0006-5349-8596;

Алтайбаева Азиза — PhD, ассоциированный профессор кафедры Общая и теоретическая физика, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9254-7027;

Бейсекеева Жанна — PhD, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: sagidullayeva.zh@gmail.com, ORCID 0000-0001-9722-4016.

Аннотация. Мы представляем динамический системный анализ плоских космологических моделей Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера (ФРЛУ) в гравитации $f(R, T) = R + \beta T^m$, где R — скаляр Риччи, а T — скаляр кручения. Этот подход позволяет глубже понять эволюционные возможности модели, включая устойчивые фазовые решения, условия ускоренного расширения и сингулярные сценарии. Фазовое пространство сводится к двум измерениям с использованием безразмерных переменных, и выводятся условия для неподвижных точек де Ситтера, ускоренного расширения и конечных временных сингулярностей. Мы показываем, что эта модель допускает



переходы между эпохами, в которых доминирует излучение, материя и темная энергия, но запрещает циклические или осциллирующие вселенные. Устойчивость неподвижных точек и роль параметра m тщательно исследуются. Эта гибридная модификация гравитации вводит новые взаимодействия между терминами кривизны и кручения, что приводит к отчетливому динамическому поведению. Мы систематически исследуем устойчивость критических точек и анализируем влияние параметра m на космическую эволюцию. В частности, для $m > 0.5$ ускорение в позднее время естественным образом достигается через аттракторы де Ситтера. Однако модель не допускает фантомного пересечения, поскольку эффективное уравнение состояния темной энергии явно зависит от m и взаимодействий материи и излучения. Кроме того, мы классифицируем возможные конечные временные сингулярности и их зависимость от параметров модели. Наши результаты показывают, что структура $f(R, T) = R + \beta T^m$ предлагает жизнеспособную альтернативу для объяснения позднего ускорения без экзотических компонентов. Полученные результаты свидетельствуют о физической состоятельности модели и ее потенциале для дальнейшего сопоставления с наблюдательными данными. Практически данное исследование может способствовать более глубокому пониманию эволюции Вселенной и развитию новых теорий гравитации.

Ключевые слова: космология, темная энергия, темная материя, пределы наблюдения, $f(R, T)$ гравитация

Кіріспе. Модификацияланған гравитация теорияларындағы космологиялық модельдерді зерттеу күңгірт энергия мен ғарыштық ұлғаюға байланысты туындаған мәселелерге ерекше назар аударуды талап етеді (Møller, 1961: 2; Cho, 1976: 2; Hayashi, 1977: 2; Faraoni, 2011: 2). Осы теориялардың ішінде $f(R)$ және $f(T)$ гравитациясы Жалпы салыстырмалық теориясының (ЖСТ) ықтимал модификациясы ретінде кеңінен зерттелген (Aldrovandi, 2013: 2; Maluf, 2013: 2; Felice, 2010: 2). Бұл түрлендірулер космологиялық тұрақтыны қажет етпей, Ғаламның үдемелі ұлғаюына толық түсініктеме бере алады. Бұл жұмыста біз гравитациялық әрекетте (R) қисықтық және (T) бұралу негізіндегі терминдерді қосатын $f(R, T) = R + \beta T^m$ жаңа гибриді моделін зерттейміз (Shabani, 2018: 3; Narko, 2011: 3). Бұл модель Риччи скаляры мен бұралу скалярын тривиалды емес түрде біріктіру арқылы ғарыштық динамиканы түсіндірудің жаңа әдісін ұсынады. ФЛРУ космологиясындағы бұралу скаляры $T = -6H^2$ және Риччи скаляры $R = 6(\dot{H} + 2H^2)$ болғандықтан, H және $\dot{H}$ арасында байланыс пайда болып, ерекше динамикалық қасиеттерге әкеледі (Bengochea, 2009: 4; Linder, 2010: 3). Біз бұл жүйені динамикалық жүйелер теориясы арқылы талдап, оның жалпы сипаттамаларын зерттейміз. Дәстүрлі $f(R)$ модельдері Риччи скалярының функцияларын гравитациялық әрекетке енгізіп, Эйнштейн өріс тендеулерін өзгертуге мүмкіндік береді. Сол сияқты, $f(T)$

гравитация теориялары бұралу скалярының функцияларын қарастыра отырып, гравитацияның телепараллельдік тұжырымын өзгертеді (Li, 2011: 3; Farrugia, 2016: 2; Ong, 2013: 3). Ұсынылған $f(R, T)$ гибриді модель екі элементтерді біріктіру арқылы осы тәсілдерді кеңейтіп, бірегей динамикалық қасиеттерге ие болады. Біздің талдауымызда біз фазалық кеңістікті екі өлшемге дейін азайтамыз, бұл космологиялық шешімдердің жалпы қасиеттерін алуға мүмкіндік береді. Атап айтқанда, біз тұрақты үдемелі ұлғаю үшін маңызды болып саналатын де Ситтер аттракторларының болуына, сондай-ақ, күрт космологиялық ауысуларға әкелуі мүмкін соңғы уақыттық ерекшеліктердің ықтималдылығы болуына назар аударамыз.

Сонымен қатар, әртүрлі ғарыштық дәуірлер арасындағы ауысуларды, соның ішінде радиация басым, материя басым және күнгірт энергия басым фазаларды талдаймыз (Jarv, 2016: 5; Hayashi, 1979: 4; Krššák, 2016: 4; Bamba, 2016: 3; Paliathanasis, 2016: 4). Біздің қорытындыларымыз m параметрінің осы ауысуларды басқаруда шешуші рөл атқаратынын көрсетеді. Модель радиациядан күнгірт энергияның үстемдігіне дейін бірқалыпты эволюцияға мүмкіндік береді, бұл Фридман функциясының әрекетінде көрінеді $W(H) = 6H^2 + \beta(-6H^2)^m(1 - 2m)$. Бұл зерттеуде біз ұсынылған $f(R, T) = R + \beta T^m$ моделі физикалық негізделген эволюциялық сценарийлерді қамтамасыз ете отырып, әртүрлі космологиялық дәуірлер арасындағы ауысуларды сипаттай алатынын көрсетеміз. Алайда, модель циклдік сценарийлерді жоққа шығарып, фантомдық қиылыстарға жол бермейді. Біз негізгі бақылау салдарын қарастырып, астрофизикалық деректерді пайдалана отырып, модельді сынау мүмкіндігін қоса, одан әрі зерттеулердің бағыттарын анықтаймыз. Атап айтқанда, бұл теорияның әрі қарай дамуы инфляцияны, күнгірт энергия құрылымын және ерте ғаламның эволюциясын тереңірек түсінуге мүмкіндік беруі мүмкін. Модель бойынша жеделдетілген

кеңею $\ddot{a}/a > 0$ шартымен сипатталады, ал эффективті күнгірт энергияның күй теңдеуі $\omega_{DE} = -1 + \frac{m(X+3)}{3}$ болып табылады. $m = 0.75$ болған жағдайда, модель үдемелі ұлғаюды қамтамасыз етіп, фантомдық қиылыстарды болдырмайды. Сонымен қатар, гравитациялық толқындар мен ғаламның ауқымды құрылымын зерттеу үшін болашақ ғылыми миссияларды пайдалана отырып, модельді эксперименталды тұрғыда сынау маңызды. Бұл модельдің тұрақты де Ситтер аттракторларына ие болуы $W(Y^*) = 0$ шартымен расталады, мұнда $W(H)$ – модификацияланған Фридман функциясы. Осылайша, біздің зерттеуіміз Ғаламның үдемелі ұлғаюының балама механизмдерін түсінуге үлес қосады, олар қисықтық пен бұралу әсерлерінің комбинациясына негізделген.

Материалдар мен әдістер. Космологиядағы динамикалық жүйелер әдісі

Динамикалық жүйелер әдісі — бұл ғаламның эволюциясын зерттеуге арналған сапалық тәсіл. Бұл әдіс дәстүрлі түрде қолданылатын Фридман немесе Эйнштейн теңдеулерінің нақты шешімдерін іздеудің орнына, оларды бірінші ретті қарапайым дифференциалдық теңдеулер жүйесі түрінде қайта жазуға

мүмкіндік береді. Осылайша, ғаламның даму үрдісін фазалық кеңістіктегі жүйенің қасиеттерін — мысалы, стационарлық нүктелер мен олардың тұрақтылығын талдау арқылы зерттеуге болады (Hohmann, 2017: 4).

Космологияда ғаламның эволюциясы масштабтық фактор, Хаббл параметрі, әртүрлі компоненттердің энергия тығыздығы және скалярлық өрістер секілді шамалармен сипатталады. Осы айнымалыларды өлшемсіз түрде қайта анықтау арқылы космологиялық теңдеулерді автономды дифференциалдық жүйеге айналдыруға болады. Жүйенің эволюциясы осы жаңа айнымалылармен құрылған фазалық кеңістіктегі траекториялар арқылы сипатталады.

Бұл әдістің негізгі кезеңдері:

1. Теңдеулерді өлшемсіз және қалыпқа келтірілген айнымалылар арқылы өрнектеу.

2. Космологиялық теңдеулерді осы айнымалылар арқылы қайта жазу.

3. Туынды шамалар нөлге тең болатын стационарлық (критикалық) нүктелерді табу.

4. Бұл нүктелер маңындағы жүйені линеаризациялау және Якоби матрицасының меншікті мәндері арқылы тұрақтылықты талдау.

5. Әрбір нүктенің физикалық мағынасын анықтау (мысалы, материяның үстемдік ету дәуірі, радиациялық кезең, үдемелі ұлғаю) және олардың ғалам эволюциясындағы рөлін сипаттау.

Бұл әдіс әсіресе күрделі космологиялық модельдерді — мысалы, скалярлық өрістермен, күңгірт энергиямен немесе модификацияланған гравитация теорияларын зерттегенде тиімді. Ол ғаламның кейінгі даму сценарийлерін, үдеу шарттарын және әртүрлі бастапқы шарттарға қарамастан жүйе ұмтылатын тартымды шешімдердің (аттракторлардың) болуын талдауға мүмкіндік береді. Қорытындылай келе, космологиядағы динамикалық жүйелер әдісі — бұл түрлі космологиялық модельдердің қасиеттерін, тұрақтылығын және сапалық мінез-құлқын терең түсінуге мүмкіндік беретін маңызды құрал.

Біз қарастыратын $f(R, T)$ гравитациясының әрекеті келесідей:

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int |e| (R + \beta T^m) d^4x + S_{\text{материя}}, \quad (1)$$

мұндағы $|e| = \det(e_\mu^A)$ тетраданың детерминанты, β және m - тұрақты параметрлер, G - гравитациялық тұрақты. Жазық ФЛРУ ғаламы үшін, масштабтық коэффициент $a(t)$, бұралу скаляры $T = -6H^2$, ал Риччи скаляры $R = 6(\dot{H} + 2H^2)$. Әрекеттің вариациясын есептеу нәтижесінде модификацияланған Фридман теңдеулері:

$$W(H) = 16\pi G(\rho_m + \rho_r), \quad (2)$$

$$-\dot{H} \frac{W_H}{3H} = 16\pi G \left(\rho_m + \frac{4}{3} \rho_r \right), \quad (3)$$

мұнда Фридман функциясы:

$$W(H) = 6H^2 + \beta(-6H^2)^m(1-2m). \quad (4)$$

Хаббл параметрі H және энергия тығыздықтары Фридманның алгебралық шектеуі салдарынан бір-бірінен тәуелсіз емес. Осыған байланысты, біздің динамикалық жүйеміздің физикалық фазалық кеңістігі — бұл кеңістіктегі көөлшемділігі 1 болатын гипербетті құрайды, яғни

Фазалық кеңістікті қысқарту үшін өлшемсіз айнымалыларды келесі күйде анықтаймыз:

$$Y = \frac{H}{\sqrt{1+H^2}}, \quad X = \frac{\rho_r}{\rho_r + \rho_m}, \quad (5)$$

мұнда $Y \in (-1,1)$ және $X \in [0,1]$. Физикалық фазалық кеңістік:

$$P = \{(Y, X) | Y \in (-1,1), X \in [0,1], W(H) \geq 0\}. \quad (6)$$

Уақыт айнымалысы ретінде $N = \ln a$ -ны қолданғанда, жүйе былай жазылады:

$$\frac{dY}{dN} = -\frac{(X+3)Y(1-Y^2)W}{W_H}, \quad \frac{dX}{dN} = \frac{XY(X-1)}{\sqrt{1-Y^2}}. \quad (7)$$

Нәтижелер мен талқылау. Біз жүйенің критикалық нүктелерінің орнықтылығын зерттеп, m параметрінің ғаламның кеңеюіне әсерін қарастырамыз. Егер $m > 0.5$ болса, онда ғаламның кеш кезеңдегі жеделдетілуі де Ситтер аттракторы арқылы жүзеге асады. Бірақ модельде фантомдық шекараның қиылысуы болмайды, өйткені күңгірт энергияның тиімді күй теңдеуі m және материя мен сәулеленудің әсерлесуіне тәуелді.

Тұрақты нүктелер келесі шарттарды қанағаттандырады:

$$dY/dN = 0 \text{ және } dX/dN = 0$$

Негізгі тұрақты нүктелер:

1) Де Ситтер нүктелері: $Y = Y^* \neq 0$, $X = 0$ немесе $X = 1$, мұнда $W(Y^*) = 0$.

2) Минковский нүктесі: $Y = 0$, $X \in [0,1]$, $W(0) > 0$.

Тұрақтылық Якобиан матрицасының меншікті мәндері арқылы анықталады. Егер $Y^* \neq 0$ болса, меншікті мәндер келесідей болады:

$$\lambda_1 = -3A, \quad \lambda_2 = -H^* \quad (H^* > 0), \quad (8)$$

мұнда

$$A = \frac{(1-2m)\beta(-6H^{*2})^{m-1}}{m} \quad (9)$$

$H^* > 0$ болғанда жүйе тұрақты күйде болады.

Шекті уақыттық сингулярлықтар $W_H \rightarrow 0$ немесе $W \rightarrow \infty$ болғанда пайда болады. Егер $f(R, T) = R + \beta T^m$ болса:

1) I типтес сингулярлық (Үлкен жарылыс/Үлкен Қысылу) $Y \rightarrow \pm 1$ және $H \rightarrow \pm \infty$, егер $m > 1$ болғанда байқалады;

2) II типтес сингулярлық (Кенеттен сингулярлық) $H = H^\circ$ және $W_H(H^\circ) = 0$, $m < 1$ болғанда мүмкін;

3) IV типтес сингулярлық. Егер $W_{\text{HH}} H = 0$ - де шексіздікке ұмтылса, онда бұл жоғары дәрежелі сингулярлық болуы мүмкін.

Үдемелі ұлғаю

Үдемелі ұлғаю шарты ($\ddot{a}/a > 0$) келесі теңдеумен беріледі:

$$1 - \frac{(X+3)W}{2W_H} > 0. \quad (10)$$

Бұл дегеніміз, ғаламның үдемелі ұлғаюы (ақырғы кезеңде күңгірт энергияның басым болуы) үшін осы өрнектің оң мәнге ие болуы қажет. Егер $m > 0.5$ болса, онда үдеу де Ситтер аттрактор нүктелері $Y \rightarrow Y^*$ маңында пайда болады. Бұл модель Ғалам ұлғаюының кеш фазасында күңгірт энергияның үстемдік етуіне мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Эффективті күңгірт энергия

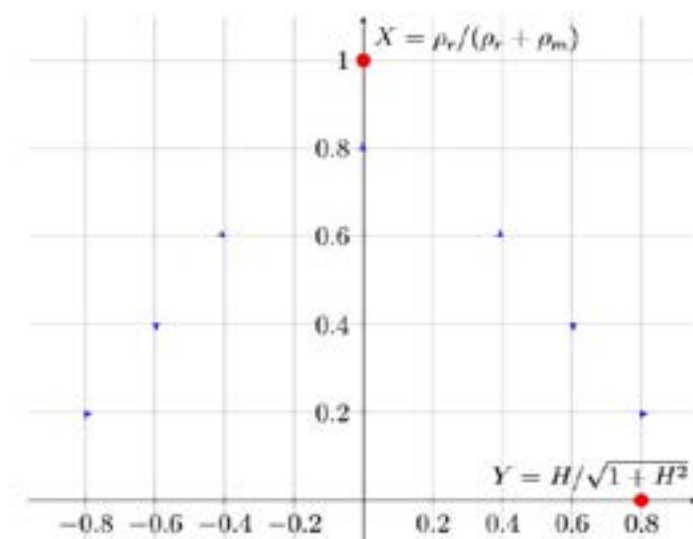
Эффективті күңгірт энергияның тығыздығы мен күй теңдеуі:

$$\rho_{\text{DE}} = \frac{\beta(-6H^2)^m(1-2m)}{16\pi G}, \quad w_{\text{DE}} = -1 + \frac{m(X+3)}{3}. \quad (11)$$

Фантомдық $w_{\text{DE}} = -1$ шекарадан өту мүмкін емес, өйткені w_{DE} тек m және X -ке тәуелді.

Фазалық диаграммалар

1-ші суретте $m = 0.75$, $\beta = 1$ үшін фазалық кеңістіктегі $f(R, T) = R + \beta T^m$ модель траекториясы көрсетілген. Жебелер эволюцияның өткеннен (жоғары Y) болашаққа (төмен Y) қарай жүрісін көрсетеді. $Y^* \approx 0.8$ мәніндегі де Ситтер аттракторы кеш кезеңдегі үдемелі ұлғаюда басымдыққа ие.



Сурет 1 - $f(R, T) = R + \beta T^m$ моделінің $m = 0.75$, $\beta = 1$ болғанда фазалық кеңістік графигі. Ордината осі X , абсцисса осі Y өлшемсіз айнымалысын көрсетеді.

Қорытынды. $f(R, T) = R + \beta T^m$ моделін динамикалық жүйелерді талдау әдістерін қолдану арқылы зерттеу әлемнің мүмкін болатын эволюциялық сценарийлерінің кең ауқымын анықтауға мүмкіндік берді. Бұл тәсіл Де Ситтер тұрақты нүктелерінің бар екендігін анықтауға ғана емес, сонымен қатар β және m параметрлеріне байланысты модельдің қолданылу шегін анықтауға мүмкіндік берді. Қарастырылып отырған модель қосымша өрістерді немесе жаңа экзотикалық құрамдастарды енгізуге жүгінбей-ақ радиация мен заттың үстемдігінен үдемелі ұлғаю фазасына өтуді түсіндіруге қабілетті екенін көрсетті. Негізгі нәтижелердің бірі $m = 0.75$ үшін модель қазіргі заманғы бақылау деректеріне сәйкес Ғаламның кеш кезеңдегі үдемелі ұлғаюын болжайды. Атап айтқанда, ол радиациядан материяға өту кезеңін және соңында соңғы уақытта байқалып отырған үдемелі ұлғаю фазасына көшуді қолдайды. Де Ситтердің тұрақты нүктелерінің болуы ғаламның қазіргі ғарыштық бақылауларына сәйкес, ұзақ мерзімді тұрақты жеделдету фазасына өте алатынын көрсетеді. Алайда, бұл модельдің маңызды шектеулерінің бірі – оның фантомдық шекараны $\omega_{DE} = -1$ кесіп өте алмауы. Бұл шектеу күңгірт энергияның динамикалық күй теңдеуімен сипатталатын кейбір бақылау деректерімен үйлесімділікті шектейді. Дегенмен, стандартты Λ CDM моделінен айырмашылығы, ол болашақ астрофизикалық зерттеулерде тексерілетін динамиканың өзгертілген заңдарына әкеледі. Біз сондай-ақ m параметрінің мүмкін болатын ақырғы уақыт сингулярлықтарына әсерін қарастырдық және сингулярлықтың әртүрлі типтеріне, соның ішінде белгілі бір параметр мәндері үшін түрлі мүмкіндік беретінін көрсеттік. Сонымен қатар, біз тұрақты аттракторлардың болуын және кеш үдемелі ұлғаю режиміне тегіс өту мүмкіндігін растайтын фазалық портреттер мен сандық шешімдерді

талдадық. Бұл $f(R, T)$ моделін қосымша космологиялық тұрақты енгізуді қажет етпей-ақ күнгірт энергияны сипаттау үшін қолайлы етеді. Дегенмен, модельді түпкілікті сынау үшін кванттық ауытқуларды, тығыздықтың ауытқуларын және үлкен космологиялық зерттеулердің деректерімен салыстыруды қоса алғанда, одан әрі талдау қажет. Болашақ зерттеулер β -ның уақытқа тәуелділігін, мүмкін болатын кванттық әсерлерді және модификацияланған гравитацияның стандартты модель өрістерімен әрекеттесуін ескере отырып, қарастырылатын модельдер класын кеңейтуге бағытталуы мүмкін. β және m параметрлерін нақтылау үшін ғарыштық бақылаулар негізделуі керек, соның ішінде асқын жаңа жұлдыздар туралы деректер, бариондық акустикалық тербелістер және ғаламдық микротолқындық фон өлшемдері. Сонымен қатар, модельдің ірі масштабты құрылым түзілуіне және ғаламдық анизотропияға әсерін түсіну үшін толқындық тұрақсыздықтарды талдау маңызды. Гравитациялық толқын деректерін және ғарыштық микротолқынды фон сәулеленуін зерттеуді пайдалана отырып, модель болжамдарын эксперименталды түрде сынау мүмкіндігі қызығушылық тудырады. Осылайша, талдау $f(R, T)$ сияқты түрлендірілген гравитация теорияларының Әлемнің үдемелі ұлғаюын түсіндіру үшін маңызды әлеуеті бар екенін көрсетеді. Олар гравитацияның іргелі табиғаты туралы жаңа түсініктер береді және космологиядағы теориялық және эксперименттік зерттеулер үшін жаңа көкжиектерді ашады. Тағы бір маңызды аспект – бұл модель мен гравитацияның термодинамикалық интерпретациялары арасындағы ықтимал байланыс. Бірқатар зерттеулер гравитацияның энтропиялық шығу тегі болуы мүмкін екенін болжайды, ал $f(R, T)$ гравитациясы тереңірек статистикалық-механикалық принциптерден туындауы ықтимал. Осы аспектілерді зерттеу гравитациялық өзара әрекеттесулердің табиғатын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Әдебиеттер

- Aldrovandi R. and Pereira J.G. (2013) Teleparallel Gravity. — Springer, Dordrecht. — Vol. 173. (in Eng.).
- Bamba K., Nashed G.G.L., Hanafy W.El. and Ibraheem Sh.K. (2016) Bounce inflation in $f(T)$ Cosmology: A unified inflaton-quintessence field, *Physical Review D* — Vol. 94. — P. 083513. (in Eng.).
- Bengochea G.R. and Ferraro R. (2009) Dark torsion as the cosmic speed-up. — *Physical Review D*. — Vol. 79. — P. 124019. (in Eng.).
- Cho Y.M. (1976) Einstein Lagrangian as the Translational Yang-Mills Lagrangian. — *Physical Review D*. — Vol. 14. — P. 2521. (in Eng.).
- Faraoni V. and Capozziello S. (2011) Beyond Einstein Gravity. — Springer, Dordrecht. — Vol. 170. (in Eng.).
- Farrugia G. and Said J.L. (2016) Stability of the flat FLRW metric in $f(T)$ gravity. — *Physical Review D*. — Vol. 94. — P. 124054. (in Eng.).
- Felice A.D. and Tsujikawa S. (2010) $f(R)$ theories. — *Living Reviews in Relativity*. — Vol. 13. — P. 3. (in Eng.).
- Harko T., Lobo F.S.N., Nojiri S.I., Odintsov S.D. (2011) $f(R, T)$ gravity. — *Physical Review D*. — Vol. 84(2). — P. 024020. (in Eng.).
- Hayashi K. and Shirafuji T. (1979) New General Relativity. — *Physical Review D*. — Vol. 19. — P. 3524–3553. (in Eng.).



- Hayashi K. (1977) The Gauge Theory of the Translation Group and Underlying Geometry. — *Physics Letters B*. — Vol. 69. — P. 441–444. (in Eng.).
- Jarv L. and Toporensky A. (2016) General relativity as an attractor for scalar-torsion cosmology. — *Physical Review D*. — Vol. 93. — P. 024051. (in Eng.).
- Kršák M. and Saridakis E.N. (2016) The covariant formulation of $f(T)$ gravity. — *Classical and Quantum Gravity*. — Vol. 33. — P. 115009. (in Eng.).
- Li B., Sotiriou T.P and Barrow J.D. (2011) $f(T)$ gravity and local Lorentz invariance. — *Physical Review D*. — Vol. 83. — P. 064035. (in Eng.).
- Linder E.V. (2010) Einstein's Other Gravity and the Acceleration of the Universe. — *Physical Review D*. — Vol. 81. — P. 127301. (in Eng.).
- Maluf J.W. (2013) The teleparallel equivalent of general relativity. — *Annalen der Physik*. — Vol. 525. — P. 339–357. (in Eng.).
- Møller C. (1961) Conservation Laws and Absolute Parallelism in General Relativity. — *K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Skr.* — Vol. 1. — P. 1–50. (in Eng.).
- Ong Y.C., Izumi K., Nester J.M. and Chen P. (2013) Problems with Propagation and Time Evolution in $f(T)$ Gravity. — *Physical Review D*. — Vol. 88. — P. 024019. (in Eng.).
- Paliathanasis A., John D. Barrow and Leach P.G. (2016) Cosmological Solutions of $f(T)$ Gravity. — *Physical Review D*. — Vol. 94. — P. 023525. (in Eng.).
- Shabani H., Ziaie A.H. (2018) Bouncing cosmological solutions from $f(R, T)$ gravity. — *European Physical Journal C*. — Vol. 78(5). — P. 397. (in Eng.).
- Hohmann M., Järvi L., Ualikhanova U. (2017) Dynamical systems approach and generic properties of $f(T)$ cosmology. — *Physical Review D*. — Vol. 96. — P. 043508. (in Eng.).

© **Zh.S. Umbetova***, **U.U. Abdizhalilova**, 2025.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

E-mail: zhanumbetova@gmail.com

DYNAMICS OF THE EVOLUTION OF ANISOTROPIC COMPACT STARS IN $f(\mathcal{T})$ TELEPARALLEL GRAVITY

Umbetova Zhanbala — doctoral student of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: zhanumbetova@gmail.com Orcid: 0009-0008-4569-4655;

Abdizhalilova Ulzhalgas — undergraduate student of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,

E-mail: ulzhalgasusenkyzy@gmail.com Orcid: 0009-0005-7499-6685.

Abstract. This article investigates the dynamical evolution of anisotropic compact stars within the framework of $f(\mathcal{T})$ teleparallel gravity. To derive the field equations of the modified gravity $f(\mathcal{T})$ theory, the gravitational action is defined and varied with respect to the tetrad field. The foundation of teleparallel gravity is introduced through the tetrad torsion tensor. The field equations are obtained by substituting the tetrad field including the torsion scalar and its derivative. Next, the field equations of $f(\mathcal{T})$ teleparallel gravity were solved using physical ansatz for the anisotropy function. The effect of anisotropy by increasing the torsion parameter can serve as an explanation for stars with masses exceeding $2.5 M_{\odot}$. Thus, precise solutions have been obtained, including energy density, radial and tangential pressures, which investigate the physical quantities of the star. A graph was built with the exact solutions obtained, and a physical analysis was performed, which shows satisfaction with physical standards. The energy conditions that play a key role in verifying the physical feasibility of the proposed models of compact objects are considered. Graphs are constructed for zero, weak, strong, and dominant energy conditions, which show the distributions of energy density, radial, and tangential pressures depending on the radius. Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation describes the hydrostatic equilibrium in compact stars, reflecting the balance between the internal pressure of an object and gravitational attraction, preventing gravitational collapse. In the course of the work, graphs of stability of an anisotropic compact star depending on forces such as gravitational force, hydrostatic force, anisotropic and electric force are obtained and analyzed.

Keywords: Anisotropic compact stars, $f(\mathcal{T})$ teleparallel gravity, modified gravity theories, energy conditions, hydrostatic equilibrium

«This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № AP25794707)»

© Ж.С. Умбетова*, У.У. Абдижалилова, 2025.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

E-mail: zhanumbetova@gmail.com

$f(\mathcal{T})$ -ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬ ГРАВИТАЦИЯСЫНДАҒЫ АНИЗОТРОПТЫ КОМПАКТТЫ ЖҰЛДЫЗДАРДЫҢ ЭВОЛЮЦИЯСЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫ

Умбетова Жанбала Сундетовна — Жалпы және теориялық физика кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: zhanumbetova@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4569-4655;

Абдижалилова Улжалгас Усеновна — Жалпы және теориялық физика кафедрасының студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: ulzhalgasusenkyzy@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7499-6685.

Аннотация. Бұл мақалада $f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитациясының анизотропты компактты жұлдыздардың эволюциясының динамикасы зерттеледі. $f(\mathcal{T})$ - модификацияланған гравитация теориясында өріс теңдеулерін алу үшін гравитациялық әсер анықталуы қажет. Қозғалыс теңдеулерін құру үшін әсер тетрада өрісі бойынша түрлендіріледі. Телепараллель гравитацияның негізі ретінде тетрада мен ширату тензорының сипаттамасымен ұсынылды. Содан кейін $f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитация өрісінің теңдеулері тетрада өрісін ауыстырып, ширату скалярын және оның туындысын енгізу арқылы алынды. Әрі қарай, $f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитация өрісінің теңдеулері анизотропия функциясына арналған физикалық анзацтар арқылы шешілді. Анизотропияның әсері ширату параметрінің артуымен массасы $2.5 M_\odot$ асатын жұлдыздарды түсіндіруге мүмкіндік береді. Нәтижесінде жұлдыздың физикалық шамаларын зерттейтін энергия тығыздығын, радиалды және тангенциалды қысымды қамтитын нақты шешімдер алынды. Алынған нақты шешімдерді пайдалана отырып, график тұрғызылды және модельдің физикалық заңдылықтарға сәйкес келетіндігі көрсетілді. Компактты объектілердің ұсынылған модельдерінің физикалық жарамдылығын тексеруде маңызды рөл атқаратын энергетикалық шарттар қарастырылды. Нөлдік, әлсіз, күшті және басым энергетикалық шарттар үшін энергия тығыздығының, радиалды және тангенциалды қысымның радиусқа тәуелді таралуы графиктер арқылы көрсетілді. Толман-Оппенгеймер-Волков теңдеуі көмегімен компактты жұлдыздардағы гидростатикалық тепе-теңдік сипатталады, ол заттың ішкі қысымы мен гравитациялық тартылыс арасындағы тепе-теңдікті көрсетеді, гравитациялық коллапсты болдырмайды. Ұсынылған

модель телепараллель гравитация аясында физикалық шынайылықты қамтамасыз ете алатыны көрсетілді. Жұмысты орындау барысында гравитациялық күш, гидростатикалық күш, анизотроптық және электрлік күш сияқты күштерге тәуелді анизотропты компактты жұлдыздың тұрақтылық графиктері алынып, талданды.

Түйін сөздер: анизотропты компактты жұлдыздар, $f(\tau)$ - телепараллель гравитациясы, модификацияланған гравитация теориялары, энергетикалық шарттар, гидростатикалық тепе-теңдік

«Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (Грант № AP25794707)»

© Ж.С. Умбетова*, У.У. Абдижалилова, 2025.

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан.

E-mail: zhanumbetova@gmail.com

ДИНАМИКА ЭВОЛЮЦИИ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПАКТНЫХ ЗВЕЗД В $f(\tau)$ -ТЕЛЕПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ГРАВИТАЦИИ

Умбетова Жанбала Сундетовна — докторант кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: zhanumbetova@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4569-4655;

Абдижалилова Улжалгас Усеновна — студент кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: ulzhalgasusenkyzy@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7499-6685.

Аннотация. В данной статье исследуется динамика эволюции анизотропных компактных звезд в рамках $f(\tau)$ - телепараллельной гравитации. Для получения уравнения поля в модифицированной теории гравитации $f(\tau)$ необходимо определить гравитационное действие. Действие дифференцируется по полю тетрад для установления уравнений движения. Была представлена основа телепараллельной гравитации с описанием тетрады и тензора кручения. Затем уравнение поля $f(\tau)$ телепараллельной гравитации были выведены путем подстановки тетрадного поля и вставки скаляра кручения и его производной. Далее уравнения поля $f(\tau)$ телепараллельной гравитации были решены с использованием физических анзацев для функции анизотропии. Влияние анизотропии с помощью увеличения параметра кручения может служить объяснению звезд с массами, превышающими 2.5 $M_\odot$. Таким образом, получены точные решения включающие плотность энергии, радиальное и тангенциальное давление, которые исследуют физические величины звезды. С полученными точными решениями построен график, был сделан физический анализ, где показывают удовлетворение по физическим нормам. Рассмотрены энергетические условия, которые играют ключевую роль в проверке физической допустимости

предложенных моделей компактных объектов. Для нулевых, слабых, сильных и доминантных энергетических условий построены графики, где показаны распределения плотности энергии, радиального и тангенциального давления в зависимости от радиуса. С помощью уравнения Толмана-Оппенгеймера-Волкова описаны гидростатическое равновесие в компактных звездах, отражающий баланс между внутренним давлением объекта и гравитационным притяжением, препятствуя гравитационному коллапсу. В ходе работы получены и проанализированы графики устойчивости анизотропной компактной звезды зависящий от сил, таких как гравитационная сила, гидростатическая сила, анизотропная и электрическая сила.

Ключевые слова: анизотропные компактные звезды, $f(\mathcal{T})$ — телепараллельная гравитация, модифицированные теории гравитации, энергетические условия, гидростатическое равновесие

«Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP25794707)»

Кіріспе. Қазіргі заманғы гравитация теориясының негізі – Эйнштейн ұсынған жалпы салыстырмалық теориясы. Жалпы салыстырмалылық теориясы тек теориялық физиканың негізі ғана емес, сонымен қатар астрофизикада жұлдыздар эволюциясын, қара құрдымдар мен нейтронды жұлдыздардың қасиеттерін түсіндіруге мүмкіндік береді. Космологияда бұл теория ғаламның кеңеюін, күңгірт энергия мен үлкен жарылыстан кейінгі дамуын сипаттайды. Аспан механикасында орбиталық қозғалыстарды дәл анықтауға, гравитациялық толқындарда – үлкен массалы компоненттердің қосылуы нәтижесінде пайда болатын кеңістік-уақыттағы толқын тәрізді бұзылыстарды болжауға негіз болады. XX ғасырдың басында ғалымдар гравитацияны балама тәсілдермен сипаттауға тырысты, олардың бірі - ширату геометриясына негізделген телепараллель гравитация теориясы болды. Эйнштейннің гравитацияны қисықтық геометриясы негізінде сипаттауы сол кездегі жалғыз дамыған геометриялық құрылым – Риман геометриясы болғандықтан қажет болды (Misner, et al., 1973). Алайда, он жылдан аз уақыт өткенде, Эйнштейн гравитация тудыратын геометриялық деформацияны сипаттау үшін қисықтықтың орнына ширатуды пайдаланатын балама геометрияны қарастыруға мүмкіндік алды (Goenner, 2014). Бұл кезеңде және кейінгі ондаған жылдар бойы Роланд Вейценбек, Эли Картан, Лютер П. Айзенхарт, Герман Мюнц, Якоб Громмер және Корнелиус Ланчос сияқты ғалымдардың еңбектері бұл ізденісте шешуші рөл атқарды. Эйнштейннің бастапқы мақсаты - электромагнетизмді гравитацияны да қамтитын біртұтас теорияның құрамдас бөлігі ретінде сипаттау еді. Алайда, көп ұзамай ширатылған гравитациялық теориядағы қосымша еркіндік дәрежелері электромагнетизммен үйлеспейтіні белгілі болды, өйткені олар жергілікті Лоренц тобына тиесілі болды. Бұл жағдай Эйнштейн мен басқа зерттеушілерді бұл теориядан бас тартуға итермеледі (Bahamonde, et al., 2021).

Бірнеше қайта жаңғыру кезеңдерінен кейін телепараллель гравитацияның негіздері едәуір жетілдіріліп, түсінігі де айтарлықтай тереңдеді. Қазіргі кезде ол жалпы салыстырмалық теориясына балама ретінде телепараллель эквивалентін (TEGR) ұсына алады (Unzicker, et al., 2005). Бұл теория жалпы салыстырмалық теориясының барлық классикалық нәтижелерін дәл қайта шығаратынына кепілдік береді. Алайда, оның кванттық шегі тұрақтырақ сипатта болуы мүмкін, бұл кванттық гравитация теориясын құруға мүмкіндік ашады. Бұл гравитация формализмінің тағы бір қыры - оның сандық тиімділігі, себебі ол алгебралық жағынан ерекшеленеді (Aldrovandi, et al., 2012). Бұл әсіресе сандық салыстырмалық шеңберінде жүргізілетін модельдеулерде маңызды, мысалы, қара құрдымдар обсерваториялары үшін шаблондарды жасау сияқты процестер кейде бірнеше айға созылады. TEGR теориялық тұрғыдан да өте қызықты, өйткені ол гравитацияны қайтадан күш ретінде қарастырады, бұл оны электромагнетизмге жақындатады.

Соңғы онжылдықтарда жалпы салыстырмалық теориясында болғандай, TEGR теориясын модификациялаудың көптеген жолдары ұсынылды. $f(\mathcal{T})$ - гравитациясы телепараллель гравитацияның жалпыланған түрі болып табылады (De Andrade, et al., 2002; Bahamonde, et al., 2023), мұнда телепараллель гравитациясының лагранжианы болып табылатын ширату скаляры T оның $f(\mathcal{T})$ түріндегі функциясымен алмастырылады. Бұл функция ковариантты туындыны анықтау үшін жалпы салыстырмалық теориясында Леви-Чивита байланысының орнына Вейценбек байланысын қолданады (Turnbull, 1924). Телепараллель гравитациясы (De Andrade, et al., 2002) әрбір нүктеде жанамалы кеңістікте ортонормаланған базис жасайтын төрт векторлық өрістен (тетрада немесе вирбейндерден) тұрады. Бұл - жалпы салыстырмалық теориясындағы метрикалық тензордың рөлін атқаратын динамикалық шамалар. Вирбейндер параллель векторлық өрістер болып табылады, сондықтан бұл теория «телепараллель» деп аталады. Бұл теория шын мәнінде жалпы салыстырмалықпен эквивалентті және оған балама емес, оның қайта тұжырымдалған нұсқасы болып саналады, мұнда гравитация қисықтық арқылы емес, ширату арқылы сипатталады (Nashed, et al., 2022).

Телепараллель гравитация (Krssak, et al., 2019) және оның модификациялары қызықты әрі тың нәтижелер беруді жалғастыруда. Алайда, бұл теория шеңберінде астрофизика саласы - жеткіліксіз зерттелген және әдебиетте елеулі ілгерілеу байқалмайтын бағыттардың бірі. Қара құрдымдардың табиғаты мен олардың телепараллель гравитациядағы мінез-құлқын түсіну үшін әлі де көп жұмыс қажет. Сондай-ақ, астрофизикалық күңгірт материяның осы модификацияланған телепараллель гравитациялық теорияларда қандай рөл атқаратыны немесе мүлде рөл атқармайтыны әлі нақты белгісіз. Астрофизика саласында телепараллель гравитациядағы қара құрдымдар мәселесі $f(\mathcal{T})$ гравитациясындағы әлсіз өріс шеңберінде зерттеліп, қызықты шешімдер мен болжамдар алынған (Pfeifer, et al., 2021; Vamba, et al., 2011). Ал сфералық симметрия жағдайындағы бұзылыстар басқа мақалада қайта қарастырылып, мұндай шешімдерді алудың жалпылама

тәсілдері ұсынылған (Golovnev, et al., 2021). Сонымен қатар, тағы бір мақалада Шварцшильд қара құрдымының квазинормальды режимдері зерттелген (Maluf, et al., 2021). Бұл зерттеулер телепараллель гравитацияның астрофизикалық объектілерді сипаттаудағы әлеуетін арттырып отыр.

Компактты жұлдыздар басқа қарапайым жұлдыздармен салыстырғанда радиусы кіші және өте массивті болып келетін жұлдыздар қалдығы. Компактты жұлдыздардың бірнеше түрі бар, ақ ергежейлілер, нейтронды жұлдыздар және қара құрдымдар. Галактиканың құрамдас бөлігі болып табылатын бұл объектілерге қатысты күшті гравитацияда $f(\mathcal{T})$ – телепараллель гравитациясы шешімдер ала алады (Nashed, et al., 2020).

Релятивистік гравитацияның маңызды міндеттерінің бірі – ғаламның құрылымын және аспан денелерінің гравитациялық әсерін Эйнштейннің жалпы салыстырмалылық теориясы негізінде кеңістік-уақыттың қисықтығы арқылы сипаттау. Компактты жұлдыздар жағдайында гравитациялық өрістің күрделілігі олардың ішкі құрылымы және энергия таралуына әсер етеді. Кеңістік-уақыттың метрикалық қасиеттері арқылы алынған өріс теңдеулері компактты жұлдыздардың тұрақтылық, қысым және энергия тығыздығы сияқты динамикалық сипаттамаларын зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде жұлдыздың эволюциясы мен оның физикалық жарамдылығын бағалауға мүмкіндік береді.

$f(\mathcal{T})$ - гравитациясы аясында қарастырылатын анизотропты компактты жұлдыздар конфигурациясы теорияның кеңейтілген мүмкіндіктерін көрсетеді. Мұндай жүйелерді зерттеу жұлдыз ішіндегі құрылымдық ерекшеліктер мен энергия тығыздығының таралуын сипаттауға мүмкіндік береді. Осыған байланысты, ұсынылған жұмыста $f(\mathcal{T})$ - гравитациясында анизотропты компактты жұлдыздардың теңдеулерін шешу арқылы олардың тұрақтылығы мен физикалық сипаттамаларын талдаймыз.

Материалдар мен негізгі әдістер. $f(\mathcal{T})$ модификацияланған гравитация теориясының қозғалыс теңдеулерін алу үшін гравитациялық әсерді анықтау қажет. Телепараллельді гравитация теориясында әсер келесідей жазылады (Maurya, et al., 2024):

$$S = \int d^4x e \left[\frac{1}{16\pi} f(\mathcal{T}) + L_{Matter} + L_E \right]. \quad (1)$$

Бұл теңдеудегі $f(\mathcal{T})$ - еркін таңдалатын функция, ол гравитациялық әсердің қалай түрленетіні мен модификацияланған гравитация теориясының формаларында қандай динамикалық қасиеттері бар екенін анықтайды.

$e = \det(e^\mu_\nu)$ - кеңістік-уақыттағы тетрадалық өрістің детерминанты, L_{Matter} - материялық өрістің Лагранжиан тығыздығы және L_E - электромагниттік өрістің Лагранжианы ретінде қарастырылады.

Қозғалыс теңдеулерін орнату үшін (1) теңдеуді тетрадалық өріс бойынша дифференциалданады:

$$S_{\mu}^{va} \partial_a T f_{\tau\tau} + \left[e^{-1} e_{\mu}^i \partial_a (e e_n^{\rho} S_{\mu}^{va}) + T_{\lambda\mu}^{\rho} S_{\rho}^{v\lambda} \right] f_{\tau} + \frac{1}{4} \delta_{\mu}^{\nu} f = 4\pi (\tilde{T}_{\mu}^{\rho} + E_{\mu}^{\rho}). \quad (2)$$

Анизотропты материяны болжай отырып, энергия-импульс тензоры келесі түрде болады:

$$T_{\mu}^{\rho} = (P_t + \rho) H_{\mu} H^{\rho} - P_t \delta_{\mu}^{\rho} + (P_r - P_t) N_{\mu} N^{\rho} \quad (3)$$

Гравитациялық өрістің қозғалыс теңдеулері $f(\tau)$ - телепараллель гравитация теориясында ковариантты туынды әдісін қолданумен алынады және өрістің қозғалыс теңдеуінің түрі:

$$16\pi \left[G_{\mu\nu} f_{\tau} + S_{\mu\nu}^{\rho} \nabla_{\rho} T f_{\tau\tau} + \frac{\tau}{2} \left(\frac{f}{\tau} - f_{\tau} \right) g_{\mu\nu} \right] = (E_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}) \quad (4)$$

Сфералық - симметриялық және стационарлы сұйықтық таралуының ішкі құрылымына назар аударылады және келесі түрде сипатталады:

$$ds^2 = e^{A(r)} dt^2 - e^{B(r)} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\Omega^2 \quad (5)$$

мұнда $A(r)$ және $B(r)$ тек радиалды координата r - ге тәуелді екі гравитациялық потенциалды білдіреді. Сондай-ақ анизотропты жүйе үшін энергия тензорының компоненттері келесідей шығарылады:

$$T_{\mu}^{\nu} = \text{diag}(\rho, -P_r, -P_t, -P_t) \quad (6)$$

$$T_{\mu}^{\nu} = 0, \text{ егер } \mu \neq \nu. \quad (7)$$

Электр өрісінің күші E мен $B(r)$ және $A(r)$ потенциалдық функциялар арасындағы байланыс мына түрде өрнектеледі:

$$F^{01} = -F^{10} = E e^{-(B+A)/2}. \quad (8)$$

r радиалды координаталарымен сфералық құрылымда болатын электр зарядын $q(r)$ келесі түрде анықталынады және ол релятивистік Гаусс заңы мен сәйкес электр өрісі E арқылы беріледі:

$$q(r) = \frac{1}{2} \int e^{\lambda/2} \sigma r^2 dr = r^2 \sqrt{-F^{10} F_{10}}, \quad (9)$$

$$E^2 = -F^{10} F_{10} = \frac{q^2}{r^4}. \quad (10)$$

Екінші жағынан, (3) теңдеуінде ұзындық элементі үшін тетрадалық матрица түрде жазылады:

$$[e_\mu^\nu] = \text{diag}[e^{A/2}, e^{B/2}, r, r \sin \theta], \quad (11)$$

бұл тензордың анықтаушының өрнектелуі:

$$e = \det[e_\nu^\mu] = r^2 e^{A/2} e^{B/2} \sin \theta. \quad (12)$$

Радиалды координата r контекстінде ширату скаляры, оның туындысымен бірге анықталады:

$$T(r) = \frac{2}{e^{B(r)}} \left(\frac{A'(r)}{r} + \frac{1}{r^2} \right). \quad (13)$$

$f(\tau)$ - телепараллель гравитациясының өріс теңдеулері, бұрын берілген тетрадалық өрісті (11) - теңдеуден және ширату скаляры мен оның туындысын (2) - теңдеуге қою арқылы табылады:

$$8\pi\rho + \frac{q^2}{r^4} = \frac{\partial f}{\partial \tau} \left[\frac{1}{r^2} + \frac{1}{r} e^{-B} (B' + A') - \tau(r) \right] + \frac{f(\tau)}{2}, \quad (14)$$

$$8\pi P_r - \frac{q^2}{r^4} = \frac{\partial f}{\partial \tau} \left[-\frac{1}{r^2} + \tau(r) \right] - \frac{f(\tau)}{2}, \quad (15)$$

$$8\pi P_t + \frac{q^2}{r^4} = \frac{\partial f}{\partial \tau} \left[e^{-B} \left(\frac{A''}{2} - (B' - A') \left(\frac{1}{2r} + \frac{A'}{4} \right) \right) + \frac{\tau(r)}{2} \right] - \frac{f(\tau)}{2}. \quad (16)$$

Нәтижелер

$f(\tau)$ қарапайым функционалды модель алу үшін келесідей түрі қолданылады:

$$f(\tau) = \alpha \tau e^\beta \quad (17)$$

мұнда, α және β - тұрақтылар. Көрсетілген тұрақтылар өріс теңдеуін шешу барысында қолданылады. Өріс теңдеулеріне $f(\mathcal{T})$ моделін енгізу арқылы жаңа түрі алынады:

$$\rho = \frac{1}{16\pi^2} [2\alpha(rB' - 1 + e^\beta) + r^2\beta] \quad (18)$$

$$P_r = \frac{1}{16\pi^2} [-2\alpha(rA' + 1 - e^\beta) + r^2\beta] \quad (19)$$

$$P_t = \frac{1}{16\pi} \left[A''\alpha - 2\alpha(B' - A') \left(\frac{1}{2r} + \frac{A'}{4} \right) - \beta \right]. \quad (20)$$

Бұл - $f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитациясындағы энергия тығыздығы, радиалды және тангенциалды қысым теңдеулері.

$f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитациясында жаңа нақты шешім алу
 $f \mathcal{T}$ қарапайым моделіне сәйкес толық шешім алу үшін, қысым анизотропиясының теңдеуі алынады:

$$\alpha(2Ar^2 - Br'(A'r + 2) + A'r^2 - 2A'r - 4 + 4e^b) = \frac{8q^2}{r^2} = 32\pi r^2 \Delta. \quad (21)$$

Белгісіздердің қолайлы түрі қарастырылады

$$A = br^3 + c, \quad (22)$$

$$B = ar^3, \quad (23)$$

сонымен қатар $r \rightarrow 0$ онда $e^B = 1$. Қысым анизотропиясына (22)-(23) теңдеулері қойылғанда

$$\alpha[12b - 3a(2 + 3br^2) - 6b + 6b^2r^4] = \frac{4}{r} \left(8\pi r \Delta + \frac{2q^2}{r^4} \right). \quad (24)$$

Содан анизотропия коэффициенті анықталады

$$\Delta = \frac{1}{8\pi} \left[-3r^2\alpha(a - b) \left(\frac{1}{2r} + \frac{3b}{4}r^2 \right) - \frac{2q^2}{r^4} \right]. \quad (25)$$

Қысым анизотропиясы - анизотропты компактты жұлдыздар мен зарядталған астрофизикалық жүйелердің құрылымын зерттеуге мүмкіндік береді.

$$8\pi\rho = 3a r \alpha + \frac{\gamma}{2} - \frac{q^2}{r^4}, \quad (26)$$

$$8\pi P_r = 3b r \alpha - \frac{\gamma}{2} + \frac{q^2}{r^4}, \quad (27)$$

$$8\pi P_t = 3r\alpha \left[b - r(a-b) \left(\frac{1}{2r} + \frac{3br^2}{4} \right) \right] - \frac{\gamma}{2} - \frac{q^2}{r^4}. \quad (28)$$

Энергетикалық шарттар

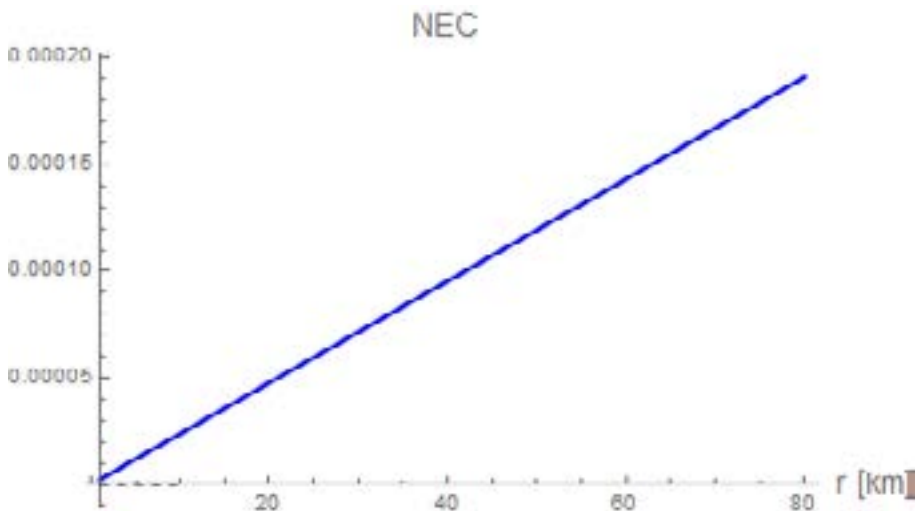
Энергетикалық шарттар компактты объектілер моделінің физикалық рұқсат етілуін тексеруде маңызды рөл ойнайды. Жалпы салыстырмалық теориясында материяның классикалық емес әрекетін жоққа шығару үшін, энергия-импульс тензорына қойылатын шектеулер теңсіздіктер түрінде беріледі. Энергетикалық шарттардың қарастырылатын түрлері.

$$\text{NEC: } \rho + P_r \geq 0, \quad (29)$$

$$\text{WEC: } \rho \geq 0, \rho + P_i \geq 0, \quad (30)$$

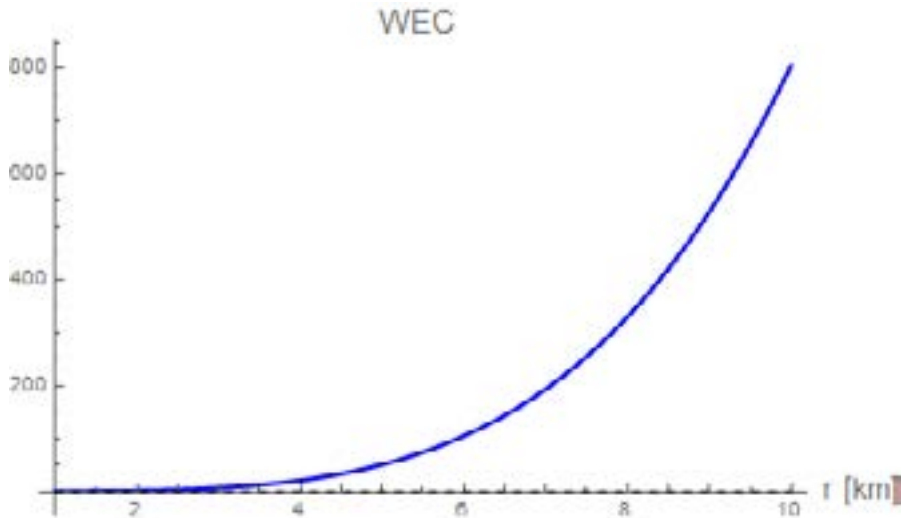
$$\text{SEC: } \rho + \sum P_i \geq 0, \quad (31)$$

$$\text{DEC: } \rho \geq 0, \rho \geq P_i. \quad (32)$$



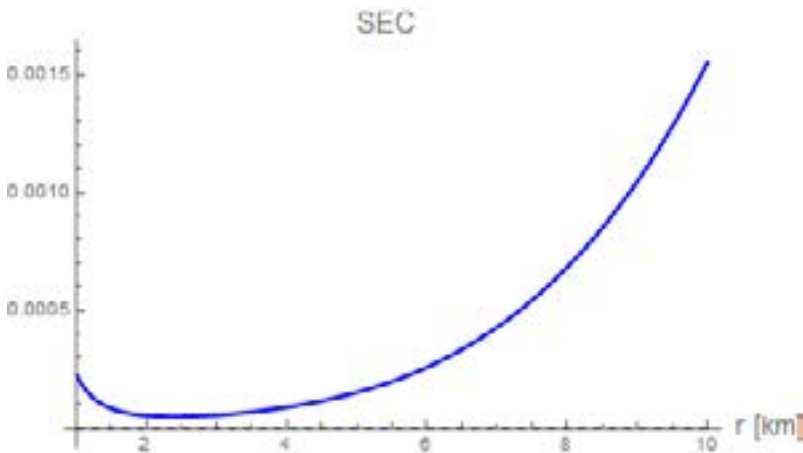
Сурет 1 – NEC шарты

Сурет 1-де көрсетілгендей NEC нөлдік энергетикалық шарты компактты жұлдыз бойымен толық орындалады, $\rho + P_r \geq 0$ яғни энергия тығыздығы мен радиалды қысымның қосындысы оң мәнде болу қажет. Радиустың өсуімен NEC мәні өсіп отырады. Бұл модельде бұзылу болмағандықтан физикалық түрде тұрақты екендігінің нақты көрінісі.



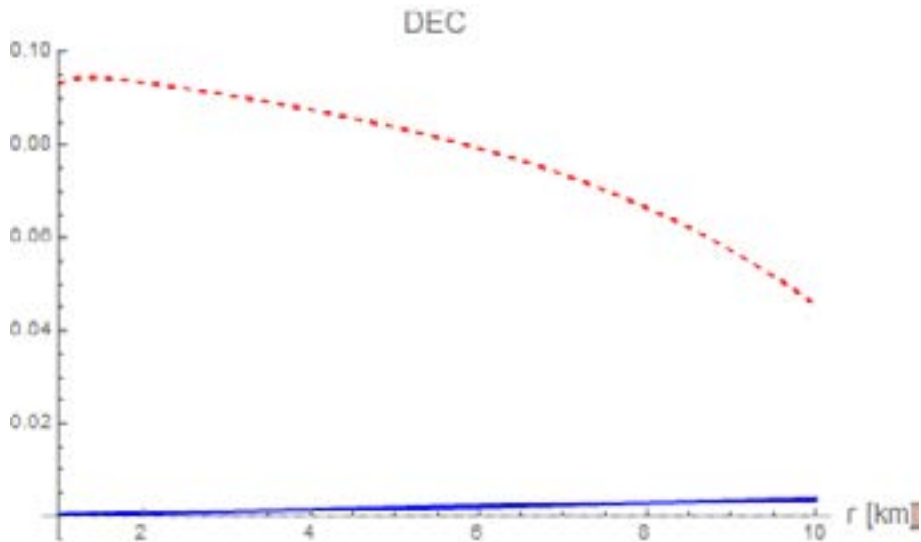
Сурет 2 – WEC шарты

WEC шарты бойынша энергия тығыздығы және энергия тығыздығы мен қысымның қосындысы кез-келген бағытта оң болуы қажет. WEC әлсіз энергетикалық шарты NEC-тің күшейтілген нұсқасы болып табылады. Сурет 2-де берілген модель бойынша WEC шарты толығымен орындалады. Берілген шамада радиус өскен сайын WEC мәнінің өсуі байқалады.



Сурет 3 – SEC шарты

SEC шарты $\rho + P_r + 2P_t \geq 0$ бойынша сурет 3-те көрсетілгендей график тұрғызылған. Радиустың өсуімен қисықтың айқын бейнесі көрсетіледі. Күшті энергетикалық шарттың оң мәнге ие болуы, компактты объектінің физикалық шынайылығы және барлық аралықта орындалатынын береді.



Сурет 4 – DEC шарты. Қызыл пунктирлі сызық $\rho \geq |P_r|$, көк сызық $\rho \geq |P_t|$.

Зерттелетін модель бойынша сурет 4-тегі графикте екі функцияда оң мәнде және берілген радиуста DEC шарты орындалады. DEC – басым энергетикалық шарт, барлық бағытта материяның энергия тығыздығы қысымдардың модулінен артық немесе тең болуын талап етеді. Компактты жұлдыздардың ішкі құрылымын зерттегенде гравитациялық модельдің жарамдылығын бағалайды.

Гидростатикалық тепе-теңдік

Толман-Оппенгеймер-Волков теңдеуі – жалпы салыстырмалылық теориясында гравитациялық тұрақтылықта болатын, идеал сұйықтан құралған статикалық, сфералық-симметриялық дененің құрылымын сипаттайды. Анизотропия немесе модификацияланған гравитациясы бар модельдерде, соның ішінде $f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитация теориясында Толман-Оппенгеймер-Волков теңдеуі анизотроптық қысым мен заряд сияқты шамалармен қамтылған қосымша күштермен жалпыланады:

$$\frac{dP_r}{dr} = -\frac{A'}{2}(P_r + \rho) + \frac{q}{4\pi r^4} \frac{dq}{dr} + \frac{2\Delta}{r}. \quad (29)$$

Бұл теңдеу гравитациялық, гидростатикалық, анизотроптық және электр күштер компоненттерімен жазылады:

$$\begin{aligned}
 F_g &= -\frac{A'}{2}(P_r + \rho), \\
 F_h &= \frac{dP_r}{dr}, \\
 F_a &= \frac{2\Delta}{r}, \\
 F_e &= \frac{q}{4\pi r^4} \frac{dq}{dr}.
 \end{aligned} \tag{30}$$

Берілген модель үшін нақты теңдеулері

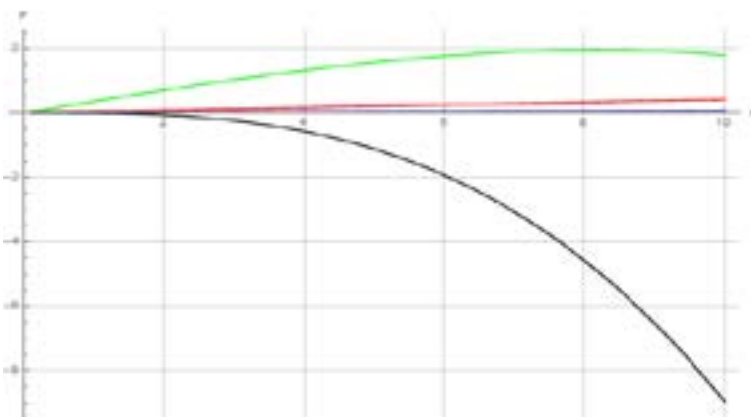
$$F_g = -\frac{9\alpha br^3}{16\pi}(b+a), \tag{31}$$

$$F_h = \frac{\alpha}{8\pi}[4q_0 r - 3b], \tag{32}$$

$$F_a = -\frac{1}{4\pi}\left[3r\alpha(a-b)\left(\frac{1}{2r} + \frac{3b}{4}r^2\right) - \frac{2q^2}{r^3}\right], \tag{33}$$

$$F_e = \frac{3r}{4\pi}\sqrt{\alpha q_0}. \tag{34}$$

Талқылау. Толман-Оппенгеймер-Волков теңдеуі бойынша берілген күштердің қосындысы нөлге тең болған жағдайда гидростатикалық тепе-теңдік орындалады. Күштер жүйенің параметрлеріне, соның ішінде α, β - тұрақтыларының және заряд тығыздығының шамаларына тәуелді өзгереді.



Сурет 5 - $\alpha = 0.01$, $q = 0.3$ тұрақты мәндерінде F_g (қара), F_h (көк), F_a (жасыл), F_e (қызыл) өзгерісі.

Гравитациялық күш компактты жұлдыздарға қарай, яғни сырттан ішкі бөлікке қарай бағытталады. Қалған күштер жұлдыздың ішінде оң мәнде және итермелейтін, іштен сыртқа бағытталған күш болады, Сурет 5 - те қара сызықпен берілген F_g гравитациялық күш орталықтан алыстаған сайын шамасы азаяды, себебі гравитациялық әсер орталықтан алыстаған сайын әлсіреп кетеді. Жалпы, гравитациялық күш жұлдыздың ішіндегі массаға тартылуын сипаттайды. Көк сызықпен берілген F_h гидростатикалық күш қысымның радиус бойымен қалай таралатынын сипаттайды. Берілген жағдайда біртекті таралу байқалып тұр. Келесі қызыл түсті F_a анизотроптық күш компактты объектінің ішкі анизотропиялық құрылымын сипаттайды. Құрылымында әртүрлі бағыттарда түрлі қасиеттер көрсететіндігін анықтап береді және оң немесе теріс мәндерге ие болуы мүмкін. α параметріне тікелей тәуелді, қарастырылған модельде оң мәнге ие болып тұр. Соңғы жасыл сызық F_e электр күші зарядталған жұлдыз модельдерінде маңызды, гравитациялық қысылуға қарсы тұрады. Бұл модельде оң мәнде және радиус бойымен аздап өсуін көрсетеді.

Берілген күштердің өзара әрекеті компактты жұлдыздардың ішкі тұрақтылығы мен құрылымын анықтайды. Анизотропия мен зарядтың болуы Толман-Оппенгеймер-Волков теңдеуі арқылы компактты жұлдыздардың физикалық сипатын түсінуге мүмкіндік берді. Бұл күштер гравитациялық теориялар үшін өзекті болып табылады.

Қорытынды. Жұмыс барысында $f(\mathcal{T})$ - телепараллель гравитациясы аясында жаңа функционалды модель енгізіліп, оның негізінде анизотропты және зарядталған компактты жұлдыздардың өріс теңдеулерінің нақты шешімі алынды. Гравитациялық өріс теңдеулерінің дәл шешімін алу үшін метрикалық потенциал, анизотропия, заряд функциясы сияқты бірқатар функцияларды қамтитын анзац құрылды. Олар бейсызық түрде болып, радиалды координатамен ширату скаляры физикалық шарттарға сәйкестігі қарастырылды. Жаңа модель негізінде энергия тығыздығы, радиалды және тангенциалды қысым сияқты физикалық шамалар алынды. Тангенциал және радиалды қысым негізінде анизотропия функциясы анықталды. Берілген модель бойынша көп шамалар α, β - тұрақтыларына тікелей тәуелді. Компактты жұлдыздарда бұл параметрлердің аз ғана өсуі немесе кемуі - тығыздық пен қысымға әсер етіп, заряд пен анизотропияны күшейтіп немесе азайтып отырады.

Берілген модельдің жарамдылығын тексеру үшін энергетикалық шарттар және гидростатикалық тепе-теңдік қарастырылды. Жұлдыздың ішкі құрылымының барлық аймағында энергетикалық шарттар орындалса онда физикалық жарамды нысан болып есептеледі. Тұрақты компактты жұлдыздар бағытында энергетикалық шарттар шешуші рөлде болады. Энергия тығыздығы, радиалды және тангенциалды қысымдардың әсерлесуінен негізделген нөлдік энергетикалық шарттары (NEC), әлсіз энергетикалық шарттары (WEC), күшті энергетикалық шарттары (SEC), басым энергетикалық шарттары (DEC) анықталды. Барлық берілген энергетикалық шарттарға байланысты графиктері

тұрғызылды. Ұсынылған мәндер бойынша энергетикалық шарттар толығымен орындалатындығы көрінді. Гидростатикалық тепе-теңдіктің тұрақтылығы Толман-Оппенгеймер-Волков теңдеуі көмегімен анықталды. Бұл теңдеу гравитациялық, гидростатикалық, анизотроптық және электрлік күштерден құралады. Берілген күштердің жиынтығы тепе-теңдіктің тұрақтылығын анықтайды. Гидростатикалық тепе-теңдікке байланысты график тұрғызылды. Берілген модельге сай гравитациялық күш ішке бағытталғаны, қалған гидростатикалық, анизотроптық және электрлік күштер сыртқа бағытталғаны ретінде нәтиже берді.

Ұсынылған жаңа модель $f(\tau)$ - телепараллель гравитация теориясындағы тұрақты конфигурациялардың соның ішінде энергетикалық шарттарда және гидростатикалық тепе-теңдікте толығымен орындалып тұрғаны көрініп тұр. Жұмыста орындалған зерттеулердің барлығы жаңа заңдылықтарды анықтауға және компактты жұлдыздардың физикалық сипаттамалары туралы идеяларды кеңейтуге мүмкіндік береді. Зерттеу бойынша алынған өріс теңдеуі мен оның шешімдері - $f(\tau)$ - телепараллель гравитация теориясындағы компактты жұлдыздардың тұрақты конфигурацияларының болу мүмкіндігінің дәлелі.

References

- Aldrovandi R., & Pereira J. G. (2012) Teleparallel gravity: an introduction. Springer Science & Business Media. — T. 173. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5143-9> (in English)
- Bahamonde S., & Said J. L. (2021) Teleparallel Gravity: Foundations and Observational Constraints. Universe, — 7(8), 269. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe7080269> (in English)
- Bahamonde S., Dialektopoulos K.F., Di Valentin, E., Escamilla-Rivera C., Farrugia G., Gakis V., Hendry M., Hohmann M., Levi Said J., & Mifsud J. (2023) Teleparallel gravity: from theory to cosmology. Reports on Progress in Physics, — 86(2), 026901. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac9cef> (in English)
- Bamba K., Geng C.Q., Lee C.C., & Luo L.W. (2011) Equation of state for dark energy in $f(T)$ gravity. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, — 2011(01), 021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2011/01/021> (in English)
- De Andrade V.C., Guillen L.C. T., & Pereira J.G. (2002) Teleparallel gravity: an overview. In The Ninth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation and Relativistic Field Theories (In 3 Volumes). — P. 1022-1023. DOI: http://dx.doi.org/10.1142/9789812777386_0144 (in English)
- Goenner H.F. (2014). On the history of unified field theories. Part II. (ca. 1930–ca. 1965). Living reviews in relativity, 17, 1-241. DOI: <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-5> (in English)
- Golovnev A., & Guzmán M. J. (2021) Approaches to spherically symmetric solutions in $f(T)$ gravity. Universe, — 7(5). — P. 121. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe7050121> (in English)
- Krssak M., Van Den Hoogen R.J., Pereira J.G., Böhmer C.G., & Coley A. (2019). Teleparallel theories of gravity: illuminating a fully invariant approach. Classical and Quantum Gravity, — 36(18), 183001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab2e1f> (in English)
- Maluf J.W., Ulhoa S., Carneiro F.L., & Castello-Branco, K.H. (2021) Perturbations of the gravitational energy in the TEGR: quasinormal modes of the Schwarzschild black hole. Universe, 7(4), 100. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe7040100> (in English)
- Maurya S.K., Errehymy A., Daoud M., Myrzakulov K., & Umbetova Z. (2024) Effect of torsion and electric charge parameters on the configuration of anisotropic compact stars in $f(T)$ gravity. Physics of the Dark Universe, — 46, 101586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dark.2024.101586> (in English)
- Misner C.W., Thorne K.S., & Wheeler J.A. (1973) Gravitation. Macmillan. (in English)



Nashed G.G., & Bamba K. (2022) Realistic compact stars in conformal teleparallel gravity. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, — 2022(10), 103E01. DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac121> (in English)

Nashed G.G., & Capozziello S. (2020) Stable and self-consistent compact star models in teleparallel gravity. *The European Physical Journal — C*, 80, — 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08551-1> (in English)

Pfeifer C., & Schuster S. (2021) Static spherically symmetric black holes in weak f(T)-gravity. — *Universe*, — 7(5), 153. DOI: <https://doi.org/10.3390/universe7050153> (in English)

Turnbull H.W. (1924) *Invarianten-Theorie*. By Weitzenböck. Pp. 408. Paper cover, f. 5; cloth, f. 6 (10s., 12s.). — P. 1923. (Noordhoff, Groningen.) *The Mathematical Gazette*, 12 (170). — C. 122-124. DOI: <https://doi.org/10.2307/3604670> (in English)

Unzicker A., & Case T. (2005) Translation of Einstein's attempt of a unified field theory with teleparallelism. *arXiv preprint physics/0503046* DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0503046> (in English)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.348>

UDC: 523.62-726; 523.62-65; 523.62

IRSTI: 41.21.25; 89.15.35; 89.51.33

© **L.I. Shestakova, R.R. Spassiyuk***, 2025.

«Fesenkov Astrophysical Institute» LLP, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: spassiyuk@fai.kz

DESTRUCTION OF SMALL BODIES COMPOSED OF SILICATES BY THERMAL STRESSES. THERMAL EMISSION OF DISRUPTION PRODUCTS

Shestakova Lyubov I. — Fesenkov Astrophysical Institute, Ph.D. in Physics and Mathematics, head of the Laboratory of Physics of Stars and Nebulae, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: shest1952@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2223-5332>;

Spassiyuk Ruslan — Fesenkov Astrophysical Institute, bachelor in Nuclear physics, Engineer of the Laboratory of Physics of Stars and Nebulae, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: spassiyuk@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7780-2533>.

Abstract. This study investigates the influence of thermal stresses on the destruction of small rocky bodies — meteoroids and asteroids—during their approach to the Sun. Based on an analytical solution of the heat diffusion equation, temperature profiles and thermally induced mechanical stresses are computed for various silicate materials, including basalt, carbonaceous and ordinary chondrites, as well as terrestrial rocks and minerals. It is shown that the degree of heating and the character of thermal stresses depend on the size of the body: meteoroids smaller than 10 cm are heated uniformly, while bodies larger than 10 m experience heating confined to near-surface layers. Calculations are performed for bodies moving from 86 AU (outer Solar System) to 0.03 AU (7 solar radii). Critical disruption distances are determined as follows: basaltic bodies between 0.03 and 2.5 AU (Sun to Main Asteroid Belt), carbonaceous chondrites up to 2 AU (within Mars's orbit), ordinary chondrites up to 1 AU (within Earth's orbit), while rocks and minerals remain stable up to ~1000 K (about 0.17–0.2 AU, between the Sun and Mercury). Small bodies (up to 10 m) may undergo thermal fragmentation between Mars and Mercury, forming dust envelopes. Larger bodies can also become thermally destabilized: carbonaceous chondrites (~40 m) and basalts (~80 m) near Earth's orbit, ordinary chondrites (10–50 m) between Venus and Earth. Very large bodies (over 100 m) disintegrate closer to the Sun, producing dust clouds observable in optical and infrared wavelengths. The primary sources of these bodies are the Main Asteroid Belt and the Kuiper Belt. This work emphasizes the significance of thermal processes in the evolution and observational features of small Solar System bodies.

Keywords: small bodies, asteroids, meteoroids, silicates, thermal stresses, thermal emission

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (programme no. BR21881880)

© Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк *, 2025.

«В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЖШС, Алматы, Қазақстан.
E-mail: spassyuk@fai.kz

СИЛИКАТТЫ ҚҰРАМДЫ ШАҒЫН ДЕНЕЛЕРДІҢ ТЕРМИЯЛЫҚ КЕРНЕУЛЕРДЕН БҰЗЫЛУЫ. БӨЛШЕКТЕНУ НӘТИЖЕСІНДЕ ПАЙДА БОЛАТЫН ӨНІМДЕРДІҢ ЖЫЛУЛЫҚ ЭМИССИЯСЫ

Л.И. Шестакова — Фесенков атындағы Астрофизика институты, Физика-математика ғылымдарының PhD докторы, Жұлдыздар мен тұмандықтар физикасы зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан,

E-mail: shest1952@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2223-5332;

Спасюк Руслан — Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Ядролық физика бакалавры, Жұлдыздар мен тұмандықтар физикасы зертханасының инженері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: spassyuk@fai.kz, ORCID: 0000-0002-7780-2533.

Аннотация. Бұл жұмыста Күнге жақындаған кезде шағын тасты денелердің-метеороидтар мен астероидтардың – термиялық кернеулердің әсерінен бұзылу үдерісі зерттеледі. Жылу диффузиясы теңдеуінің аналитикалық шешімі негізінде түрлі силикатты материалдарда – базальтта, көміртекті және кәдімгі хондриттерде, сондай-ақ тау жыныстары мен минералдарда-температуралық градиенттерден туындайтын температуралық профильдер мен механикалық кернеулер есептелді. Жылыну дәрежесі мен термиялық кернеулердің сипаты дене өлшеміне байланысты екені анықталды: диаметрі 10 см-ден кіші метеороидтар біркелкі жылынады, ал 10 м-ден үлкен денелерде жылу тек беткі қабаттармен шектеледі. Есептеулер Күн жүйесінің сыртқы аймағынан (86 а.б.) Күнге өте жақын арақашықтыққа дейін (0.03 а.б., ($\approx 7R_{\odot}$)) козғалып келе жатқан денелер үшін жүргізілді. Бұзылу басталатын критикалық қашықтықтар анықталды: базальтты денелер - 0.03–2.5 а.б. аралығында (Күн мен Негізгі астероидтар белдеуі арасында), көміртекті хондриттер - 2 а.б.-ге дейін (Марс орбитасына дейін), кәдімгі хондриттер - 1 а.б.-ге дейін (Жер орбитасына дейін), ал тау жыныстары мен минералдар ~1000 К температураға дейін (шамамен 0.17-0.2 а.б., Күн мен Меркурий арасындағы аймақ) тұрақты болып қалады. Шағын денелер (диаметрі 10 м-ге дейін) Марс пен Меркурий орбиталары арасында бұзылып, шаң қабаттарын түзуі мүмкін. Үлкенірек денелер де термиялық тұрақсыздануға ұшырайды: көміртекті хондриттер (~40 м) мен базальттар (~80 м) Жер орбитасы маңында, кәдімгі хондриттер (10–50 м)-Шолпан мен Жер орбиталары арасында бұзылады. Ал аса ірі денелер (100 м-ден үлкен) Күнге жақын маңда бұзылып,

оптикалық және инфрақызыл диапазонда бақыланатын шаңтүзгіш бұлттар түзеді. Бұл денелердің негізгі көздері. Негізгі астероидтар белдеуі мен Койпер белдеуі. Бұл жұмыс Күн жүйесінің шағын денелерінің эволюциясы мен бақылануында термиялық үдерістердің маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: кіші денелер, астероидтер, метеороидтер, силикаттар, жылулық кернеулер, жылу эмиссиясы

© Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк *, 2025.

ТОО «Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова», Алматы, Казахстан.

E-mail: spassyuk@fai.kz

РАЗРУШЕНИЕ МАЛЫХ СИЛИКАТНЫХ ТЕЛ ТЕПЛОВЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ. ТЕПЛОВАЯ ЭМИССИЯ ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ

Шестакова Любовь И. — Астрофизический институт им. Фесенкова, доктор физико-математических наук (Ph.D.), заведующая лабораторией физики звезд и туманностей, Алматы, Казахстан,

E-mail: shest1952@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2223-5332;

Спасюк Руслан — Астрофизический институт им. Фесенкова, бакалавр по ядерной физике, инженер лаборатории физики звезд и туманностей, Алматы, Казахстан,

E-mail: spassyuk@fai.kz, ORCID: 0000-0002-7780-2533;

Аннотация. В работе исследуется влияние тепловых напряжений на разрушение малых каменных тел – метеороидов и астероидов — при их сближении с Солнцем. На основе аналитического решения уравнения тепловой диффузии рассчитаны температурные профили и механические напряжения, возникающие из-за температурных градиентов в различных силикатных материалах: базальте, углеродистых и обычных хондритах, а также горных породах и минералах. Установлено, что степень нагрева и характер термических напряжений зависят от размера тел: метеороиды менее 10 см прогреваются равномерно, а у тел более 10 м нагрев ограничен приповерхностными слоями. Расчёты выполнены для тел, движущихся от расстояния 86 а.е. (внешняя Солнечная система) до 0.03 а.е. (7 радиусов Солнца). Определены критические расстояния разрушения: базальтовые тела – от 0.03 до 2.5 а.е. (Солнце – Главный пояс астероидов), углеродистые хондриты — до 2 а.е. (до орбиты Марса), обычные хондриты — до 1 а.е. (до орбиты Земли), горные породы и минералы устойчивы до температур порядка 1000 К (≈ 0.17 – 0.2 а.е., между Солнцем и Меркурием). Малые тела (до 10 м) могут разрушаться в зоне между орбитами Марса и Меркурия, образуя пылевые оболочки. Более крупные тела также термически дестабилизируются: углеродистые хондриты (~ 40 м) и базальты (~ 80 м) — вблизи орбиты Земли, обычные хондриты (10–50 м) — между орбитами Венеры и Земли. Крупные тела (более 100 м) разрушаются ближе к Солнцу, создавая пылевые облака, которые можно наблюдать в оптическом и инфракрасном диапазонах. Основными источниками тел являются Главный пояс астероидов и пояс Койпера. Работа

подчёркивает значимость термических процессов в эволюции и наблюдаемости малых тел Солнечной системы.

Ключевые слова: малые тела, астероиды, метеороиды, силикаты, тепловые напряжения, тепловая эмиссия

Introduction. To date, the origin regions of most meteorites and kilometer-sized near-Earth objects (NEOs), including some minor classes, have been identified (Brož et al., 2024). The authors of that study examined 38 distinct asteroid families—both young and old—and determined their contributions to the populations of near-Earth objects ranging from meters to kilometers in size using collisional and orbital models. Brož et al. (2024) identified three young asteroid families (Karin, Koronis, Massalia) that serve as the primary sources of ordinary chondrite falls. The origins of various meteorite and NEO classes were established, with a particular focus on different subtypes of carbonaceous chondrites. Some well-known annual meteor showers originate from the fragmentation of comets or active asteroids, such as 3200 Phaethon, which is the parent body of the Geminid meteor shower (Jewitt & Li, 2010). Spectral analysis of Phaethon in the mid-infrared range, conducted using the *Spitzer* Space Telescope, indicated a compositional link to rare carbonaceous chondrites containing olivine, magnesium-rich carbonates, and iron sulfides (MacLennan & Granvik, 2023). These minerals decompose at temperatures around 1000 K, which 3200 Phaethon reaches at perihelion. Regardless of whether small rocky bodies are fragments of comets or asteroids, approaching the Sun at small heliocentric distances leads to the buildup of thermal stresses that may exceed the material's strength. This can result in the formation of fractures or complete fragmentation of the body.

The role of thermal stresses in the physics of small Solar System bodies has been explored by many researchers (Kuehrt, 1984; Tauber & Kuehrt, 1987; Shestakova & Tambovtseva, 1997; Tambovtseva & Shestakova, 1999). According to their estimates, thermal stresses arising during the approach of comets to the Sun can exceed solar tidal stresses by several orders of magnitude. These stresses may surpass material strength thresholds, producing fractures on and beneath the surface of cometary nuclei, which in turn can enhance cometary activity or even lead to complete nucleus disruption. Grinin et al. (1996) also noted that even non-icy planetesimals can be destroyed by thermal stresses near young stars of the UX Orionis type. According to the scenario proposed by Shestakova & Tambovtseva (1997), meteoroids approaching the Sun along highly eccentric orbits gradually heat up internally. The growing temperature gradient between the cold core and the hot surface leads to thermal stresses that can fragment bodies ranging from 10 cm to 10 m in size. In their model, the internal temperature gradient and associated stresses in larger bodies are insufficient to cause full internal disintegration. In such cases, the maximum stresses appear in the surface compression zone, causing material fragmentation at the surface.

In reality, the destruction of small bodies is complicated by additional processes. Surface melting at high temperatures may limit the growth of the temperature gradient between the core and the surface. Sublimation can cool the surface. Another important

effect is the formation of a low-conductivity surface layer—similar to a mixture of pebbles and dust—that thermally insulates the interior from large temperature fluctuations and thermal stress accumulation. Large bodies may develop such a protective layer on their surface. Small bodies, however, tend to heat uniformly and become nearly isothermal, effectively suppressing thermal stresses. The problem of calculating thermal stresses was significantly advanced in the work of Čapek and Vokrouhlický (2010), which removed many of the simplifying assumptions of earlier studies. Their model accounted for changes in insolation due to rotation of the body, yielding a more complex but informative picture of the internal thermal field. This approach allows one to determine whether thermal fragmentation conditions arise in the center or subsurface layers. Their model also incorporates the full set of non-radial components of the stress tensor into the temperature field. In the present study, we adopt a simplified analytical method following the approach of Shestakova & Tambovtseva (1997), sacrificing quantitative precision in favor of a qualitative understanding of the fragmentation processes acting on meteoroids. We consider meteoroid materials composed of various silicates: minerals, rocks, basalt, and both ordinary and carbonaceous chondrites. These bodies approach the Sun along near-parabolic orbits. Our objective is to identify the heliocentric distance range where thermal stresses cause material fracturing. Within this region, the total surface area of fragmented material may significantly increase, forming dust clouds and enhancing the probability of detection during astronomical observations in both the visible and infrared spectral ranges.

2. Methods

The method based on the analytical solution of the heat diffusion equation (HDE) is described in detail in the works by Shestakova & Tambovtseva (1997) and Shestakova & Serebryanskiy (2023). The heat diffusion equation (HDE) for spherically shaped bodies takes the following form:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a^2(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{2}{x} a^2(T) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

where T is the temperature, t is the current time, and x is the spatial coordinate measured from the center of the sphere ($x=0$) along the radial direction to the surface ($x=r$). The parameter $a^2 = \frac{k(T)}{c_v(T)}$, known as the thermal diffusivity, is the key quantity in solving this equation. It depends on the ratio of the thermal conductivity $k(T)$, expressed in $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1}$, to the specific heat per unit volume $c_v(T)$ expressed in $\text{erg}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$. As a result, the thermal diffusivity a^2 has units of $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. In the general case, both $c_v(T)$, $k(T)$ are temperature-dependent functions. If $c_v(T)$, $k(T)$ are assumed constant, then equation (1) becomes linear with respect to T .

The solution of the heat diffusion equation yields the temperature profile inside the body at a given distance from the star. Boley and Weiner (1960), using

this temperature profile, derived expressions for radial ($\overline{T_{rr}}$) and tangential ($\overline{T_{\varphi\varphi}}$) thermal stress functions in solid spheres. The quantities $\overline{T_{rr}}, \overline{T_{\varphi\varphi}}$ have the dimensions of temperature. In the study by Shestakova & Tambovtseva (1997), these thermal functions were also obtained analytically.

The analysis of thermal stresses becomes significantly simpler if, instead of dealing with the actual stresses, one works with the corresponding thermal functions $\overline{T_{rr}}, \overline{T_{\varphi\varphi}}$, which depend solely on the geometry of the body and the internal temperature distribution.

By using these temperature functions as proxies for thermal stresses, one can easily convert them into actual stress values through a simple relationship:

$$\sigma_{\varphi\varphi}(x) = \frac{E\alpha}{1-\mu} \overline{T_{\varphi\varphi}}(x), \quad \sigma_{rr}(x) = \frac{E\alpha}{1-\mu} \overline{T_{rr}}(x), \quad (2)$$

where the tangential stresses $\overline{\sigma_{\varphi\varphi}}$ are characterized by the function $\overline{T_{\varphi\varphi}}$, and the radial stresses $\overline{\sigma_{rr}}$ by the function $\overline{T_{rr}}$. The following parameters describing the elastic properties of the material are used: E - Young's modulus, α - linear thermal expansion coefficient, and μ — Poisson's ratio.

2.1 Thermal and Elastic Properties of Silicate Material

Silicate materials exhibit a wide range of properties and may include various rocks and minerals. However, despite this diversity, most oxides, minerals, and rocks demonstrate similar behavior in terms of their thermophysical ($\overline{c_v}, \overline{k}, \overline{\alpha^2}$) and mechanical ($\overline{E}, \overline{\alpha}, \overline{\mu}$) parameters as temperature varies—often showing even quantitative agreement. Here, $\overline{c_v}$ denotes the specific heat at constant volume, and $\overline{k}$ is the thermal conductivity. The parameters that define material strength are also critical:

$\overline{\sigma_-}$ is the compressive strength, and $\overline{\sigma_+}$ is the tensile strength. In materials with high thermal conductivity, internal heating occurs more rapidly than in those with low conductivity. The resulting temperature gradients between the body's surface and interior layers induce significant thermal stresses. Among the considered silicate materials, pure fused quartz has the lowest linear thermal expansion coefficient α . All other silicates have α values at least an order of magnitude higher. Since meteorites consist of a heterogeneous mixture of minerals, we considered a broad spectrum of silicate materials. According to Campbell (1956), oxides and silicate materials generally have thermal expansion coefficients of $\overline{\alpha} = (5 - 10) * 10^{-6} K^{-1}$. We adopted an average value of $\overline{\alpha} = 7 * 10^{-6} K^{-1}$.

While we used unified values for the thermal parameters across the three groups—oxides, minerals, and rocks—for the elastic parameters, such unification is possible only within each group individually. Nevertheless, we accounted for their similar behavior with temperature.

The Young's modulus of refractory oxides decreases by approximately a factor of two upon heating to 1500°C, while their compressive and tensile strengths may drop

by more than an order of magnitude. For minerals, we used the Young's modulus of fused quartz, which is 72,000 MPa (Campbell, 1956), as a baseline, noting that other minerals have comparable values. According to the same source, refractory oxides may have significantly higher values, while rocks tend to have lower elastic moduli. A similar trend holds for compressive and tensile strength. Refractory oxides have the highest strength limits, while minerals exhibit lower values. For minerals, we adopted $\sigma_+ = (80 \pm 30)$ MPa (Campbell, 1956), and for rocks-being mixtures of minerals-this value is even lower. Common rocks such as granite, basalt, andesite, and others include minerals found in meteorite material, such as olivine, pyroxene, plagioclase, magnetite, quartz, and glassy phases (Krinov, 1955). According to Hütte (1964), these rocks exhibit compressive strengths in the range of $\sigma_- = -(100-380)$ MPa. This range agrees well with data for andesite, whose average compressive strength is $\sigma_- = -(180 \pm 60)$ MPa. For all cited rock types, the uncertainty does not exceed a factor of two, with the exception of particularly strong basalt. In Hütte (1964), the tensile strength is given by a single relation: $\sigma_+ = \frac{\sigma_-}{2\epsilon}$. We adopted an upper limit of $\sigma_+ = 20$ MPa, which is approximately one order of magnitude lower than the average compressive strength for andesite.

We chose to adopt upper-bound values for the critical compressive and tensile stresses so as not to overestimate the likelihood of fragmentation caused by thermal stresses. The Young's modulus for rocks was taken as 26,000 MPa, although this value may vary by a factor of two. The Poisson's ratio was set to $\mu = 0.15$, for both minerals and rocks. Table 1 summarizes the adopted material parameters and the corresponding thermal stress functions for minerals and rocks. Separately, we include data for a specific type of basalt, taken from educational sources and references therein (Kobanova, 1986; Portsevsky & Katkov, 2009). Despite substantial differences in $\sigma_+ E$ values between rocks and minerals, the thermal stress functions T_-, T_+ , derived from the relation $T = \frac{\sigma(1-\mu)}{E \cdot \alpha}$, turned out to be quite similar. Therefore, we adopted common average values of these functions for both rocks and minerals, with deviations not exceeding 30%.

Table 1 - Physico-Mechanical parameters of silicate meteorites

parameters	α^2	α	μ	E	T_-	σ_-	T_+	σ_+
measurement	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	K^{-1}	-	MPa	K	Mpa	K	K
minerals	0.00548	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.15	72000	-1300	-800	130	80
rocks	0.00548	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.15	26000	-800	-180	90	20
basalt	0.0167	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.25	$7 \cdot 10^4$	-300	-160	7	4.5
carbonaceous chondrites	0,01178	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.25	$7 \cdot 10^4$	-86	-60	13	9
ordinary chondrites	0,01178	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.25	$7 \cdot 10^4$	-214	-150	36	25

As shown in Table 1, the selected basalt rock exhibits relatively lower strength. It is also evident that rocks and minerals possess similar physical parameters, and when these are used in the calculation of thermal stresses via the heat diffusion equation,

they yield nearly identical stress values. The only differences arise from the distinct values of their strength limits. The aforementioned authors (Campbell, 1956; Hütte, 1964) also note that, upon heating to high temperatures around 900–1000 K, the strength of materials drops sharply-by approximately a factor of 10 to 20.

The study by Slyuta (2017) provides experimental data for stony meteorites, including compressive strength ($\overline{\sigma_-}$), tensile strength ($\overline{\sigma_+}$), as well as other physico-mechanical properties ($\overline{E, \alpha, \mu}$) and thermophysical parameters such as $\overline{c_p, a^2}$. A detailed analysis of the thermal and elastic properties of stony meteorites is presented in Shestakova & Serebryanskiy (2023). Table 1 also includes the adopted material parameters and the corresponding thermal stress functions for two types of chondrites based on the data from Slyuta (2017), and for basalt, based on Kobanova V.N. (1986) and Portsevsky A.K. (2009). In our study, the values for thermal conductivity and specific heat were taken from Opeil et al. (2012), where the thermal conductivity was measured for seventeen stony meteorites over the temperature range from 5 K to 300 K. The selection of this rock type is motivated by the fact that, for example, the Frankfurt meteorite (howardite) is a representative sample of the surface material of asteroid Vesta. The primary parameter used in solving the heat diffusion equation is the thermal diffusivity, defined as $\overline{a^2}$.

To model the thermal fragmentation of bodies composed of ordinary and carbonaceous chondrites, we used the value $\overline{a^2} = 0.01178 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ for the Frankfurt sample (Opeil et al., 2012), corresponding to an equilibrium temperature of approximately 150 K, which we adopted as the initial temperature of a uniformly heated body at the starting heliocentric distance of 3.46 AU. The same thermal diffusivity value was applied to basalt, since the values of $\overline{a^2}$ are of the same order, and differences in the calculated temperature profiles from the center to the surface only appear in the third decimal place. Moreover, their physico-thermal parameters-such as ($\overline{E, \alpha, \mu}$) are also similar, making their comparison in Figures 1b, 2, and 4 appropriate and convenient.

3. Results and discussion

Temperature and stress profiles were calculated for various materials, with their parameters listed in Table 1. It is assumed that the bodies are spherical in shape and follow parabolic orbits. The initial heliocentric distance was set at 3.45 AU, where the blackbody temperature is close to 150 K. At this starting distance, the bodies are assumed to be isothermal throughout their volume, and no thermal stresses are present. The radii of the bodies range from $r=5 \text{ cm}$ to $r=300 \text{ m}$. The final distance was set at 0.0345 AU, which corresponds to 7.42 solar radii ($\overline{7.42R_\odot}$), where the blackbody temperature reaches approximately 1500 K a temperature at which silicate materials undergo intense sublimation.

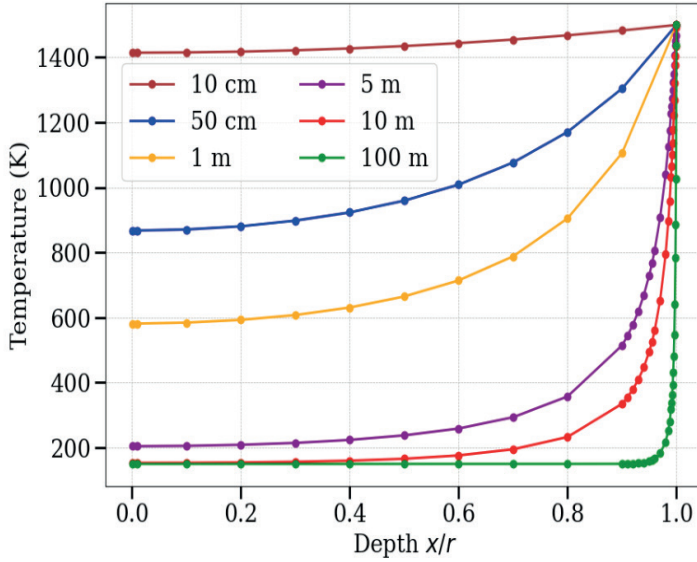


Figure 1a - Temperature profiles from the center ($x/r=0$) to the surface ($x/r=1$) inside bodies of different sizes at the final heliocentric distance of 0.0345 AU ($\approx 7.42R_{\odot}$), for rocks and minerals ($a^2 = 0.00548 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$).

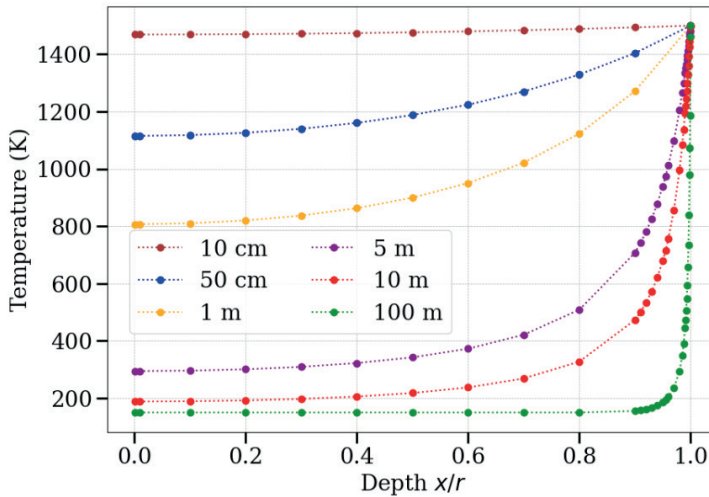


Figure 1b - Temperature profiles from the center ($x/r=0$) to the surface ($x/r=1$) inside bodies of different sizes at the final heliocentric distance of 0.0345 AU ($\approx 7.42R_{\odot}$), for basalt and chondrites ($a^2 = 0.0167 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$).

As shown in Figure 1, the internal heating of bodies approaching the Sun along a parabolic orbit strongly depends on their size. Large bodies with radii greater than 10 m retain low internal temperatures close to the initial value, with a rapid increase occurring only near the surface. In contrast, small meteoroids with radii less than 10 cm exhibit nearly uniform temperature profiles throughout their volume, close to

the surface temperature, as they have sufficient time to become fully heated during their approach.

A comparison between Figures 1a and 1b shows that basaltic and chondritic bodies heat more efficiently than those composed of minerals and rocks.

Figures 2 and 3 present the results of thermal stress calculations inside rocky bodies of different compositions as they approach the Sun along parabolic trajectories. The thermal stresses are evaluated at a distance $x=0.1r$ from the center of the body, where r is the radius.

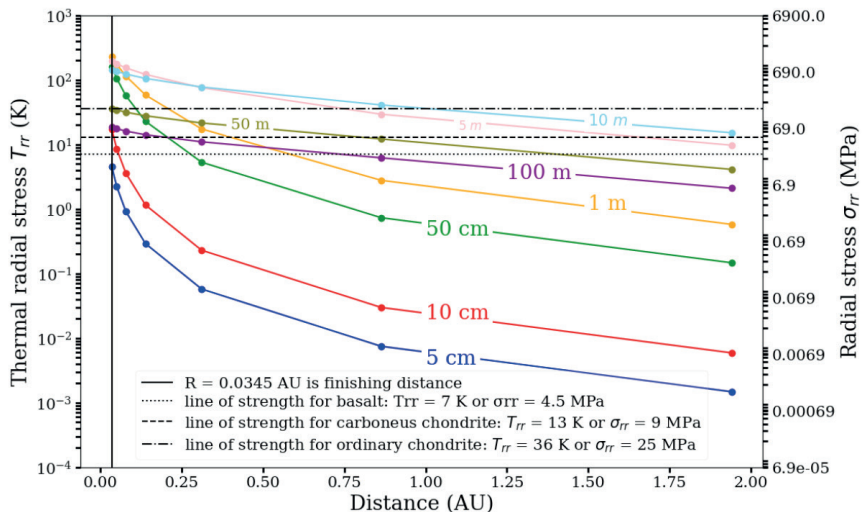


Figure 2 - Dependence of thermal stresses on heliocentric distance for pebbles and rocks of various sizes approaching the Sun along parabolic orbits from an initial distance of 3.45 AU, where their equilibrium temperature is 150 K.

To calculate the radial stresses presented in Figure 2, we used a uniform thermal diffusivity value of $\overline{a^2} = 0.0167 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ for all three materials: basalt, carbonaceous chondrites, and ordinary chondrites. The resulting values of the thermal stress function $\overline{T_{rr}}$ are identical for these materials; however, their strength limits differ. The horizontal lines in the figure indicate the strength thresholds for each of the three materials: basalt has the lowest strength, carbonaceous chondrites represent an intermediate case, and ordinary chondrites have the highest tensile strength.

As shown in Figure 2, basaltic particles with radii starting from approximately 5–7 cm experience stresses near the strength limit at the final heliocentric distance of 0.0345 AU ($\approx 7.42R_{\odot}$) and thus are expected to fragment. At the same distance, carbonaceous chondrite stones with minimum radii of 8–9 cm and larger are also subject to destructive stresses. Among the materials shown in Figure 2, ordinary chondrites are the most resistant. Fracturing of these bodies begins at final distance only when their radii exceed ~15 cm. Larger stones easily exceed the tensile strength threshold at heliocentric distances significantly greater than ($\approx 7.42R_{\odot}$).

It should also be noted that even larger bodies, on the scale of decameters (5–

50 m), may begin to crack at distances beyond 1 AU and continue to fragment into smaller pieces as they approach the Sun.

Figure 3 presents results of similar calculations for bodies composed of stronger materials such as typical rocks. These bodies fragment only near the final distance and within a limited size range of approximately 0.5 m to 10 m. The figure also displays two vertical axes: on the left — thermal stresses, and on the right — mechanical stresses for rocky materials. Thermal radial stresses are converted into mechanical stresses $\sigma_{rr} = 0.222 * T_{rr}$ using equation (2) and the values listed in Table 1. The T_{rr} scale is also applicable to minerals, although conversion to mechanical stress values $\sigma_{rr} = 0.615 * T_{rr}$ requires a different relation.

Rocks and minerals exhibit very high strength limits, significantly exceeding those of basalt and chondrites.

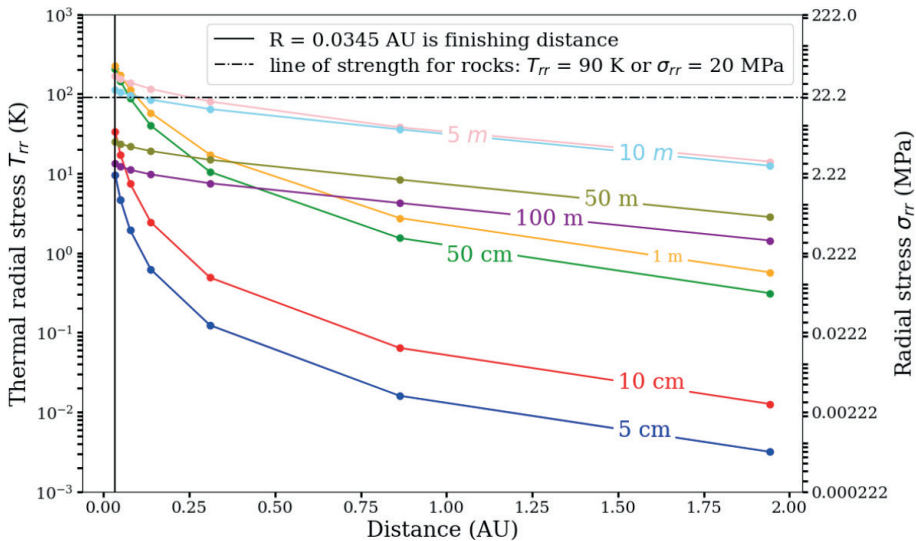


Figure 3 - Dependence of thermal stresses on heliocentric distance for pebbles and rocks of various sizes approaching the Sun along parabolic orbits from an initial distance of 3.45 AU. The composition of the small bodies corresponds to rocky materials.

The final distance adopted in our model, at which centimeter-sized stones undergo fragmentation, corresponds to the melting temperature of silicate particles. Furthermore, once the temperature exceeds 1000 K, the mechanical strength of the material decreases by nearly an order of magnitude, making particles as small as 1 cm susceptible to thermal disruption. Since rapid sublimation of particles is expected near the final distance, a region of enhanced dust density may form at distances of $(7 - 10)R_*$, which can be detected in the infrared range via its thermal emission.

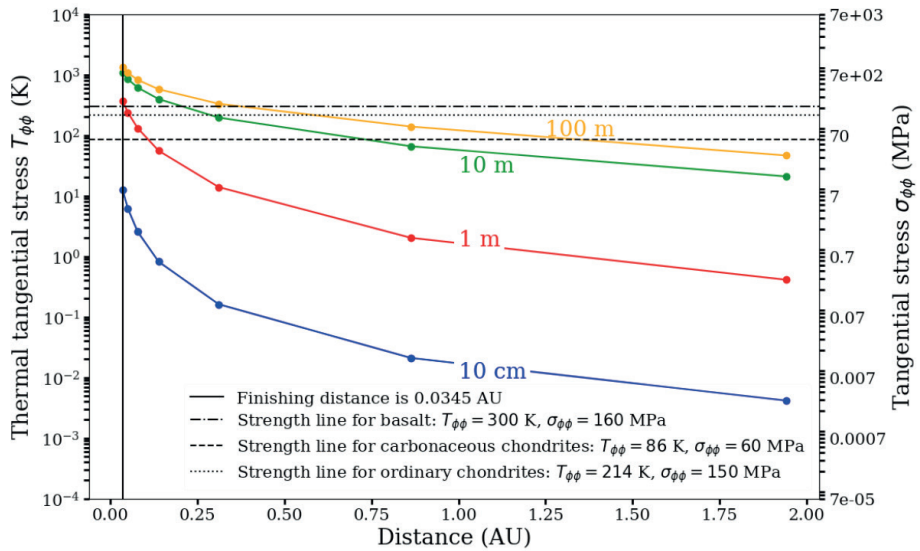


Figure 4 - Dependence of tangential thermal stresses on heliocentric distance for stones composed of basalt and chondrites.

Figure 4 presents the results of calculated tangential thermal stresses for three types of stones composed of basalt and two types of chondrites. The plot includes two vertical axes: the left axis shows the tangential thermal stresses $T_{\phi\phi}$ units of kelvin (K), and the right axis shows the corresponding values in mechanical units (MPa). The conversion between these units is performed using equation (2) and the material parameters listed in Table 1. Three strength thresholds are shown in Figure 4. The lowest strength corresponds to carbonaceous chondrites, the intermediate strength to ordinary chondrites, and the highest strength to basalt. According to the results, stones with a radius of 10 cm do not undergo surface fragmentation, whereas bodies with radii of 1 m or more may experience surface compressive failure, leading to dust generation.

Similar calculations for rocky materials indicate that bodies composed of such material can undergo surface stress-induced fragmentation starting from radii of approximately 2 m. Bodies composed of mineral material can potentially remain intact-without dust production-until they reach the sublimation zone boundary or attain surface temperatures close to 1000 K at distances around $16R_s$, where a sharp drop in material strength is expected. For all materials listed in Table 1 and for a wide range of body radii from 5 cm to 300 m, we performed calculations of radial thermal stresses at a distance of $0.1r$ from the center of the body.

Figure 5 shows the heliocentric distances at which the radial stress inside parabolically orbiting bodies reaches the material strength limit, initiating mechanical failure. Depending on the material's strength, fragmentation can begin at different distances from the Sun.

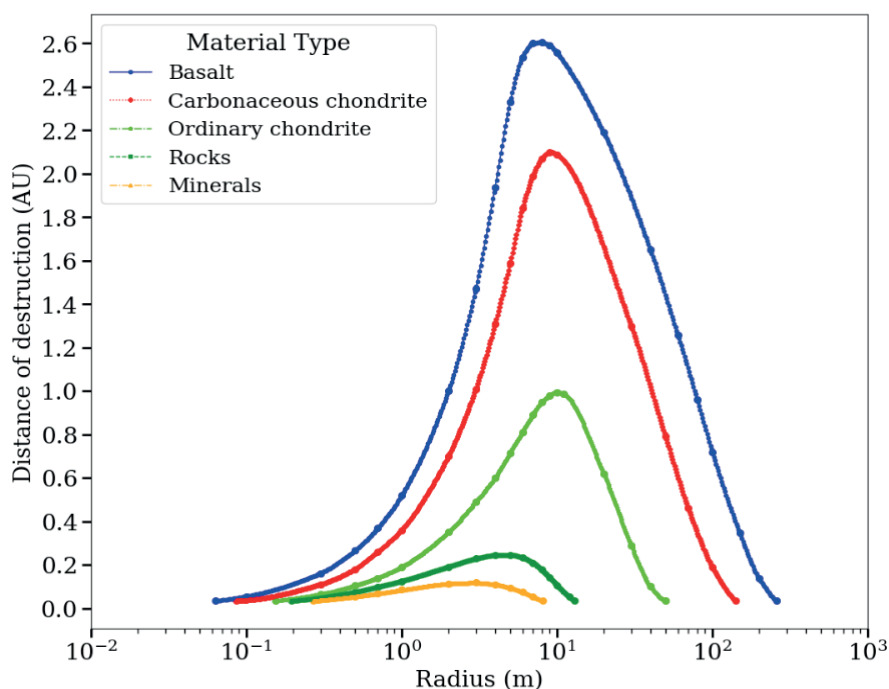


Figure 5 - Heliocentric distances at which bodies of various sizes experience internal thermal stresses equal to the material's strength limit. Onset of internal fracturing.

A characteristic feature of the curves in Figure 5 is the presence of a maximum, which highlights an intermediate size range of bodies whose internal failure may begin at the greatest heliocentric distances. Basaltic bodies with radii of 6–9 m, carbonaceous chondrites of 6–9 m, and ordinary chondrites of 6–9 m reach critical stress levels at distances of approximately 2.5 AU, 2 AU, and 1 AU, respectively. Fragments from such bodies may reach Earth as meteorites. Both smaller and larger bodies attain critical internal stresses closer to the Sun. The broadest size range susceptible to thermal fragmentation is found for basaltic bodies: from 6 cm to 260 m. Carbonaceous and ordinary chondrites are prone to destruction within narrower ranges: 9 cm to 140 m and 15 cm to 50 m, respectively. According to our calculations, rocky bodies fragment within $\sqrt{50R_s}$ for radii ranging from 20 cm to 13 m, and mineral bodies within $\sqrt{50R_s}$ for radii between 30 cm and 8 m. It is evident that as the heliocentric distance approaches $\sim\sqrt{50R_s}$, where surface temperatures reach ~ 1000 K and material strength drops sharply, the fragmentation process may become catastrophic, accompanied by the release of fine fragments and dust.

The curves shown in Figure 6 represent the distances at which bodies of a given size begin to release dust from their surfaces—a phenomenon analogous to a coma in comets. This effect intensifies as the body approaches the Sun. For large bodies with radii exceeding 100 m, thermal stresses stabilize at specific distances characteristic of each material.

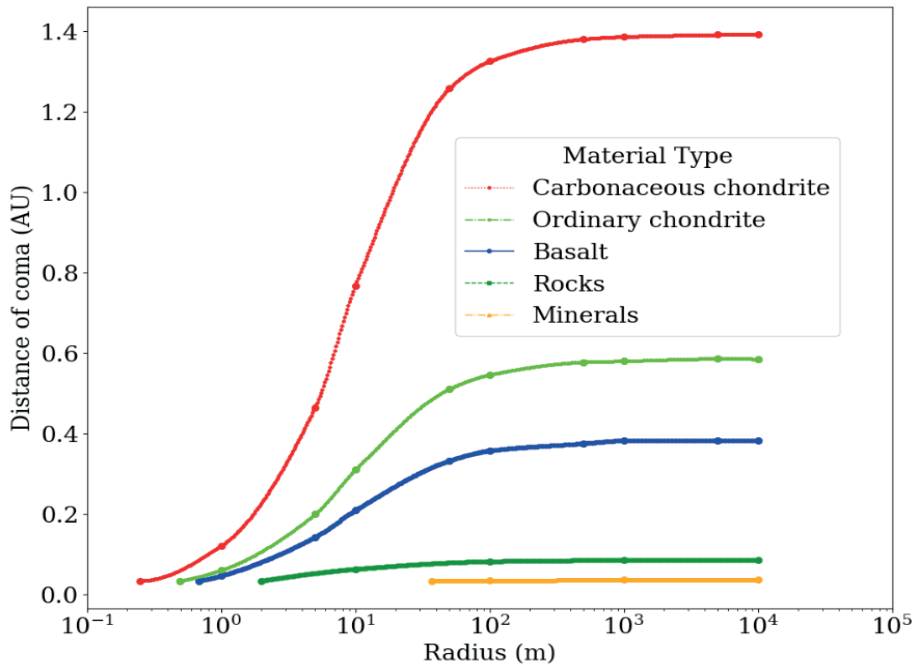


Figure 6 - Heliocentric distances at which bodies of various sizes experience surface thermal stresses equal to the material's strength limit. Onset of surface fragmentation and dust release.

By comparing the curves, one can conclude that bodies composed of chondrites and basalt begin releasing dust at greater heliocentric distances. Carbonaceous chondrites may start shedding dust at distances as far as 1.4 AU, ordinary chondrites at around 0.6 AU, and basalts at approximately 0.4 AU. In contrast, rocks and minerals are capable of releasing dust only near the sublimation zone, where material strength drops sharply due to high temperatures-i.e., near $16R_{\odot}$.

4 Final Remarks

Our calculations have shown that dust production by solid bodies approaching the Sun along highly elongated orbits can occur at various heliocentric distances. Due to surface thermal stresses, dust envelopes may form around solid bodies with radii exceeding 100 m between the orbits of Mars and Mercury. Such bodies could be detected using both ground-based and space-based observational methods.

Destructive internal stresses arise in basaltic, carbonaceous, and ordinary chondritic bodies at the most distant regions from the Sun-approximately 2.5 AU, 2 AU, and 1 AU, respectively. However, as illustrated in Figure 5, these distances correspond to relatively small bodies (up to ~10 m in radius), and their disruption is unlikely to generate dust clouds of sufficient size to be detected in the optical or infrared range-unless the event occurs near Earth. In such cases, ordinary chondrites with radii around 10 m could be observable. Around Earth's orbit, carbonaceous chondrites with radii of ~40 m and basaltic bodies with radii of ~80 m may also undergo fragmentation. The largest bodies tend to disintegrate closer to the Sun, triggering a cascade fragmentation

process. The resulting fragments are rapidly broken down into smaller ones, leading to the formation of a dust cloud that approaches the sublimation zone. These clouds could be observable in the optical or infrared spectral ranges.

The primary sources of rocky bodies are believed to be the Main Asteroid Belt and the Kuiper Belt. Infrared observations (1–100 μm) allow researchers to estimate the number of asteroids in the Main Belt. According to Tedesco and Désert (The Infrared Space Observatory Deep Asteroid Search), the Main Asteroid Belt contains between 700,000 and 1.7 million objects with diameters of 1 km or more. In addition, infrared surveys have revealed active asteroids exhibiting signs of dust emission. For example, the WISE telescope detected active asteroids such as 596 Scheila (James M. Bauer, A. K. Mainzer et al.), confirming the presence of dust trails in the Main Belt. In recent years, researchers have increasingly focused on asteroids located on orbits interior to Earth's, as several large objects posing potential threats have been discovered. The Chelyabinsk superbolide is a striking example of how little is known about such objects. Ground-based and low-Earth-orbit telescopes have limited ability to detect objects on the Sun-facing side, highlighting the need for new approaches in identifying potentially hazardous asteroids and associated dust activity.

One promising solution involves the use of high-orbit infrared space telescopes. Within the framework of the program BR24992759 «Development of the concept for the first Kazakhstani orbital cislunar telescope – Phase I», the following observational equipment is proposed:

A telescope with an aperture of 30–40 cm, equipped with a filter tuned to the near-infrared range. Suggested filter passband: $\lambda_0=3\text{--}6\ \mu\text{m}$ range.

As an alternative, a simpler device can be used: a small photometric camera with a wide field of view ($10^\circ\text{--}20^\circ$), without focusing optics. A 10° field of view corresponds to $\sim 40R_\odot$. In front of the objective lens (with a fast f-ratio of $f/1$ to $f/1.5$ and an aperture of 4–6 cm), an IR filter fully covering the light beam is installed. A CCD array sensitive to wavelengths $\lambda = 3\text{--}6\ \mu\text{m}$ is placed in the focal plane. A key challenge is precise pointing toward the near-Sun region from multiple directions. Ideally, solar occultation should be applied down to $\sim 4R_\odot \approx 1$, with a comparison channel using a filter in the $\lambda < 2\ \mu\text{m}$ range. The most scientifically valuable region lies between 4 and $(4 - 24)R_\odot$ ($1^\circ\text{--}6^\circ$ from the solar center), which coincides with the sublimation zone for dust of various chemical compositions.

Observations can be restricted to two sectors: west and east of the Sun near the ecliptic plane. If close solar pointing proves difficult, it is possible to monitor more distant regions near the ecliptic plane and toward its poles to detect dust clumps. In terms of instrumentation, the task of detecting dust closely parallels the task of observing small asteroids in the inner Solar System within the broader framework of asteroid-comet hazard identification.

Литература

- Brož M., Vernazza P., Marsset M. et al. (2024) Source regions of carbonaceous meteorites and near-Earth objects A&A, 689, A183 DOI: 10.1051/0004-6361/202450532
- Jewitt D., Li J. (2010) Activity in Geminid Parent (3200) Phaethon. The Astronomical Journal, 140(5): 1519–1527. arXiv: 1009.2710. DOI: 10.1088/0004-6256/140/5/1519.
- MacLennan E., Granvik M. (2023). Thermal decomposition as the activity driver of near-Earth asteroid (3200) Phaethon. Nature Astronomy. arXiv: 2207.08968. DOI: 10.1038/s41550-023-02091-w.
- Kuhrt E. (1984) Temperature profiles and thermal stresses in cometary nuclei. Icarus, 60. — P. 512-521.
- Tauber F., Kührt E. (1987) Thermal stresses in cometary nuclei. Icarus, 69. — P. 83-90.
- Shestakova L.I., Tambovtseva L.V. (1997-1998) The thermal destruction of solids near the Sun. Earth, Moon, and Planets, 1997-1998, 76. — P. 19-45.
- Tambovtseva L.V., Shestakova, L.I. (1999) Planetary Space Science, 47. — P. 319.
- Гринин В. П., Золотов А.П., Ходенко П. Н. (1996) Процесс теплового округа в солнечной системе малакуль-телах. Астрономический Вестник.
- Čapek D., Vokrouhlický D. (2010) Thermal stresses in small meteoroids. A&A, 519, A75. DOI: 10.1051/0004-6361/201014281.
- Shestakova L.I., Serebryanskiy A. (2023) Thermal effects in meteoroids and their fragmentation. MNRAS, 524. — P. 4506–4520.
- Boley B.A., Weiner J.H. (1960) Theory of Thermal Stress. Wiley, New York. — P. 302.
- Campbell I.E. (ed.) (1956) High-temperature technology. Wiley, New York.
- Krinov E.A. (1955) Основы метеоритики. Москва, 392 с.
- Hütte Manuel de l'ingenieur (1964) Librairie Polytechnique Beranger, 1444 p.
- Кобанова В.Н. (1986) Петрофизика. Учебник для высших учебных заведений, М.: Недра, 392 с.
- Порцевский А.К., Катков Г.А. (2009) Учебный план физики горных родов, геомеханики и управления состоянием массива. — М., 120 с.
- Slyuta, E.N. (2017) Thermal properties of meteorites and their implications. Solar System Research, 51, 64.
- Opeil C.P., Consolmagno G.J., Safarik D.J., Britt D.T. (2012) Physical properties of meteorites and their relationship to asteroids. Meteoritics & Planetary Science, 47, 319.
- James M. Bauer, A.K. Mainzer, Tommy Grav, Russell G. Walker, Joseph R. Masiero, Erin K. Blauvelt, Robert S. McMillan, Yan R. Fernández, Karen J. Meech, Carey M. Lisse, DOI 10.1088/0004-637X/747/1/49
- Порцевский А.К., Катков Г.А. (2009) Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива. — М. 120 с

References

- Brož M., Vernazza P., Marsset M. et al. (2024) Source regions of carbonaceous meteorites and near-Earth objects A&A, 689, A183 DOI: 10.1051/0004-6361/202450532 (in Eng.).
- Jewitt D., Li J. (2010) Activity in Geminid Parent (3200) Phaethon. The Astronomical Journal, 140(5): 1519–1527. arXiv: 1009.2710. DOI: 10.1088/0004-6256/140/5/1519. (in Eng.).
- MacLennan E., Granvik M. (2023). Thermal decomposition as the activity driver of near-Earth asteroid (3200) Phaethon. Nature Astronomy. arXiv: 2207.08968. DOI: 10.1038/s41550-023-02091-w. (in Eng.).
- Kuhrt E. (1984) Temperature profiles and thermal stresses in cometary nuclei. Icarus, 60. — P. 512-521. (in Eng.).
- Tauber F., Kührt E. (1987) Thermal stresses in cometary nuclei. Icarus, 69. — P. 83-90. (in Eng.).
- Shestakova L.I., Tambovtseva L.V. (1997-1998) The thermal destruction of solids near the Sun. Earth, Moon, and Planets, 1997-1998, 76. — P. 19-45. (in Eng.).
- Tambovtseva L.V., Shestakova, L.I. (1999) Planetary Space Science, 47. — P. 319. (in Eng.).
- Grinin V.P., Zolotov Yu.P., Khodenko P.N. Teplovye protsessy v malykh telakh Solnechnoy sistemy

[Proces toplotne ločitve v sončnem sistemu malakulh-telakh]. *Astronomicheskii vestnik*, 1996 (in Russ.)

Čapek D., Vokrouhlický D. (2010) Thermal stresses in small meteoroids. *A&A*, 519, A75. DOI: 10.1051/0004-6361/201014281. (in Eng.).

Shestakova L.I., Serebryanskiy A. (2023) Thermal effects in meteoroids and their fragmentation. *MNRAS*, 524. — P. 4506–4520. (in Eng.).

Boley B.A., Weiner J.H. (1960) *Theory of Thermal Stress*. Wiley, New York. —P. 302. (in Eng.).

Campbell I.E. (ed.) (1956) *High-temperature technology*. Wiley, New York. (in Eng.).

Krinov E.A. (1955) *Основы метеоритики*. Москва, 392 с. (in Eng.).

Hütte Manuel de l'ingenieur (1964) *Librairie Polytechnique Beranger*, 1444 p. (in Eng.).

Kobanova V.N. (1986) *Petrofizika. Uchebnik dlya vuzov* [Petrophysics. Textbook FOR higher education institutions], M.: Nedra, 392 s (in Russ.)

Portsevsky A.K., Katkov G.A. *Osnovy fiziki gornykh porod, geomekhaniki i upravleniya sostoyaniem massiva* [Fundamentals of rock physics, geomechanics, and array condition Management]. M., 2009, 120 s (in Russ.)

Slyuta, E.N. (2017) Thermal properties of meteorites and their implications. *Solar System Research*, 51, 64. (in Eng.).

Opeil C.P., Consolmagno G.J., Safarik D.J., Britt D.T. (2012) Physical properties of meteorites and their relationship to asteroids. *Meteoritics & Planetary Science*, 47, 319. (in Eng.).

James M. Bauer, A.K. Mainzer, Tommy Grav, Russell G. Walker, Joseph R. Masiero, Erin K. Blauvelt, Robert S. McMillan, Yan R. Fernández, Karen J. Meech, Carey M. Lisse, DOI 10.1088/0004-637X/747/1/49 (in Eng.).

Portsevsky A.K., Katkov G.A. *Osnovy fiziki gornykh porod, geomekhaniki i upravleniya sostoyaniem massiva* [Fundamentals of rock physics, geomechanics, and array condition Management]. 2009. M. – 120 s (in Russ.)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 2. Number 354 (2025), 138–151

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.349>

UDC . 524.7; 52; 52-16/-17; 520.88; 520.2/.8
IRSTI. 41.27.29; 41.17.00; 41.51.41; 41.51.27

© **S.A. Shomshekova***, **L.K. Kondratyeva**, **I.V. Reva**, **L. Aktay**, **V.Y. Kim**, 2025.

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: shomshekova@fai.kz

STUDIES OF THE MRK 766 GALAXY IN THE OPTICAL RANGE

S.A. Shomshekova — PhD, Lead Researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: shomshekova.saule@gmail.com, shomshekova@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9841-453X>;

L.N. Kondratyeva — c.ph.-m.sc, Chief Researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: kondratyeva@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6302-2851>;

I.V. Reva — Senior researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: reva@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9944-8398>;

L. Aktay — Engineer, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: aktay@fai.kz, <https://orcid.org/0009-0005-5862-4777>;

V.Yu. Kim — Candidate of Physics and Mathematics science, Lead Researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: kim@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1202-9751>.

Abstract. To understand the structure of active galactic nuclei (AGN) and the physical processes occurring within them, the study of their variability represents one of the crucial tasks in modern astrophysics. The aim of this study is to analyze the photometric and spectroscopic data of the galaxy Mrk 766 in order to investigate the nature of its activity variability. Within the framework of this objective, spectral and photometric observations of the Seyfert galaxy Mrk 766 (NGC 4253) were conducted using the telescopes of the Tien Shan Astronomical Observatory and the Kamenskoye Plato Observatory. Photometric results in the B, V, and Rc filters are presented for the period from 2020 to 2025, showing a gradual decline in the galaxy's brightness. The amplitude of the brightness variation in the V filter was approximately 0.16 magnitudes. Spectral observations revealed variations in the continuum flux and the equivalent widths of emission lines, indicating possible changes in the activity of the galaxy's nucleus and the gas density. Analysis of the emission line profiles of H α , [NII], [SII], and [OI] revealed differences in radial velocities, suggesting inhomogeneous gas kinematics. In particular, discrepancies were observed between the velocities obtained from different lines, which may reflect the complex structure and dynamics of the ionized gas. The results of the spectral analysis performed on April 1, 7, and May 27, 2024, are considered in detail. Thus, on May 27, 2024, the



[SII] line demonstrates a significantly higher velocity (~ 384 km/s) compared to the H α and [NII] lines (105 – 115 km/s). The obtained data contribute to the understanding of physical processes occurring in active galactic nuclei and their evolution, providing observational constraints for theoretical models.

Keywords: Seyfert galaxy Mrk 766, spectrophotometry, photometry, active galactic nuclei

© С.А. Шомшекова*, Л.Н. Кондратьева, И.В. Рева, Л. Актай,
В.Ю. Ким, 2025.

В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail: shomsheкова@fai.kz

MRK 766 ГАЛАКТИКАСЫН ОПТИКАЛЫҚ ДИАПАЗОНДА ЗЕРТТЕУ

С.А. Шомшекова — PhD, ЖФҚ, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: shomsheкова.saule@gmail.com, shomsheкова@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9841-453X>;

Л.Н. Кондратьева — ф.-м.ғ.к., БҒҚ, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: kondratyeva@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6302-2851>;

И.В. Рева — АҒҚ, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: reva@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9944-8398>;

Л. Актай — инженер, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: aktay@fai.kz, <https://orcid.org/0009-0005-5862-4777>;

В.Ю. Ким — физика-математика ғылымдарының кандидаты, ЖФҚ, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан, E-mail: kim@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1202-9751>.

Аннотация. Ядролары белсенді галактикалардың (ЯБГ) құрылымын және ондағы жүретін үдерістерді түсіну үшін оның айнымалылығын зерттеу астрофизикадағы негізгі міндеттердің бірі болып табылады. Осы зерттеудің мақсаты – Mrk 766 галактикасының фотометрлік және спектрлік мәліметтерін талдау арқылы оның белсенділігінің айнымалылығының табиғатын түсіну. Осы міндет аясында, Mrk 766 (NGC 4253) сейферт галактикасына спектрлік және фотометрлік бақылаулар Тянь-Шань астрономиялық обсерваториясы мен Каменка Үстірті обсерваториясының телескоптарын пайдалана отырып жүргізілді. 2020-2025 жылдар аралығында В, V және R_c сүзгілеріндегі фотометрия нәтижелері ұсынылды, олар галактиканың жарықтығының біртіндеп төмендеуін көрсетті. V сүзгісіндегі жарықтың өзгеру амплитудасы $\sim 0,16$ жұлдыздық шаманы құрады. Спектрлік бақылаулар үздіксіз спектр ағынының және эмиссиялық сызықтардың эквиваленттік ендерінің өзгеруін көрсетті, бұл галактика ядросының белсенділігінің және газ тығыздығының өзгеру мүмкіндігін көрсетеді. H α , [NII], [SII] және [OI] эмиссиялық сызықтарының профильдерін талдау сәуле жылдамдықтарындағы айырмашылықтарды анықтады, бұл газ кинематикасының біртектілігін көрсетеді. Атап айтқанда, әртүрлі сызықтар

бойынша алынған жылдамдықтар арасындағы айырмашылықтар иондалған газдың күрделі құрылымын және динамикасын көрсетуі мүмкін. 1, 7 сәуір және 27 мамыр 2024 жылы жүргізілген спектрлік талдау нәтижелері егжей-тегжейлі қарастырылды. Мысалы, 2024 жылғы 27 мамырда [SII] сызығы $\text{H}\alpha$ және [NII] сызықтарына (105 – 115 км/с) қарағанда айтарлықтай жоғары жылдамдықты (~ 384 км/с) көрсетті. Алынған мәліметтер белсенді галактикалар ядроларында жүретін физикалық процестер мен олардың эволюциясын түсінуге үлес қосады және теориялық модельдер үшін бақылау шектеулерін ұсынады.

Түйін сөздер: Сейферт галактикасы Mrk 766, спектрофотометрия, фотометрия, ядролары белсенді галактикалар

© С.А. Шомшекова*, Л.Н. Кондратьева, И.В. Рева, Л. Актай,
В.Ю. Ким, 2025.

Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан.

E-mail: shomshekova@fai.kz

ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЛАКТИКИ MRK 766 В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

С.А. Шомшекова — PhD, ВНС, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: shomshekova@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9841-453X>;

Л.Н. Кондратьева — к.ф.-м.н, ГНС, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, <https://orcid.org/0000-0002-6302-2851>;

И.В. Рева — СНС, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: reva@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9944-8398>;

Л. Актай — инженер, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: aktay@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9944-8398>;

В.Ю. Ким — кандидат физико-математических наук, ВНС, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,

E-mail: kim@fai.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1202-9751>.

Аннотация. Для понимания структуры АЯГ и процессов, происходящих в нем, изучение его переменности является одной из ключевых задач в астрофизике. Целью данного исследования является анализ фотометрических и спектральных данных галактики Mrk 766 для понимания природы переменности ее активности. В рамках этой задачи были проведены спектральные и фотометрические наблюдения сейфертовской галактики Mrk 766 (NGC 4253) с использованием телескопов Тянь-Шаньской астрономической обсерватории и Обсерватории Каменского Плато. Представлены результаты фотометрии в фильтрах В, V и Rc за период с 2020 по 2025 годы, которые демонстрируют постепенное ослабление блеска галактики. Амплитуда изменения блеска составила ~ 0.16 звездной величины в фильтре V. Спектральные наблюдения показали вариации потока в континууме и эквивалентных ширин эмиссионных линий, указывая на возможные изменения в активности ядра галактики и плотности газа. Анализ

профилей эмиссионных линий H α , [NII], [SII] и [OI] выявил различия в лучевых скоростях, что говорит о неоднородности кинематики газа. В частности, наблюдались расхождения между скоростями, полученными по разным линиям, что может отражать сложную структуру и динамику ионизированного газа. Подробно рассмотрены результаты спектрального анализа, проведенного 1 и 7 апреля и 27 мая 2024 года. Так, 27 мая 2024 года линия [SII] демонстрирует существенно более высокую скорость (~ 384 км/с) по сравнению с линиями H α и [NII] (105 – 115 км/с). Полученные данные вносят вклад в понимание физических процессов, протекающих в активных ядрах галактик, и их эволюции, предоставляя наблюдательные ограничения для теоретических моделей.

Ключевые слова: сейфертовская галактика Mrk 766, спектрофотометрия, фотометрия, активные ядра галактик

Информация о финансировании. Исследование выполнено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта № AP22784884 и программы № BR24992807.

Введение. Систематические спектральные и фотометрические наблюдения активных галактических ядер (АЯГ), в частности сейфертовских галактик (СГ) из списка Маркаряна, имеют ключевое значение для изучения фундаментальных вопросов астрофизики, включая природу АЯГ, рост сверхмассивных черных дыр и эволюцию галактик. Данные наблюдения предоставляют критически важную информацию о физических условиях (температура, плотность, ионизация) и динамических процессах (аккреция, выбросы, переменность) в ядрах галактик. Анализ спектральных характеристик, таких как эмиссионные линии и континуум, позволяет определять параметры центральных черных дыр, изучать кинематику газа и выявлять наличие потоков плазмы. Длительные фотометрические наблюдения выявляют механизмы переменности АЯГ, связанные с процессами аккреции и динамикой околоядерной среды, и позволяют накладывать ограничения на теоретические модели. Совместный анализ спектральных и фотометрических данных обеспечивает всестороннее понимание физических процессов в АЯГ и их роли в эволюции галактик (Mickaelian, et al., 2021).

Спектральные и фотометрические исследования СГ из списка Маркаряна проводятся в АФИФ на протяжении многих лет. Из-за большого количества открытых на сегодняшний день СГ наземные и космические обсерватории, исследующие АЯГ, не могут охватить все эти объекты систематическими наблюдениями, что крайне важно из-за их непредсказуемой фотометрической и спектральной переменности. В связи с этим систематические наблюдения и исследования, малоизученных СГ остаются актуальной задачей. Mrk 766 (NGC 4253) относится к классу сейфертовских галактик Sy1 с супермассивным центральным телом (SMBH). Преобладающее радиоизлучение в диапазоне 1 – 9 ГГц обусловлено оптически тонким источником, что подтверждается спектральным индексом и радионаблюдениями в соответствующих диапазонах

частот. Радио ядро Mrk 766 демонстрирует температуру яркости, характерную для синхротронного излучения, что указывает на наличие ускоренных заряженных частиц в магнитных полях (Chen, et al., 2022). Спектральные изменения в Mrk 766 могут быть обусловлены несколькими физическими процессами, включая частичное перекрытие многослойных поглощающих облаков и ультрабыстрые выбросы. Кроме того, наблюдаемые характеристики линии Fe - K указывают на наличие резонансного рассеяния и отражения от внутреннего диска, что говорит о сложной структуре среды вокруг центрального рентгеновского источника (Mochizuki, et al., 2023). Данные исследования подчеркивают сложность и динамичность радиоядра Mrk 766, указывая на необходимость последующих наблюдений для более глубокого понимания физических процессов, происходящих в этой галактике как в радио-, так и в оптическом диапазонах.

Настоящая работа посвящена анализу распределения газа и его кинематики во внутренней области радиусом 450 парсек галактики Mrk 766 (NGC 4253) — спиральной галактики с перемычкой (SBa), находящейся на расстоянии 60,6 Мпк, при котором угловое расстояние 1'' соответствует 294 парсек. Снимки, полученные с помощью Hubble Space Telescope (HST), демонстрируют нерегулярные пылевые нити вокруг ядра галактики (Malkan, et al., 1998). Исследования (Kukula, et al., 1995) выявили, что радиоисточник в галактике простирается в юго-восточном направлении с позиционным углом (PA) $\approx 150^\circ$ на масштабе около 1''. Оптическое излучение галактики распространяется за пределы радиоструктуры (Gonzalez Delgado, et al., 1996). Спектры в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR), описанные (Rodríguez-Ardila, et al., 2005), содержат разрешенные линии H I, He I, He II, Fe II, а также запрещенные линии [S II], [S III], [Fe II]. В спектре также наблюдаются высокоионизированные линии, такие как [Si IX], [Si X], [S IX], [Mg VIII]. Рентгеновские наблюдения показывают, что Mrk 766 является сильно переменным источником. Источником этой переменности, как правило, являются динамические процессы в ближайших окрестностях центрального тела (Smith, et al., 2018; Yao, et al., 2018). Масса центрального тела оценивается в $1.29 \times 10^6 M_\odot$ (Yao, et al., 2018). При этом на энергии около 2 кэВ зарегистрированы наибольшие амплитуды вариаций. Масса SMBH в центре Mrk 766 была точно измерена методом перекрестной корреляции (reverberation mapping) (Bentz, et al., 2009) и составляет $(1.76 \pm 1.48) \times 10^6 M_\odot$. Анализ радиального профиля и ультрафиолетового потока показывает, что он практически не загрязнен соседними источниками. Новый объект примерно в 2,5 раза слабее AGN в дальнем ультрафиолете (FUV) и в 5,6 раза слабее в ближнем ультрафиолете (NUV), что визуально выглядит как двойное ядро. Исследование ультрафиолетового и оптического излучения нового источника, а также отсутствие значимого рентгеновского излучения позволяют исключить вероятность его природы как второй аккрецирующей сверхмассивной черной дыры в Mrk 766. Вместо этого анализ показывает, что его спектральные характеристики соответствуют компактной области звездообразования.

Материалы и методы. Фотометрические наблюдения проводились на

телескопе Zeiss - 1000 «Восточный» ($F = 6500$ мм, $D = 1$ м) с измененной оптической схемы, установленного на Тянь-Шаньской обсерватории (ТШАО). Спектральные наблюдения получены на двух телескопах: АЗТ - 8 и АЗТ - 20. АЗТ - 20 (диаметр 1,5 м) находится в обсерватории Ассы – Тургень (77.87114° в.д., 43.225527° с.ш., высота 2658 м над уровнем моря). Он оснащён спектрографом с длинной щелью, изготовленный с использованием объемно - фазовых голографических решёток (VRHG), и работает в режиме спектрофотометрии. Относительное фокусное расстояние телескопа составляет 5.72 м ($f / 3.8$). Фокусные расстояния коллиматора и камеры составляют 130 мм и 85 мм, соответственно. Камера EMCCD iXon Ultra 888 имеет матрицу 1024×1024 пикселей, размер пикселя — 13 мкм, а масштаб изображения равен $0.717''$ / пиксель.

АЗТ - 8 (диаметр 70 см) расположен на Каменском плато и используется для наблюдений сейфертовских галактик, симбиотических звёзд и планетарных туманностей. Этот телескоп оснащён спектрографом с решеткой 400 линий/мм и полем зрения $5' \times 5'$ на CCD SBIG 3200. Фотометрические наблюдения обрабатываются с помощью программы для обработки астрономических изображений Maxim DL Pro 6. Для первичной обработки (калибровки) снимков звездного поля (ПЗС - кадров) используются дополнительные калибровочные кадры: DARK и FLAT FIELD. В процессе калибровки снимка устраняются аддитивные и мультипликативные ошибки. В качестве стандартной звезды и проверочных звезд выбирались объекты с известной яркостью, расположенные вблизи исследуемой галактики (см. Таблицу 1). Для приведения инструментальных измерений к стандартной фотометрической системе B, V, Rc применялись соответствующие уравнения (Shomshekova, et.al., 2017). Апертура фотометрии для Mrk 766 составляла $9''$. Для данной галактики фотометрические величины за период с 2015 по 2019 годы приведены в работе (Shomshekova, et.al., 2019), а для настоящей статьи представлены результаты за период с 06 февраля 2020 по 22 февраля 2025, приведенные в Таблице 2.

Таблица 1 - Характеристики стандартных звезд для фотометрических исследований

Исследуемая галактика	Стандартная звезда	B	V	R
	Полоса фильтра			
Mrk 766	Ton 76	14.72	14.2	13.2
	Проверочные звезды			
	Pul - 3 - 920040	16,14	15,2	-
	GPM 184.6072220 + 29.83269	15,7	-	-

Для обработки спектральных данных использовали пакет IRAF в астрономии включают широкий спектр инструментов, предназначенных для анализа, калибровки, визуализации и интерпретации спектров. Процесс обработки включает экстракцию спектра объекта и калибровочной лампы (He - Ne - Ar),

идентификацию линий в спектре лампы, калибровку спектра объекта по длинам волн, калибровку по потокам излучения и анализ профилей эмиссионных линий в разных областях. После обработки спектрограмм объекта получаем потоки излучения в абсолютных энергетических единицах. Для анализа спектров использовали многокомпонентную Гауссову подгонку ('k' с несколькими профилями), оно дает возможность выделять отдельные линии и анализировать каждую в отдельности, результат приведено в Таблице 3.

Результаты. В таблице 1 представлены оценки яркости в фильтрах B, V, Rc Mrk 766 за период 2020–2025 гг., демонстрирующие тенденцию к постепенному ослаблению блеска в трех фильтрах. Для общего сравнения на Рисунке 1 показаны кривые блеска с 2015 по 2025 год, подтверждающие стабильность фотометрических характеристик объекта в оптическом диапазоне на протяжении всего времени наших наблюдений. Данные показывают, что максимальная амплитуда изменения наблюдается в фильтре V (~ 0.16), что соответствует большему изменению светимости в этом диапазоне. В фильтрах B и R амплитуды близки (~ 0.15), что также указывает на значительные изменения, но с меньшей выраженностью. Спектральные данные хорошо согласуются с фотометрическими наблюдениями в фильтрах V и Rc: в апреле 2024 года фиксируется снижение блеска, что подтверждается уменьшением потоков в континууме на спектрах.

Таблица 2 - B, V, Rc величины Mrk 766 в фильтрах B, V, Rc, полученные в 2020-2025 гг.

Date	JD -2440000	B	σB	V	σV	Rc	σRc
06.02.2020	18885	14,948	$\pm 0,006$	14,185	$\pm 0,003$	12,766	$\pm 0,002$
28.02.2020	18907	14,916	$\pm 0,003$	14,145	$\pm 0,002$	12,729	$\pm 0,002$
10.03.2020	18918	14,921	$\pm 0,01$	14,129	$\pm 0,005$	12,720	$\pm 0,005$
19.04.2020	18958	14,871	$\pm 0,004$	14,103	$\pm 0,002$	12,692	$\pm 0,002$
18.03.2021	19291	14,845	$\pm 0,004$	14,076	$\pm 0,003$	12,623	$\pm 0,004$
17.04.2022	19686	14,868	$\pm 0,013$	14,193	$\pm 0,006$	12,728	$\pm 0,004$
25.04.2023	20059	14,874	$\pm 0,007$	14,133	$\pm 0,003$	12,704	$\pm 0,003$
04.05.2023	20068	14,831	$\pm 0,012$	14,116	$\pm 0,005$	12,692	$\pm 0,005$
15.05.2023	20079	14,807	$\pm 0,006$	14,075	$\pm 0,003$	12,643	$\pm 0,003$
17.03.2024	20386	14,782	$\pm 0,007$	14,034	$\pm 0,003$	12,603	$\pm 0,002$
07.04.2024	20407	14,704	$\pm 0,006$	13,973	$\pm 0,002$	12,552	$\pm 0,002$
14.05.2024	20444	14,776	$\pm 0,007$	14,048	$\pm 0,003$	12,62	$\pm 0,002$
18.02.2025	20724	14,871	$\pm 0,008$	14,117	$\pm 0,003$	12,664	$\pm 0,002$
22.02.2025	20728	14,827	$\pm 0,007$	14,091	$\pm 0,003$	12,98	$\pm 0,003$

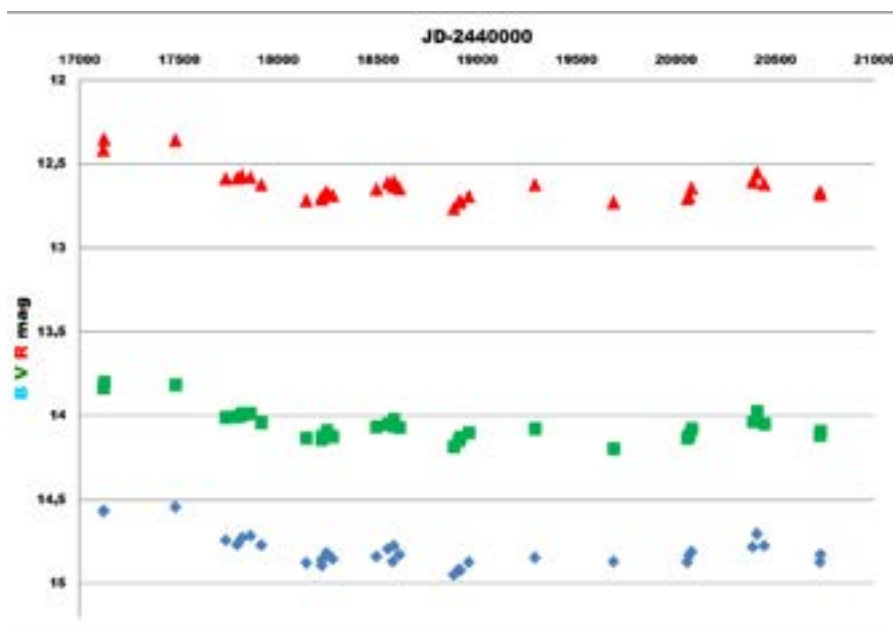


Рисунок 1 - Кривая блеска галактики Mrk 766, полученная с 2015 по 2025 гг. По оси X - юлианская дата - 2440000, по оси Y - звездная величина.

Результаты спектрального анализа приведены в таблице 3. Наблюдается падение уровня континуума с 8.65×10^{-15} до 3.87×10^{-15} (27.05.2024), что указывает на снижение светимости фонового источника (например, уменьшение активности аккреционного диска). Отношение $[SII] / H\alpha + [NII]$ увеличивается от 0.03 (01.04.2024) до 0.12 (07.04.2024) и затем немного снижается до 0.085 (27.05.2024). Это может свидетельствовать о изменениях в плотности газа и степени его ионизации. Значение $[NII] / H\alpha \approx 0.43$ указывает, что галактика Mrk 766 находится в пограничной области между звездообразованием и активным ядром (AGN) на BPT - диаграмме (Baldwin, et al., 1981; Kewley, et al., 2001; Kauffmann, et al., 2003). Резкий рост эквивалентной ширина $[SII]$ с $5 \text{ \AA}$ (01.04) до $19 \text{ \AA}$ (27.05) подтверждает, что линия $[SII]$ усиливается относительно континуума. Возможно, это является результатом процессов, приводящих к возникновению ударных волн или изменения уровня фотоионизации из-за изменений физических условий в окрестности ядра галактики. Снижение светимости континуума может свидетельствовать об изменении активности центрального источника в Mrk 766. Рост $[SII] / H\alpha + [NII]$ указывает на возможные изменения в плотности и ионизации газа.

Таблица 3 - Результаты обработки спектральных данных для галактики MRK 766, полученных в 2024 гг.

Date	Center Line	Wavelength (Å)	Continuum Flux (erg/s/cm2/Å)	Line Flux (erg/s/cm2/s)	EQW (Å)	Telescope
01.04.2024	Hα + [NII] [SII]	6562	7.903E-15	9.556E-13	121	70 cm, AZT - 8
		6730	5.751E-15	3.042E-14	5	
07.04.2024	Hα + [NII] [SII]	6562	8.650E-15	7.865E-13	91	70 cm, AZT - 8
		6730	7.898E-15	9.865E-14	12	
27.05.2024	Hα + [NII] [SII]	6562	3.870E-15	7.982E-13	206	70 cm, AZT - 8
		6730	3.546E-15	6.786E-14	19	

В рамках анализа спектральных данных (Рисунки 2,3,4) галактики MRK 766, полученных с использованием пакета IRAF rvsaο.εmsao, были изучены отдельные эмиссионные линии (Hα, [N II], [S II] и [O I]) на основе трёх независимых наблюдений, проведённых 1, 7 апреля и 27 мая 2024 г.

При предполагаемой относительной погрешности 10% для потока линии и континуума, средняя ошибка эквивалентной ширины составляет около 14–15% для Hα + [N II] и 12–14% для [S II], что соответствует типичным значениям при наблюдениях с телескопом AZT-8 в оптическом диапазоне.

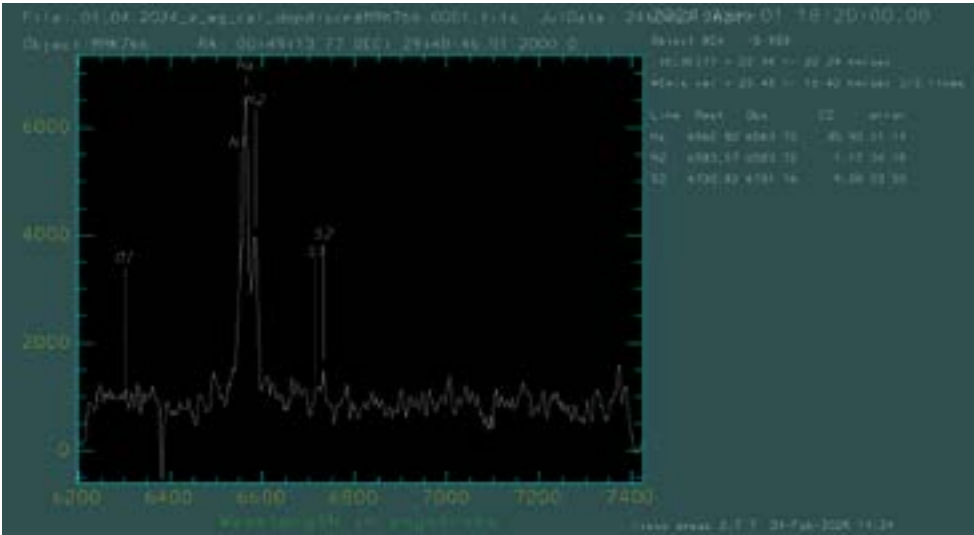


Рисунок 2 - Профиль эмиссионных линий, наблюдаемых на телескопе АЗТ - 8, 1 апреля 2024 года. Ось X — спектральный диапазон от 6200-7200 Å, ось Y — относительные потоки.

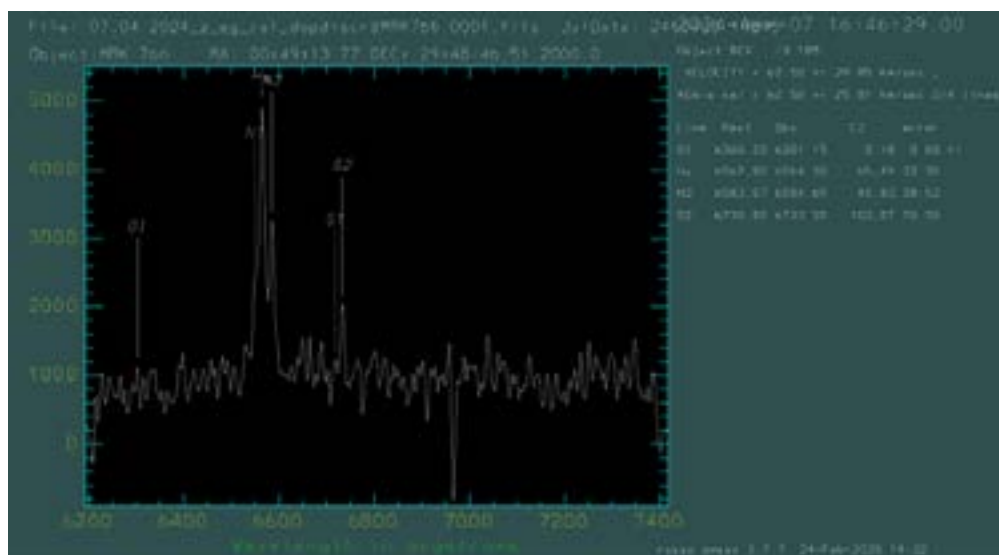


Рисунок 3 - Профиль эмиссионных линий, наблюдаемых на телескопе АЗТ - 8, 7 апреля 2024 года. Ось X — спектральный диапазон от 6200-7200 Å, ось Y — относительные потоки.

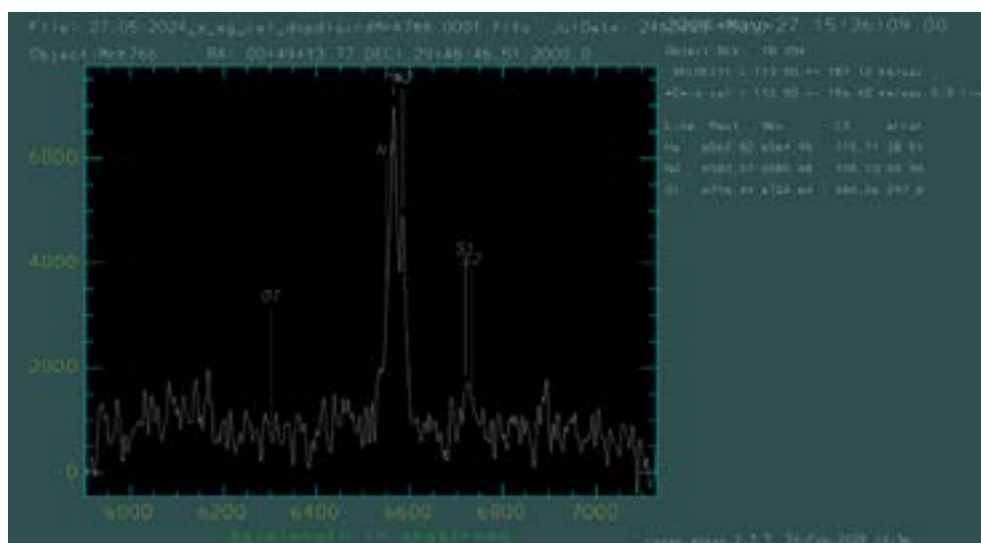


Рисунок 4 - Профиль эмиссионных линий, наблюдаемых на телескопе АЗТ - 8, 27 мая 2024 года. Ось X — спектральный диапазон от 6200-7200 Å, ось Y — относительные потоки.

Основные выводы следующие: В спектре от 1 апреля 2024 г. объединённая скорость составляет ≈ 22.5 км/с ($z \approx 0.0001$) с заметной разницей между H α (≈ 36 км/с) и линиями [N II] и [S II] ($\approx 1 - 9$ км/с). Спектр от 7 апреля 2024 г. характеризуется объединённой скоростью ≈ 62.5 км/с ($z \approx 0.0002$): H α и [N II] дают согласованные значения (примерно 65.5 и 45.8 км/с), а линия [S II] (S2)

— чуть выше (≈ 104 км/с). Линия [O I] практически не влияет на результат (≈ -3.2 км/с, без учёта веса). В спектре от 27 мая 2024 г. линии H α и [N II] показывают скорости порядка 105–115 км/с ($z \approx 0.0003$), в то время как линия [S II] (обозначенная как S1) демонстрирует существенно более высокую скорость (~ 384 км/с, $z \approx 0.0012$) с большой неопределенностью и малым весом в расчётах.

Наблюдаемые расхождения между скоростями, полученными по разным линиям, могут отражать неоднородность кинематики и распределения ионизированного газа внутри галактики. Особенно выделяется высокая скорость и большая ошибка для линии [S II] (S1) в наблюдении от 27 мая что может указывать как на меньшую надёжность измерения этой линии, так и на наличие отдельного кинематического компонента. В то же время согласованность результатов для H α и [N II] свидетельствует о стабильном поведении основных эмиссионных зон.

Обсуждение. Результаты фотометрических и спектроскопических наблюдений Mrk 766 в оптическом диапазоне в 2015–2025 гг. демонстрируют общую стабильность с признаками постепенного ослабления блеска после 2020 года, особенно заметного в фильтре V (амплитуда ~ 0.16 зв. вел.). Эти изменения подтверждаются спектроскопически: в апреле–мае 2024 года зафиксировано снижение потока в континууме и вариации скоростей эмиссионных линий, что может отражать локальные изменения в структуре области BLR или NLR. Наиболее выраженные кинематические отклонения наблюдаются в линии [S II] в спектре от 27 мая 2024 года, что может свидетельствовать о наличии дополнительного газового компонента. Оптические результаты хорошо согласуются с наблюдениями в других диапазонах. Снижение оптической светимости, зафиксированное в апреле 2024 года, вероятно, связано с теми же механизмами, которые обуславливают переменность в UV и X-ray диапазонах — такими как перекрытие аккреционного диска облаками или изменение структуры околоядерной среды. Таким образом, совокупность данных в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах указывает на сложную и изменчивую структуру активного ядра Mrk 766, а также подтверждает необходимость его дальнейшего мультидлиноволнового мониторинга.

Заключение. В ходе спектральных и фотометрических наблюдений сейфертовской галактики Mrk 766 (NGC 4253), проведённых на телескопах Тянь - Шаньской астрономической обсерватории и Обсерватории Каменского Плато, были выявлены значительные изменения в её оптических характеристиках. Фотометрические данные в фильтрах B, V и Rc за период 2020 – 2025 гг. показали постепенное ослабление блеска галактики с максимальной амплитудой изменения в фильтре V (~ 0.16 звёздной величины). Эти изменения согласуются с результатами спектральных наблюдений, фиксирующих снижение потока в континууме и вариации эквивалентных ширин эмиссионных линий, что может указывать на эволюцию активности ядра и изменение условий в окружающем газе.

Спектральный анализ, проведённый 1, 7 апреля и 27 мая 2024 года, выявил неоднородность кинематики ионизированного газа. В частности, обнаружены значительные различия в лучевых скоростях, определённых по разным эмиссионным линиям. Линия [SII] в спектре от 27 мая демонстрирует существенно более высокую скорость (~ 384 км/с) по сравнению с H α и [NII] ($105 - 115$ км/с), что может свидетельствовать о наличии отдельного кинематического компонента или изменении физических условий вблизи ядра. Рост отношения [SII] / H α + [NII] от 0.03 до 0.12 с последующим небольшим снижением, а также увеличение эквивалентной ширины [SII] с $5 \text{ \AA}$ до $19 \text{ \AA}$ могут быть связаны с изменением плотности газа и уровня фотоионизации, вызванным активностью центрального источника. Полученные результаты подтверждают сложную кинематику и неоднородность ионизированного газа в центральных областях галактики, а также указывают на возможные механизмы, такие как влияние ударных волн или изменение условий фотоионизации. Дальнейший мониторинг объекта позволит уточнить эволюционные процессы, происходящие в его активном ядре, и их влияние на окружающую среду.

Литература

- Baldwin J.A., Phillips M.M., Terlevich R. (1981) Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Astronomical Society of the Pacific, Publications.* — Vol. 93. — P. 5-19. DOI: 10.1086/130766
- Bentz M. C., Peterson B.M., Netzer H., Pogge R.W., Vestergaard M. (2009) The Radius - Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei: The Effect of Host-Galaxy Starlight on Luminosity Measurements. II. The Full Sample of Reverberation-Mapped AGNs. *The Astrophysical Journal.* — Vol. 697, Issue 1. — P. 160. DOI: 10.1088/0004-637X/697/1/160.
- Chen S., Laor A., Behar E. (2022) Quasi-simultaneous observations of radio and X - ray variability in three radio-quiet Seyfert galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — Vol. 515, Issue 2. — P. 1723-1735. DOI: 10.1093/mnras/stac1891.
- González Delgado R. M., Heckman T. (2001) The Nuclear and Circumnuclear Stellar Population in Seyfert 2 Galaxies: Implications for the Starburst-Active Galactic Nucleus Connection. *The Astrophysical Journal.* — Vol. 546. — P. 845-865. DOI:10.1086/318295
- Kauffmann G., Heckman T., Tremonti Ch., Brinchmann J., Chariot S., White S., et al. (2003) The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — Vol. 346. — P. 1055. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x.
- Kewley, L., Heisler, C., Dopita, M. (2001) Optical Optical classification of Southern warm infrared galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — Vol. 132. — P. 37. DOI: 10.1086/318944.
- Kukula M. J., Pedlar A., Baum S. A., O'Dea C. P. (1995) High-resolution radio observations of the CfA Seyfert Sample. I. The observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — Vol. 276, Issue 4. — P. 1262-1280. DOI: 10.1093/mnras/276.4.1262.
- Malkan M. A., Gorjian V., Tam R. (1998) A Hubble Space Telescope Imaging Survey of Nearby Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — Vol. 117, Issue 1. — P. 25-88. DOI: 10.1086/313110.
- Mickaelian A.M., Andreasyan R.R., Abrahamyan H.V., Paronyan G.M., Mikayelyan G.A., Sukiasyan A.G., Mkrtchyan V.K. (2021) Multiwavelength search for and studies of active galaxies. *Astronomical and Astrophysical Transactions.* — Vol. 32, No. 4. — P. 331-354. <https://doi.org/10.17184/eac.5652>
- Mochizuki Y., Mizumoto M., Ebisawa K. (2023) Origin of the complex iron line structure and spectral variation in Mrk 766. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — Vol. 525, Issue 1. — P. 922-932. DOI: 10.1093/mnras/stad2329.
- Rodríguez-Ardila A., Contini M., Viegas S.M. (2005) The continuum and narrow-line region of the



narrow-line Seyfert 1 galaxy Mrk 766. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 357, Issue 1. — P. 220-234. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08628.x.

Шомшекова С.А., Рева И.В., Кондратьева Л.Н. (2017). Стандартизация фотометрической системы 1-метрового телескопа ТШАО. *Известия НАН РК. Физико-математическая серия*. — Т. 4, — № 314. — С. 155–161. url: <https://rmebrk.kz/journals/3432/87155.pdf>

Shomshekova S.; Denissyuk E.; Valiullin R.; Omarov Ch. (2019) Photometric research of Seyfert galaxies MRK 766, MRK 6, MRK 1040, MRK 1513. *News of NAS of RK. Physico-mathematical Series*. — No 3. — P. 64-71. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1726.25>.

Smith K.L., Mushotzky R., Boyd P., et al. (2018) Evidence for an optical low - frequency quasi-periodic oscillation in the Kepler light curve of an active galaxy. *The Astrophysical Journal*. — Vol. 860. — L10. DOI: 10.3847/2041-8213/aac88c

Yao S., Qiao E., Xue - Bing W. (2018) Exploring the physics of the accretion and jet in nearby narrow - line Seyfert 1 galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 477. — P. 1356. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty788>

References

Baldwin J.A., Phillips M.M., Terlevich R. (1981) Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Astronomical Society of the Pacific, Publications*. — Vol. 93. — P. 5-19. DOI: 10.1086/130766 (in Eng.).

Bentz M.C., Peterson B. M., Netzer H., Pogge R.W., Vestergaard M. (2009) The Radius - Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei: The Effect of Host-Galaxy Starlight on Luminosity Measurements. II. The Full Sample of Reverberation-Mapped AGNs. *The Astrophysical Journal*. — Vol. 697, Issue 1. — P. 160. DOI: 10.1088/0004-637X/697/1/160. (in Eng.).

Chen S., Laor A., Behar E. (2022) Quasi-simultaneous observations of radio and X - ray variability in three radio-quiet Seyfert galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 515, Issue 2. — P. 1723-1735. DOI: 10.1093/mnras/stac1891. (in Eng.) González Delgado R. M., Heckman T. (2001) The Nuclear and Circumnuclear Stellar Population in Seyfert 2 Galaxies: Implications for the Starburst-Active Galactic Nucleus Connection. *The Astrophysical Journal*. — Vol. 546. — P. 845-865. DOI:10.1086/318295(in Eng.).

Kauffmann G., Heckman T., Tremonti Ch., Brinchmann J., Chariot S., White S., et al. (2003) The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 346. — P. 1055. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x. (in Eng.).

Kewley, L., Heisler, C., Dopita, M. (2001) Optical Optical classification of Southern warm infrared galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — Vol. 132. — P. 37. DOI: 10.1086/318944. (in Eng.).

Kukula M.J., Pedlar A., Baum S. A., O'Dea C. P. (1995) High-resolution radio observations of the CfA Seyfert Sample. I. The observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 276, — Issue 4. — P. 1262-1280. DOI: 10.1093/mnras/276.4.1262. (in Eng.).

Malkan M.A., Gorjian V., Tam R. (1998) A Hubble Space Telescope Imaging Survey of Nearby Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — Vol. 117, — Issue 1. — P. 25-88. DOI: 10.1086/313110. (in Eng.).

Mickaelian A.M., Andreasyan R.R., Abrahamyan H.V., Paronyan G.M., Mikayelyan G.A., Sukiasyan A.G., Mkrtchyan V.K. (2021) Multiwavelength search for and studies of active galaxies. *Astronomical and Astrophysical Transactions*. — Vol. 32, — No. 4. — P. 331-354. <https://doi.org/10.17184/eac.5652> (in Eng.).

Mochizuki Y., Mizumoto M., Ebisawa K. (2023) Origin of the complex iron line structure and spectral variation in Mrk 766. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 525, — Issue 1. — P. 922-932. DOI: 10.1093/mnras/stad2329. (in Eng.).

Rodríguez-Ardila A., Contini M., Viegas S. M. (2005) The continuum and narrow-line region of the narrow-line Seyfert 1 galaxy Mrk 766. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — Vol. 357, — Issue 1. — P. 220-234. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08628.x. (in Eng.).

Shomshekova S.A., Reva I.V., Kondratyeva L.N. (2017) Standartizaciya Fotometricheskoy Sistemy



1-Metrovogo Teleskopa Tyan'-Shanskoy Astronomicheskoy Observatorii [Standardization of the photometric system of the 1 - meter telescope on TSHAO]. Of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series. — Vol. 4, — No. 314. — P. 155-161. url: <https://rmebrk.kz/journals/3432/87155.pdf> (in russian)

Shomshekova S.; Denissyuk E.; Valiullin R.; Omarov Ch. (2019) Photometric research of Seyfert galaxies MRK 766, MRK 6, MRK 1040, MRK 1513. News of NAS of RK. Physico-mathematical Series. — No 3. — P. 64-71. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1726.25>. (in Eng.).

Smith K.L., Mushotzky R., Boyd P., et al. (2018) Evidence for an optical low - frequency quasi-periodic oscillation in the Kepler light curve of an active galaxy. The Astrophysical Journal. — Vol. 860. — L10. DOI: 10.3847/2041-8213/aac88c (in Eng.).

Yao S., Qiao E., Xue - Bing W. (2018) Exploring the physics of the accretion and jet in nearby narrow - line Seyfert 1 galaxies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Vol. 477. — P. 1356. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty788>(in Eng.).

© D.T. Altynbekova^{1*}, B.K. Massalimova², B.E. Begenova², A. Darmenbayeva¹,
M.D. Akanova², 2025.

^{1*}Taraz University named after M.Kh. Dulaty, Taraz, Kazakhstan;

² M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan.

E-mail: Altynbekova.1985@inbox.ru

SYNTHESIS AND STUDY OF PROTON CONDUCTIVITY OF NANOCOMPOSITES BASED ON COMPLEX OXIDES (LaNbO₄) AND ALLOYS (NiCoOx, CuCoOx, NiCuOx)

D.T. Altynbekova — Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Chemical Technology, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,

E-mail: altynbekova.1985@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8489-320X>;

B.K. Massalimova — candidate of chemical sciences, professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan, E-mail: massalimova15@mail.ru, bkmassalimova@ku.edu.kz. <https://orcid.org/0000-0003-0135-9712>;

B.E. Begenova — doctor of chemical sciences, chair, associate professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan,

E-mail: bebegenova@ku.edu.kz. <https://orcid.org/0000-0003-0279-3481>;

A. Darmenbayeva — PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,

E-mail: maral88.ad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2974-0398>;

M.D. Akanova — Senior lecturer of the Department of «Chemistry and Chemical Technology» of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan,

E-mail: mdakanova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0279-3481>.

Abstract. In recent years, global economic trends and environmental concerns have led to a growing demand for renewable energy sources. In response, the European Union has been tightening environmental regulations regarding greenhouse gas emissions annually. In this context, the development of advanced materials and technologies for alternative energy systems has become a key factor in achieving a sustainable energy future. Lanthanum orthoniobates are a class of proton-conducting oxides that are considered promising materials for high-temperature electrochemical devices. These compounds are actively investigated for applications in proton-conducting ceramic membranes, solid oxide fuel cells, and electrolysis systems due to their high proton conductivity ($\sim 10^{-3}$ S/cm at 800 °C) and excellent chemical stability. However, stabilizing and modifying their structure is essential to enhance their practical applicability. In this study, a novel nanocomposite based on

complex oxide $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4$ and a NiCoOx alloy (in a 65:35 ratio) was synthesized for the first time via an ultrasonic dispersion method. The individual components— $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4$ and NiCoOx —were pre-synthesized using a solvothermal method in a continuous-flow reactor under supercritical alcohol conditions. The structural, morphological, and proton-conducting properties of the resulting nanocomposite were studied using various physicochemical techniques. The $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoOx}$ composite exhibited total conductivity of $\sim 10^{-2} \text{ S/cm}$ at 597°C under humidified reducing atmosphere, indicating high proton conductivity. These results demonstrate that LaNbO_4 -based nanocomposites with NiCoOx alloys are promising candidates for hydrogen-permeable membranes and other electrochemical devices such as fuel cells, hydrogen separators, and sensors.

Keywords: complex oxides, lanthanum orthoniobate, nanocomposite, ultrasonic dispersion method

© Д.Т. Алтынбекова^{1*}, Б.К. Масалимова², Б.Е. Бегенова², А. Дарменбаева¹,
М.Д. Аканова², 2025.

¹М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан;

²М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,

Петропавл, Қазақстан.

E-mail: Altynbekova.1985@inbox.ru

КҮРДЕЛІ ОКСИДЕР (LaNbO_4) МЕН ҚҰЙМАЛАРДЫҢ (NiCoO_x , CuCoO_x , NiCuO_x) НЕГІЗІНДЕГІ НАНОКОМПОЗИТТЕРДІ СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ ПРОТОНӨТКІЗГІШТІГІН ЗЕРТТЕУ

Алтынбекова Д.Т. — М.Х. Дулати атындағы Тараз университетінің «Химия және химиялық технология» кафедрасының аға оқытушысы., Тараз, Қазақстан,

E-mail: altynbekova.1985@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8489-320X>;

Масалимова Б.К. — химия ғылымдарының кандидаты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университетінің «Химия және химиялық технология» кафедрасының профессоры, Петропавл, Қазақстан,

E-mail: massalimova15@mail.ru, bkmassalimova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0125>;

Бегенова Б.Е. — химия ғылымдарының докторы, кафедра меңгерушісі, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университетінің «Химия және химиялық технология» кафедрасының доценті, Петропавл, Қазақстан,

E-mail: bebeganova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0279-3481>;

Дарменбаева А. — химия ғылымдарының кандидаты, М.Х. атындағы Тараз университетінің «Химия және химиялық технология» кафедрасының доценті, Дулати, Тараз, Қазақстан,

E-mail: maral88.ad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2974-0398>;

Аканова М.Д. — М. Қозыбаева атындағы Солтүстік Қазақстан университетінің «Химия және химиялық технология» кафедрасының аға оқытушысы, Петропавл, Қазақстан,

E-mail: mdakanova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0279-3481>.

Аннотация. Әлемдік экономикалық үрдістердің өзгеруі мен жаһандық экологиялық қауіптерге байланысты соңғы жылдары жаңартылатын энергия көздеріне деген сұраныс артып келеді. Осыған орай, Еуропалық Одақ парниктік газдар шығарындыларына қатысты экологиялық талаптарды жыл сайын

катайтып отыр. Мұндай жағдайда баламалы энергия көздерін дамыту үшін тиімді жаңа материалдар мен технологияларды әзірлеу тұрақты энергетикалық болашаққа қол жеткізудің маңызды алғышартына айналады. Лантан ортониобаттары — жоғары температурада жұмыс істейтін электрохимиялық құрылғыларға арналған перспективалы материалдар қатарына жататын протон өткізгіш оксидтер. Олар протон өткізгіш керамикалық мембраналарда, қатты оксидті отын элементтері мен электролизерлерде қолдану үшін белсенді түрде зерттелуде. Бұл қосылыстардың $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ шамасында 10^{-3} См/см деңгейіндегі жоғары протон өткізгіштік қасиеті және химиялық тұрақтылығы оларды энергия түрлендіру технологияларында пайдалануға қолайлы етеді. Сондықтан мұндай материалдарды практикалық қолдану үшін олардың құрылымын тұрақтандыру және модификациялау өзекті мәселе болып табылады. Мақалада күрделі оксид $(\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4)$ пен NiCoO_x құймасы 65%:35% арақатынаста ультрадыбыстық диспергилеу әдісімен алғаш рет жаңа наноккомпозит синтезделді. Күрделі оксид $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4$ пен NiCoO_x құймасы алдын-ала ағынды реакторда жоғарыкрификалық спирттер көмегімен сольвотермалды синтездеу әдісімен алынды. Алынған наноккомпозиттің құрылымдық, морфологиялық және протонөткізгіштік қасиеттері физика-химиялық әдістермен зерттелді. $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ үлгісінің жалпы электр өткізгіштігі (ылғалды қалпына келтіретін атмосферада өлшенгенде) $597\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурада $\sim 10^{-2}$ См/см протон өткізгіштікке жететіндігі анықталды. Лантан ортониобаты (LaNbO_4) мен құйма (NiCoO_x , негізіндегі наноккомпозиттер сутегі бөлгіш мембраналар үшін, әртүрлі электрохимиялық құрылғыларда (отын элементтері, сутегі сепараторлары мен датчиктер және т.б.) пайдалану мүмкіндігіне байланысты перспективалы композиттер болып табылатындығы анықталды.

Түйін сөздер: күрделі оксидтер, лантан ортониобаты, наноккомпозит, ультрадыбыстық диспергилеу әдісі

© Д.Т. Алтынбекова^{1*}, Б.К. Масалимова², Б.Е. Бегенова², А. Дарменбаева¹,
М.Д. Аканова², 2025.

¹Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан;

²Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Казахстан.

E-mail: *Altynbekova.1985@inbox.ru

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ (LaNbO_4) И СПЛАВОВ (NiCoO_x , CuCoO_x , NiCuO_x)

Алтынбекова Д.Т. — старший преподаватель кафедры «Химии и химической технологии» Таразского университета имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,

E-mail: altynbekova.1985@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8489-320X>;

Масалимова Б.К. — кандидат химических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология», Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан,
E-mail: massalimova15@mail.ru, bkmassalimova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0135-9712>;



Бегенова Б.Е. — доктор химических наук, заведующий кафедрой, доцент кафедры «Химии и химической технологии» Северо-Казахстанского университета имени М.Козыбаева, Петропавловск, Казахстан,

E-mail: bebegenova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0279-3481>;

Дарменбаева А. — PhD по химии, ассоциированный профессор кафедры «Химии и химической технологии» Таразского университета имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,

E-mail: maral88.ad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2974-0398>;

Аканова М.Д. — старший преподаватель кафедры «Химия и химическая технология» Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан,

E-mail: mdakanova@ku.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0279-3481>;

Аннотация. В условиях современных глобальных экономических изменений и экологических вызовов наблюдается устойчивый рост спроса на возобновляемые источники энергии. В связи с этим Европейский союз ежегодно ужесточает экологические нормы, касающиеся выбросов парниковых газов. Разработка новых эффективных материалов и технологий для альтернативной энергетики становится ключевым условием для достижения устойчивого энергетического будущего. Лантан ортониобаты относятся к классу протонпроводящих оксидов и считаются перспективными материалами для высокотемпературных электрохимических устройств. Благодаря высокой протонной проводимости ($\sim 10^{-3}$ См/см при 800 °C) и высокой химической стабильности, они активно исследуются для применения в керамических мембранах, твёрдооксидных топливных элементах и электролизёрах. Однако для практического применения необходимо обеспечить стабильность структуры и провести модификацию состава. В данной работе впервые синтезирован новый наноккомпозит на основе сложного оксида $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4$ и сплава NiCoOx в соотношении 65:35 методом ультразвуковой дисперсии. Предварительно оба компонента были получены методом сольвотермального синтеза в проточном реакторе в условиях сверхкритических спиртов. Структурные, морфологические и протонпроводящие свойства наноккомпозита исследованы с использованием комплекса физико-химических методов. Установлено, что образец $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoOx}$ обладает общей проводимостью порядка $\sim 10^{-2}$ См/см при температуре 597 °C во влажной восстановительной атмосфере, что свидетельствует о высокой протонной проводимости. Полученные результаты демонстрируют перспективность наноккомпозитов на основе LaNbO_4 и NiCoOx для применения в водородопроницаемых мембранах и различных электрохимических устройствах, таких как топливные элементы, сепараторы водорода и сенсоры.

Ключевые слова: сложные оксиды, ортониобат лантана, наноккомпозит, метод ультразвукового диспергирования

Кіріспе. Соңғы жылдары, ғылыми ортада протон мен оттегінің өткізгіштігінің, тығыздығының және термохимиялық тұрақтылықтың жоғары мәндеріне байланысты перспективалы иондық өткізгіштер болып саналатын материалдарды белсенді түрде іздеу жүргізілуде (Sadykov, et al., 2019). Жоғары температурадағы протонды тасымалдауды зерттеудің классикалық

объектілері сирек жер элементтерімен (мысалы барий) допирленген цераттар немесе цирконаттар, цирконаттар- цераттар негізіндегі перовскит тәрізді оксидтер болып табылады, мысалы, BaCeO_3 , BaZrO_3 , SrCeO_3 және SrZrO_3 (Malavasi, et al., 2010, Markov, 2021) BaCeO_3 қоспасы бар электролиттердің химиялық және термиялық тұрақтылығы нашар, бірақ тотығу-тотықсыздану циклдеріндегі протонды өткізгіштік жоғары (700°C -де 10^{-2} См/см) керісінше, BaZrO_3 қоспасы бар электролиттер қолайлы химиялық және термиялық тұрақтылықты көрсетті, бірақ протон өткізгіштігі төмен (Gui, et al., 2016). Барий цирконаттар-цераттар $\text{BaCe}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$ қолдану химиялық тұрақтылық пен протон өткізгіштігін жоғарылатуға жақсы шешім болуы мүмкін, ал Zr/Ce қатынасының жоғарылауымен химиялық тұрақтылық артады (Rashid, et al., 2019), Соңғы жылдары, химиялық тұрақтылықты арттыруда белгілі бір жетістіктерге А- және В-катиондарын (подрешеток) әртүрлі катиондармен (Sr, Y, Ca, Nb және т.б.) допирлеу арқылы қол жеткізілді, бірақ бұл әрқашан протон өткізгіштігі мен агломерация қабілетінің жоғарылауына немесе кем дегенде сақталуына әкелмейді (Rashid, et al., 2019, Hashim, et al., 2018; Sonu, et al., 2018; Khalid, et al., 2021; Jian, et al., 1996) Сол себепті, қазіргі таңда сутегі өткізгіш материалдар үшін жаңа материалдарды іздеу маңызды. Оларға сирек жер элементтерінің ортониобаттары (атап айтқанда, лантан ниобаттары) жатады, олар отын элементтерінің құрамдас бөліктері және сутегі бөлгіш мембраналар үшін керамикалық мембраналық реакторлар, электролизерлер, қатты оксидті отын элементтері (ҚООЭ) үшін басқа электрохимиялық құрылғылардың құрамдас бөліктері ретінде пайдалануға арналған перспективалық материалдар ретінде сипатталады. Бұл күрделі оксидтер негізінен иондық өткізгіштер болып табылады және жоғары температурада тетрагональды жүйеде (шеелиттік құрылым) және төмен температурада моноклиндік жүйеде (фергюсонит құрылымы) кристалданады. Әдеби шолуларға сүйенсек, лантан ортониобаттары негізінде алынған материалдардың сутегіде немесе құрамында сутегі бар атмосферада $400\text{--}900^\circ\text{C}$ температура аралығында протон өткізгіштік қасиеті жоғары екені анықталған. LaNbO_4 негізіндегі материалдардағы протондардың өткізгіштігін одан әрі арттыруға шеелиттің А-катионын сілтілік жер металдармен: Sr, Mg және Ca, лантаноидтармен: Ce, Yb, Pr, өтпелі металдармен: Mo, Cu (Fjeld., et al., 2010, Yong., et al., 2014, Brand., et al., 2011, Brandao., et al., 2012) сондай-ақ, шағын иондық радиусы бар жоғары валенттілікке ие W, Zr, Mn, Co, Ti, Mo, Y металдармен В-катиондарды допирлеу арқылы қол жеткізуге болатындығы (Ivanova, et al., 2012; Yong, et al., 2015; Mariya., et al., 2015; João, et al., 2019) жайында зерттеулерінде келтірді.

Материалдар мен әдістер. Бұл мақалада құрамында металл нанобөлшектері бар ($M = \text{Ni}, \text{Co}$) $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ нанокомпозит жаңа түрі ультрадыбыстық диспергирлеу әдісімен синтездеу мақсат етіп қойылды. Синтезделген материалдың мөлшері, фазалық құрамы, морфологиясы, сондай-ақ тасымалдау қасиеттері электронды сканерлеу микроскопиясы (HRTEM) және рентгендік фазалық талдау (РФА) арқылы, композиттің протон өткізгіштігі

таблетка түріндегі үлгілерде ион-селективті зондтармен жабдықталған 4-зондты Van der Pauw әдісі арқылы гальваностатикалық режимде анықталды. Өлшеулер сутек атмосферасында 50–850 °C температура диапазонында жүргізілді. Өлшеу үшін ИПУ-1 аспабы қолданылып, зерттелді. Бірфазалы ортониобат қазірдің өзінде жақсы зерттелген, сондықтан олардың негізіндегі аралас өткізгіштігі бар нанокөмірлік материалдар теориялық және практикалық жағынан да қызығушылық тудырады.

Тәжірибелік бөлім. Күрделі оксидтер (Altyn, et al., 2020) және құйманың (Altyn, et al., 2020) үлгілері ағынды реакторда жоғарыкритикалық спирттер көмегімен сольвотермалды синтездеу әдісімен алынды. Материалдар $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Vecton, Ресей), $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Reakhim, Ресей) және NbCl_5 (Acros Organics, Бельгия), $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Reakhim, Russia), тұздарының спирттік ерітінділері арқылы синтезделді. Прекурсорлық ерітінділер изопропанолда (Реаким, Ресей) тұздарды комплекс түзуші ретінде эквимольарлы ацетилацетонды $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ (Реакхим, Ресей) қосу арқылы дайындады. Металл тұзының ерітінділерінің қоспасы U-тәрізді реакторға ($l=75$ см, $d=4$ мм) 5 мл/мин жылдамдықпен жіберілді. Бұл ретте реакторға 400°C және 120 атм қысымда 9 мл/мин жылдамдықпен 150°C дейін қыздырылған изопропил спирті қосылды. Синтез өнімдері декантация арқылы бөлінді. Тұнбалар кептіріліп, 500-1100°C температурада 4 сағат бойы күйдірілді.

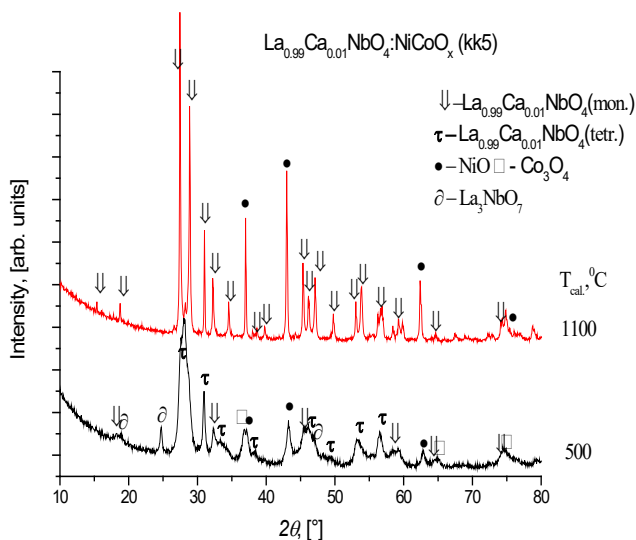
Нанокөмірліктерді синтездеу ультрадыбыстық дисперсті «T-18 Basic», «ULXAUER Germany», «TRAUR» көмегімен жүргізілді. $\text{La}_{0,99}\text{Ca}_{0,01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$, композитті ультрадыбыстық диспергилеу арқылы алу үшін, сольвотермиялық әдіспен синтезделген күрделі оксид ($\text{La}_{0,99}\text{Ca}_{0,01}\text{NbO}_4$) мен металл құйма NiCoO_x құрғақ ұнтағын (тиісінше 65%:35%) 50 мл изопропанолда беттік белсенді зат ретінде 2 мл поливинилбутирал қосып, 40 минут ішінде диспергилеу арқылы синтезделді. Алынған суспензия 80°C температурада 24 сағат бойы кептірілді, содан кейін, ұнтақталды және органикалық еріткіштерді кетіру үшін 2 сағат бойы 500°C температурада ауада күйдірілді.

Синтезделген үлгілердің фазалық құрамы рентгендік дифракциялық зерттеулер (XRD) D8 Advance дифрактометрінде (Брукер, Германия) монокроматикалық Cu-K α сәулеленуімен ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) 2θ диапазонында 20-90°, сканерлеу қадамы 0,02 немесе 0,05° жүргізілді. Оттегі бос орындарының үлесі TOPAS (Total Pattern Analysis System) (Брукер, Германия) бағдарламасының көмегімен Ритвельд әдісі бойынша құрылымдағы оттегі позицияларының толтырылуын нақтылау арқылы есептелді. Рентген сәулелерінің дифракциялық үлгілері әртүрлі газ қоспаларының жоғары температуралық коректенуімен жабдықталған Bruker AXS D8 Advance дифрактометрінде (Германия), сканерлеу қадамы $2\theta = 0,05^\circ$ және жинақтау уақыты 3 с ($2-\theta = 5^\circ$ бұрыштық диапазондағы әрбір нүкте) CuK α эмиттерінде алынды.

Суреттер JEM-2200FS трансмиссиялық электронды микроскопта (JEOL Ltd., Жапония, жеделдеткіш кернеуі 200 кВ, тор ажыратымдылығы 1 А) кең бұрышты сақиналы сканерлеуші электрондық микроскопия (HAADF-STEM)

және жоғары ажыратымдылықтағы трансмиссиялық электронды микроскопия (HRTEM) арқылы алынды. Қадамдық сызықтық талдау немесе элементтік EDX салыстыру үшін нүктенің минималды диаметрі 1,5 нм сканерлеу қадамымен ~1 нм болды. Құрамында катиондары бар композиттердің протонды өткізгіштігі басқа жұмыстарда сипатталған иондық зонд әдісіне ұқсас $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4$ протон өткізгіш керамикадан жасалған төрт ион таңдаулы зондтармен гальваностатикалық режимде Ван дер Пау әдісімен жинақы үлгілерде анықталды. Ионды-селективті электродтар протон өткізгіштігін анықтауға мүмкіндік берді, өйткені олар протондар үшін қайтымды электродтар бола отырып, электронды тоқты толығымен блоктады.

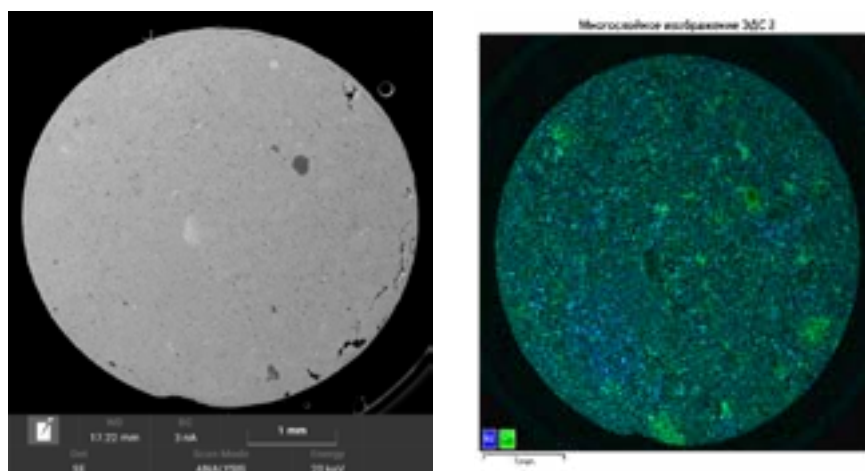
Нәтиже және талқылау



Сурет 1. Әр түрлі температурада күйдірілген рентгенограммалар

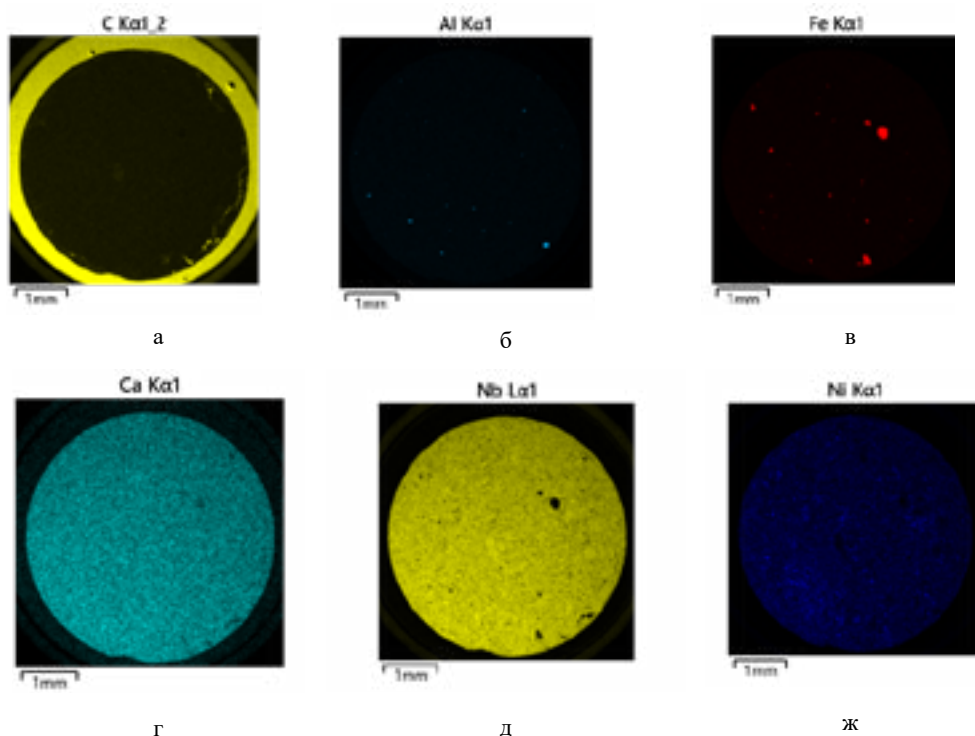
РФА деректеріне сәйкес $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ екі фазаның қоспасы – моноклиниктік және тетрагональды, олардың шыңдары кеңейеді, бұл синтез кезінде алынған үлгі нанометрлік диапазондағы бастапқы бөлшектердің өлшемі бар ультра жұқа материал екенін көрсетеді. Күйдіру температурасының жоғарылауымен 1100°C екі фазаның кристалдануы артады, фазалар санының қатынасы моноклиникалық фазаның $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4$ жоғарылауына қарай өзгереді. 1100°C күйдірілгеннен кейін тетрагональды фаза жоғалады.

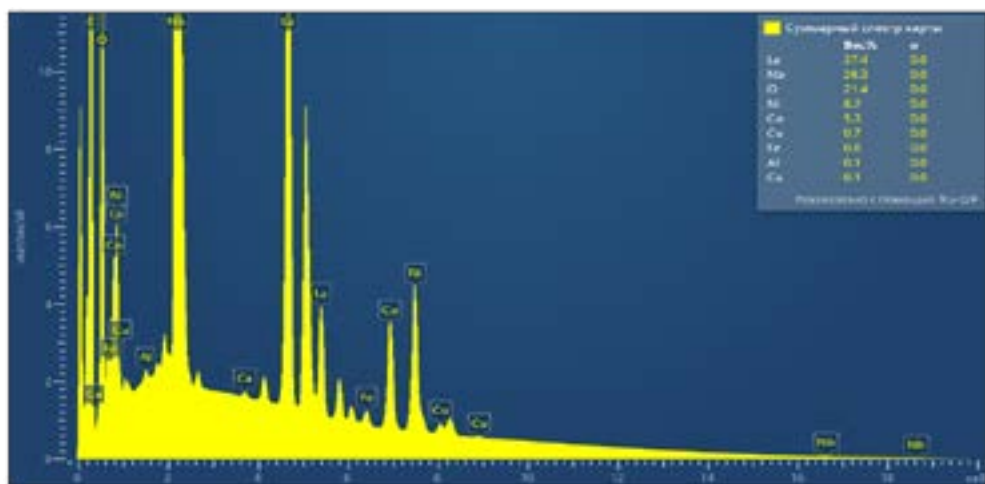
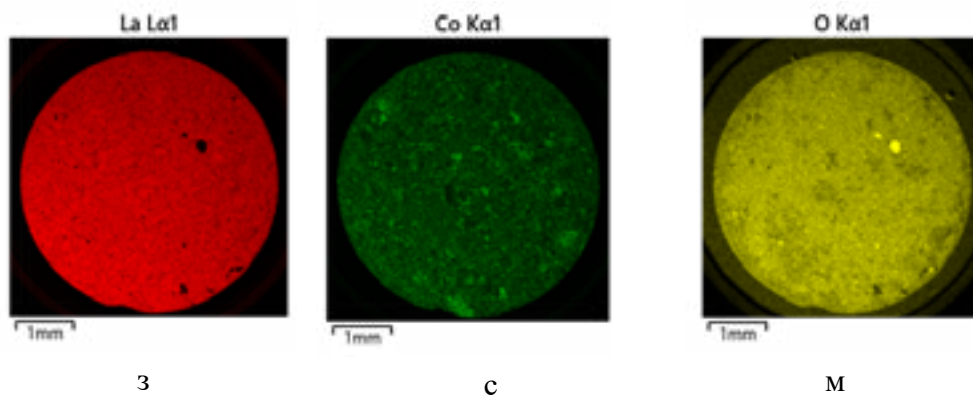
$\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ 11000 үлгісін СЭМ және ЭДС (карталау) арқылы зерттеу үшін саңылау (беттік кесінді) жасалды.



Сурет 2. Кальцинация температурасы 1100°C кезінде $\text{La}_{0,99}\text{Ca}_{0,01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ электронды микроскопиялық суреттері.

Шлейф бетінде Ni және Co таралуы: никельмен де, кобальтпен де байытылған жергілікті аймақтар байқалады. Nb, La, Ca және жергілікті Fe және Al аймақтарының салыстырмалы түрде біркелкі таралуы үлгідегі элементтердің жеке карталарында байқалады.



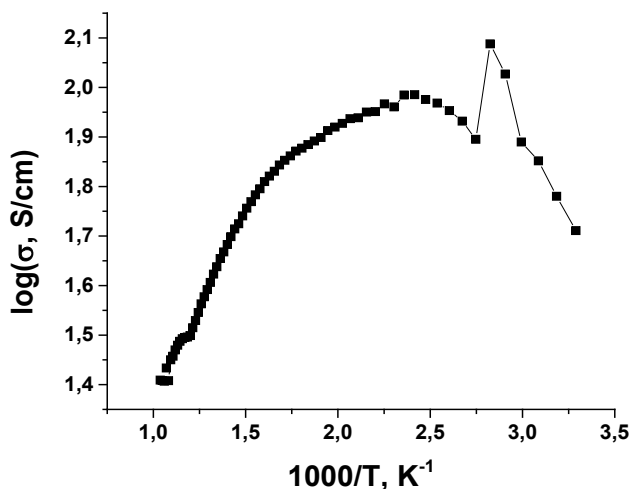


Сурет 3. «Ультрадыбыстық диспергирлеу» әдісімен синтезделген $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ нанокөмізгіштің элементтерінің жеке картасы және ЭДС спектрі

Кесте 1 «Ультрадыбыстық диспергирлеу» әдісімен синтезделген $\text{La}_{0.99}\text{Ca}_{0.01}\text{NbO}_4 + \text{NiCoO}_x$ композицияның стехиометриялық құрамы

Элементтер	Салмақтық үлесі%	Атомдық үлесі %
O	21.41	62.32
Al	0.13	0.23
Ca 0.09 0.10		
Fe	0.57	0.47
Co	5.34	4.22
Ni	8.16	6.47
Cu	0.69	0.51
Nb	26.25	13.16

La	37.35	12.52
Барлығы	100.00	100.00



Сурет 4. He + 10% ылғалды H₂ газ қоспасындағы тығыздалған композит үлгісінің жалпы электр өткізгіштігі

La_{0.99}Ca_{0.01}NbO₄·NiCoO_x үлгісі үшін электрөткізгіштіктің температураға тәуелділігі графигінде орташа температуралық аймақта (~2.7–3.0) электрөткізгіштіктің күрт артуы байқалады. Бұл мән шамамен 597 °C температурада ~10⁻² См/см протон өткізгіштікке жетеді. Мұндай, құбылыс заряд тасымалдау механизмінің өзгеруімен, мысалы, протон өткізгіштіктен электрондық өткізгіштікке ауысумен байланысты болуы мүмкін. Сонымен қатар, фазалық ауысу немесе кристалл торының құрылымдық қайта түзілуі де жоққа шығарылмайды, бұл заряд тасымалдаушылар концентрациясының артуына әкелуі мүмкін. Температураны одан әрі арттырғанда өткізгіштік төмендейді, бұл, мүмкін, материалдың дегидратациялануымен немесе өткізгіш фазаның термиялық тозуының басталуымен байланысты.

Қорытынды. Бұл зерттеуде күрделі оксидтер (La_{0.99}Ca_{0.01}NbO₄) мен металл құймасының (NiCoO_x) қатысуымен ультрадыбыстық диспергилеу әдісімен алғаш рет жаңа нанокомпозит синтезделді. Алынған нанокомпозиттердің құрылымдық және протонөткізгіштік қасиеттері физика-химиялық әдістермен зерттелді. Иондық өткізгіш ретінде белгілі La_{0.99}Ca_{0.01}NbO₄ фазасы қалпына келтірілгеннен кейін барлық үлгілерде бар екендігі дәлелденді. Метал-керамикалық La_{0.99}Ca_{0.01}NbO₄·NiCoO_x композиттік материалдардың электрофизикалық қасиеттерін өлшеу стандартты 4 электродты Ван дер Пау әдісімен жүргізілді. үлгілерінің жалпы электр өткізгіштігі (ылғалды қалпына келтіретін атмосферада өлшенгенде) 597 °C температурада ~10⁻² См/см

анықталды. Лантан ортонобибаттары (LaNbO_4) негізіндегі нанокөміпозиттер сутегі бөлгіш мембраналар үшін, әртүрлі электрохимиялық құрылғыларда (отын элементтері, сутегі сепараторлары мен датчиктер және т.б.) пайдалану мүмкіндігіне байланысты перспективалы көміпозиттер болып табылады.

References

- Sadykov V.A. et al. (2019) Advanced materials for solid oxide fuel cells and membrane catalytic reactors *Advanced Nanomaterials for Catalysis and Energy*. — Elsevier. — C. 435-514 (in English)
- Malavasi L., Fisher C.A.J., Islam M.S. (2010) Oxide-ion and proton conducting electrolyte materials for clean energy applications: structural and mechanistic features. *Chemical Society Reviews*. — P. 39. —11: 4370-4387 (in English)
- Markov A.A., Nikitin S.S., Politov B.V., Shalaeva E.V., Tyutyunnik A.P., Leonidov I.A., Patrakeev M.V. (2021) The impact of cerium content on oxygen stoichiometry, defect equilibrium, and thermodynamic quantities of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{FeO}_{3-\delta}$. *Journal of Alloys and Compounds*. — 875:160051 (in English)
- Gui L., Ling Y., Li G., Wang Z., Wan Y., Wang R., He B., Zhao L. (2016) Enhanced sinterability and conductivity of $\text{BaZr}_{0.3}\text{Ce}_{0.5}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ by addition of bismuth oxide for proton conducting solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*. — P.369–375 (in English)
- Rashid N.L.R.M., Samat A.A., Jais A.A., Somalu M.R., Muchtar A., Baharuddin N.A., Isahak W.N.R.W. (2019) Review on zirconate-cerate-based electrolytes for proton-conducting solid oxide fuel cell // *Ceramics International*. — 45:6605-6615. (in English)
- Markov A.A., Nikitin S.S., Politov B.V., Shalaeva E.V., Tyutyunnik A.P., Leonidov I.A., Patrakeev M.V. (2021) The impact of cerium content on oxygen stoichiometry, defect equilibrium, and thermodynamic quantities of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{FeO}_{3-\delta}$. *Journal of Alloys and Compounds*. — 875:160051 (in English)
- Hashim S.S., Somalu M.R., Loh K.S., Liu S., Zhou W., Sunarso J. (2018) Perovskite-based proton conducting membranes for hydrogen separation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. — 43:15281-15305 (in English)
- Sonu B.K., Sinha E. (2021) Structural, thermal stability and electrical conductivity of zirconium substituted barium cerate ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*. — 860:158471 (in English)
- Khalid Hossain M., Biswas M.C., Chanda R.K., Rubel M.H.K., Ishak Khan M., Hashizume K. (2021) A review on experimental and theoretical studies of perovskite barium zirconate proton conductors // *Emergent Materials*. — 4:999-1027 (in English)
- Jian L., Wayman M. (196) Protonic conduction in Sr-doped $(\text{La}_{1-x}\text{Sm}_x)\text{PO}_4$, *Journal of Solid State Chemistry*. — 79:65-69 (in English)
- Fjeld H., Kepaptsoglou D. M., Haugsrud R., Norby T., ReidarHaugsrud. (2010) Charge carriers in grain boundaries of 0.5% Sr-doped LaNbO_4 , *Solid State Ionics*. — 181:104-109 (in English)
- Yong Cao, Bo Chi, Jian Pu, Li Jian. (2014) Effect of Ce and Yb co-doping on conductivity of LaNbO_4 , *Journal of the European Ceramic Society*. — 3:1981-1988 (in English)
- Brand A.D., Gracio J., Mather G.C., Kharton V.V., Fagg D.P. (2011) B-site substitutions in $\text{LaNb}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_{4-\delta}$ materials in the search for potential proton conductors ($\text{M}=\text{Ga}, \text{Ge}, \text{Si}, \text{B}, \text{Ti}, \text{Zr}, \text{P}, \text{Al}$), *Journal of Solid State Chemistry*. —184: 863-870 (in English)
- Brandao A.D., Antunes I., Frade J.R., Torre J., Mikhalev S.M., Fagg D.P. (2012) Effects of A and B site acceptor doping on hydration and proton mobility of LaNbO_4 , *International journal of hydrogen energy*. — 37:8004-8016 (in English)
- Mariya Ivanova, Sandrine Ricote, Wilhelm A. Meulenberg, Reidar Haugsrud, Mirko Ziegner. (2012) Effects of A-and B-site (co-)acceptor doping on the structure and proton conductivity of LaNbO_4 , *Solid State Ionics*. 213:45-52 (in English)
- Yong Cao, Nanqi Duan, Xin Wang, Bo Chi, Jian Pu, Li Jian. (2015) Enhanced electrical conductivity of Mo-doped LaNbO_4 , *Journal of the European Ceramic Society*. — 35: 979-1983(in English)
- Mariya E. Ivanova, Wilhelm A. Meulenberg, Justinas Palisaitis, Doris Sebold, Cecilia Solís, Mirko

Ziegner e, Jose M. Serra, Joachim Mayer, Michael Hänsel, Olivier Guillon. (2015) Functional properties of $\text{La}_{0.99}\text{X}_{0.01}\text{Nb}_{0.99}\text{Al}_{0.01}\text{O}_{4-\delta}$ and $\text{La}_{0.99}\text{X}_{0.01}\text{Nb}_{0.99}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_{4-\delta}$ proton conductors where X is an alkaline earth Cation, Journal of the European Ceramic Society. — 35:1239-1253 (in English)

João P.C. do Nascimento, Felipe F. do Carmo, Marcello X. Façanha, José E.V. de Morais, Antonio J.M. Sales, Humberto D. de Andrade, Idalmir S. Queiroz Júnior, Antonio S.B. Sombra. (2019) Visible and near- infrared luminescent properties of $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped lanthanum ortho-niobate phosphors, Optical Materials. — 109-119 (in English)

Altynbekova D.T., B.K. Massalimova, Yu.N. Bepalko, K.R. Valeev, T.A. Krieger, V.A. Sadykov. (2020) Synthesis of nanocrystalline complex oxides in supercritical alcohols. News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.Series of Chemistry and Technology.. — 4:6-13. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.58> (in English)

Altynbekova D.T., B.K. Massalimova, Yu.N. Bepalko, K.R. Valeev, V.A. Sadykov. (2020) Synthesis of metal nanoparticles and their alloys using supercritical fluids. Herald of the Kazakh-British technical university. Series: Chemistry. — 3:13-20 (in English)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 2. Number 354 (2025), 164–181

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.351>

УДК 581.192:582.998.2:543.421/424

МРПТИ 31.15.21

© **D.Zh. Amantayeva¹, M.A. Dyusebayeva¹, B.K. Kopzhassarov²,
A.E. Berganayeva³, G.E. Berganayeva^{1*}, 2025.**

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Kazakh Research Institute for Plant Protection and Quarantine, named
after Zh. Zhiembayev, Almaty, Kazakhstan;

³Scientific Center of Anti-infectious Drugs, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: gulzat-bakyt@mail.ru

PHYTOCHEMICAL COMPOSITION AND BIOLOGICAL ACTIVITY OF ULMUS PUMILA LEAVE

Amantayeva Dilnaz — Bachelor student, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: amantayieva.dilnaz@gmail.com;

Dyusebaeva Moldyr — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: moldyr.dyusebaeva@kaznu.edu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3873-5099>;

Kopzhassarov Bakyt — Candidate of Biological Sciences, Kazakh Research Institute for Plant Protection and Quarantine named after Zh. Zhiembayev, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: bakyt-zr@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4205-5387>;

Berganayeva Aliya — Master of Chemical Technology of Inorganic Substances, Acting deputy head of the Laboratory of Pharmaceutical Chemistry and Pharmaceutical Technology, Scientific Center of Anti-infectious Drugs, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: aberganayeva@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1417-2992>;

Berganayeva Gulzat — Candidate of Chemical Sciences, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: gulzat-bakyt@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7213-7458>.

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study on *Ulmus pumila* collected in the foothills of the Karasai district, Almaty region. The quality parameters of the raw material were evaluated: moisture content was 6,7%, ash content – 5,9%, and the content of extractive substances was 18,60% in 90% ethanol, 15,73% in 70% ethanol, and 13,4% in 50% ethanol. Phytochemical analysis revealed the predominance of flavonoids (3,84%), tannins (2,42%), and saponins (1,93%) in the leaves. Additionally, the presence of unsaturated acids, coumarins, starch, phenolic compounds, amino acids, ketoses, and a small amount of carotenoids was confirmed. Atomic absorption spectroscopy identified eight elements in the ash, with the highest concentrations found for calcium (967,11 µg/ml), iron (40,08 µg/ml), manganese (5,33 µg/ml), and zinc (4,50 µg/ml). GC-MS analysis of the ethyl acetate extract showed a



diverse composition, including phenolic compounds, terpenes, fatty acids, and esters. The most abundant compounds were 9,12,15-Octadecatrienoic acid (19,88%), Lup-20(29)-en-3-ol, acetate (10,36%), and Dibutyl phthalate (10,10%). Bioscreening demonstrated that the ethyl acetate extract exhibited antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Pseudomonas aeruginosa*, while no antifungal activity was observed against *Candida albicans*. Furthermore, the alcoholic extract significantly enhanced wheat seed germination (100%) and early seedling growth. The results suggest that *Ulmus pumila* possesses promising pharmacological and agricultural potential and could be used in the development of natural remedies and biostimulants.

Keywords: *Ulmus pumila*, biologically active substances, antibacterial activity, gas chromatography-mass spectrometry, plant growth regulators

© Д.Ж. Амантаева¹, М.А. Дюсебаева¹, Б.К. Копжасаров², А.Е. Берганаева³,
Г.Е. Берганаева^{1*}, 2025.

¹эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Ж. Жиёмбаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ҒЗИ,
Алматы, Қазақстан;

³Инфекцияға қарсы препараттар ғылыми орталығы, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: gulzat-bakyt@mail.ru

ULMUS PUMILA ЖАПЫРАҚТАРЫНЫҢ ФИТОХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫ ЖӘНЕ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ

Амантаева Дильназ Жасулановна — бакалавр студенті, Химия және химиялық технология факультеті, эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: amantayieva.dilnaz@gmail.com;

Дюсебаева Мольдыр Акимжановна — химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: moldyr.dyusebaeva@kaznu.edu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3873-5099>;

Копжасаров Бакыт Кенжекожаевич — биология ғылымдарының кандидаты, Ж. Жиёмбаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ҒЗИ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: bakyt-zr@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4205-5387>;

Берганаева Алия Ергазиевна — бейорганикалық заттардың химиялық технологиясы магистрі, Фармацевтикалық химия және фармацевтикалық технология зертханасының меңгерушісінің м.а., Инфекцияға қарсы препараттар ғылыми орталығы, Алматы, Қазақстан,
E-mail: aberganayeva@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1417-2992>;

Берганаева Гульзат Ергазиевна — химия ғылымдарының кандидаты, эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: gulzat-bakyt@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7213-7458>.

Аннотация. Бұл мақалада Алматы облысының Қарасай ауданының таулы бөктерінде жиналған *Ulmus pumila* (қарағаш) өсімдігінің зерттеу нәтижелері келтірілген. Өсімдіктің сапалық көрсеткіштері анықталды: шикізат былғалдылығы – 6,7%, күлділігі – 5,9%, экстрактивті заттар мөлшері 90% этанолда – 18,60%, 70% этанолда – 15,73%, 50% этанолда – 13,4% құрады. Экстрактивті заттарды бөліп алу үшін оптималды экстрагент ретінде этанол (90%) алынды. Фитохимиялық

талдау нәтижесінде *U. pumila* жапырақтарында флавоноидтар (3,84 %), тері илегіш заттар (2,42 %), сапониндер (1,93 %) басым болатыны анықталды. Сонымен қатар, қанықпаған қышқылдар, кумариндер, крахмал, фенолды қосылыстар, амин қышқылдары, кетозалар мен аз мөлшерде каротиноидтар табылды. Атомды-абсорбциялық спектроскопия әдісі арқылы шикізат күлінің құрамында 8 элемент анықталып, олардың ішінде кальций (Ca – 967,110 мкг/мл), темір (Fe – 40,0775 мкг/мл), марганец (Mn – 5,3291 мкг/мл) және мырыш (Zn – 4,5009 мкг/мл) үлестері басым болды. ГХ-МС сараптама нәтижелері бойынша *U. pumila* этилацетатты экстракт құрамында фенолды қосылыстар, терпендер, май қышқылдары, күрделі эфирлер және т.б. бар екендігі анықталды. Пайыздық мөлшері бойынша 9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)- (19,88 %), Lup-20(29)-en-3-ol, acetate, (3β) (10,36 %) , Dibutyl phthalate (10,10 %) қосылыстары басым болды. Биоскрининг нәтижесі бойынша Қарағаш этилацетат сығындысы *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* бактериялар штамдарына қарсы биологиялық белсенділік көрсетті, *C. albicans* қатысты фунгицидтік белсенділік байқалмады. *U. pumila* спирт сығындысының бидай тұқымдарының өсу энергиясы мен өңгіштігіне әсері бақылаудың алғашқы күнінен бастап тұқымдардың 100% өнуі мен өскіндердің өсу энергиясы эталонмен салыстырғанда әлде қайда жоғары болғаны айқындалды. Алынған нәтижелер *U. pumila* өсімдігінің медициналық және ауыл шаруашылығы мақсаттарында қолдану мүмкіндіктерін көрсетеді.

Түйін сөздер: *Ulmus pumila*, биологиялық белсенді заттар, бактерияға қарсы белсенділік, газ хроматография-масс-спектрометрия, өсімдіктердің өсу реттегіштері

© Д.Ж. Амантаева¹, М.А. Дюсебаева¹, Б.К. Копжасаров², А.Е. Берганаева³,
Г.Е. Берганаева^{1*}, 2025.

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Казахский НИИ защиты и карантина растений им. Ж. Жиёмбаева,
Алматы, Казахстан;

³Научный центр противоинфекционных препаратов, Алматы, Казахстан.
E-mail: gulzat-bakyt@mail.ru

ФИТОХИМИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛИСТЬЕВ *ULMUS PUMILA*

Амантаева Дильназ Жасулановна — студент-бакалавр, факультет Химии и химической технологии, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: amantayeva.dilnaz@gmail.com;

Дюсебаева Мольдыр Акимжановна — кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: moldyr.dyusebaeva@kaznu.edu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3873-5099>;

Копжасаров Бакыт Кенжекожаевич — кандидат биологических наук, Казахский НИИ защиты и карантин растений им. Ж. Жиёмбаева, Алматы, Казахстан,
E-mail: bakyt-zr@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4205-5387>;

Берганаева Алия Ергазыевна — магистр химической технологии неорганических веществ, и.о.



зав. лабораторией фармацевтической химии и фармацевтической технологии, Научный центр противoinфекционных препаратов, Алматы, Казахстан,

E-mail: aberganayeva@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1417-2992>;

Берганаева Гульзат Ергазиевна — кандидат химических наук, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: gulzat-bakyt@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7213-7458>.

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследований растения *Ulmus pumila* (вяз, карагач), собранного в предгорьях Карасайского района Алматинской области. Определены качественные показатели: влажность сырья – 6,7 %, зольность – 5,9 %, содержание экстрактивных веществ – 90% в этаноле – 18,60 %, 70% в этаноле – 15,73 %, 50% в этаноле – 13,4%. Оптимальным экстрагентом для выделения экстрактивных веществ выбран 90% этанол. Фитохимический анализ показал, что в листьях *U. pumila* преобладают флавоноиды (3,84%), дубильные вещества (2,42%), сапонины (1,93%). Кроме того, идентифицированы ненасыщенные кислоты, кумарины, крахмал, фенольные соединения, аминокислоты, кетозы и небольшое количество каротиноидов. Методом атомно-абсорбционной спектроскопии в составе золы сырья обнаружено 8 элементов, среди которых преобладали кальций (Ca – 967,110 мкг/мл), железо (Fe – 40,0775 мкг/мл), марганец (Mn – 5,3291 мкг/мл) и цинк (Zn – 4,5009 мкг/мл). ГХ-МС анализ показал, что этилацетатный экстракт *U. pumila* содержит фенольные соединения, терпены, жирные кислоты, сложные эфиры и др., среди которых доминируют 9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)- (19,88 %), Lup-20(29)-en-3-ol, acetate, (3 β) (10,36 %), Dibutyl phthalate (10,10%). По результатам биоскрининга этилацетатный экстракт вяза проявил биологическую активность в отношении штаммов бактерий *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, однако фунгицидной активности в отношении *C. albicans* не выявлено. Влияние спиртового экстракта *U. pumila* на энергию роста и всхожесть семян пшеницы определялось 100%-ной всхожестью семян и значительно более высокой энергией роста проростков по сравнению с контролем с первого дня наблюдения. Полученные результаты демонстрируют потенциал *U. pumila* для медицинских и сельскохозяйственных целей.

Ключевые слова: *Ulmus pumila*, биологически активные вещества, антибактериальная активность, газовая хроматография-масс-спектрометрия, регуляторы роста растений

Кіріспе. Өсімдіктердің химиялық құрамы мен биологиялық белсенділігі олардың фармакологиялық және ауыл шаруашылығындағы маңыздылығын анықтайды. *Ulmus pumila* (қарағаш) – құрамында биологиялық белсенді қосылыстардың кең спектрі бар өсімдік түрлерінің бірі. Оның жапырақтары флавоноидтар, фенолдық қосылыстар, органикалық қышқылдар, полисахаридтер және басқа да биоактивті заттарға бай болуы мүмкін (Melek, 2021; Hu, 2024; Jeong, 2024; Cheng, 2020), бұл олардың антиоксиданттық, қабынуға қарсы және микробқа қарсы әсерін зерттеуді өзекті етеді (Gu, 2019; Sosorburam, 2022; Schafer, 2022; Wang, 2019; Kim, 2023) Қазіргі уақытта Қазақстанда өсімдіктердің биологиялық белсенді заттарына негізделген табиғи препараттарға сұраныс артып келеді. Әсіресе, табиғи өсімдік тектес қосылыстар ауыл шаруашылығында

өсімдіктердің өсуін ынталандырушы ретінде және медицинада экологиялық таза дәрілік заттар ретінде қолдану үшін маңызды.

Осы зерттеу Алматы облысы, Қарасай ауданының таулы аймағынан жиналған *Ulmus pumila* жапырақтарының фитохимиялық құрамын және биологиялық белсенділігін анықтауға бағытталған. Зерттеу нәтижелері бұл өсімдіктің фармакологиялық әлеуетін бағалауға және оның болашақта ауыл шаруашылығы мен медициналық қолданылу мүмкіндіктерін анықтауға негіз болады.

Материалдар және әдістер. *Ulmus pumila* өсімдігінің фитохимиялық сараптамасы Қазақстан Республикасының Мемлекеттік Фармакопееының (ҚР МФ) I басылым ережелерінің жалпы қабылданған әдістемесі бойынша жүргізілді. Оптималды экстрагентті таңдау үшін су, бензол, этанол, этилацетат, бутанол еріткіштері арқылы сәйкес сығындылар алынды, кейін қағазды хроматография арқылы сапалық анализ жасалды. *U. pumila* өсімдігінің этанолды экстрактын алу үшін мацерация әдісі қолданылды: құрғақ жапырақтары ұнтақталып, 90%-ды этанолмен 20–24 °C-та экстракцияланды, этил спирті 1:8 қатынасында алынды, экстракция уақыты 72 сағат құрады. Үлгі айналмалы буландырғышта концентрленіп, шикі сығынды алынды.

Макро және микроэлементтік құрамы атомды абсорбциялық спектроскопия әдісі арқылы анықталды. Ол үшін 2 г ұнтақталған өсімдік шикізатын алдын ала тұрақталған тигельге салады. Фарфор тигельді электр плиткада бидай шикізаты күйіп, көмірге айналғанша қыздырады. Одан кейін эксикаторда салқындатылады, аналитикалық таразыда өлшенеді. Кейін үлгіні муфель пешінде 4 сағат бойы 500–600 °C температурада толық күлге айналғанша өртейді, кейін тигельді эксикаторда салқындатып аналитикалық таразыда тұрақты массаға жеткенше салмағын өлшейді. Толық күлге айналған қалдықтың үстіне 5 мл HNO_3 (1:1) қосып, электр плиткасында ылғал тұз қалғанша қыздырады. Қалған тұздың үстіне 10–15 мл 1н HCl немесе 1н HNO_3 қосып ерітеді, дайын болған ерітіндіні 25 мл өлшемдік колбаға құйып, белгіленген мөлшерге дейін жеткізеді. Сонымен қатар, осындай концентрация және реттілікпен бақылау ерітіндіні дайындайды. Сараптама әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университетінің «Физика-химиялық зерттеу әдістері және талдау орталығында (ЦФХМА) Carl Zeiss компаниясының ASSIN құрылғының көмегімен жүргізілді. Өсімдік шикізатындағы минералды қоспаны анықтау МФ XI 1 шығарылымы, 276 бет әдісіне сәйкес жүргізілді.

Ulmus pumila өсімдігінің этилацетатты сығындының құрамы газды хроматографиясы-масс-спектрометрия (ГХ-МС) әдісі арқылы анықталды. Үлгілер Agilent MSD ChemStation масс-спектрометриялық детекторы бар газ хроматографиялық жүйесі (7890A/5975C) арқылы жүргізілді. Талдау шарттары: үлгінің көлемі 0,5 мкл, үлгіні енгізу температурасы 280 °C. Бөлу ұзындығы 30 м, ішкі диаметрі 0,25 мм және пленка қалыңдығы 0,25 мкм болатын DB-WaxEtr хроматографиялық капиллярлық бағаны арқылы 1 мл/мин жылдамдықпен (гелий) тасымалдаушы газ пайдаланыла отырып жүргізілді. Жұмыс температурасы 40 °C бастап, 5 °C/мин жылдамдықпен 260 °C-қа дейін (экспозиция 5 мин) көтерілді. Талдау уақыты 49 минутты құрады. Анықтау SCAN m/z 34–850 режимінде жүргізілді. Деректерді өңдеу барысында ұстау уақытын, шыңдардың аудандарын

анықтау және масс-спектрометриялық детектор арқылы алынған спектрлік ақпаратты өңдеу жүзеге асырылды. Алынған масс-спектрлерді декодтау үшін Wiley 7th Edition және NIST02 кітапханалары пайдаланылды (кітапханаларда 550 мыңнан астам спектр бар).

Ulmus pumila этилацетат сығындысының бактерияға және саңырауқұлаққа қарсы белсенділігі «Инфекцияға қарсы препараттар ғылыми орталығында» зерттелді. Зерттеу барысында бактерияға қарсы белсенділік американдық микроорганизмдер мұражайының тест-штамдарына қатысты анықталды: *Staphylococcus aureus* ATCC 6538-R (мұражайға сезімтал штамм), *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027, *Escherichia coli* ATCC 8739 және *Candida albicans* ATCC 10231 (мұражайға сезімтал штамм). Қоректік орта ретінде Мюллер-Хинтон агары (МХА) қолданылды.

Микроорганизмдердің суспензиясын дайындау: қажетті концентрациядағы микроорганизмдердің суспензияларын дайындау үшін оптикалық тығыздықты (лайлылықты) өлшеуге арналған DEN-1 денситометрі қолданылды. Микроорганизмдердің суспензиялары натрий хлоридінің тұзды ерітіндісінде (0,9% NaCl) дайындалды. Пробиркаға 5 мл тұзды ерітінді енгізілді, ол денситометрге орналастырылды және оптикалық тығыздық өлшенді. Алдымен бактериялар үшін $1,5 \times 10^8$ CFU/мл концентрациясы бар микроорганизмдердің суспензиясы дайындалды, бұл макфарланд бойынша 0,5 бірліктің лайлануына сәйкес келеді. Бұл суспензиялардан 1,0 мл суспензияны 9,0 мл стерильді тұзды ерітіндіге ауыстырып, он есе сұйылту жасалды. Осылайша, бактериялар үшін $1,5 \times 10^6$ CFU/мл сұйылту алынды. Саңырауқұлақтар үшін суспензия дәл осылай дайындалды. Қажетті суспензия лайлылығы Макфарланд бойынша 2,5 бірлік болуы керек, бұл $7,5 \times 10^8$ CFU/мл сәйкес келеді. бұл суспензиядан 1,0 мл суспензияны 9,0 мл стерильді тұзды ерітіндіге ауыстырып, он есе сұйылту жасалды. Осылайша, олар $7,5 \times 10^6$ CFU/мл өсірді.

Сериялық сұйылту әдісімен сығындылардың микробқа қарсы белсенділігін анықтау: Микробқа қарсы белсенділікті анықтау үшін 96 шұңқырлы полистирол планшеті қолданылды. Барлық ұңғымаларға 150 мкл мөлшерінде натрий хлоридінің стерильді 0,9% тұзды ерітіндісі енгізілді (1-ден 8-ші ұңғымаға дейін). Сығындылар таза түрде 150 мкл көлемінде 1-ші ұяшықтарға (шұңқырға) және 2-ші ұяшыққа енгізілді, онда 150 мл көлемінде физикалық ерітінді бар. 2-ші ұяшықтан бастап қоспаны алу арқылы жүзеге асырылатын сериялық сұйылтулар жүргізілді. Нәтижесінде келесі сұйылтулар алынды: таза сығынды, 1:1, 1:2, 1:4; 1:8; 1:16; 1:32, 1:64, бұл 1-ден 8-ге дейінгі ұяшықтарға сәйкес келеді.

Сұйылту сериясынан кейін барлық ұңғымаларға бактериялар үшін $1,5 \times 10^6$ КК/мл және саңырауқұлақтар үшін $7,5 \times 10^6$ КК/мл концентрациясында микроорганизмдердің 20 мкл сынақ штамдары қосылды. Барлық үлгілер $37 \pm 1^\circ\text{C}$ температурада 30 минут бойы инкубацияланды. Инкубация уақыты аяқталғаннан кейін тірі жасушаларды анықтау үшін мүк Петри табақтарына себілді.

Нәтижелерді есепке алу тығыз қоректік ортаның бетінде микроорганизмдердің көрінетін өсуінің болуына байланысты жүргізілді. Минималды бактерицидтік концентрация (МБК) микроорганизмдердің өсуін тежейтін ұңғымадағы ең аз концентрация болып саналды.

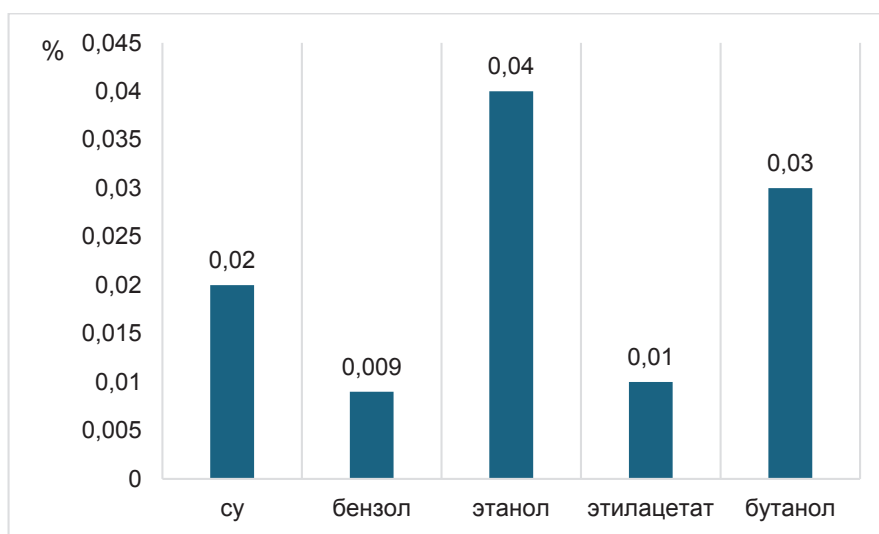
Ulmus pumila спирт сығындысының бидай тұқымдарының өсу энергиясы мен өңгіштігіне әсері МЕМСТ 12038–84 сәйкес анықталды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Өсімдік шикізатының шынайылығын анықтау оның сапасын, қауіпсіздігін және стандартқа сәйкестігін бағалау үшін қажет. Бұл көрсеткіштер шикізаттың тазалығын, тұрақтылығын және фармакологияда, тамақ өнеркәсібінде және ауыл шаруашылығында қолдануға жарамдылығын бақылауға мүмкіндік береді. *Ulmus pumila* өсімдігінің шынайылық көрсеткіштері 1-кестеде келтірілген:

1 кесте - *Ulmus pumila* өсімдігінің шынайылық көрсеткіштері

Шынайылық көрсеткіштері	<i>Ulmus pumila</i>	Экстрактивті заттар, %		
		Сулы спирт (50%)	Сулы спирт (70%)	Сулы спирт (90%)
Ылғалдылығы	6,7%			
Жалпы күлділік	5,9%	13,4	15,73	18,6

Ulmus pumila өсімдігінен барынша барлық биологиялық белсенді заттарды (ББЗ) бөліп алу мақсатында оңтайлы экстрагентті таңдау үшін су, бензол, этанол, этилацетат, бутанол алынды және экстрактивті заттардың мөлшері анықталды (1-сурет).



1 сурет – Еріткіштердегі экстрактивті заттардың мөлшері

Зерттеу нәтижелері бойынша экстрактивті заттардың ең жоғары мөлшері 90%-дық этанол ерітіндісінде анықталды. Сондықтан сапалық және сандық талдаулар 90%-дық сулы-спиртті ерітіндісі негізінде жүргізілді.

Ulmus pumila өсімдігіндегі ББЗ-ды фитохимиялық сапалық сараптау барысында қағазды хроматография және 13 түрлі реагент қолданылды. Олар өсімдіктегі ББЗ-ды анықтап, әрбір компонентті түстері арқылы ажыратуға мүмкіндік береді (2-кесте). Сараптама нәтижелері бойынша, нысана өсімдікте флавоноидтар, қанықпаған қышқылдар мен кумариндер, крахмал, фенолды

қосылыстар, тері илегіш заттар, амин қышқылдары, кетозалар және аз мөлшерде каротиноидтар анықталды. Сонымен қатар, этанол еріткішінде басқа зерттелген еріткіштерге қарағанда барлық ББЗ топтары айқындалды.

2 кесте - Фитохимиялық сараптауда қолданылған реагенттер

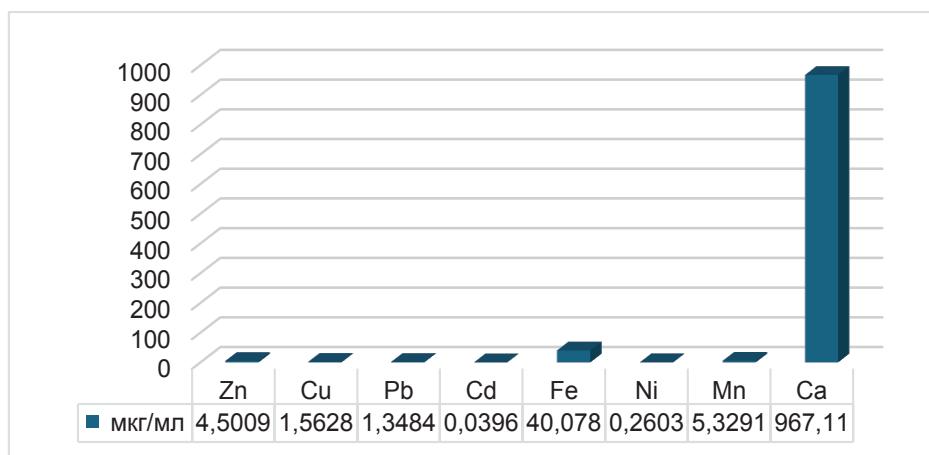
Реагенттер	Анықталатын ББЗ	Су	Бензол	Этанол	Этилацетат	Бутанол
Сірке қышқылы	Антрахинондар, флавоноидтар	+	-	+	+	-
Йод суы	Қанықпаған қышқылдар, кумариндер қоңыр түс, крахмал - көк түс береді	+	+	+	+	+
КОН 10%	Антрахинон мен флавоноидтар сары-жасыл түс береді	+	+	+	+	+
FeCl ₃	Барлық фенолды қосылыстар (жасыл, көк, күлгін)	+	+	+	+	+
Pb(Ac) ₂	Фенолдар, фенол қышқылдары, флавоноидтар сары түс береді	+	-	+	+	-
AlCl ₃ 1%	Флавоноидтар, полифенолды қосылыстар сары түс береді	+	-	+	+	-
ДзПНА	Полифеноларды сапалық анықтайды	+	-	+	+	-
ЖАК	Тері илегіш заттар қою көк түс береді	+	-	+	+	-
Нингидрин	Амин қышқылдары, аминақанттар қызғылт, көк, күлгін, сары түс береді	+	+	+	+	+
Мочевина	Кетозалар қоңыр түс береді	+	-	+	+	-
KMnO ₄ %	Каротиноидтар түссізденеді	-	+	+	-	+
Желатин	Тері илегіш заттар қара жасыл түс немесе тұнба	-	-	-	-	-
Аммиак суы	Флавоноидтар, фенолды қосылыстар сары түс береді. Изофлавоноидтар сары-қоңыр түс береді.	+	-	+	+	+

Ulmus pumila өсімдігі жапырағының құрамындағы **ББЗ-ға сандық талдау** нәтижелері 2-суретте көрсетілген. Алынған деректер бойынша өсімдік жапырақтарының құрамында флавоноидтар (3,84 %), тері илегіш заттар (2,42 %) және сапониндердің мөлшері (1,93 %) басым болды.



2 сурет – *Ulmus pumila* өсімдігі құрамындағы ББЗ-дың сандық көрсеткіштері

Ulmus pumila өсімдігі құрамындағы макро- және микроэлементтер атомды-абсорбциялық спектроскопия әдісі көмегімен анықталды. Алынған нәтижелер 3-суретте көрсетілген:



3 сурет - *Ulmus pumila* өсімдігінің макро және микроэлементтері

Алынған нәтижелер бойынша нысана өсімдікте 8 элемент анықталды: 1 макроэлемент (Ca) және 7 микроэлементтер (Cu, Fe, Ni, Pb, Cd, Mn, Zn). Құрамында кальцийдің мөлшері едәуір жоғары болды (967, 11 мкг/мл). Корей ғалымдарының деректері (Park, 2021) бұл фактіні растайды. Атап айтқанда, көптеген *U. pumila* түрлерінің жапырақтарының ортаңғы тамырында кальций

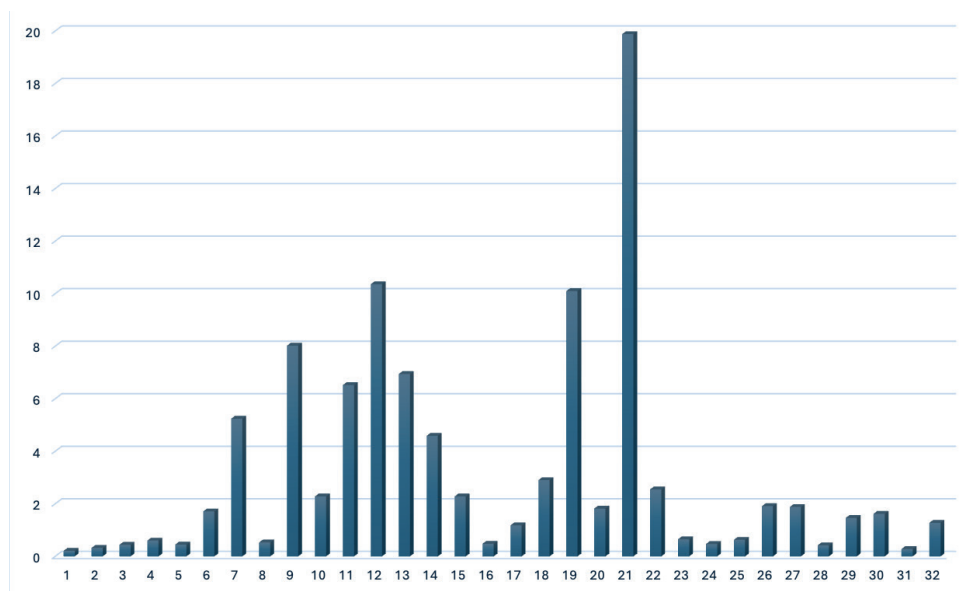
оксалаты мен кальций карбонатының кристалдары шоғырланады екен. Сонымен қатар анықталған микроэлементтер ішінен темір, марганец мен мырыштың үлестері басым болды, олардың мөлшері, сәйкесінше, 40,0775, 5,3291 және 4,5009 мкг/мл құрады. Бұл мәндерді тығыздығы суға жуық ерітінді үшін мг/кг түрінде қарастыратын болсақ, тиісінше: Fe $\approx$ 40,0775 мг/кг, Mn $\approx$ 5,3291 мг/кг, Zn $\approx$ 4,5009 мг/кг. Бұл деңгейлер медициналық және фармакологиялық қолдану үшін рұқсат етілген қауіпсіздік шектерінен аспайды. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы мәліметтері бойынша, мырыштың фитотерапиядағы шекті мөлшері — 50 мг/кг (Баба, 2021) Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, анықталған мырыш концентрациясы бұл шектен әлдеқайда төмен. Сонымен қатар, (WHO, 2005) ұсынған деректерге сәйкес, дәрілік өсімдіктердегі темір мен марганецтің шекті рұқсат етілген мөлшері – 200 мг/кг. Бұл зерттеуде алынған нәтижелерге сүйенсек, марганец пен темірдің концентрациясы бұл көрсеткіштерден едәуір төмен екені анықталды. Аталған металдар өсімдіктің құрамында болатын супероксиддисмутаза ферменттің активті формаларының түзілуіне қатысады, яғни келесі металоферменттерді Cu-Zn-COD, Fe-COD және Mn-COD түзеді. Бұл антиоксиданттық ақуыздар супероксид радикалдарын ($O_2^{\cdot-}$) молекулалық оттегі мен сутегі асқын тотығына (H_2O_2) айналдырады. COD өсімдіктердің өсуі мен дамуындағы және тотығу стрессімен күресу арқылы биотикалық және абиотикалық стресс жағдайларына төзімділікті қамтамасыз етудегі рөлімен жақсы белгілі. Бұл ферменттер pH мен температураның кең ауқымында тұрақты және белсенді болады (Туағи, 2019).

Зерттеу барысында *U. pumila* өсімдігінің этилацетатты сығындысы ГХ-МС әдісімен талданды. Зерттеу жұмыстары әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың Физика-химиялық зерттеу әдістері және талдау орталығында жүргізілді. Сараптама нәтижелері 3-кестеде және 4-суретте келтірілген.

3 кесте – *Ulmus pumila* этилацетатты сығындысының ГХ-МС сараптама нәтижелері

№	Ұстау уақыты, мин	Қосылыстар	Сәйкестендіру ықтималдығы, %	Мөлшері, %
Фенолды қосылыстар				
1	19,79	Phenol	66	0,21
2	23,44	2-Methoxy-4-vinylphenol	82	0,32
3	35,94	Hydroquinone	69	0,44
4	39,00	4-((1E)-3-Hydroxy-1-propenyl)-2-methoxyphenol	76	0,60
Жай эфирлер				
5	19,83	Diphenyl ether	82	0,45
Спирттер				
6	20,28	3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen-1-ol	88	1,71
7	44,41	Octacosanol	89	5,24

Дитерпендер				
8	21,29	Phytol, acetate	81	0,53
9	31,08	Phytol	92	8,02
10	47,93	Phytol, acetate	69	2,28
Тритерпеноидтер				
11	44,11	12-Oleanen-3-yl acetate, (3 α)-	86	6,52
12	47,36	Lup-20(29)-en-3-ol, acetate, (3 β)-	81	10,36
13	46,75	γ -Sitosterol	79	6,94
14	37,80	Squalene	93	4,59
Күрделі эфирлер				
15	25,62	Hexadecanoic acid, ethyl ester	91	2,28
16	29,09	Octadecanoic acid, ethyl ester	79	0,48
17	29,77	9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester	88	1,18
18	30,66	9,12,15-Octadecatrienoic acid, ethyl ester, (Z,Z,Z)-	90	2,90
19	31,70	Dibutyl phthalate	96	10,10
20	38,52	Acetic acid, 2-(2,2,6-trimethyl-7-oxa-bicyclo[4.1.0]hept-1-yl)-propenyl ester	68	1,82
21	39,45	9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)-	94	19,88
22	40,81	1,4-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	88	2,55
Май қышқылыдары				
23	28,50	Dodecanoic acid	88	0,65
24	31,79	Tetradecanoic acid	73	0,47
25	40,41	Eicosanoic acid	75	0,63
26	40,67	cis-13-Eicosenoic acid	83	1,91
27	43,20	Erucic acid	75	1,88
Гетероциклді қосылыстар				
28	25,99	2(4H)-Benzofuranone, 5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl-, (R)-	84	0,42
29	26,71	Benzofuran, 2,3-dihydro-	85	1,46
Көмірсулар				
30	39,62	D-Allose	74	1,62
Азоты бар органикалық қосылыстар				
31	41,74	9-Octadecenamide, (Z)-	65	0,28
32	43,59	1-Naphthalenamine, N-phenyl-	70	1,28



4 сурет – *Ulmus pumila* этилацетатты сығындысының ГХ-МС сараптама нәтижелері

Сараптама нәтижелері бойынша *Ulmus pumila* этилацетатты сығынды құрамында жалпы 32 қосылыс анықталды, олардың ішінде фенолды қосылыстар, терпендер, май қышқылдары, күрделі эфирлер және т.б. бар. Пайыздық мөлшері бойынша жоғары 9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)- 19,88% (21), Lup-20(29)-en-3-ol, acetate, (3 β)- 10,36% (12), Dibutyl phthalate 10,10% (19) қосылыстары басым болды. Сонымен қатар, терпендер қатарындағы биологиялық белсенді тритерпеноидтер 12-Oleanen-3-yl acetate (11), (3 α)-, Lup-20(29)-en-3-ol acetate, (3 β) (12), γ -Sitosterol (13), Squalene (14) сарапталды.

9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z) (21) – биологиялық белсенділігі бойынша қабынуға қарсы, нематид, инсектицид, гипохолестеринемиялық, қатерлі ісіктің алдын алу, гепатопротекторлық, антигистаминдік, акнеге қарсы, артритке қарсы, 5-альфа-редуктаза ингибиторы, антиандрогендік, антикоронарлық, коронарлық, қатерлі ісікке қарсы қасиеттері зерттелінген (Selvan, 2015). γ -Sitosterol (13) әдетте бета-ситостерол немесе ситостерол ретінде белгілі, қатерлі ісік пен диабетке қарсы, антиоксидант, қабынуға қарсы, қызуды түсіретін қасиеттері және *staphylococcus aureus* бактерияларына қарсы бактерияға қарсы әсерге ие (Babu, 2023). (3 α)-, Lup-20(29)-en-3-ol acetate, (3 β) (12) - қабынуға, ісікке және вирусқа қарсы, қант диабетіне, сондай-ақ Шағас ауруына қарсы тиімді екендігі анықталды (Vandana, 2023)].

Сонымен қатар *Ulmus pumila*-дан алынған этилацетатты сығындының *S. aureus* ATCC 6538-R, *C. albicans* ATCC 10231, *E. coli* ATCC 8739 және *P. aeruginosa* ATCC 9027 сезімтал мұражай сынақ штамдарына қатысты бактерияға қарсы белсенділігі және фунгицидтік белсенділігі зерттелді. Зерттеу нәтижелері 4-кестеде және 5-суреттерде келтірілген.

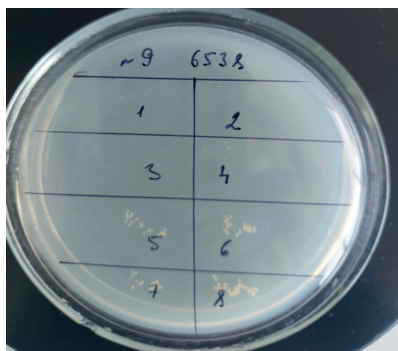
4 кесте - Сериялық сұйылту әдісімен алынған Қарағаш сығындысының микробқа қарсы белсенділігінің нәтижелері

Сыналған үлгі	Қайталама	Минималды бактерицидті сұйылту			
		<i>S. aureus</i> ATCC 6538-R	<i>C. albicans</i> ATCC 10231	<i>E. coli</i> ATCC 8739	<i>P. aeruginosa</i> ATCC 9027
<i>Ulmus pumila</i> этилацетатты экстрактісі	1	1:4	-	1:2	1:4
	2	1:4	-	1:2	1:4
	3	1:4	-	1:2	1:4

Алынған деректер бойынша қарағаш этилацетатты сығындылары минималды бактерицидтік сұйылту 1:4 *S. aureus* ATCC 6538-R, 1:2, *E. coli* ATCC 8739, 1:4, *P. aeruginosa* ATCC 9027 штамдарына қатысты биологиялық белсенділікті көрсетті. Керісінше, *C. albicans* ATCC 10231-ге қатысты фунгицидтік белсенділігі байқалған жоқ.

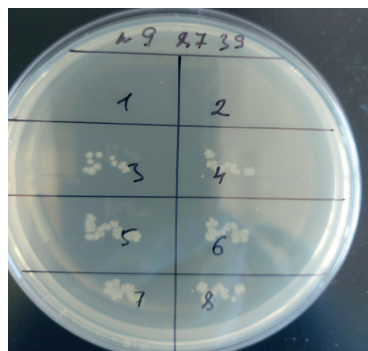
Ulmus pumila өсімдігінің этилацетат сығындысының бактерияларға қарсы белсенділігі негізінен оның құрамындағы фенолды қосылыстар, терпендер мен кейбір май қышқылдарының есебінен қамтамасыз етілу мүмкін (Breijyeh, 2024; Родин, 2015).

A



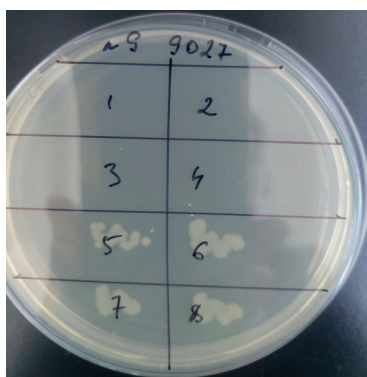
S. aureus ATCC 6538-P
(1:4 сұйылтуда)

B



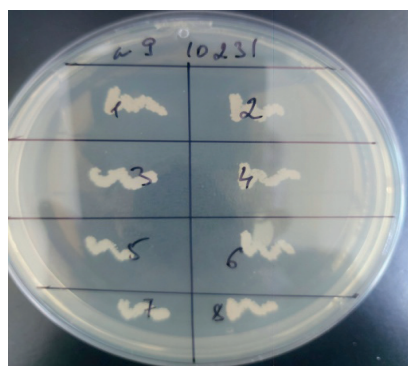
E. coli ATCC 8739
(1:1 сұйылтуда)

C



P. aeruginosa ATCC 9027
(1:4 сұйылтуда)

D



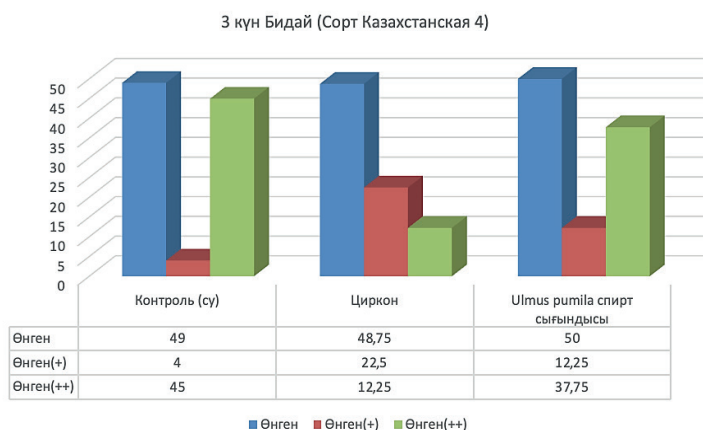
C. albicans ATCC 10231

5 сурет - *Ulmus pumila* этилацетатты сығындысының микробтарға қарсы биологиялық әсері

Жоғарыда атап өткендей, табиғи өсімдіктердің өсу реттегіштері (ӨӨР) жоғары тиімділігі мен экологиялық тазалығының арқасында бірқатар артықшылықтарға ие. Бұл мәселе еліміз үшін аса өзекті. Қарағаш көптеген аймақтарға кеңінен таралған және әртүрлі сыртқы факторларға жоғары төзімділігімен ерекшеленетіні бәрімізге мәлім. Біз қарағаш этанол экстрактынан бөлінген компоненттердің өсімдіктердің өсуін реттейтін немесе өсуді ынталандыратын белсенді қосылыстарға ие болуы мүмкін екенін болжаймыз. Бұл қосылыстар өсімдік жасушаларының метаболизмін белсендіріп, тұқымдардың өну процесін жеделдетуі, өсу энергиясын арттыруы және өсімдіктің жалпы дамуына оң әсер етуі мүмкін. Сонымен қатар, олардың әсер ету механизмі фитогормондарға ұқсас болуы немесе белгілі бір физиологиялық процестерді күшейтуі ықтимал. Осыған байланысты, қарағаш экстракттарының құрамын тереңірек зерттеп, олардың нақты биологиялық әсерін анықтау маңызды. Әсіресе, бұл экстрактың бидай тұқымдарының өсу энергиясы мен өну қабілетіне ықпалын зерттеу қызығушылық тудырады.

Зерттеу барысында эталонды препарат ретінде өсімдік биостимуляторы Циркон (Ресей, ЖШС «НЭСТ М») қолданылды. Бақылау – су болды. Өндірушінің нұсқауын ескере отырып, эталон препараты мен *Ulmus pumila* спирт сығындысының 0,05 % ерітінділері дайындалды. «Казахстанская 4» сұрып бидай тұқымдарын (50 дана) осы ерітінділермен (20 мл) өңделіп контейнерлерге орналастырылды. Контейнерлер 20-22 °C тұрақты температурада ұсталынып, тәжірибелерді есепке алу 3, 5 және 7-ші тәулікте визуалды түрде бақылау арқылы жүргізілді.

Тәжірибенің 3, 5 және 7 күнгі нәтижелері 6-8 суреттерде көрсетілген:

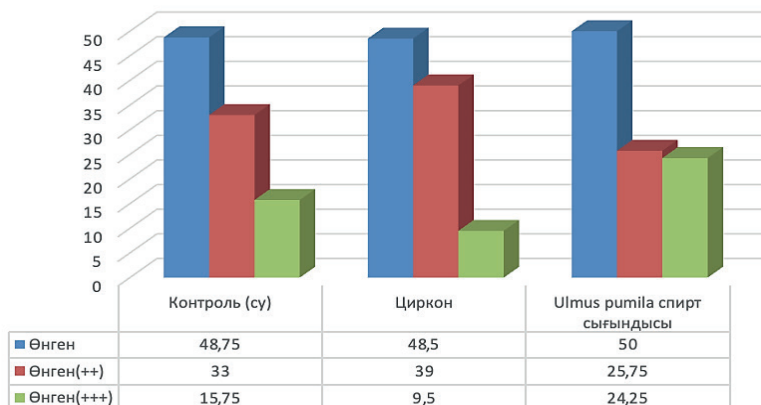


6 сурет – Ерітінділердің бидай тұқымдарының өсу энергиясы мен өңгіштігіне әсері (3 күн)

6-суретте келтірілген нәтижелер бойынша алғашқы бақылау күнінде бидайдың өнуі бақылау ортасы суда - 98%, эталон «Циркон» - 97,5%, *U. pumila* экстрактіне бидайдың өнуі - 100%-ды құрады. Визуалды бақылау арқылы суда және *U. pumila* экстрактіне ақ түсті өскіндердің мөлшері, эталон сынамасымен салыстырғанда жоғары екендігі байқалды.

7-суретте келтірілген нәтижелер бойынша 5-ші бақылау күнінде бидайдың өнуі бақылауда - 97,5% (үшінші күнгі нәтижелермен салыстырғанда 0,5% төмендеді), эталонда - 97,5%, *U. rumila* экстрактіне бидайдың өнуі - 100%-ды құрады. Визуалды бақылау арқылы суда және *U. rumila* экстрактіне жасыл өскіндердің, ал эталон «Циркон» сынамаcында ақ өскіндердің өнуі байқалды. Салыстыра отырып, өсу энергиясы су және өсімдік экстракті сынамаларында басым болды. Алайда, су сынамаcында зеңнің пайда болуы байқалды.

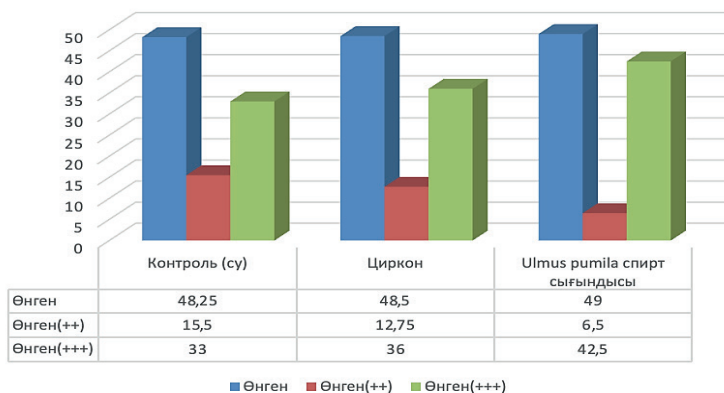
5 күн Бидай (Сорт Казахстанская 4)



7 сурет – Ерітінділердің бидай тұқымдарының өсу энергиясы мен өңгіштігіне әсері (5 күн)

8-суретте келтірілген нәтижелер бойынша соңғы бақылау күнінде бидайдың өнуі бақылауда – 96,5% (5-ші күнгі нәтижелермен салыстырғанда 1% төмендеді), эталон «Циркон» - 97,% (5-ші күнгі нәтижелермен салыстырғанда 0,5% төмендеді), *U. rumila* экстрактіне бидайдың өнуі - 98%-ды (5-ші күнгі нәтижелермен салыстырғанда 2% төмендеді) құрады

7 күн Бидай (Сорт Казахстанская 4)



8 сурет – Ерітінділердің бидай тұқымдарының өсу энергиясы мен өңгіштігіне әсері (7 күн)

Визуалды бақылау арқылы барлық сынамаларда жасыл өскіндердің өнуі байқалды, ал жасыл өскіндердің жоғары мөлшері *U. rumila* экстрактіңде байқалды, бірақ сынамаларда зеңнің пайда болуы, тұқымның өнуіне кері әсерін тигізді. Зерттеуді қорытындылайтын болсақ, *U. rumila* экстрактіңде бақылаудың алғашқы күнінен бастап тұқымдардың 100% өнуі мен өскіндердің өсу энергиясы басқа ерітінділерге қарағанда жоғарырақ болды. Бақылаудың 5-ші күні су сынамалырында, ал 7-ші күні *U. rumila* экстрактіңде сынамаларында зеңнің пайда болуын көрдік. Бұл өсімдік экстрактінің фунгицидтік әсерінін жоқтығын тағыда көрсетті. Ал эталон сынамалырында өнуі және өсу энергиясы, басқа ерітінділермен салыстырғанда әлде қайда төмен болды.

Қарағаштың (*Ulmus rumila*) спирттік сығындысының тұқым өсу энергиясына оң әсері негізінен антиоксиданттық механизм арқылы жүзеге асады. Сығынды құрамындағы фенолды қосылыстар (мысалы, гидрохинон, 2-метокси-4-винилфенол және т.б.) өсімдікте тотығу стрессін төмендетіп, антиоксиданттық ферменттердің, әсіресе супероксиддисмутаза (СОД) сияқты қорғаныс жүйелерінің белсенділігін арттырады (Kamran, 2017; Paudel, 2025). Қарағаштың құрамында анықталған темір (Fe), марганец (Mn) және мырыш (Zn) элементтері — СОД ферментінің кофакторлары болып табылады және оның тиімді жұмыс істеуіне тікелей қатысады. Бұл ферменттердің белсенділігі артқанда, тұқымның ішкі жасушаларында жиналатын зиянды бос радикалдар залалсызданады. Нәтижесінде, тұқымның энергетикалық ресурстары тиімді жұмсалып, тез әрі біркелкі өну процесі жүреді. Бұл механизм өсу энергиясын арттыруға және жас өсімдіктің стресс жағдайларына төзімділігін күшейтуге мүмкіндік береді. Алайда, бұл әсердің ауыл шаруашылығы өнімділігін ұзақ мерзімде арттыруы үшін келесі жағдайлар ескерілуі тиіс:

1. Концентрация әсері: Көптеген фенолдық қосылыстар (мысалы, гидрохинон) төмен концентрацияларда ынталандырушы, ал жоғары дозада тежегіш әсер көрсетеді. Сондықтан оң нәтижеге қол жеткізу үшін дәл мөлшерлеу қажет.

2. Өсімдіктің даму кезеңі: Сығындының әсері көбінесе тұқым өну және бастапқы өсу фазасында байқалады. Бұл әсер кейінгі даму сатыларында тұрақты сақталуы үшін қосымша агротехникалық қолдау қажет.

3. Экологиялық факторлар: Топырақ, ылғалдылық, температура және т.б. жағдайлар антиоксиданттардың тиімділігіне әсер етуі мүмкін.

Бұл әсер ауыл шаруашылығы үшін перспективалы, алайда оны ұзақ мерзімді өнімділікке жеткізу үшін технологиялық регламент, дәл мөлшерлеу және тәжірибелік растау қажет. Яғни, бұл – қолдануға болатын тиімді биостимулятор, бірақ ол тұрақты агротехникалық жүйемен бірге пайдаланылғанда ғана елеулі нәтижеге жеткізеді.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу нәтижелері *Ulmus rumila* (қарағаш) өсімдігінің химиялық құрамы мен биологиялық белсенділігін анықтауға мүмкіндік берді. Өсімдік жапырақтарының құрамында флавоноидтар (3,84 %), тері илегіш заттар (2,42 %), сапониндер (1,93 %) және басқа да биологиялық белсенді қосылыстар анықталды. Атомды-абсорбциялық спектроскопия әдісі

арқылы шикізат күлінің құрамында кальций, темір, марганец және мырыштың басым үлесте екені дәлелденді.

ГХ-МС сараптамасы *U. pumila* этилацетатты экстрактында фенолды қосылыстар, терпендер, май қышқылдары және күрделі эфирлердің бар екенін көрсетті, олардың ішінде 9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)- (19,88 %), Lup-20(29)-en-3-ol, acetate, (3 β) (10,36 %), Dibutyl phthalate (10,10 %) қосылыстары басым болды. Биоскрининг нәтижесінде *U. pumila* этилацетат сығындысы *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa* бактерияларына қарсы белсенділік танытса, *C. albicans* қатысты фунгицидтік әсері байқалмады. Сонымен қатар, *U. pumila* спирт сығындысының бидай тұқымдарының өсуіне оң әсері дәлелденді, тұқымдардың 100% өнуі мен өскіндердің өсу энергиясы эталонмен салыстырғанда жоғары болды. Алынған нәтижелер *U. pumila* өсімдігінің медициналық және ауыл шаруашылығы салаларында кеңінен қолдану мүмкіндігін көрсетеді. Бұл өсімдікті фармацевтика, косметология, ауыл шаруашылығы және экологиялық салаларда перспективті шикізат көзі ретінде қарастыруға болады.

References

- Baba H. S., Mohammed M. I. (2021) Determination of some essential metals in selected medicinal plants ChemSearch Journal. 12 (1), — P. 15-20. <http://www.ajol.info/index.php/csj> (in Eng.).
- Babu Y.R., Vidyullatha M.V., Ramalakshmana J., Sowmithri C., & Padal S.B. (2023) GC-MS analysis, In-vitro anti-microbial and antioxidant activities of stem bark extracts of *Ficus religiosa* L. and *Ficus semicordata* Buch.-Ham. ex Sm. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology ISSN No, 1006. — P. 7930. (in Eng.).
- Breijyeh Z., Karaman R. (2024) Antibacterial activity of medicinal plants and their role in wound healing Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 10 (1). —P. 68. (in Eng.).
- Cheng S., Li N., Yu Y., Elshafei A., Jin M., Li G., & Zheng M. (2020). A new flavonoid from the bark of *Ulmus pumila* L. Biochemical Systematics and Ecology, 88, 103956. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2019.103956> (in Eng.).
- Gu Z.Y., Feng C.Y., Li S.S., Yin, D.D., Wu, Q., Zhang, L., & Wang, L. S. (2019). Identification of flavonoids and chlorogenic acids in elm fruits from the genus *Ulmus* and their antioxidant activity. Journal of Separation Science, 42(18), 2888-2899. (in Eng.).
- Hu, D., Liu, Z., Yu, Y., Wu, C., Liu, J., Kang, D., ... & Zheng, M. (2024). Chemical constituents of *Ulmus pumila* L. and their chemotaxonomic significance. Biochemical Systematics and Ecology, 117, — P.104907. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104907> (in Eng.).
- Kamran M. et al. (2017) Hydroquinone; a novel bioactive compound from plant-derived smoke can cue seed germination of lettuce. Frontiers in chemistry. 5. — P. 30. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00030> (in Eng.).
- Kim J., Choi C.H., Lee A. Y., & Lee S. (2023). Antioxidant, Anticancer, and Neuroprotective Activities and Phytochemical Analysis of Germinated Shoots. Journal of Food Biochemistry, (1). — P. 2074678. <https://doi.org/10.1155/2023/2074678> (in Eng.).
- Jeong, C., Lee, C. H., Seo, J., Park, J. H. Y., & Lee, K. W. (2024). Catechin and flavonoid glycosides from the *Ulmus* genus: Exploring their nutritional pharmacology and therapeutic potential in osteoporosis and inflammatory conditions. Fitoterapia. — P. 106188. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2019.103956> (in Eng.).
- Melek F. R., El Zalabani S. M., Ghaly N. S., Sabry O. M., Fayad W., & Boulis A. G. (2021). Phytoconstituents with cytotoxic activity from *Ulmus pumila* L. Journal of Applied Pharmaceutical Science, 11(5). — P. 127-134. <https://dx.doi.org/10.7324/JAPS.2021.110517> (in Eng.).
- Park W.-S., Kim H.-J., et al. (2021). Anatomical and Chemical Characterization of *Ulmus* Species from South Korea. Plants, 10(12), — P. 2617. <https://doi.org/10.3390/plants10122617> (in Eng.).

Paudel M. R. et al. (2025) Antioxidant and cytotoxic properties of protocorm-derived phenol-rich fractions of *Dendrobium amoenum*. BMC Complementary Medicine and Therapies, 25 (1), 61. <https://doi.org/10.1186/s12906-025-04810-4> (in Eng.).

Rodin A. Yu., Zaklyakova T. N. (2015) Znachimost' polinenasyshchennyh zhirnyh kislot v kompleksnoj terapii akne Farmateka, 10. — P. 70-73. (in Eng.).

Schafer J., Puga T.B., Miller, S. R. T., & Agbedanu, P. N. (2022). Gram-negative Antimicrobial spectrum of *Ulmus pumila*. bioRxiv, 2022-03. <https://doi.org/10.1101/2022.03.12.484112> (in Eng.).

Selvan P.S., & Velavan, S. (2015). Analysis of bioactive compounds in methanol extract of *Cissus vitiginea* leaf using GC-MS. Rasayan J chem, 8(4). — P. 443. (in Eng.).

Sosorburam B., Delgermurun D., & Bolormaa P. (2022). Anti-Inflammatory Screening of *Ulmus pumila* L ethanolic extract. Mongolian Journal of Agricultural Sciences, 15(36). — P. 21-26. (in Eng.).

Tyagi S., Shumayla Singh S.P., & Upadhyay S.K. (2019). Role of superoxide dismutases (SODs) in stress tolerance in plants. Molecular approaches in plant biology and environmental challenges, 51-77. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0690-1_3 (in Eng.).

Vandana D.G., Bano I., & Deora V. (2021). GC-MS analysis of bioactive compounds from the methanolic leaf extract of *Tephrosia villosa* (Linn.) pers. an important medicinal plant of Indian Thar desert. Int. J. Botany Stud, 6. — P. 693-699. (in Eng.).

Wang C., Yang J., Hu Z., Liu W., Ge S., Liu Z., & Peng W.X. (2019). Potential Reuse of Extracts from *Ulmus pumila* L. Wood. Ekoloji Dergisi, (108). (in Eng.).

World Health Organization (2005). Quality Control Methods for Medicinal Plant Materials, World Health Organization, Geneva, Switzerland. — P. 19-23 (in Eng.).

© A. Assanov¹, S.A. Mameshova^{1*}, G.S. Tatykhanova², T.A. Savitskaya³, 2025.

¹Taraz Regional University named after M.D. Dulaty, Taraz, Kazakhstan;

²Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev,
Almaty, Kazakhstan;

³Belarusian State University, Minsk, Belarus.

E-mail: saya8383@mail.ru

CHEMICAL AND MINERALOGICAL ANALYSIS OF KAZAKHSTAN CLAYS AND STUDY OF THEIR HYDRODISPERSIVE PROPERTIES

A. Assanov — candidate of chemical sciences, professor at M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,

E-mail: asanovamankait@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9176-6690>;

S.A. Mameshova — senior lecturer at M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,

E-mail: saya8383@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2484-8420>;

G.S. Tatykhanova — associate professor, deputy head of the laboratory of engineering profile, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev), Almaty, Kazakhstan,

E-mail: gulnur-ts81@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4457-1705>;

T.A. Savitskaya — Professor at Belarusian State University, Minsk, Belarus,

E-mail: savitskayaTA@bsu.by, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4151-3614>.

Abstract. Relevance. This scientific study presents a comprehensive investigation of the chemical and mineralogical composition of natural bentonite clays from various regions of Kazakhstan, along with a systematic analysis of their hydrodispersive properties. The primary research objects were natural clay samples from the Tagan, Urangai, Keles, and Kyzylorda deposits. A detailed examination was carried out on their physical properties (density, particle size distribution), chemical composition (major and trace elements), mineralogical structure (dominant phases), and rheological behavior (viscosity, thixotropy, structural stability). Mineral composition was identified using advanced techniques such as X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD). The results revealed significant differences in mineralogical composition across the clay samples, directly affecting their dispersion stability, sedimentation tendencies, and practical applicability. Rheological tests showed that bentonite clays from the Tagan deposit have high structural stability and clear thixotropic properties, making them effective components for drilling fluids. In contrast, samples from Keles, Urangai, and Kyzylorda displayed higher sedimentation, limiting their use. Additionally, the study examined the impact of hydrophilic, amide-functional polymers on clay hydrodispersions. Their introduction altered interparticle

interactions and improved both rheological and structural characteristics. These findings offer new possibilities for extending their practical use and developing innovative solutions. Practical Value. This research provides a solid scientific basis for the efficient application of bentonite clays in industries such as drilling, construction, and environmental protection.

Keywords: clay, hydrodispersion, bentonite, rheology, drilling fluids

© А. Асанов¹, С.А. Мамешова^{*1}, Г.С. Татыханова², Т.А. Савицкая³, 2025.

¹М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан;

²Қ. Сатпаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан;

³Беларусь мемлекеттік университеті, Минск, Беларусь.

E-mail: saya8383@mail.ru

ҚАЗАҚСТАН САЗДАРЫНЫҢ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ ТАЛДАУЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ГИДРОДИСПЕРСИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

А. Асанов — химия ғылымдарының кандидаты, М.Х. Дулати атындағы Тараз университетінің профессоры, Тараз, Қазақстан,

E-mail: asanovamankait@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9176-6690>;

С.А. Мамешова — М.Х. Дулати атындағы Тараз университетінің аға оқытушысы, Тараз, Қазақстан,

E-mail: saya8383@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2484-8420>;

Г.С. Татыханова — Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің Инженерлік профильді зертхана меңгерушісінің орынбасары, қауымдастырылған профессор, Алматы, Қазақстан,

E-mail: gulnur-ts81@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4457-1705>;

Т.А. Савицкая — Беларусь мемлекеттік университетінің профессоры, Минск, Беларусь,

E-mail: savitskayaTA@bsu.by, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4151-3614>.

Аннотация. Өзектілігі. Бұл ғылыми жұмыс Қазақстан аумағындағы табиғи бентонитті саздардың химиялық және минералогиялық құрамын жан-жақты зерттеуге, сонымен қатар олардың гидродисперсиялық қасиеттерін жүйелі түрде талдауға арналған. Басты зерттеу нысандары ретінде Таған, Уранғай, Келес және Қызылорда кен орындарынан алынған табиғи саз үлгілері алынды. Саздардың физикалық қасиеттері (тығыздық, түйіршік құрамы), химиялық құрамы (негізгі және ілеспе элементтердің мөлшері), минералогиялық құрылымы (басым фазалар) және реологиялық қасиеттері (тұтқырлық, тиксотропия, құрылымдық тұрақтылық) егжей-тегжейлі зерттелді. Минералдық құрамды анықтау үшін заманауи рентгенфлуоресценттік (РФА) және рентгенфазалық (РФТ) талдау әдістері қолданылды. Нәтижесінде зерттелген саз үлгілерінің минералогиялық құрылымында айтарлықтай айырмашылықтар анықталды. Бұл айырмашылықтар олардың дисперсиялық тұрақтылығына, тұнба түзу қабілетіне және қолдану тиімділігіне тікелей әсер ететіні дәлелденді. Реологиялық зерттеулер нәтижесінде Таған кен орнының бентонитті саздары жоғары

құрылымдық тұрақтылық пен айқын тиксотропиялық қасиеттерге ие екендігі байқалды. Бұл көрсеткіштер оларды бұрғылау ерітінділерінің тиімді компоненті ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Керісінше, Келес, Уранғай және Қызылорда кен орындарынан алынған саз үлгілерінде тұнбалану үрдісі жоғары болып, олардың қолдану шеңберін шектейтін фактор ретінде анықталды. Сонымен қатар, зерттеу барысында гидрофильді, амид функционалды полимерлердің саз гидродисперсияларына әсері де талданды. Полимерлерді енгізу саз бөлшектері арасындағы өзара әрекеттесулерді өзгертіп, дисперсиялардың реологиялық және құрылымдық қасиеттерін жақсартты. Бұл олардың қолдану аясын кеңейтіп, жаңа технологиялық шешімдерге жол ашады. Практикалық құндылық. Алынған нәтижелер бентонитті саздарды бұрғылау, құрылыс, экология және басқа да салаларда тиімді қолдану стратегияларын жасауға маңызды ғылыми-тәжірибелік негіз бола алады.

Түйін сөздер: саз, гидродисперсия, бентонит, реология, бұрғылау ерітінділері

© А. Асанов¹, С.А. Мамешева^{*1}, Г.С. Татыханова², Т.А. Савицкая³, 2025.

¹Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан;

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени

К. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

³Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия.

E-mail: saya8383@mail.ru

ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЛИН КАЗАХСТАНА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИХ ГИДРОДИСПЕРСИЙ

А. Асанов — кандидат химических наук, профессор Таразского университета имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,

E-mail: asanovamankait@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9176-6690>;

С.А. Мамешева — старший преподаватель Таразского университета имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,

E-mail: saya8383@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2484-8420>;

Г.С. Татыханова — доцент, заместитель заведующего лабораторией инженерного профиля Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,

E-mail: gulnur-ts81@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4457-1705>;

Т.А. Савицкая — профессор Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь,

E-mail: savitskayaTA@bsu.by, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4151-3614>.

Аннотация. Актуальность. Данное научное исследование посвящено всестороннему изучению химического и минералогического состава природных бентонитовых глин, распространённых на территории Казахстана, а также систематическому анализу их гидродисперсионных свойств. В качестве основных объектов исследования были выбраны природные образцы глин, отобранные на месторождениях Таган, Урангай, Келес и Кызылорда. Подробно изучены физические свойства глин (плотность, гранулометрический состав), их химический состав (содержание основных и сопутствующих элементов), минералогическая



структура (доминирующие фазы) и реологические характеристики (вязкость, тиксотропия, структурная стабильность). Для определения минерального состава применялись современные методы рентгенофлуоресцентного (РФА) и рентгенофазового (РФТ) анализа. В результате были выявлены существенные различия в минералогической структуре исследуемых образцов, что, как было доказано, напрямую влияет на их дисперсионную стабильность, способность к образованию осадка и эффективность применения. Реологические исследования показали, что бентонитовые глины Таганского месторождения обладают высокой структурной устойчивостью и выраженными тиксотропными свойствами, что делает их эффективным компонентом буровых растворов. В то же время глины из месторождений Келес, Урангай и Кызылорда характеризуются повышенной склонностью к осаждению, что ограничивает возможности их практического применения. Кроме того, в ходе исследования была проанализирована и оценена эффективность воздействия гидрофильных амидофункциональных полимеров на поведение глинистых гидродисперсий. Введение полимеров изменяло межчастичные взаимодействия, улучшая реологические и структурные свойства дисперсий, что открывает перспективы их более широкого применения и внедрения в технологические процессы нового поколения. Практическая значимость. Полученные результаты могут служить научно-практической основой для разработки эффективных стратегий использования бентонитовых глин в бурении, строительстве, экологии и других отраслях.

Ключевые слова: глина, гидродисперсия, бентонит, реология, буровые растворы

Введение. В современном мире невозобновляемые источники энергии, включая метан, нефть и уголь, остаются ключевыми компонентами энергетического обеспечения общества. Анализ показывает значительный рост глобального спроса на углеводородную энергию - почти на 10% в период между 2004 и 2012 годами (Aftab, et al., 2017). Согласно прогнозам учёных, эта тенденция сохранится, причём до 2040 года около 75% энергетических потребностей будет удовлетворяться за счёт ископаемого топлива (ИЕО, 2016). В настоящее время структура мирового энергопотребления демонстрирует доминирование невозобновляемых источников: нефть составляет 31%, метан - 21%, уголь - 29%, ядерная энергия - 4,8%, что в совокупности превышает 86%. При этом доля возобновляемых источников энергии достигает лишь 11% от общего первичного энергоснабжения (IEA, et al., 2014). Для преодоления растущего разрыва между спросом и предложением энергоресурсов необходимо совершенствование методов разведки и интенсификация бурения нефтяных и газовых скважин (Qadri, et al., 2021; Islam, et al., 2021; Qadri, et al., 2021; Radwan, et al., 2022; Haque, et al., 2022). В этом контексте особую значимость приобретают буровые растворы (Hossain, et al., 2015), основными функциями которых являются очистка ствола скважины, транспортировка бурового шлама и обеспечение смазки бурового долота при минимизации расхода (Aftab, et al., 2017; Sehly, et al., 2015; Radwan, et

al., 2019). Следует отметить, что затраты на сложные буровые растворы составляют около 20% от общих расходов на бурение нефтегазовых скважин (Khodja, et al., 2010). Несмотря на существование различных подходов к изучению характеристик и составов буровых растворов, традиционные растворы, состоящие из воды и глины, часто демонстрируют неудовлетворительные показатели по стабильности системы, фильтрации и реологическим свойствам. В связи с этим современные исследования направлены либо на улучшение характеристик буровых растворов на водной основе, либо на разработку буровых растворов на масляной основе с добавлением биоразлагаемых материалов (Khodja, et al., 2010).

Нестабильность глинистых пород в стволе скважины представляет собой одну из серьезнейших проблем в геологоразведочной отрасли, приводящую к таким осложнениям, как прихват бурильных труб вследствие обвалов и сужение ствола скважины из-за накопления твердых частиц, что снижает скорость циркуляции бурового раствора. Эти непроизводительные временные затраты (НВЗ) влекут за собой многомиллионные убытки для нефтегазовой промышленности ежегодно.

Особо следует отметить, что основные проблемы нестабильности ствола скважины возникают преимущественно при бурении мелкозернистых глинистых отложений и их литифицированных разновидностей (сланцев), которые составляют до 75% пробуренных пластов в разведочных скважинах. При этом взаимодействие между буровым раствором и глинистыми породами может существенно влиять на характеристики самого бурового раствора, приводя к диспергированию глины до коллоидных частиц (Charlez, et al., 2020). Основными механизмами взаимодействия сланцев с буровыми растворами являются адсорбция воды, осмотическое набухание и катионный обмен (Van Oort, 2003).

Для эффективного использования сланцевых пород в составе буровых растворов критически важно понимание их физических характеристик, особенно концентрации и типа содержащихся в них глинистых минералов. Хотя буровые растворы на углеводородной основе обеспечивают превосходную устойчивость ствола скважины, отличные смазывающие свойства и термическую стабильность, их применение существенно ограничено экологическими нормами. Эти ограничения создают потребность в разработке экологически безопасных буровых растворов на водной основе, которые должны обеспечивать эксплуатационные характеристики, сопоставимые с растворами на углеводородной основе (Khodja, et al., 2010). В настоящее время многие исследования направлены на поиск возможностей замещения буровых растворов на углеводородной основе растворами на водной основе (Van Oort, 2003; Simpson, et al., 1995).

В научном сообществе значительное внимание уделяется исследованиям, направленным на совершенствование характеристик буровых растворов и снижение рисков неустойчивости ствола скважины (Aftab, et al., 2017; ИЕО, 2016; ИЕА, et al., 2014). Таким образом, в статье особое внимание уделяется исследованиям свойств бентонитовых глин различных месторождений Казахстана в качестве компонентов буровых растворов. Цель этих исследований —

определить физико-химические и реологические характеристики бентонитовых глин Казахстана, оценить их эффективность в буровых растворах и проверить их пригодность для применения в различных геологических условиях.

Основными задачами проведенного исследования являлись сравнительная оценка эффективности применения бентонитовых глин различных месторождений Казахстана в буровых растворах на водной основе и определение их оптимальных концентраций (Асанов, et al., 2023). В ходе исследования уделялось особое внимание изучению влияния различных модификаций этих глин на реологические характеристики бурового раствора, включая показатели вязкости, предельного напряжения сдвига и тиксотропных свойств (Mameshova, et al., 2024). На основе комплексного анализа физико-химических и реологических свойств бентонитовых глин Казахстана были разработаны рекомендации по оптимизации состава буровых растворов с использованием комбинаций этих глин для повышения их эффективности в различных геологических условиях и улучшения эксплуатационных характеристик.

Материалы и основные методы. В качестве объектов исследования были использованы образцы природных глин из четырех месторождений Республики Казахстан:

- Таганское месторождение (ТМ, Восточно-Казахстанская область);
- Урангайское месторождение (УМ, Туркестанская область, Сауранский район);
- Келесское месторождение (КМ, Туркестанская область, Келесский район);
- Кызылординское месторождение (КЗМ, Кызылординская область).

В исследовании применялись следующие полимерные материалы:

- Полиакриламид (ПАА) с молекулярной массой 150000 г/моль и химической формулой мономерного звена $C_9H_{12}NNaO_5$;
- Гидроксипропилцеллюлоза (ГПЦ, торговая марка Klucel EF PHARM) с молекулярной массой 80000 г/моль;
- Натрий карбоксиметилцеллюлоза (Na-КМЦ) с молекулярной массой 250000 г/моль.

Для проведения исследований образцы глин предварительно высушивали при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 0,25 мм согласно ГОСТ 21216-2014. Химический состав исследуемых глин определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S2 PUMA (Bruker, Германия). Минералогический состав образцов изучали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D6 PHASER (Bruker, Германия) с использованием $CuK\alpha$ -излучения при следующих условиях: напряжение 40 кВ, ток 40 мА, шаг сканирования $0,02^\circ$, время набора 0,5 с. Морфологию и размеры частиц глин исследовали методом оптической микроскопии с помощью микроскопа AXIOSKOP 40 (Carl Zeiss, Германия) при различных увеличениях. Микрофотографии обрабатывали с использованием программного обеспечения AxioVision.

$$m_{\max} = \frac{(V - \pi d_{\text{ш}}^2 h_{\text{ш}}/4) m_0 S_{\text{ш}}}{V S_{\text{ш}}} = \frac{(V - \pi d_{\text{ш}}^2 h_{\text{ш}}/4) m_0 d_{\text{ш}}^2}{V d_{\text{ш}}^2}$$

Седиментационный анализ проводили на весовом седиментометре СВ-1 при температуре $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Параметры измерительной системы: расстояние от дна чашечки для накопления осадка до дна цилиндра ($h_{\text{ш}}$) – 3,0 см, внутренний диаметр цилиндра ($d_{\text{ц}}$) – 6,5 см, внутренний диаметр чашечки ($d_{\text{ч}}$) – 4 см, расстояние от уровня жидкости в цилиндре до чашечки седиментометра (H) – 19 см, объем жидкости в цилиндре (V) – 600 мл, масса глины (m_0) – 3 г. С учетом этих параметров можно рассчитать массу глины ($m_{\max}$), которая должна оказаться на чашечке после полного оседания частиц:

где, $S_{\text{ц}}$ и $S_{\text{ч}}$ – соответственно площади внутреннего основания цилиндра и чашечки. По нашим расчетам, значение $m_{\max} = 0,95$ г.

Для анализа готовили водные суспензии с концентрацией твердой фазы 1 масс.%. Измерения проводили в течение 24 часов с регистрацией массы осадка через определенные промежутки времени. Реологические свойства водных дисперсий глин исследовали на ротационном вискозиметре VT550 (Haake, Германия, Thermo Fisher Scientific) с системой коаксиальных цилиндров при температуре $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Измерения проводили при концентрации твердой фазы до 20 масс.% в диапазоне скоростей сдвига $0,1\text{--}100\text{ с}^{-1}$. Определяли зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига и строили полные реологические кривые течения.

Результаты и обсуждение. В данном разделе представлены результаты исследования и их интерпретация в контексте существующих научных данных о физико-химическом взаимодействии глинистых минералов и полимеров. Полученные результаты по адсорбционным и реологическим характеристикам согласуются с ранее опубликованными исследованиями в данной области.

В результате проведенных исследований глинистых минералов из четырех месторождений Республики Казахстан были установлены их основные физико-химические свойства, структурные особенности и геологические условия формирования (Рис. 1). Цвет глин напрямую определяется их минералогическим и химическим составом, в частности, степень окисления и концентрация железа ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) играют ключевую роль: так, ионы Fe^{3+} придают глинам красновато-коричневые или желтые оттенки, тогда как преобладание Fe^{2+} обуславливает зеленоватую или синеватую окраску. Существенное влияние на цвет также оказывают сопутствующие компоненты, такие как органические вещества, марганец, кальций и углерод, а также кристаллическая структура глинистых минералов и степень их дисперсности, поскольку они изменяют характер рассеяния и поглощения света. Указанные особенности подтверждаются результатами рентгенофазового и химического анализа. При этом глинистые минералы исследуемых месторождений характеризуются типичной для алюмосиликатов слоистой структурой, основу которой составляют тетраэдрические кремнекислородные и октаэдрические алюмокислородные

слои; образцы различаются по характеру упаковки этих слоёв, типу межслоевых промежутков и наличию изоморфных замещений в кристаллической решётке, что в совокупности влияет как на их цвет, так и на физико-химические свойства.



Рисунок 1 - Глины различных месторождений Казахстана
(ТМ – Таганский, УМ – Урангайский, КМ – Келесский и КЗМ - Кызылординский)

Результаты рентгенофазового анализа (РФА) показали, что исследуемые образцы бентонитовых глин представляют собой полиминеральные системы со схожим минеральным составом. Основной фазой во всех образцах является монтмориллонит смектитовой группы, однако также выявлены примеси в виде нонтронита, мусковита, кварца, кальцита, полевых шпатов и слюд, присутствующих в различной степени.

По данным РФА, характерные рефлексы монтмориллонита зафиксированы на интервалах 14,73 - 14,56 Å; 6,43 - 6,48 Å; 2,54 - 2,60 Å, что соответствует 2:1 слоистой структуре алюмосиликатов. Кварц идентифицирован по пикам при 2,46; 3,36 - 3,34; 2,29; 2,24 - 2,25 Å. Ортотклаз (полевой шпат) - на интервалах 3,80; 3,20 - 3,18; 2,92; 2,53 Å. Рефлексы мусковита и других слюд наблюдаются при 5,03; 3,50; 3,20; 2,34 - 2,35 Å, что подтверждает их участие в фазовом составе.

Бентониты Таганского месторождения характеризуются высоким содержанием монтмориллонита (до 85 мас. %) и выраженными тиксотропными свойствами, что делает их особенно перспективными для применения в качестве основ для буровых растворов. В отличие от них, образцы из Урангайского месторождения содержат лишь около 30 мас. % монтмориллонита и классифицируются как бейделлитовые глины. Низкое содержание активной смектитовой фазы ограничивает их способность к набуханию и диспергированию. Бентониты Келесского месторождения содержат монтмориллонит в пределах 55 - 60 мас. %, при незначительном присутствии кварца и кальцита, что обеспечивает хорошие коллоидные и адсорбционные характеристики. Образцы из Кызылординского месторождения характеризуются монтмориллонитовой фазой на уровне ~50 мас. % и относительно высоким содержанием кальцита и кварца, что повышает их прочность при высыхании, но несколько снижает тиксотропность и дисперсность.

Таким образом, полученные данные рентгенофазового анализа позволяют дифференцировать бентонитовые глины по минералогическому и фазовому составу и обосновать их дальнейшее технологическое применение с учётом

геологического происхождения и структурных особенностей. Реологические свойства бентонитовых глин определяются их химическим составом и минералогической структурой (Трофимова, et al., 2006). В рамках исследования был проведен анализ химического состава бентонитовых глин из различных месторождений Казахстана (Табл. 1).

Анализируя химический состав и физико-химические свойства гидродисперсий глин различных месторождений Казахстана, можно дать следующую характеристику:

Таблица 1. Химический состав глин различных месторождений Казахстана

Состав, масс.%	Таган	Келес	Урангай	Кызылорда
SiO ₂	55,48	60	51,26	51,84
Al ₂ O ₃	19,38	14	14,85	12,9
Fe ₂ O ₃	4,4	6	5,58	5,5
CaO	1,98	9	4,9	9,62
MgO	2,18	2	2,58	2,58
TiO ₂	0,3	1	-	0,72
Na ₂ O	1,24	1,5	1,88	1,65
K ₂ O	0,51	1,5	1,88	2,21
п.п.п др.	11,31	6	6,48	0,15

Образцы глинистых пород Таганского месторождения содержат диоксид кремния (SiO₂) в количестве 55,48%, что указывает на их высокую силикатную природу. Содержание оксида алюминия (Al₂O₃) составляет 19,38%, что является самым высоким показателем по сравнению с другими месторождениями. Содержание оксида железа (Fe₂O₃) относительно низкое - 4,4%. В минеральном составе Келесского месторождения наблюдается самое высокое содержание SiO₂ (60%). Концентрация оксида кальция (CaO) достигает 9%, что является достаточно высоким показателем. Помимо этого, глинистые породы данного месторождения характеризуются содержанием диоксида титана (TiO₂) в количестве 1%.

Глинистые минералы Урангайского месторождения характеризуются средним содержанием SiO₂ (51,26%). Концентрация оксидов натрия (Na₂O) и калия (K₂O) одинакова - 1,88%, что является высоким показателем по сравнению с другими месторождениями. Глинистые отложения Кызылординского месторождения отличаются наивысшим содержанием оксида кальция (9,62%). Концентрация оксида калия также достигает высокого значения - 2,21%. По сравнению с другими месторождениями, данные образцы демонстрируют наименьшее содержание дополнительных примесей - 0,15%. Эти различия в химическом составе отражают особенности геологических условий каждого месторождения и определяют их различные возможности промышленного применения. Результаты исследования физико-химических свойств гидродисперсий глинистых минералов позволяют определить их структурно-реологические характеристики и расширить области применения.

Бентонитовые глины обладают уникальными характеристиками, которые определяются особенностями их состава и структуры. В частности, их отличительные свойства обусловлены значительным содержанием тонкодисперсной фракции и специфическим строением минералов, относящихся к монтмориллонитовой группе (Асанов, et al., 2023). Данные глины демонстрируют выдающиеся адсорбционные способности, что делает их эффективными при очистке различных сред. Важной характеристикой является их способность формировать устойчивые суспензии, что особенно ценно в промышленных применениях. Кроме того, бентонитовые глины характеризуются значительной степенью набухаемости при взаимодействии с водой и ярко выраженными коллоидными свойствами. В ходе исследования были проанализированы физические и коллоидно-химические характеристики гидродисперсий изучаемых образцов. Проведены измерения следующих параметров во времени (t , мин): объем осадка (V , мл), высота слоя жидкости над осадком (h , мл) (Рис.2 а), оптическая плотность (D) и степень осветления жидкости ($D_{\text{сож}}$) (Рис.2 б) для гидродисперсий глины (ГДГ).

Результаты измерений показали существенные различия в динамике изменения исследуемых параметров. С увеличением времени отстаивания наблюдались следующие закономерности: объем осадка (V , мл) и оптическая плотность (D) постепенно уменьшались, в то время как высота жидкости над осадком (h , мл) и степень осветления жидкости ($D_{\text{сож}}$) возрастали (Рис.2).

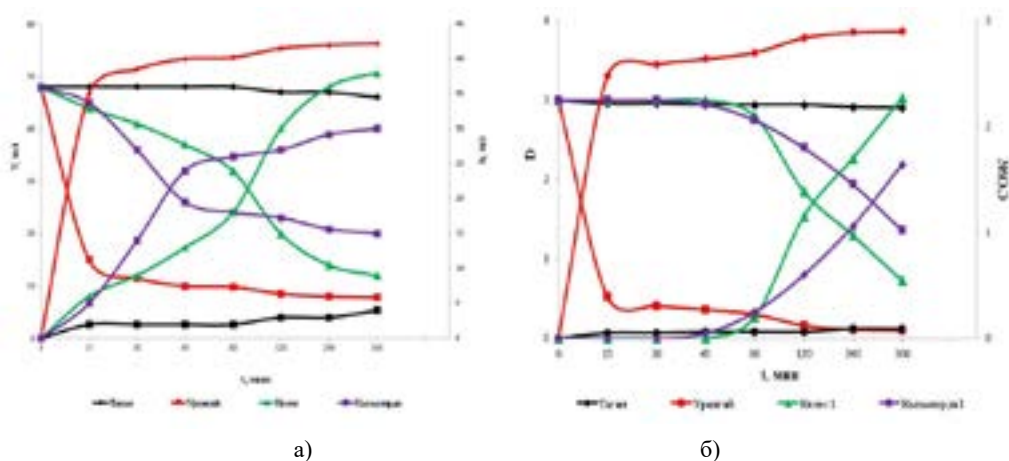


Рисунок 2 - Временная зависимость (t , мин) параметров гидродисперсий глины:
(а) объема осадка (V , мл) и высоты жидкости над осадком (h , мл); (б) оптической плотности (D) и степени осветления жидкости ($D_{\text{сож}}$)

Скорость изменения исследуемых параметров существенно зависит от типа глинистого минерала и места его добычи. Особенно заметны различия при анализе динамики объема осадка (V , мл) во времени. Наибольшие значения объема осадка (V , мл) и наименьшие значения высоты жидкости над осадком

(h, мл) показали гидродисперсии глин (ГДГ) месторождений Таган, Кызылорда и Келес. В то же время, гидродисперсия Урангай характеризуется наименьшим объемом осадка (V, мл) и наибольшей высотой осветленной жидкости над осадком (h, мл). Гидродисперсии месторождений Таган, Кызылорда и Келес также демонстрируют более высокие значения оптической плотности (D) и меньшую степень осветления ($D_{\text{сож}}$). Примечательно, что оптическая плотность (D) зависит не только от типа глины, но и от места отбора образца и времени отстаивания. Это подтверждается сравнением значений оптической плотности (D) и объема осадка (V, мл), измеренных после 60 минут отстаивания для ГДГ месторождений Таган, Кызылорда и Келес. Аналогичные закономерности наблюдаются при сравнении изменений объема осадка (V, мл) и оптической плотности (D) жидкости над осадком для образцов глин месторождения Урангай с остальными образцами (Рис.2 а, б).

Особенно наглядно эти различия проявляются при сравнении скорости разделения твердой фазы гидродисперсий во времени. Наибольшая скорость разделения, образования осадка и осветления жидкости над осадком наблюдается у образцов Урангай. Напротив, самый медленный процесс разделения твердой и жидкой фаз характерен для образцов глин месторождений Таган, Кызылорда и Келес. Обнаруженные различия обусловлены преимущественно размером частиц твердой фазы и взаимодействующей способностью дисперсной среды. С увеличением дисперсности твердой фазы возрастает площадь поверхности частиц, что усиливает процесс их контакта с дисперсной средой и приводит к повышению гидрофильности (Мифтахова, et al., 2019). В результате замедляется образование осадка, снижается его объем (V, мл) и высота осветленной жидкости над ним, при этом сохраняется относительно высокая оптическая плотность (D) жидкости над осадком при заданном времени отстаивания (Рис.2 а, б). Это подтверждается сравнительными данными изменения объема осадков образцов ГДГ через 4, 6 и 24 часа отстаивания. Наблюдается различное изменение объема осадки во времени для образцов гидродисперсии глин (ГДГ) одинаково с содержанием твердой фазы. В целом объем оседания выводится с переходом по времени, однако степень этой разницы изменяется в зависимости от типа приведенных примеров. Данная закономерность характерна для всех изученных образцов ГДГ.

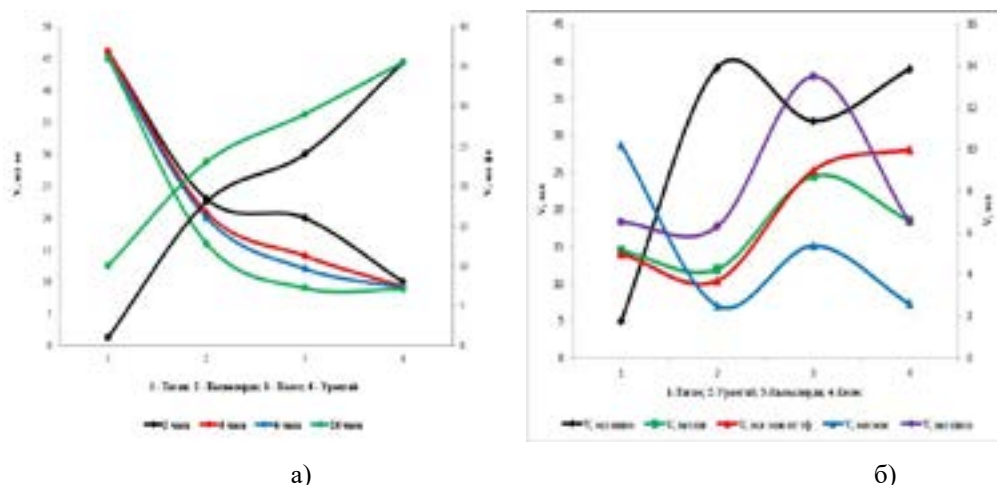


Рисунок 3 - Изменения в образцах ГДГ: (а) объема осадка твердой фазы и фильтратов; (б) объема жидкости над осадками (V , мл ожс), объема поглощенной жидкости (V , мл пж), объема жидкости, закрепленной на поверхности твердой фазы (V , мл зож пт тф) и объема закрепленной жидкости через сутки (V , мл зож)

Объем фильтра через 24 часа варьируется в зависимости от вида глины, что обусловлено различиями в химическом составе, дисперсности и гидрофильности образцов. Это подтверждается тем, что для образца глины месторождения Урангай процесс изменения объема осадки ГДГ продолжается медленно даже через 2 часа и продолжается до 24 часов, пока не сохраняется постоянный объем осадки. В образцах глины месторождения Келес объем осадка значительно меняется при отстаивании до 24 часов. Глины месторождения Кызылорда отличаются тем, что через 4 часа их объем осадка и его высота почти вдвое больше, причем эта разница сохраняется даже после 24 часов отстаивания. Аналогичные различия наблюдаются и в скорости фильтрации. Для достижения одинакового объема фильтрата образцам глин Урангай требуется 2 часа, Келес - 4 часа. Образцы глин Таган и Кызылорда фильтруются крайне медленно: для Кызылорда максимальный объем фильтрата достигается через 4 часа и далее остается неизменным даже через 24 часа.

Различия в объеме осадка и скорости фильтрации указывают на неодинаковую гидрофильность изученных образцов глины, что подтверждается данными по количеству фильтрата (V , мл фт) и объему осадка (V , мл ос) (Рис. 3 а). Дополнительную информацию о различиях в гидрофильности образцов можно получить из анализа параметров, рассчитанных по приведенной формуле:

$$V_{\text{мл пж}} = V_{\text{мл дж}} - V_{\text{мл фт}}$$

количеством поглощенной жидкости. А также рассчитанные по формуле:

$$V_{\text{мл ожпо}} = V_{\text{мл ГДГ}} - V_{\text{мл ос тф}}$$

количество объема жидкой среды над поверхностью осадкой (V , мл ожпо). Здесь приведенное $V_{\text{мл гдг}}$ – объем жидкости гидродисперсии глины, $V_{\text{мл ос тф}}$ – объем осадка твердой фазы. Кроме этого на отличие взаимодействующие способности образцов глин с дисперсной средой свидетельствует установленные параметры по отношению объема осадка гидродисперсии глин через суток ($V_{\text{мл ос гдг (ч.с.)}}$) и масса сухой твердой фазой ($m_{\text{г тф}}$),

$$V_{\text{мл зож}} = V_{\text{мл ос гдг (ч.с.)}} / m_{\text{г тф}} - 1$$

количество прочно закрепленной объем жидкости ($V_{\text{мл зож}}$) на поверхности твердой фазы. А также разница найденное численное значение закрепленной объем жидкости над поверхностью твердой фазы ($V_{\text{мл зож пт тф}}$) ровно

$$V_{\text{мл зож пт тф}} = V_{\text{мл ожпо}} - V_{\text{мл фт (ч.с.)}}$$

объема жидкости над поверхностью осадки ($V_{\text{мл ожпо}}$) и объема фильтрата через сутки ($V_{\text{мл фт (ч.с.)}}$). По мимо этого объем жидкости в составе осадка ($V_{\text{мл ожсо}}$) найденного

$$V_{\text{мл ожсо}} = V_{\text{мл одж}} - V_{\text{мл оспо}}$$

которые вычисленные на основании объем добавленной жидкости ($V_{\text{мл одж}}$) и объема среды над поверхностью осадки ($V_{\text{мл оспо}}$). Физико-химический анализ ГДГ выявил существенные различия в значениях удельной электропроводности ($\chi_{\text{уд}}$), солесодержания и pH фильтратов (Табл. 2). В данном исследовании были изучены физико-химические характеристики фильтратов глинистых гидродисперсий, включая оптическую плотность, удельную электропроводность, солесодержание и pH. Полученные результаты позволяют оценить растворимые свойства исследуемых систем и их возможные механизмы формирования.

Оптическая плотность ($D_{\text{ф}}$) отражает степень мутности фильтрата и косвенно характеризует содержание в нем коллоидных и взвешенных частиц. Наименьшее значение (0,01) зафиксировано для Таганской глины, тогда как для остальных образцов (Келес, Кызылорда, Урангай) этот параметр выше (0,02). Более низкая оптическая плотность может свидетельствовать о лучшей коагуляции и осаждении частиц, что приводит к меньшему содержанию взвесей в фильтрате.

Таблица 2. Физико-химические характеристики фильтратов глинистых гидродисперсий

№	Образцы глины	$D_{\text{ф}}$	$\chi_{\text{уд}}$ мкСм/см	Солесодержания, мг/дм ³	pH
1	Таган	0,01	989,2	680,2	8,78
2	Келес	0,02	511,0	255,5	7,81
3	Кызылорда	0,02	251,8	120,1	7,56
4	Урангай	0,02	1039	511,0	7,32

Наибольшее значение удельной электропроводности (1039 мкСм/см) наблюдается у Урангайской глины, тогда как минимальное (251,8 мкСм/см) - у Кызылординской глины. Высокая электропроводность свидетельствует о большем количестве растворенных ионов в растворе. Это также подтверждается данными по солесодержанию: максимальная минерализация зафиксирована у Таганской глины (680,2 мг/дм³) и Урангайской глины (511,0 мг/дм³). Наименьшее содержание растворенных солей у Кызылординской глины (120,1 мг/дм³), что согласуется с ее низкой электропроводностью. Значения электропроводности и солесодержания показывают, что фильтраты глин содержат различное количество растворимых соединений, что может быть связано с природными примесями и минералогическим составом сырья.

Значения pH варьируются от 7,32 до 8,78, что указывает на преобладание щелочной среды. Наиболее высокое значение pH зарегистрировано для Таганской глины (8,78), а наиболее низкое - для Урангайской глины (7,32). Более высокая щелочность может быть связана с наличием карбонатных примесей или процессов гидролиза растворимых компонентов глины.

Сравнение полученных данных позволяет выявить следующие закономерности: образцы с высокой электропроводностью и солесодержанием (Таган, Урангай) демонстрируют более выраженную щелочную реакцию среды, что указывает на наличие растворимых солей. Оптическая плотность фильтрата (D_{ϕ}) у Таганской глины ниже, что может говорить о более эффективном осаждении частиц, несмотря на высокую концентрацию растворенных ионов. Кызылординская глина характеризуется минимальными значениями электропроводности и солесодержания, что может указывать на низкое содержание растворимых примесей. Результаты эксперимента показали, что фильтраты различных глинистых гидродисперсий значительно различаются по физико-химическим свойствам. Основные различия обусловлены концентрацией растворимых соединений и их влиянием на электропроводность и pH. Оптическая плотность фильтрата служит важным параметром, отражающим наличие коллоидных частиц в растворе, и может быть использована для оценки устойчивости глинистых суспензий. Эти данные имеют практическое значение для понимания поведения глинистых дисперсий в технологических процессах, включая водоочистку, буровые растворы и керамическое производство.

Для оценки плотности исследуемых гидродисперсий глин, необходимой для обработки кривых накопления осадка при седиментации, была использована методика, описанная в работе (Мордасов, et al., 2004). Кривые накопления осадка для исследованных дисперсий глин в воде приведены на рис. 4 (а, б, в, г). Время наблюдения составляло от 4,2 до 8,9 ч. Из рис. 4 г видно, что на кривой наблюдается точка перегиба, что, как известно, свидетельствует об агрегировании частиц. Это исключает дальнейшие расчеты для оценки индивидуальных размеров частиц. Показано, что за время наблюдения полного оседания частиц глин не произошло. Количество осевших частиц (масс. %) приведено в таблице 3. Таким образом, гидродисперсии глины характеризуются очень широким

распределением частиц по размерам, поскольку для них фиксируется не только наличие седиментации, но и седиментационно-диффузионного равновесие.

Это не позволяет провести полноценный дисперсионный анализ на основе кривых накопления осадка (рис. 3 а,б,в). При этом возможно оценить лишь время ($t_{\min}$) оседания самых крупных частиц по отрыву касательной, проведенной к кривой седиментации из начала координат (табл. 3). Максимальный радиус частиц ($r_{\max}$) рассчитывали по уравнению:

$$r_{\max} = [9\eta H / 2(\rho - \rho_o)gt_{\min}]^{1/2},$$

где η и ρ_o – соответственно вязкость и плотность воды при 22°C.

Результаты приведены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, гидродисперсия глины Таганского месторождения демонстрирует высокую седиментационную устойчивость, о чем свидетельствует низкая степень осаждения частиц (13,7%) за время наблюдения. Это указывает на стабильность дисперсии и возможность ее использования для реологических испытаний, поскольку отсутствие значительной седиментации позволяет получать воспроизводимые данные на ротационном вискозиметре с коаксиальными цилиндрами.

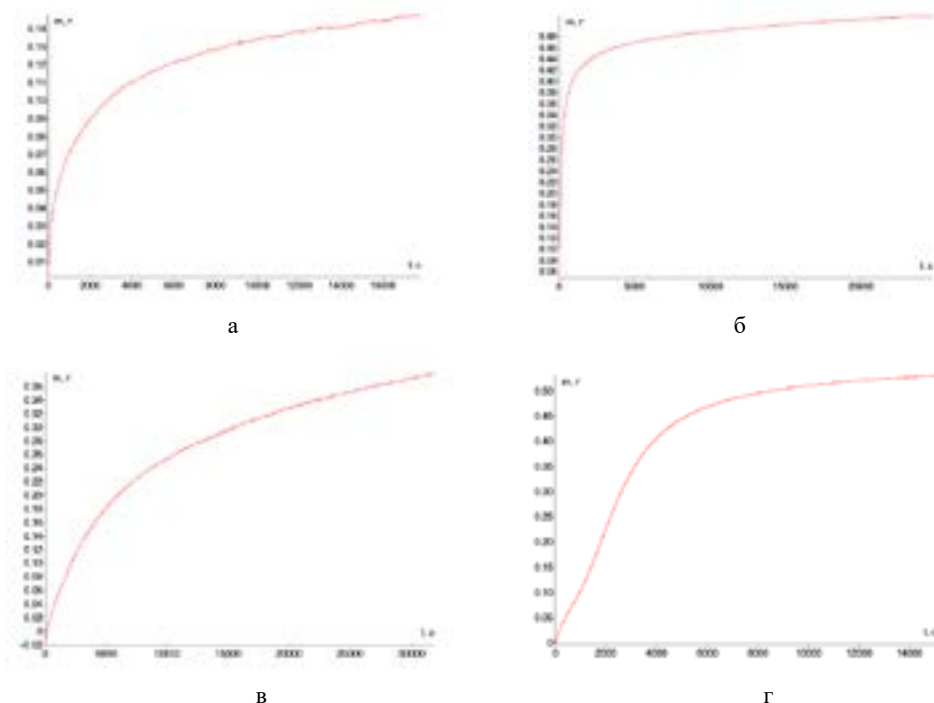


Рисунок 4 – Седиментационные кривые для гидродисперсий глин Таганского (а), Урангайского (б), Келесского (в) и Кызылординского (г) месторождений

В отличие от Таганской глины, гидродисперсии остальных образцов (Келесского, Урангайского и Кызылординского месторождений) характеризуются значительно большей склонностью к седиментации. Для Келесской глины осело 48,0% частиц, для Урангайской – 49,3%, а для Кызылординской – 55,8%, что свидетельствует о низкой седиментационной устойчивости. В результате эти дисперсии не пригодны для реологических испытаний в стандартных условиях, так как оседание частиц приводит к невозможности получения воспроизводимых реологических характеристик. Для образца глины Кызылординского месторождения значение максимального радиуса частиц не представлено, поскольку на седиментационной кривой данного образца наблюдается выраженная точка перегиба, что указывает на интенсивное агрегирование частиц, затрудняющее корректное определение индивидуальных размеров.

Таблица 3. Значения плотности глин и данные седиментационного анализа для их гидродисперсий ($C = 0,5$ масс. %) при 22°C

№	Название месторождения	Плотность, кг/м ³	Время наблюдения, ч	Частицы, седиментировавшие за время наблюдения, масс. %	$t_{\min}$, с	$r_{\max}$, мкм
1	Таганское	2000	5,7	13,7	52	41±1
2	Келесское	1670	6,9	48,0	40	58±2
3	Урангайское	1250	8,9	49,3	60	76±2
4	Кызылординское	1250	4,2	55,8	50	—

Таким образом, седиментационная устойчивость исследуемых глин существенно различается, что определяет возможность их дальнейшего использования в реологических исследованиях.

Реологические свойства глин исследовали с использованием ротационного вискозиметра VT 550. Установлено, что таганская глина обладает выраженными тиксотропными свойствами, что подтверждается соответствующими реологическими характеристиками. В отличие от таганской глины, остальные образцы (Келесское, Урангайское и Кызылординское месторождения) частично подвергаются седиментации со временем, что затрудняет их прямое реологическое исследование.

Для гидродисперсий глин Таганского месторождения (5, 7 и 10 масс. %) получены кривые течения (рис. 5) и вязкости (рис. 6). Наблюдается наличие предельного напряжения сдвига (τ^*), возрастающего с увеличением концентрации (рис. 5 и 6). С ростом скорости деформации эффективная вязкость уменьшается более чем в 1000 раз. Эти результаты свидетельствуют о структурировании гидродисперсии. Сформированная структура проявляет ярко выраженные тиксотропные свойства, т.е. способность к быстрому восстановлению (рис. 9).

Тиксотропные зависимости эффективной вязкости получены для 5 и 7% гидродисперсий (рис.5).

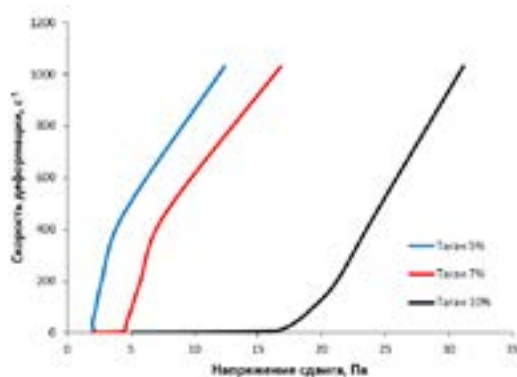


Рисунок 5 - Зависимости скорости деформации от напряжения сдвига для гидродисперсий различными концентрациями глины Таганского месторождения

На рисунке (Рис. 6) представлено изменение скорости деформации в зависимости от приложенного напряжения сдвига для образцов с концентрацией 5, 7 и 10 масс. %. Видно, что увеличение содержания глины приводит к возрастанию предельного напряжения сдвига, что свидетельствует об усилении межчастичных взаимодействий и формировании более жесткой пространственной структуры. Наиболее выраженный нелинейный характер проявляется у 10%-ной дисперсии, что указывает на значительное сопротивление течению.

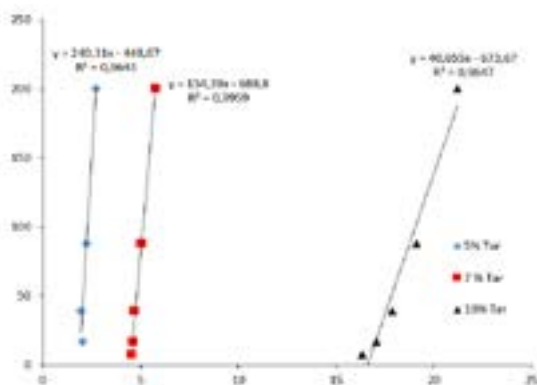


Рисунок 6 - Зависимости эффективной вязкости от скорости деформации для гидродисперсий различными концентрациями глины Таганского месторождения

Рисунок 6 иллюстрирует тиксотропное поведение гидродисперсий: при увеличении скорости деформации наблюдается резкое снижение эффективной вязкости, что связано с разрушением пространственной структуры. Вязкость уменьшается более чем в 1000 раз, что характерно для сильно структурированных систем. Это подтверждает способность системы к обратимому восстановлению при снижении напряжения.

Таблица 4. Числовые значения рассчитанной вязкости для образцов глины Таганского месторождения при различных концентрациях

Тар, мас %	τ^* , Па	hБ, мПа с	Точность %
5	1,87	4,16	3,6
7	4,47	6,48	0,5
10	16,57	24,60	3,5

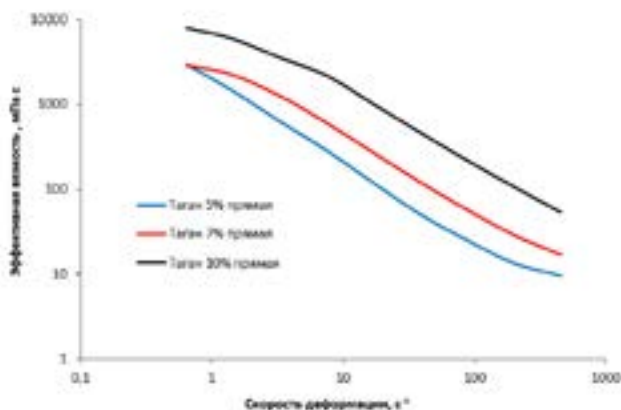


Рисунок 7 - Зависимости эффективной вязкости от скорости деформации для гидродисперсий различными концентрациями глины Таганского месторождения

На рисунке (Рис. 7) отображено поведение вязкости при циклическом изменении скорости деформации. Наблюдается эффект гистерезиса: при уменьшении нагрузки вязкость восстанавливается, но с некоторым запаздыванием, что указывает на динамическую перестройку структуры. Это доказывает тиксотропные свойства дисперсии, важные для практического применения в строительных и технологических процессах.

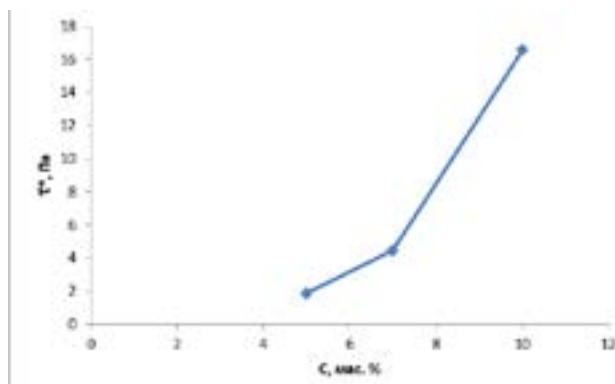


Рисунок 8 - Зависимость предельного напряжения сдвига от концентрации гидродисперсий глины Таганского месторождения

Данный рисунок (Рис. 8) подтверждает рост предельного напряжения сдвига с увеличением концентрации глины. Это обусловлено усилением межчастичных взаимодействий, приводящих к формированию устойчивых пространственных сеток. Такая зависимость характерна для структурированных дисперсий и подтверждает реологические особенности изучаемых систем (Асанов, et al., 2023).

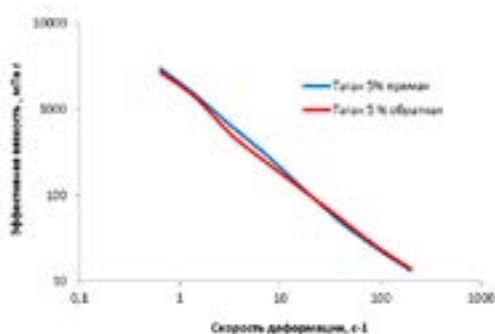


Рисунок 9 - Зависимости эффективной вязкости при увеличении (прямая) и уменьшении (обратная) скорости деформации для 5% гидродисперсии глины Таганского месторождения

На данном рисунке (Рис. 9) представлены прямой и обратный ходы изменения вязкости. При уменьшении нагрузки вязкость возрастает, что подтверждает наличие тиксотропии. Быстрое восстановление структуры указывает на временную коагуляцию частиц, что свидетельствует о высокой структурной стабильности дисперсии.

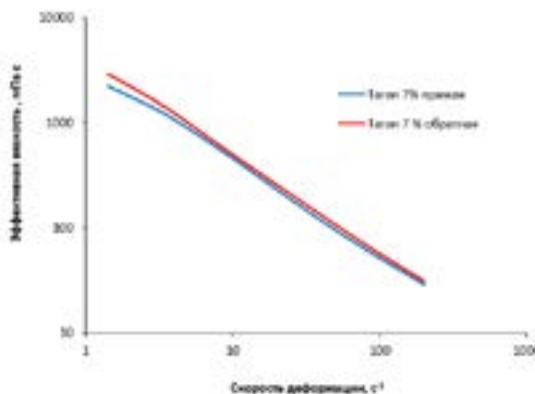


Рисунок 10 - Изменение скорости деформации 7% таганской глины в зависимости от эффективной вязкости

Рисунок (Рис. 10) иллюстрирует тиксотропное поведение 7%-ной дисперсии. Наблюдается аналогичный эффект восстановления структуры после разрушения

при больших скоростях сдвига. Это подтверждает, что увеличение концентрации глины приводит к усилению тиксотропных свойств.

Полученные результаты позволяют предположить, что свойства, выявленные у трех модифицированных образцов, могут быть использованы в различных прикладных направлениях. В связи с этим планируется проведение дополнительных исследований в данном направлении.

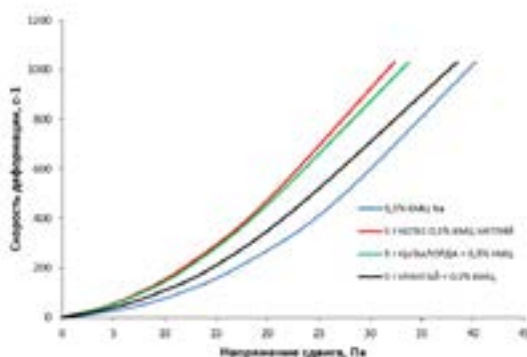


Рисунок 11 - Изменение скорости деформации 5% гидродисперсии глины с 0,5% КМЦ в зависимости от напряжений сдвига

Добавление карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) приводит к изменению характера течения (Рис. 11). Дисперсия теряет тиксотропные свойства и ведет себя ближе к ньютоновским жидкостям. Это связано с адсорбцией полимерных цепей на поверхности частиц глины, что препятствует образованию пространственной структуры.

При добавлении гидроксипропилцеллюлозы (ГПЦ) наблюдается аналогичное поведение (Рис. 12). Дисперсия приобретает свойства ньютоновской жидкости, что делает ее пригодной для использования в технологических процессах, требующих стабильной реологии.

Представленные рисунки подтверждают выраженные тиксотропные свойства глины Таганского месторождения. С увеличением концентрации наблюдается рост предельного напряжения сдвига и снижение вязкости при увеличении скорости деформации. Введение гидрофильных полимеров (КМЦ и ГПЦ) приводит к изменению характера течения дисперсий, что может быть полезно для различных инженерных и технологических приложений. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации реологических характеристик материалов в строительстве, бурении и других отраслях промышленности. А также, с учетом выявленных причин полученных результатов исследуемых образцов, в перспективе поставлена задача изучения всех образцов с использованием различных модифицированных полимерных материалов.

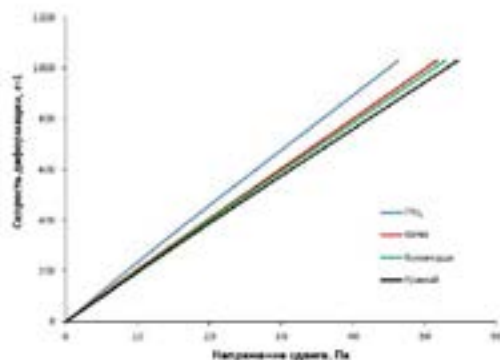


Рисунок 12 – Изменение скорости деформации 5% гидродисперсии глин с 5% ГПЦ в зависимости от напряжений сдвига

Заключение. В ходе проведенного исследования были изучены физико-химические и реологические характеристики бентонитовых глин различных месторождений Казахстана. Полученные результаты позволили установить, что химический состав и минералогическая структура глин существенно различаются в зависимости от месторождения. Эти различия оказывают значительное влияние на их способность к диспергированию и образованию устойчивых суспензий.

Исследование седиментационной устойчивости показало, что образцы глин Таганского месторождения обладают наибольшей стабильностью, в то время как глины Келесского, Урангайского и Кызылординского месторождений характеризуются повышенной склонностью к седиментации. Реологический анализ подтвердил, что гидродисперсии глин Таганского месторождения проявляют ярко выраженные тиксотропные свойства, что делает их перспективными для применения в буровых растворах на водной основе.

Добавление гидрофильных полимеров, таких как карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и гидроксипропилцеллюлоза (ГПЦ), существенно изменяет поведение дисперсий, снижая их тиксотропные свойства и делая их пригодными для использования в различных технологических процессах. Анализ фильтрационных характеристик показал, что степень осветления и электропроводность фильтратов зависят от концентрации растворимых солей, что следует учитывать при разработке составов буровых растворов.

Проведенные исследования позволили расширить представления о свойствах бентонитовых глин Казахстана и их потенциале для применения в нефтегазовой промышленности. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации состава буровых растворов с учетом специфики геологических условий. Они также могут служить основой для дальнейших исследований в области реологии и модификации глинистых материалов.

Литературы

Aftab A., Ismail A.R., Ibupoto Z.H., & Soomro M.I. (2017) Nanoparticles based drilling muds: A solution to drill elevated temperature wells — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76. — P. 1301-1313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.020>

Асанов А., Мамешова С.А., Асанов А.А. (2023) Оңтүстік өңір сазды минералдарының коллоидты-химиялық және реологиялық қасиеттері: 2. Доклады НАН РК, 346(2). — Б. 75-93.

Charlez P., & Heugas O. (2020). Evaluation of optimal mud weight in soft shale levels. In *Rock mechanics as a multidisciplinary science*. — P. 1005-1014. CRC Press.

Haque A.E., Islam M.A., Qadri S.M. T., & Radwan A.E. (2022) Integrated wireline log and seismic attribute analysis for the reservoir evaluation: A case study of the Mount Messenger Formation in Kaimiro Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 99. — P. 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104452>

Hossain M.E., & Al-Majed A.A. (2015) *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. John Wiley & Sons.

International Energy Agency (IEA) (2014) *Key world energy statistics* (Vol. 2011, p. 3). IEA.

International Energy Outlook. (2016) U.S. Energy Information Administration. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/> (in English)

Islam M.A., Qadri S.M. T., & Radwan A.E. (2021). Three-dimensional structural and petrophysical modeling for reservoir characterization of the Mangahewa Formation, Pohokura Gas-Condensate Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Natural Resources Research*, 30(1). — P. 371-394. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09676-z>

Khodja M., Khodja-Saber M., Khelifi R., Canselier J.P., Bergaya F., & Fourar K. (2010) Shale problems and water-based drilling fluid optimisation in the Hassi Messaoud Algerian oil field. *Applied Clay Science*, 49(4). — P. 383-393. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.06.015>

Mameshova S., & Asanov A. (2024). Study of colloidal-chemical properties of clay hydrodispersions obtained from the southern region of Kazakhstan. *Eurasian Science Review: An International Peer-Reviewed Multidisciplinary Journal*, 2(1). — P. 36-44.

Міфтахова Г. М., Каримов О. Х., Сулейманов Д. Ф., Кадыров Р. Р., & Загретдинов Р. Б. (2019). Особенности взаимодействия глинистых частиц с водной фазой. *Проблемы научной мысли*, 4(12). — P. 45-47.

Мордасов Д. М., & Мордасов М. М. (2004). *Технические измерения плотности сыпучих материалов*. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та.

Qadri S.M. T., Islam M.A., & Radwan A.E. (2021) Integration of 1D and 3D modeling schemes to establish the Farewell Formation as a self-sourced reservoir in Kupe Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Frontiers in Earth Science*, 15(3). — P. 631-648.

Qadri S. M. T., Islam M. A., & Radwan A. E. (2021). Reservoir quality evaluation of the Farewell sandstone by integrating sedimentological and well log analysis in the Kupe South Field, Taranaki Basin-New Zealand. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(1). — P. 11-31.

Radwan A. E. (2022). Three-dimensional gas property geological modeling and simulation. In *Sustainable Geoscience for Natural Gas Subsurface Systems*. — P. 29-49.

Radwan A. E., Qadri S.M.T., & Islam M.A. (2019). Pore and fracture pressure modeling using direct and indirect methods in Badri Field, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 156. — P. 133-143.

Sehly K., Benyounes K., Youcefi A., & Djebbar M. (2015). Stability and ageing behaviour and the formulation of potassium-based drilling muds. *Applied Clay Science*, 104. — P. 309-317.

Simpson J.P., Walker T.O., & Jiang G.Z. (1995). Environmentally acceptable water-based mud can prevent shale hydration and maintain borehole stability. *SPE Drilling & Completion*, 10(4). — P. 242-249.

Трофимова Ф.А., et al. (2006). Влияние механоактивационных процессов на изменение коллоидных и реологических свойств бентонитовых глин. In *Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ*. — P. 99. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.



Van Oort E. (2003). On the physical and chemical stability of shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38(3-4). — P. 213-235.

References

Aftab A., Ismail A.R., Ibutoto Z.H., & Soomro M.I. (2017) Nanoparticles based drilling muds: A solution to drill elevated temperature wells — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76. — P. 1301-1313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.020> (in English)

Asanov A., Mameshova S., & Asanov A. (2023). Ontustik onir sazdı mineraldarynyn kolloidty-khimiyalyk zhane reologiyalyk kasietteri [Colloidal-chemical and rheological properties of clay minerals from the Southern region]: 2. Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (NAS RK), 346(2). — P. 75-93. (in Kazakh)

Charles P., & Heugas O. (2020) Evaluation of optimal mud weight in soft shale levels. In *Rock mechanics as a multidisciplinary science*. — P. 1005-1014. CRC Press. (in English)

Haque A.E., Islam M.A., Qadri S.M. T., & Radwan A.E. (2022) Integrated wireline log and seismic attribute analysis for the reservoir evaluation: A case study of the Mount Messenger Formation in Kaimiro Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 99. — P. 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104452> (in English)

Hossain M.E., & Al-Majed A.A. (2015) *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. John Wiley & Sons. (in English)

International Energy Agency (IEA) (2014) *Key world energy statistics* (Vol. 2011, p. 3). IEA. (in English)

International Energy Outlook. (2016) U.S. Energy Information Administration. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/> (in English)

Islam M.A., Qadri S.M. T., & Radwan A.E. (2021). Three-dimensional structural and petrophysical modeling for reservoir characterization of the Mangahewa Formation, Pohokura Gas-Condensate Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Natural Resources Research*, 30(1). — P. 371-394. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09676-z> (in English)

Khodja M., Khodja-Saber M., Khelifi R., Canselier J.P., Bergaya F., & Fourar K. (2010) Shale problems and water-based drilling fluid optimisation in the Hassi Messaoud Algerian oil field. *Applied Clay Science*, 49(4). — P. 383-393. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.06.015> (in English)

Mameshova S., & Asanov A. (2024) Study of colloidal-chemical properties of clay hydrodispersions obtained from the southern region of Kazakhstan. *Eurasian Science Review: An International Peer-Reviewed Multidisciplinary Journal*, 2(1). — P. 36-44. (in English)

Miftakhova G.M., Karimov O.Kh., Suleimanov D.F., Kadyrov R.R., & Zagretidinov R.B. (2019). Osobennosti vzaimodeystviya glinistykh chastits s vodnoy fazoy [Features of interaction of clay particles with the aqueous phase]. *Problemy nauchnoy mysli*, 4(12). — P. 45-47. (In Russian)

Mordasov D.M., & Mordasov M.M. (2004) *Tekhnicheskie izmereniya plotnosti sypuchikh materialov* [Technical measurements of bulk material density]. Tambov: Izd-vo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. (In Russian)

Qadri S.M. T., Islam M.A., & Radwan A.E. (2021) Integration of 1D and 3D modeling schemes to establish the Farewell Formation as a self-sourced reservoir in Kupe Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Frontiers in Earth Science*, 15(3). — P. 631-648. (in English)

Qadri S.M.T., Islam M.A., & Radwan A.E. (2021). Reservoir quality evaluation of the Farewell sandstone by integrating sedimentological and well log analysis in the Kupe South Field, Taranaki Basin-New Zealand. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(1). — P. 11-31. (in English)

Radwan A. E. (2022). Three-dimensional gas property geological modeling and simulation. In *Sustainable Geoscience for Natural Gas Subsurface Systems*. — P. 29-49. (in English)

Radwan A. E., Qadri S.M.T., & Islam M.A. (2019). Pore and fracture pressure modeling using direct and indirect methods in Badri Field, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 156. — P. 133-143. (in English)

Schly K., Benyounes K., Youcefi A., & Djebbar M. (2015). Stability and ageing behaviour and the formulation of potassium-based drilling muds. *Applied Clay Science*, 104. — P. 309-317. (in English)

Simpson J.P., Walker T.O., & Jiang G.Z. (1995). Environmentally acceptable water-based mud can prevent shale hydration and maintain borehole stability. *SPE Drilling & Completion*, 10(4). — P. 242-249. (in English)

Trofimova F.A., et al. (2006) Vliyanie mekhanoaktivatsionnykh processov na izmenenie kolloidnykh i reologicheskikh svoystv bentonitovykh glin. In *Rezul'taty fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy po razrabotke metodik tekhnologicheskoy ocenki rud metallov i promyshlennykh mineralov na rannih stadiyakh geologorazvedochnykh rabot* [The influence of mechanoactivation processes on the exchange of colloidal and rheological properties of bentonite clay. In the results of fundamental and appropriate studies on the development of methods of technical evaluation of ore of metallov and promyshlenny minerals at early stages of geological work]. — P. 99. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Scienc (in Russ.).

Van Oort E. (2003). On the physical and chemical stability of shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38(3-4). — P. 213-235. (in English)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 2. Number 354 (2025), 206–217

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.353>

UDC 547.823:615.212

© G.S. Akhmetova¹, U.B. Issayeva¹, K.D. Praliyev¹,
M.T. Omyrzakov², T.M. Seilkhanov³, 2025.

¹A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan;

²Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan;

³Sh. Ualikhanov Kokshetau State University, Kokshetau, Kazakhstan;

E-mail: ulyajan_1603@mail.ru

TECHNOLOGY OF PRODUCING 1-(2-ETHOXYETHYL)-4- ADAMANTANECARBONYLOXY-PIPERIDINE HYDROCHLORIDE AND STUDY OF ITS CYTOTOXICITY

G.S. Akhmetova — Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: gulgakhmet@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9074-1464>;

U.B. Issayeva — PhD, Researcher, A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: ulyajan_1603@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6976-6096>;

K.D. Praliyev — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Chief Researcher at A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: praliyevkd@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0381-7481>;

M.T. Omyrzakov — PhD, Senior Lecturer at S.D. Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: manas.88@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2665-178X>;

T.M. Seilkhanov — Professor, Sh. Ualikhanov Kokshetau State University, Kokshetau, Kazakhstan,

E-mail: tseilkhanov@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0079-4755>.

Abstract. Relevance. Drug resistance, including multiple drug resistance (MDR), simultaneous resistance of pathogens to several medicinal products, is becoming one of the main problems of modern medicine. In this regard, the search for and development of compounds possessing antimicrobial activity is of high relevance. The aim of the present study is the development of a technology for obtaining a highly effective antimicrobial/antifungal agent — adamantane carboxylate of the piperidine series AIP-5 — and the investigation of its cytotoxicity. Materials and Methods. To assess cytotoxicity *in vitro*, monolayer transplantable cell cultures — MDCK — were used. Quantitative evaluation of the toxic effect of the tested compound was carried out using the MTT assay. Data were recorded after 72 hours of exposure to the compound. Based on the obtained results, CT₅₀ values were calculated. Results and Discussion. The present study provides data on the technology for obtaining the highly effective antimicrobial/antifungal agent AIP-5. The technological scheme for obtaining the



compound as an active pharmaceutical ingredient includes five stages. Conclusion. A technology for obtaining the highly effective antimicrobial/antifungal agent AIP-5 has been presented. It has been shown that the technological scheme for obtaining AIP-5 as an active substance consists of five stages. As a result of the study of its cytotoxic effect, it was revealed that the AIP-5 compound is less toxic than the reference substance Rimantadine.

Keywords: synthesis, piperidine, hydrochloride, production technology, antimicrobial/antifungal activity, substance

© Г.С. Ахметова¹, Ұ.Б. Исаева¹, Қ.Ж. Пірәлиев¹,
М.Т. Омырзаков², Т.М. Сейлханов³, 2025.

¹«Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ,
Алматы, Қазақстан;

²«С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті» КеАҚ,
Алматы, Қазақстан;

³Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау мемлекеттік университеті, Қазақстан.
E-mail: ulyajan_1603@mail.ru

1-(2-ЭТОКСИЭТИЛ)-4-АДАМАНТАНКАРБОНИЛОКСИ-ПИПЕРИДИН ГИДРОХЛОРИДІН АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ЦИТОУЫТТЫЛЫҚ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Г.С. Ахметова — химия ғылымдарының докторы, «Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ-ның бас ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: gulgakhmet@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9074-1464>;

Ұ.Б. Исаева — PhD, «Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ-ның ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: ulyajan_1603@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6976-6096>;

Қ.Ж. Пірәлиев — химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, «Ә.Б. Бектұров атындағы химия ғылымдары институты» АҚ-ның бас ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: praliyevkd@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0381-7481>;

М.Т. Омырзаков — PhD, «С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медициналық университеті» КеАҚ-ның аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан,

E-mail: manas.88@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2665-178X>;

Т.М. Сейлханов — Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау мемлекеттік университеті профессоры, Көкшетау, Қазақстан,

E-mail: tseilkhanov@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0079-4755>.

Аннотация. Өзектілігі. Дәрілік төзімділік, соның ішінде көп дәріге төзімділік (MDR), яғни қоздырғыштардың бірнеше дәрілік препараттарға бір мезгілде төзімділігі қазіргі медицинаның негізгі мәселелерінің біріне айналууда. Микроорганизмдердің төзімді түрлерінің туындататын ауруларының санының күрт артуы жаңа дәрілік препараттарды жасау саласындағы айқын қиындықтар аясында орын алуы – ерекше алаңдаушылық туғызады. Осыған байланысты микробтарға қарсы әсері бар қосылыстарды іздеу және әзірлеу өте өзекті болып табылады. Осы жұмыстың мақсаты – пиперидин қатарының

адамантанкарбоксилаты АІР-5 деп аталатын жоғары тиімді антимикробтық/зеңге қарсы препаратының алу технологиясын әзірлеу және оның цитотоксиктілігін зерттеу болып табылады. Материалдар мен әдістер. Цитотоксиктілікті *in vitro* жағдайында бағалау үшін моноқабатты, өсірілетін жасушалық мәдениет – MDCK қолданылды. Зерттелетін препараттың уытты әсеріне сандық баға беру МТТ-тест әдісімен жүргізілді. Деректер препаратпен әсер еткеннен кейін 72 сағат өткен соң есепке алынды. Алынған деректер негізінде ЦТК₅₀ мәндері есептелді. Нәтижелер мен талқылау. Бұл жұмыста АІР-5 деп аталатын жоғары тиімді антимикробтық/зеңге қарсы препаратының алу технологиясы бойынша деректер келтірілген. Қосылысты белсенді субстанция ретінде алу технологиялық сызбасы 5 сатыдан тұрады. Зерттелген заттың цитотоксикалық әсері бойынша алынған нәтижелер АІР-5 қосылысының салыстырмалы зат Римантадинге қарағанда уыттылығы төмен екенін көрсетті. Қорытындылар. Жоғары тиімді антимикробтық/зеңге қарсы АІР-5 препаратының алу технологиясы ұсынылды. АІР-5 қосылысын белсенді субстанция ретінде алу технологиялық сызбасы 5 сатыдан тұратыны көрсетілді. Оның цитотоксиктік әсерін зерттеу нәтижесінде АІР-5 қосылысының референтті зат Римантадинге қарағанда уыттылығы төмен екені анықталды.

Түйін сөздер: синтез, пиперидин, адамантанкарбоксилат, гидрохлорид, алу технологиясы, антимикробтық/зеңге қарсы әсер, субстанция

Қаржыландыру: Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті жүзеге асыратын 2023-2025 жылдарға арналған ғылыми зерттеулерді мақсатты қаржыландыру бағдарламасы аясында BR21882220 жобасы бойынша «А.Б.Бектұров атындағы Химия ғылымдары институты» АҚ-да жұмыс жүргізілді.

© Г.С. Ахметова¹, Ұ.Б. Исаева¹, Қ.Ж. Пралиев¹,
М.Т. Омырзақов², Т.М. Сейлханов³, 2025.

¹АО «Институт химических наук им А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан;

²НАО «Казахский национальный медицинский университет
им. С.Д. Асфендиярова», Алматы, Казахстан;

³Кокшетауский Государственный университет им. Ш. Уалиханова, Казахстан.

E-mail: ulyajan_1603@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИДРОХЛОРИДА 1-(2-ЭТОКСИЭТИЛ)-4-АДАМАНТАНКАРБОНИЛОКСИ-ПИПЕРИДИНА И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО ЦИТОТОКСИЧНОСТИ

Г.С. Ахметова — доктор химических наук, главный научный сотрудник АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан,

E-mail: gulgakhmet@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9074-1464>;

Ұ.Б. Исаева — PhD, научный сотрудник АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан,



E-mail: ulyajan_1603@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6976-6096>;

Қ.Ж. Пралиев — доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, главный научный сотрудник АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан,
E-mail: praliyevkd@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0381-7481>;

М.Т. Омырзаков — PhD, старший преподаватель НАО «Казахского национального медицинского университета им. С.Д. Асфендиярова», Алматы, Казахстан,

E-mail: manas.88@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2665-178X>;

Т.М. Сейлханов — профессор Кокшетауского государственного университета имени Ш. Уалиханова, Казахстан,

E-mail: tseilkhanov@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0079-4755>.

Аннотация. Актуальность. Лекарственная устойчивость, в том числе множественная лекарственная (MDR), т.е. одновременная резистентность возбудителей сразу к нескольким лекарственным препаратам, становится одной из основных проблем современной медицины. Особую тревогу вызывает тот факт, что стремительное увеличение числа заболеваний, вызываемых устойчивыми формами микроорганизмов, происходит на фоне очевидных трудностей в создании новых лекарственных препаратов. В этой связи весьма актуальным является поиск и разработка соединений, обладающих антимикробным эффектом. Целью настоящей работы является разработка технологии получения высокоэффективного противомикробного/противогрибкового препарата адамантанкарбоксилата пиперидинового ряда AIP-5 и изучение его цитотоксичности. Материалы и методы. Для оценки цитотоксичности *in vitro* использовали монослойные перевиваемые культуры клеток – MDCK. Количественная оценка токсического действия исследуемого препарата проводилась с использованием МТТ-теста. Учет данных производили после 72 ч воздействия соединения. На основе полученных данных рассчитаны значения ЦТК₅₀. Результаты и обсуждение. В рамках данной работы представлены данные о технологии получения высокоэффективного противомикробного/противогрибкового препарата AIP-5. Технологическая схема получения соединения в качестве активной субстанции представлена в 5 стадий. Результаты цитотоксического действия исследуемого вещества показали, что соединение AIP-5 менее токсичнее чем референтное вещество римантадин. Выводы. Представлена технология получения высокоэффективного противомикробного/противогрибкового препарата AIP-5. Показано, что технологическая схема получения соединения AIP-5 в качестве активной субстанции составляет 5 стадий. В результате изучения его цитотоксического действия выявлено, что соединение AIP-5 менее токсично чем референтное вещество Римантадин.

Ключевые слова: синтез, пиперидин, гидрохлорид, технология производства, противомикробное/противогрибковое действие, субстанция, цитотоксичность

Introduction. Despite the vast range of available pharmaceuticals and the challenges in developing new drugs, the relevance of research, aimed at creating effective and high-quality biologically active compounds, remains undeniable today. The reasons driving this line of research vary: weakening of the human immune system, rapid spread of dangerous viral infections, deteriorating environmental conditions, and

the resistance of harmful microorganisms to the existing medications. Despite the advancement of the innovative and cutting-edge research directions in drug development, as well as the scientific breakthroughs of the last century, the issue of infectious diseases remains urgent in every country around the world. This is confirmed by the WHO data, showing that mortality from infectious diseases ranks third globally, following non-communicable diseases such as ischemic heart disease, stroke, and COPD (World Health Organization, 2001; Levy, et.al., 2004; Shkurat, et.al., 2014). One of the main reasons for the ineffectiveness of ongoing treatments is the increasing spread of drug resistance in infectious agents, which leads to reduced therapy effectiveness or its complete loss, and thus necessitates the search for new medicinal agents. As the duration and scale of antibiotic use have increased, so has increased also the number of the resistant strains of microorganisms (Davies, et.al., 2010). The global nature of the drug resistance problem is underscored by the growing number of organizations worldwide, striving to join forces in monitoring and combating the drug-resistant forms of microorganisms (Aleksun, et.al., 2007; Sidorenko, et.al., 2004).

The importance of chemoprophylaxis and chemotherapy as methods to combat bacterial infections cannot be overstated, particularly in terms of timely protection of the population during emergency epidemic situations. Therefore, the research and development of new pharmaceutical agents, as well as the improvement of methods for evaluating their quality to ensure maximum therapeutic efficacy and safety, remain among the main objectives of the pharmaceutical chemistry. In this context, one of the priority tasks of synthetic organic chemistry is the synthesis of new compounds with the original structures that possess a combination of predictable properties. The piperidine ring is a ubiquitous structural feature in many alkaloid natural products and drug candidates. Watson P.S. and other researchers report that over the past decade, thousands of piperidine-based compounds have been mentioned in clinical and preclinical studies. The diversity of the functional groups and substituent structures, found in piperidine-based targets, has led to the widely accepted view that the biological properties of piperidines strongly depend on the type and position of the substituents on the heterocyclic ring (Weintraub, et.al., 2003; Sek, et.al., 2020).

For many years, the Laboratory of Synthetic and Natural Drug Chemistry at A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC has been actively engaged in the search for highly effective and safe pharmaceutical compounds among the piperidine derivatives. As a result of these investigations, the compounds with a broad spectrum of pharmacological activity have been identified (Zafar, et al., 2019; Praliyev, et.al., 2005; Maksatova, et.al., 2023; Pichkhadze, et.al., 2016; Sharipov, et.al., 2016; Sadyrbayeva, et.al., 2017). In connection with the above, a highly effective antimicrobial agent, AIP-5, has been identified among adamantane carboxylates of the piperidine series as a promising candidate for the development of new anti-infective drugs. Within the frames of this study, its cytotoxicity has been evaluated *in vitro*, and a technological scheme for the production of the highly active antimicrobial agent AIP-5 as an active pharmaceutical ingredient has been proposed (Akhmetova, et.al., 2020).

Research objective. Taking into account the relevance of the topic, the objective



of this work is to develop a production technology for a highly effective antimicrobial/antifungal agent AIP-5 (1-(2-ethoxyethyl)-4-adamantane-carbonyl-oxypiperidine hydrochloride), a compound from the adamantane carboxylate piperidine series, and to study its cytotoxic properties.

Materials and methods. *Test Systems. Cell Culture*

A monolayer continuous cell culture of MDCK (Madin-Darby Canine Kidney) cells was used, obtained from the Cell Biotechnology Laboratory of the Research Institute for Biological Safety Problems, National Center for Biotechnology, the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

Research methods. *Passaging and Storage of Cell Cultures*

To determine the number of viable cells, 20.0 μL of cell suspension was mixed with 20.0 μL of 0.4% trypan blue solution in a 1.5 mL Eppendorf tube. A 20.0 μL drop of the mixture was placed under a cover glass on a hemocytometer. The cells were counted, and the percentage of viable cells was calculated, using the following formula:

$\text{Viable cells} = \frac{N_1 \times 100\%}{N} \quad (2)$
--

where N_1 – number of unstained (viable) cells in 4 large squares,
 N – total number of cells in the 4 large squares.

The contents of the cryovials were transferred into a flask, containing the growth medium. The incubation was carried out at 37°C with 5% CO_2 . The MDCK cell culture was maintained with the addition of 10% fetal serum and antibiotics. The cultivation of the monolayer cultures was carried out as follows: the nutrient medium was removed, the monolayer was rinsed with phosphate-buffered saline or Hank's solution, treated with 0.25% trypsin-EDTA solution, and the cellular monolayer was detached. The released cell suspension was carefully transferred into a sterile tube. The cells were centrifuged at 125 $\times g$ for 10 minutes.

After centrifugation, the supernatant was removed from the tubes. Then, 1–5 mL of the growth medium was added to the tube, containing the cell pellet. The number of cells was counted, using a hemocytometer according to formula (3).

$$C_1 = \frac{N}{4} \times 2 \times 10^4, \quad (3)$$

where C_1 – the initial concentration of the cells;
 N – the total number of unstained cells in 4 large squares;
 2 – the dilution factor;
 10^4 – the conversion factor for the hemocytometer.

The cells were seeded at the density of 4=104.

Determination of the Cytotoxic Effect of the Substances In Vitro on MDCK Cell Culture

The cytotoxicity of the tested substances was evaluated *in vitro*, using the MTT assay (Mosmann, 1983). The cells were seeded into 96-well plates at the concentration of 2.5×10^5 cells per 1.0 mL. The plates were incubated in a thermostat at 37°C and 5.0% CO₂. After 24 hours of incubation, the growth medium was removed from the wells, and 200.0 µL of the DMEM medium, containing the test substances at the specified concentrations was added. For the negative control wells, 200.0 µL of the incomplete DMEM medium was added. After 72 hours, the medium containing the substance was removed from the wells, and 200.0 µL of fresh nutrient medium and 50.0 µL of the working MTT solution were added. The plates were incubated for 4 hours at 37°C. After the incubation period, the supernatant was removed. Then, 100.0 µL of DMSO was added to each well. The optical density in the wells was measured, using a Tecan Sunrise RC.4 microplate reader (Austria) at the wavelength of 540 nm (main filter) and 620 nm (reference filter). The results were calculated, using the formulas (3)–(5).

- the arithmetic mean of the optical density ($\bar{Y}$) for the negative control was calculated, using the formula (4).

$$\bar{Y} = \frac{y_1 + \dots + y_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4)$$

where – the result of measuring op on each object of the group;

- the number of objects in the group;

- the calculation of the percentage of surviving cells for each repetition of each concentration of the substance under study was carried out according to the formula (5):

Viable cells =	$\frac{Y_1 \times 100\%}{Y} \quad (5)$
----------------	--

where Y_i is the result of measuring OP on each object of the group;

$\bar{Y}_{NC}$ – the arithmetic mean of OP ($\bar{Y}$) for negative control;

- the calculation of the arithmetic mean of the percentage of the surviving cells ($\bar{Y}$) for each concentration of the substance under study was carried out, using the Formula (4);

- CTC₅₀ (concentration of substances in which 50% of cell death occurs) was calculated for each test substance, using the formula (6):

$$CTC_{50} = \left[\frac{X_1 - 50}{X_1 - X_2} \times (Mx_2 - Mx_1) \right] + Mx_1, \quad (6)$$

where X_1 – more than 50% of the surviving cells;

X_2 – concentration of the substance in which more than 50% of the cells survived;

Mx_1 – less than 50% of the surviving cells;

Mx_2 – concentration of the surviving substance less than 50% of the cells.

Research results and their discussion. *Determination of the cytotoxic activity of the drug AIP-5 in vitro in the MDCK cell line*

The cytotoxic effect of the AIP-5 compound and the reference substance rimantadine has been studied. Since viruses are very sensitive to the cultivation conditions, the monolayer cell cultures – the MDCK cells have been used for the Toxicological Research, which have been specially adapted for the research on viral influenza models. A quantitative assessment of the toxic effect of the studied drugs has been carried out, using an MTT test. The data calculation has been carried out after 72 hours of the exposure. Based on the data obtained, the values of TSTK50 have been calculated. The results of the cytotoxic effect of the studied substance are presented in Table 1.

Table 1 – Evaluation of the cytotoxic effects of the AIP-5 in MDCK cell culture

Name of the substance under study	CTC ₅₀ value, mg / mL
AIP-5	0.071
Rimantadine	0.046

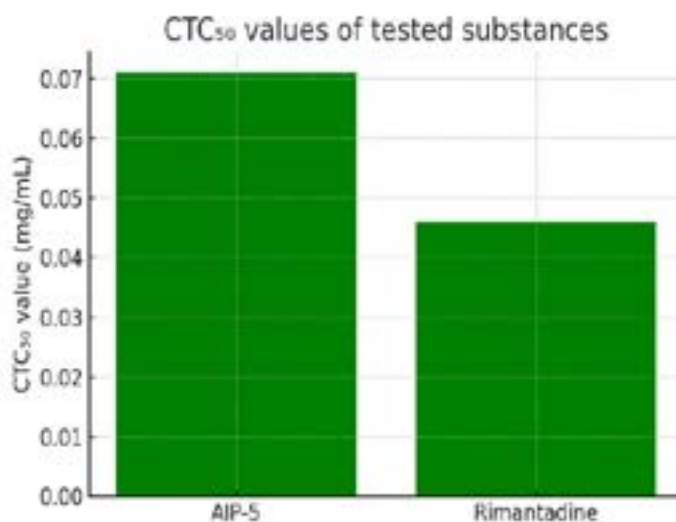


Figure 1. Diagram evaluation of cytotoxic effects of AIP-5 in MDCK cell culture

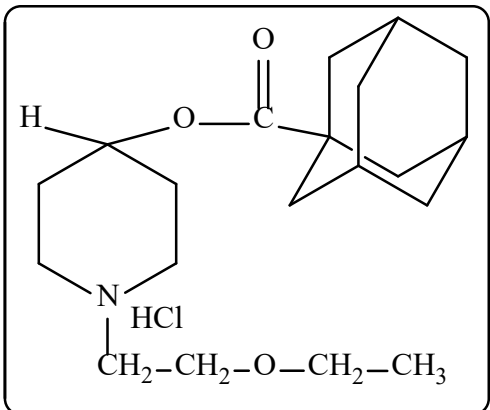
As a result of a targeted search for new anti-infective drugs in the line of adamantan derivatives in the piperidine line, a highly effective antimicrobial drug AIP-5 1-(2-ethoxyethyl)-4-adamantancarbonyloxypiperidine hydrochloride has been found, which is effective against all museum strains of microorganisms experimented with, the further in-depth study of the AIP-5 compound as a substance that fights pathogens of *Staphylococcus aureus*; *Escherichia coli*; *Candida albicans*, in terms of fungicidal

activity, AIP-5 surpassed the comparison drug fluconazole by 10 times. As part of this study, the cytotoxicity of the highly effective antimicrobial/antifungal drug AIP-5 in an *in vitro* experiment has been studied, and a technological scheme for obtaining large quantities as an active substance has been proposed (Figure 1).

1. Stage. Preparation of raw materials.

We start preparing the technological process primarily with the auxiliary work. That is, we prepare the room, clean and wash the working table and wipe it with 95% alcohol. The room is ventilated and all cleaning measures are carried out (cleaning of the floor, surfaces where all dust lives). The cleanliness of the staff and service clothes is checked. The serviceability and cleanliness of the units are checked.

The raw materials are prepared for embedding in the installation, their compliance with the OD is checked. The auxiliary substances and materials are prepared.

 AIP-5 1-(2-Ethoxyethyl)-4- adamantanecarbonyloxy piperidine hydrochloride [Patent of the for utility model RK 4780. — Bull. 25.] Chemical Formula: $C_{20}H_{34}NO_3Cl$ Solubility: water, isopropanol, ethanol Melting point: 154-157 °C	2. Stage. Conduct the reaction. Raw materials are loaded into the unit. The reaction mixture is mixed. 3. Stage. Tincture. The reaction mixture is precipitated. 4. Stage. Product separation. 4.1. Stage. Strain the tincture. 4.2. Stage. Leaching of cottage cheese. Cottage cheese is leached with diethyl firm. 4.3. Stage. Recrystallization. The product is recrystallized in isopropanol. 4.4. Stage. The product filtration. The product is filtered from isopropanol. 4.5. Stage. Drying the product. The product is dried in a dryer unit. The product quality control is carried out. 5. Stage. Hardening, winding, marking. 5.1. Stage. Washing and drying the vial. 5.2. Stage. Hardening. 5.3. Stage. Packaging marking.
---	---

In accordance with MEST 30288-95, the substance must be placed in a glass bottle with a screw neck that does not transmit radiation and be closed with a lid in accordance with ES 6-09-5311-87. The containers are wrapped from the outside with radiation-proof paper in accordance with GOST 4665-62. Sticks labeled labels on bottles.

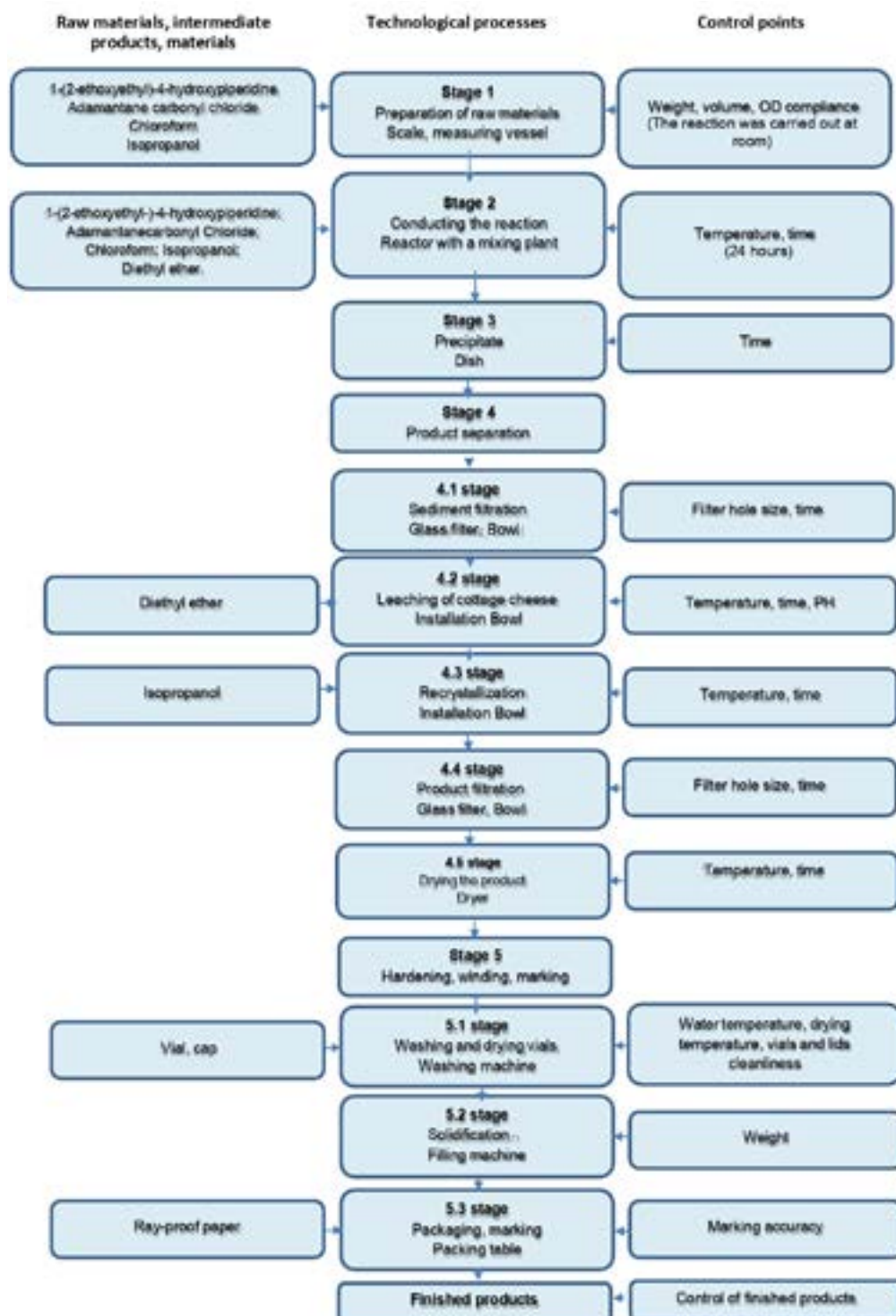


Figure 2. The technological scheme for the AIP-5 substance

Conclusion: So, as part of this work, a technology has been proposed to obtain the AIP-5 Drug (1-(2-ethoxyethyl)-4-adamantancarbonyloxyperidine hydrochloride) of the highly effective antimicrobial/antifungal piperidine series. The technological scheme for obtaining the AIP-5 compound as an active substance is in 5 stages: 1. Stage. Preparation of raw materials; 2. Stage. Conduct the reaction; 3. Stage. Tincture; 4. Stage. Product separation; 5. Stage. Hardening, winding, marking. The results of the cytotoxicity study of the tested substance showed that the AIP-5 compound is less toxic than the reference substance Rimantadine. As a result of its cytotoxicity studies, it has been found that the compound can be classified as less toxic compounds.

Литература

World Health Organization (2001) WHO Global Strategy for Containment of Antimicrobial Resistance. Geneva, <https://iacmac.ru/files/pdf/execsumr.pdf>

Levy S.B., and Marshall B. (2004) Antibacterial resistance worldwide: causes, challenges and responses. *Nat. Med.* 10. — S.122-S129.

Шкурят М.А., Покудина И.О., Батталов Д.В. (2014) Резистентность микроорганизмов к антимикробным препаратам. Живые и биокосные системы. — 10. <http://jbks.ru/archive/issue10/article-10>

Davies J, Davies D. Origins and evolution of antibiotic resistance. *Microbiol Mol Biol Rev.* — 2010 Sep;74(3):417-33. PMID:20805405

Алексун М.Н., и С.Б. Леви (2007) Молекулярные механизмы антибактериальной множественной лекарственной устойчивости. *Cell* 128:1037-1050.

Сидоренко С.В., Тишков В.И. (2004) Молекулярные основы резистентности к антибиотикам. *Успехи биологической химии*, — 44. — P. 263

P.M. Weintraub, J.S. Sabol, J.M. Kane, D.R. Borchering. (2003) Recent advances in the synthesis of piperidones and piperidines. *Tetrahedron.*, — 59. — P. 2953. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(03\)00295-3](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(03)00295-3)

Sek R., Gassama A., Kozhan S., Kaveh S. (2020) Synthesis and antimalarial activity of 1,4-disubstituted piperidine derivatives. *Molecules*, — 25. — 2. — P. 299. <https://doi.org/10.3390/molecules25020299>

Zafar S., Akhtar S., Ali S.I., Mushtaq N., Naeem S., Ali M. (2019) Synthesis, characterization and antimicrobial activity of piperidine derivatives. *J. of the Chem.Soc. of Pakistan*, — 41. — 2. — P. 363.

Пралиев К.Д., Ю.В.К. (2005). Синтетические методы функционализации C- и N-замещённых 4-оксопиперидинов. Новые фармакологически активные соединения. *Химический журнал Казахстана*, — 4. — P. 186.

Мақсатова А.М., Ахметова Г.С., Пірәліев Қ.Ж., Датхаев У.М., Омырзаков М.Т., Жумағазиева А.Б., Искакбаева Ж.А., Сейлханов Т.М. (2023) 1-(2-Фенилэтил)-пиперидин-4-он спирттерінің күрделі эфирлері қатарынан микробқа қарсы препараттар іздеу. *Фармация Казахстана*, — 2. — P. 126.

Pichkhadze G. M., Smagulova G.S., Kadyrova D.M., Praliev K.D., Yu V. K. (2016) Local Anesthetic Activity of a Promising Piperidine Derivative (LAS-54) in Combination with Epinephrine. *Pharm. Chem. Journal*, — 50. — 9. — P. 600. <https://doi.org/10.1007/s11094-016-1498-7>

Sharipov R.A., Sharapov K.S., Kemelbekov U S. Volynkin V.A, Yu V.K. (2016) The structure and pharmacological properties of the 4-acetoxy-1-(2-ethoxyethyl)-4-phenylpiperidine inclusion complex with β -cyclodextrin. *J. of Incl. Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, — 20. — 1. <https://doi.org/10.1007/s10847-016-0685-1>

Sadyrbayeva F.M., Akhmetova G.S., Praliyev K.D., Osman H., Korotetskaya N.V. (2017) New Anti-Infective Preparations of Naphthylxypropargylpiperidine Series. *Eur. Chem.-Techn.J.*, — 19. — 2. — P. 183.

Ахметова Г.С., Исаева У.Б., Пралиев К. Д., Ильин А. И., Датхаев У. М., Коротецкий И.С., Зубенко Н. В., Кузнецова Т. В., Коротецкая Н.В., Джумағазиева А. Б., Искакбаева Ж. А., Омырзаков М.Т., Сейлханов Т.М. (06.26.2020) Гидрохлорид 1-(2-этоксипропил)-4-адамантанкарбонилосиперидина, обладающий антимикробной активностью. Патент РК на полезную модель РК № 4780. — Бюллетень. 25



Mosmann T. (1983) Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. *J. Immunol. Methods*, — 65. — P. 55.

References

World Health Organization. (2001) WHO Global Strategy for Containment of Antimicrobial Resistance. Geneva, <https://iacmac.ru/files/pdf/execsumr.pdf> (in English)

Levy S.B., and Marshall, B. (2004). Antibacterial resistance worldwide: causes, challenges and responses. *Nat. Med.* — 10, S122-S129 (in English)

Shkurat M.A., Pokudina I.O., Battalov D.V. (2014) Rezistentnost' mikroorganizmov k antimikrobnym preparatam [Resistance of microorganisms to antimicrobial agents]. *Living and Biotic Systems*, — 10. <http://jbks.ru/archive/issue10/article-10> (in Russian)

Davies J, Davies D. Origins and evolution of antibiotic resistance. *Microbiol Mol Biol Rev.* — 2010 Sep;74(3):417-33. PMID:20805405 (in English)

Alekshun, M.N., and S.B. Levy. (2007) Molekuljarnye mehanizmy antibakterial'noj mnozhestvennoj lekarstvennoj ustojchivosti [Molecular mechanisms of antibacterial multidrug resistance]. *Cell*, — 128:1037–1050 (in Russian)

Sidorenko, S.V., and V.I. Tishkov. (2004) Molekuljarnye osnovy rezistentnosti k antibiotikam [Molecular foundations of antibiotic resistance]. *Advances in Biological Chemistry*, — 44. — 263 (in Russian)

P.M. Weintraub, J.S. Sabol, J.M. Kane, D.R. Borchering. (2003) Recent advances in the synthesis of piperidones and piperidines. *Tetrahedron*, — 59. — 2953. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(03\)00295-3](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(03)00295-3) (in English)

Sek R., Gassama A., Kozhan S., Kaveh S. (2020) Synthesis and antimalarial activity of 1,4-disubstituted piperidine derivatives. *Molecules*, — 25. — 2. — 299. <https://doi.org/10.3390/molecules25020299> (in English)

Zafar S., Akhtar S., Ali S.I., Mushtaq N., Naeem S., Ali M. (2019) Synthesis, characterization and antimicrobial activity of piperidine derivatives. *J. of the Chem.Soc. of Pakistan*, — 41. — 2. — P. 363. (in English)

Praliyev K.D., Yu.V.K. (2005) Sinteticheskie metody funkcionalizacii C- i N-zameshchjennyh 4-okso-piperidinov: novye farmakologicheski aktivnye soedineniya [Synthetic methods of functionalization of C- and N-substituted 4-oxopiperidines]. *New pharmacologically active compounds. Chem. journal. Kazakhstan*, — 4. — P. 186. (in Russian)

Maksatova A.M., Akhmetova G.S., Praliyev K.Zh., Dathayev U.M., Omyrzakov M.T., Zhumagazyeva A.B., Iskakbayeva Zh.A., Seyilkhanov T.M. (2023). 1-(2-Feniljetil)-piperidin-4-on spirtteriniń kырdeli jefirleri kатарынан mikrobқа қарсы preparattar іздеу [Search for antimicrobial agents among esters of 1-(2-phenylethyl)-piperidin-4-one alcohols. *Pharmacy of Kazakhstan*], — 2. — P. 126 (in Kazakh)

Pichkhadze G. M., Smagulova G.S., Kadyrova D.M., Praliyev K.D., Yu V. K. (2016) Local Anesthetic Activity of a Promising Piperidine Derivative (LAS-54) in Combination with Epinephrine. *Pharm. Chem. Journal*, — 50. — 9. — P. 600. <https://doi.org/10.1007/s11094-016-1498-7> (in English)

Sharipov R.A., Sharapov K.S., Kemelbekov U.S., Volynkin V A, Yu V.K. (2016) The structure and pharmacological properties of the 4-acetoxy-1-(2-ethoxyethyl)-4-phenylpiperidine inclusion complex with β -cyclodextrin. *J. of Incl. Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, — 20. — 1. <https://doi.org/10.1007/s10847-016-0685-1> (in English)

Sadyrbayeva F.M., Akhmetova G.S., Praliyev K.D., Osman H., Korotetskaya N.V. (2017) New Anti-Infective Preparations of Naphthyloxypropargylpiperidine Series. *Eur. Chem.-Techn.J.*, — 19. — 2. — P. 183. (in English)

Akhmetova G.S., Issayeva U.B., Praliyev K.D., Ilyin A.I., Datkhayev U.M., Korotetskiy I.S., Zubenko N.V., Kuznetsova T.V., Korotetskaya N.V., Dzhumagazyeva A.B., Iskakbayeva Zh.A., Omyrzakov M.T., Seilkhanov T.M. (06.26.2020) Gidrolorid 1-(2-jetoksijetil)-4-adamantanarboniloksipiperidina s antimikrobnj aktivnost'ju [Hydrochloride of 1-(2-ethoxyethyl)-4-adamantanecarboxyloxy-piperidine with antimicrobial activity]. Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model RK 4780. — Bull. 25 (in Russian)

Mosmann T. (1983) Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: Application to proliferation and cytotoxicity assays. *J. Immunol. Methods*, — 65. — P. 55. (in English)



© G.Zh. Baisalova^{1*}, G.K. Token², B.B. Torsykbaeva², A.D. Dukenbayeva¹,
N. Rakhmetova², 2025.

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

²Astana Medical University, Astana, Kazakhstan;

E-mail: galya_72@mail.ru

STUDYING THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE PHRAGMITES COMMUNIS PLANT BY GAS CHROMATOGRAPHY–MASS– SPECTROMETRY

Baisalova Galiya — Professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>;

Token Gulim — Master's student of Astana Medical University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: token.2020@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7778-1781>;

Torsykbaeva Bigamila — Associate professor of Astana Medical University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>;

Assiya Dukenbayeva — Senior lecturer of L.N. Gumilyov Eurasian National University Department,
Astana, Kazakhstan,

E-mail: asiya_b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7927-5853>;

Nurila Rakhmetova — Professor of Astana Medical University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: rakhmetova.n@amu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4476-5470>.

Abstract. Common reed (*Phragmites communis*) is traditionally used as a natural remedy with anti-inflammatory, antimicrobial, wound-healing, and hemostatic effects. Its young aerial parts are rich in biologically active compounds such as amino acids, flavonoids, vitamin A, ascorbic acid, making it valuable in traditional medicine. This study presents an analysis of the chemical composition of *Phragmites communis* extract using gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS). The results revealed that the plant's constituents are mainly represented by hydrocarbons, acids, esters, alkanes, phenolic compounds, heterocycles, and cycloalkanes. The composition of the extract was dominated by alkanes, with nonadecane (31.0281%±0,02) and 8-hexylpentadecane (24.6364%±0,01) comprising the major components. Minor components include 10 compounds. In order of increasing percentage content, these components are arranged in the following order: methyl 9,10-methylene octadec-9-enoate < dodecanoic acid < mono(2-ethylhexyl) ester of 1,2-benzenedicarboxylic acid < heptacosanol-1 < methyl ester of 14-methylpentadecanoic acid < 6,10,14-trimethylpentadecanone-2 < heptadecane < heptene-2 < tridecane < ethyl ester of n-hexadecanoic acid. The paper discusses the health benefits of the phytochemicals contained in this plant, the biological

activity of the main chemicals. For example, nonadecane is a long-chain alkane found in essential oils, these compounds have antitumor and antimicrobial activity. Also, tridecane, heptadecane, dodecanoic acid and other studies have shown that these compounds have antioxidant, antibacterial and anti-inflammatory activity. The study shows high application potential of *Phragmites communis*.

Keywords: *Phragmites communis*, minor component, biological activity, retention time, chromatogram

© Г.Ж. Байсалова^{1*}, Г.К. Төкен², Б.Б. Торсыкбаева², А.Д. Дукенбаева¹,
Н. Рахметова², 2025.

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

²Астана медицина университеті, Астана, Қазақстан.

E-mail: galya_72@mail.ru

ГАЗ ХРОМАТОГРАФИЯ–МАСС–СПЕКТРОМЕТРИЯ ӘДІСІМЕН *PHRAGMITES COMMUNIS* ӨСІМДІГІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

Байсалова Галия — Л.Н. Гумилева атындағы ЕҰУ профессоры, Астана, Қазақстан,

E-mail: galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>;

Төкен Гүлім — Астана Медицина университеті магистранты, Астана, Қазақстан,

E-mail: token.2020@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7778-1781>;

Торсыкбаева Бигамила — Астана Медицина университеті доценті, Астана, Қазақстан,

E-mail: maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>;

Дукенбаева Асия — Л.Н. Гумилева атындағы ЕҰУ аға оқытушысы, Астана, Қазақстан,

E-mail: asiya_b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7927-5853>;

Рахметова Нурила — Астана Медицина университеті профессоры, Астана, Қазақстан,

E-mail: rakhmetova.n@amu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4476-5470>.

Аннотация. Халық медицинасында кәдімгі қамыс (*Phragmites communis*) қабынуға қарсы, антимиқробтық, жара жазатын және қан тоқтататын табиғи құрал ретінде кеңінен қолданылып келеді. Әдеби деректерге сүйенсек, жас өсімдіктің жерүсті бөлігінде биологиялық белсенді заттар — аминқышқылдары, флавоноидтар, аскорбин қышқылы және А дәрумені едәуір мөлшерде кездеседі. Құрамындағы биологиялық маңызды қосылыстардың жоғары концентрацияда болуына байланысты бұл өсімдік дәстүрлі халықтық медицинада емдік шикізат ретінде жоғары бағаланады. Бұл мақалада *Phragmites communis* өсімдігі сығындысына газ хроматография-масс-спектрометрия әдісінің көмегімен химиялық компоненттеріне талдау жүргізілді. Өсімдік құрамындағы қосылыстар негізінен көмірсутектер, қышқылдар, эфирлер, алкандар, фенолдық қосылыстар, гетероциклдер мен циклоалкандар түрінде кездесті. Гександы сығындының мажорлы компоненттері алкандар (нонадекан (31,0281%±0,02), 8-гексилпентадекан (24,6364%±0,01). Минорлы компоненттер қатарына 10 қосылыс кіреді. Пайыздық мөлшерінің өсу реті бойынша бұл компоненттер мына қатарға орналасады: метил-9,10-метилен-октадек-9-еноат < додекан қышқылы <

1,2-бензолдикарбон қышқылының моно(2-этилгексил) эфирі < гептакозанол-1 < 14-метилпентадекан қышқылының метил эфирі < 6,10,14-триметилпентадеканон-2 < гептадекан < гептен-2 < тридекан < н-гексадекан қышқылының этил эфирі. Еңбекте бұл өсімдіктің құрамындағы фитоқосылыстардың денсаулыққа тигізетін пайдасы, сығындының негізгі компоненттерінің биологиялық белсенділігі талқыланады. Мысалы, нонадекан – эфир майларында кездесетін ұзын тізбекті алкандар, бұл қосылыстар ісікке қарсы және микробқа қарсы белсенділікке ие. Ал тридекан, гептадекан, додекан қышқылы сияқты қосылыстар антиоксиданттық, антибактериалды және қабынуға қарсы белсенділіктерге ие екендігі белгілі. Жүргізілген зерттеу нәтижелері *Phragmites communis* өсімдігін фармацевтикалық, медициналық және экологиялық бағыттарда қолданылу әлеуеті жоғары екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: *Phragmites communis*, минорлы компонент, биологиялық белсенділік, ұстау уақыты, хроматограмма

© Г.Ж. Байсалова^{1*}, Г.К. Токен², Б.Б. Торсыкбаева², А.Д. Дукенбаева¹,
Н. Рахметова², 2025.

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; ²Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан.

E-mail: galya_72@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РАСТЕНИЯ PHRAGMITES COMMUNIS МЕТОДОМ ГАЗ ХРОМАТОГРАФИИ–МАСС–СПЕКТРОМЕТРИИ

Байсалова Галия — Профессор ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

E-mail: galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>;

Токен Гулим — Магистрант медицинского университета Астана, Астана, Казахстан,

E-mail: token.2020@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7778-1781>;

Торсыкбаева Бигамила — Доцент медицинского университета Астана, Астана, Казахстан,

E-mail: maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>;

Дукенбаева Асия — Старший преподаватель ЕНУ им. Л. Н. Гумилева,

E-mail: asiya_b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7927-5853>;

Рахметова Нурила — Профессор Медицинского университета Астана, Астана, Казахстан,

E-mail: rakhmetova.n@amu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4476-5470>.

Аннотация. В народной медицине тростник обыкновенный (*Phragmites communis*) широко используется в качестве природного средства с противовоспалительным, антимикробным, ранозаживляющим и кровоостанавливающим действием. Согласно литературным данным, в наземной части молодого растения в значительных количествах содержатся биологически активные вещества — аминокислоты, флавоноиды, аскорбиновая кислота и витамин А. Благодаря высокому содержанию биологически значимых соединений данное растение высоко ценится в традиционной народной медицине как лечебное сырьё. В настоящей статье представлен анализ химического состава

экстракта *Phragmites communis*, выполненный методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Установлено, что соединения, входящие в состав растения, представлены в основном углеводородами, кислотами, эфирами, алканами, фенольными соединениями, гетероциклами и циклоалканами. В составе экстракта преобладают алканы, среди которых значительную долю составляют нонадекан ($31,0281\% \pm 0,02$) и 8-гексилпентадекан ($24,6364\% \pm 0,01$). К минорным компонентам относятся 10 соединений. В порядке возрастания процентного содержания эти компоненты располагаются в следующем порядке: метил-9,10-метилен-октадек-9-еноат < додекановая кислота < моно(2-этилгексил)овый эфир 1,2-бензолдикарбоновой кислоты < гептакозанол-1 < метиловый эфир 14-метилпентадекановой кислоты < 6,10,14-триметилпентадеканон-2 < гептадекан < гептен-2 < тридекан < этиловый эфир н-гексадекановой кислоты. В работе обсуждается роль каждого фитосоединения в растении для здоровья человека, биологическая активность основных химических компонентов экстракта. Например, нонадекан – это длинноцепочечные алканы, содержащиеся в эфирных маслах, эти соединения обладают противоопухолевой и антимикробной активностью. Известно, что тридекановая, гептадекановая и додекановая кислоты обладают антиоксидантной, антибактериальной и противовоспалительной активностью. Полученные результаты исследования свидетельствуют о высоком потенциале применения растения *Phragmites communis* в фармацевтической, медицинской и экологической сферах.

Ключевые слова: *Phragmites communis*, минорный компонент, биологическая активность, время удерживания, хроматограмма

Кіріспе. Қазақстанның өсімдік әлемі алуан түрлілігімен ерекшеленеді. Ел аумағында жоғары сатыдағы өсімдіктердің 6000-нан астам түрі өседі, бұл Орталық Азия аймағындағы флоралық байлықтың маңызды бөлігін құрайды. Осындай көптүрлілік ішінде шамамен 1 500 өсімдік түрі халықтық және ғылыми медицинада дәрілік мақсатта қолданылуға жарамды болып саналады. Алайда олардың тек 230–240-ы ғана ресми медицинада кеңінен зерттеліп, дәрілік заттар өндіруде қолданыс тапқан. Бұл деректер отандық флораны терең зерттеу қажеттілігін және табиғи ресурстарды фармацевтикалық практикаға тиімді енгізу мәселесін алдыңғы қатарға шығарады. Дәрілік өсімдіктердің мол қоры — жаңа фитопрепараттар мен биологиялық белсенді заттардың көзі ретінде ерекше ғылыми әрі практикалық қызығушылық тудырады. Флавоноидтер, сапониндер, фенолдық қосылыстар және басқа да табиғи шығу текті заттар өсімдіктер құрамындағы биологиялық белсенді қосылыстар тобына жатады. Бұл заттар фармакологиялық тұрғыдан маңызды қасиеттерге ие болып, дәрілік өсімдіктердің емдік әсерін қалыптастыратын негізгі компоненттер саналады.

Флавоноидтар — $C_6-C_3-C_6$ құрылымдық қатарындағы полифенолдық қосылыстар тобына жатады. Олар тек жоғары сатыдағы өсімдіктерде синтезделіп, адам ағзасына кең спектрлі әсер көрсетеді. Көптеген гипотезалар мен эксперименттік деректер флавоноидтардың адам денсаулығына оң әсерін, атап

айтқанда жүрек-қан тамырлары жүйесіне, сондай-ақ ісікке қарсы белсенділігін дәлелдейді. Бұл әсерлер олардың антиоксиданттық қасиеттерімен байланысты. Флавоноидтер өсімдік тектес антиоксиданттар ретінде бос радикалдарды бейтараптап, қабынуға қарсы және антимикробтық әсер көрсетеді. Флавоноидтар табиғатта кең таралған. Жоғары сатыдағы өсімдіктердің көптеген түрлері олардың табиғи көзі болып табылады және түрлі тұқымдастар мен туыстарға жатады. Сапониндер — өсімдік тектес биологиялық белсенді қосылыстар тобына жататын гликозидтер. Олар тритерпеноидты немесе стероидты құрылымды агликоннан және қант қалдықтарынан тұрады. Бұл заттар өсімдіктерде кең таралған және олардың құрамындағы табиғи қорғаныс механизмінің бір бөлігі болып табылады. Сапониндер қабынуға қарсы, иммуномодуляторлық, антиоксиданттық және антимикробтық әсерлерге ие. Олардың муколитикалық және ісікке қарсы қасиеттері де ғылыми тұрғыда дәлелденуде.

Фенолдық қосылыстар — өсімдіктердегі биологиялық белсенді табиғи заттардың кең таралған тобы. Бұл қосылыстардың құрамында бір немесе бірнеше гидроксил топтары бар ароматты сақина болады және олар айқын антиоксиданттық, қабынуға қарсы, антимикробтық әрі антиканцерогенді белсенділік көрсетеді. Фенолдар өсімдіктердің қорғаныс жүйесінде маңызды рөл атқарып, ультракүлгін сәуле, патогендер және түрлі сыртқы стресс факторларына жауап ретінде жинақталады. Осы тұрғыдан алғанда, еліміздің флорасында кең таралған, бірақ ғылыми тұрғыда химиялық құрамы толық зерттелмеген өсімдіктердің бірі — Кәдімгі қамыс (*Phragmites communis*). Бұл өсімдік табиғи су айдындарының маңында кеңінен кездесетін, экологиялық бейімділігі жоғары және биомассасы мол түр ретінде ерекшеленеді.

Кәдімгі қамыс (*Phragmites communis*) — *Phragmites* туысына жататын көпжылдық өсімдік. Қамыс өзендердің сағасында, көлдердің, бұлақтар мен арықтардың жағасында, су басқан шалғындарда және суармалы жерлерле арамшөп ретінде Қазақстанның барлық аймақтарында кездеседі. Биіктігі 0,5-5 метр болатын, топырақ қабатының 50-150 см тереңдігінде орналасқан ұзын сусымалы тамырсабақтары бар көпжылдық ірі шөптер, кейде тамыр жүйесі 10 м тереңдікке де жетуі мүмкін. Құрғақ қамыстың химиялық құрамы құрылымдық биополимерлерден құралған күрделі кешен, бұл биополимерлер негізінен полисахаридтер мен лигниннен құралған. Құрамы 40-45% целлюлозадан, 20% лигнин, 24% пентозан, 4-11% көмірсулардан құралған. Бүгінгі күнге дейін *Phragmites communis* өсімдігінен 83 қосылыс оқшауланған, оның ішінде паракумар қышқылы, полисахаридтер, C, B₁, B₂ дәрумені, май қышқылдары, амин қышқылдары, стеролдар және полифенолдар анықталған (Ren et al., 2022).

Қытай Халық Республикасының фармакопеясына сәйкес, *P. communis* өсімдігі температураны төмендетуге және тәбетті арттыруға қабілетті. Сонымен қатар, *Phragmites communis* антипиретикалық, қабынуға, бактерияға қарсы, ауырсынуды басатын және иммуномодуляциялық әсерге ие. *Phragmites communis* өсімдігінің жаңа кептірілген тамырсабағы ежелден дәстүрлі дәрілік шөп ретінде қолданылған, яғни қызуды түсіруде, диуретик ретінде, тыныштандыру, іш қатуды жеңілдету

кезінде әсер етеді (Fang, et al., 2024). Қытай дәстүрлі медицинада кең таралған *Phragmites communis* өсімдігі клиникалық тәжірибеде 2000 жылдан астам уақыт бойы қолданылып келеді. Қазіргі уақытта Қытайдағы клиникалық тәжірибеде құрамында *Phragmites communis* өсімдігі бар және сатуға рұқсаты бар әртүрлі патенттелген қытайлық дәрі-дәрмектер қолданылады. Жалпы суық тию және тұмау сияқты респираторлық инфекцияларды емдеу үшін қолданылатын вирусқа қарсы препараттар ретінде таблеткалар мен түйіршіктері түрінде шығарылған (Zhang, et al., 2016).

Клиникалық тәжірибеде *Phragmites communis* өсімдігі тыныс алу жолдарының қабынуымен байланысты патологияларды, соның ішінде өкпенің іріңді аурулары мен жұқпалы тамақ ауруларын емдеуде жиі басқа дәрілік шөптермен біріктіріліп, қайнатпа түрінде қолданылады (Sun, et al., 2016). Өсімдіктің шаруашылықта қолданылу маңыздылығы да зор. Жем-шөбі қамтамасыз етілмеген аудандарда қамысты шөп және сүрлем ретінде, малға азық даярланады. Қамыстан алынған құрамында целлюлоза бар шикізаттың көптеген артықшылықтары бар, мысалы қолжетімділігі, қайта қалпына келуі, қоршаған ортаға қауіпсіздігі. Қамысты қолдану аясы кең, мысалы отын гранулары (қатты биоотын), су қоймалары мен топырақ бетіндегі мұнай- және майөнімдерін жинайтын сорбенттер жасауда қолданады. Сонымен қатар жергілікті құрылыс материалдары, аз қабатты өнеркәсіптік және құрылыс, целлюлоза-картон-қағаз және гидролизді-химиялық өндірісте де қолданыста.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Шикізат 2024 жылдың қыркүйек айында жиналған. Күн сәулесі түспейтін, құрғақ жерде кептірілген.

Экстрагент ретінде гексан ерітіндісін қолданып, экстракциялаудың ең қол жетімді әдістерінің бірі - мацерация арқылы сығынды алу жүзеге асырылды. Алынған сығындыны роторлық буландырғыш аспабының көмегімен құрғатылды ($\eta=0,56\%$). Алынған құрғақ өнімнің химиялық құрамы арнайы аспаптарда – масс-селективті детектор біріктірілген газ хроматографта (маркасы Agilent 7890A) талданды.

Тәжірибе 3 рет қайталанып, математикалық өңдеу жасалынды.

Нәтижелер және оларды талқылау. Алынған құрғақ өнімнің компонентік құрамы газ хроматография-масс спектрометрия (ГХ-МС) әдісінің көмегімен зерттелді. ГХ-МС – қосылыстардың кең спектірін сандық және сапалық талдауға негізделген әдіс. Бұл қуатты екі аналитикалық аспаптардың үйлесімі: газ хроматография газ фазасында күрделі қоспаны жоғары тиімді бөлуге негізделсе, ал масс-спектрометрия қоспадағы белгілі де, белгісіз де қосылыстарды идентификациялауға негізделген. Зерттеу барысында гександы сығынды құрамынан жиырма үш химиялық компонент табылды. Бұл компоненттер сығындыдағы пайыздық үлесі бойынша 2 тобқа жіктелді. Пайыздық үлесі 1%-дан жоғары болса мажорлы, ал 0,1-1% аралығындағы қосылыстар минорлы компоненттер қатарына жатқызылды (суреттер 1,2).

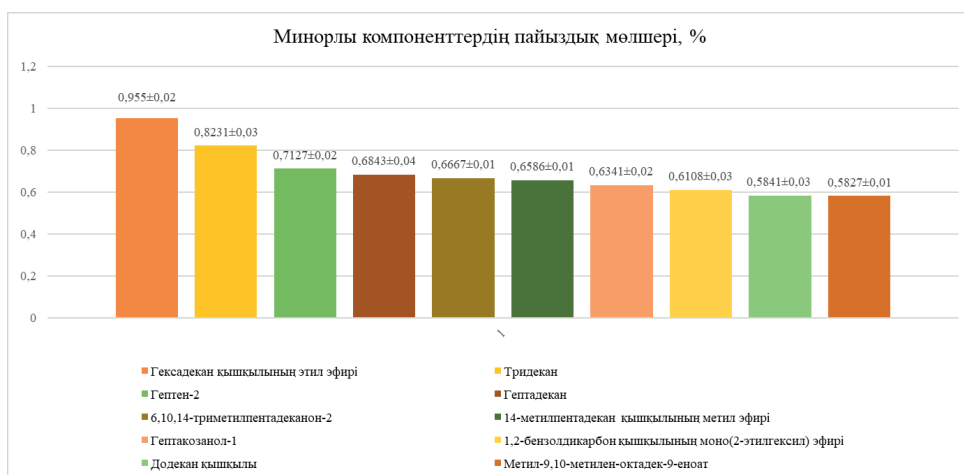
Сурет 1-де кәдімгі қамыс (*Phragmites communis*) өсімдігінің құрамындағы мажорлы компоненттер көрсетілген. Пайыздық мөлшерінің өсу реті бойынша бұл

он үш қосылыстарды мына қатарға орналастыруға болады: 1,3-бензолдикарбон қышқылының бис (2-этилгексил) эфирі < тетрадеканаль < октакозан < эйкозодиен-1,19 < гептадецилоксиран < 1-(1,5-диметилгексил)-4-(4-метилпентил) циклогексан < тетракозан < 9,12,15-октадекатриен қышқылы < октадеценаль-17 < н-гексадекан қышқылы < фитол < 8-гексилпентадекан < нонадекан.



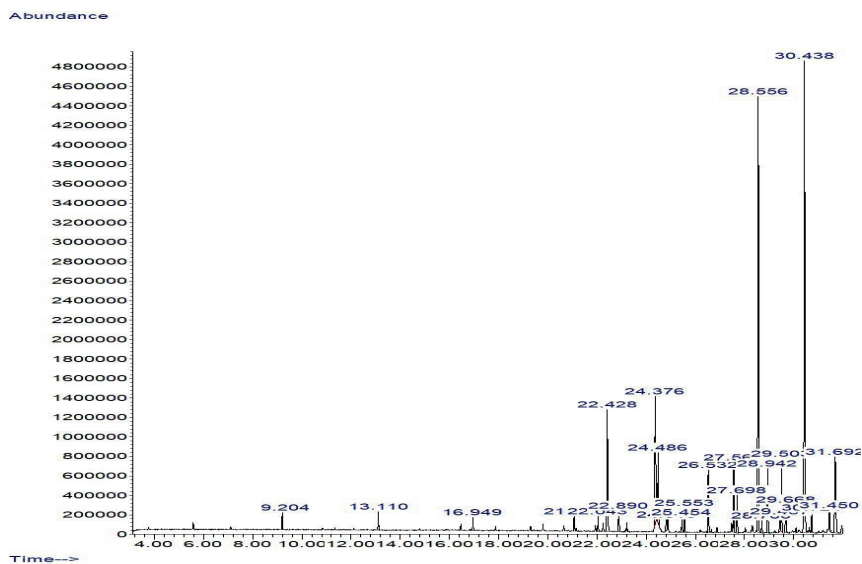
Сурет 1 - Кәдімгі қамыс (*Phragmites communis*) өсімдігі сығындысындағы мажорлы компоненттер

Минорлы компоненттерден он қосылыс табылған. Пайыздық мөлшерінің өсу реті бойынша бұл компоненттерді де белгілі бір қатарға орналастыруға болады: метил-9,10-метилтен-октадек-9-еноат < додекан қышқылы < 1,2-бензолдикарбон қышқылының моно(2-этилгексил) эфирі < гептакозанол-1 < 14-метилпентадекан қышқылының метил эфирі < 6,10,14-триметилпентадеканон-2 < гептадекан < гептен-2 < тридекан < н-гексадекан қышқылының этил эфирі (сурет 2).



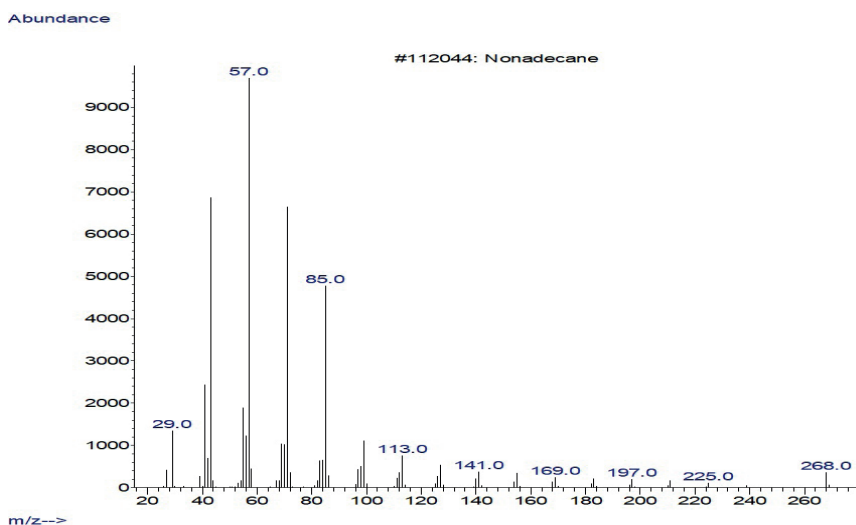
Сурет 2 - Кәдімгі қамыс (*Phragmites communis*) өсімдігі сығындысы құрамындағы минорлы компоненттер

Сурет 3-де *Phragmites communis* өсімдігінің гексан сығындысының хроматограммасы берілген. Ұстау уақыты қосылыстардың сапалық, ал шыңдардың ауданы сандық сипаттамалары екендігі белгілі. Мысалы хроматограммадан ұстау уақыты 30,4378 минут нонадеканға сай келетінін, ал мөлшері 31,0281%-ды құрайтындығын көруге болады.



Сурет 3 - Газ хроматографиясы-масс-спектрометрия әдісімен алынған *Phragmites communis* өсімдігінің сығындысына тән хроматограмма

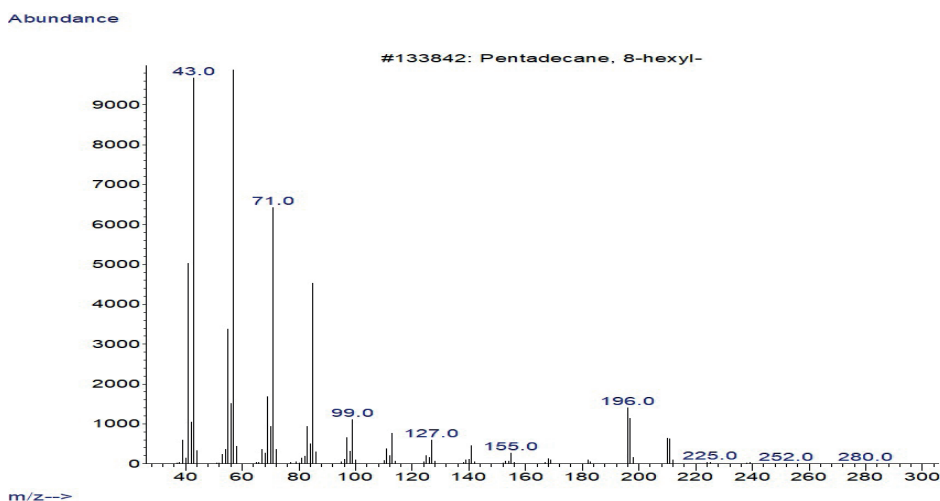
Соныменқатаргазхроматография-масс-спектрометрияменүйлестірілгендіктен, төменде кейбір қосылыстардың масс-спектрлері берілген (сурет 4,5).



Сурет 4 - Нонадеканның масс-спектрі

Нонадекан - эфир майларында кездесетін ұзын тізбекті алкан (Ghavam, et al., 2021). Бұл қосылыс ісікке қарсы және микробқа қарсы белсенділікке ие. *Pseudomonas aeruginosa* – грам теріс шартты-патогенді бактерия. Ол антибиотиктерге туа біткен төзімділік қасиеттеріне байланысты, бүкіл әлемде алаңдаушылық туғызады. Осы орайда антибиотик емес қосылыстар іздеу өзекті мәселе. Осындай қосылыстар ретінде ұзын тізбекті үш алкан эйкозан, триаконтан және нонадекан лиган ретінде таңдалып, β -лактамаза нысан ретінде таңдалды. Зерттеулер нонадеканның дәрілік заттарға ұқсас байланыстырғыш қасиеттері триаконтан және эйкозанға қарағанда жоғары екендігі анықталды (Gayathri, et al., 2022).

5-суретте жоғары мөлшерде кездескен келесі бір қосылыс - 8-гексилпентадеканның (24,6364%) масс-спектрі келтірілген.



Сурет 5 - 8-гексилпентадекан масс-спектрі

Әдеби көздерден *Haematocarpus validus* жемістерінің этилацетат сығындысы антиоксиданттық және қабынуға қарсы қасиеттеріге ие екендігі анықталды. Бұл сығындының биобелсенді компоненттерінің бірі – гептадекан (Sasikumar et al., 2020).

Фитол – фармацевтика және биотехнология өнеркәсібінде хош иістендіргіш және құнды эфир майы ретінде қолданыс тапқан. Соңғы зерттеулер (Islam, et al., 2018) оның анксиолитикалық, метаболикалық, антиоксидантты, аутофагия мен ауырсынуға, қабынуға, микробқа қарсы және иммуномодуляциялық әсерін көрсетті. Додекан қышқылы қаныққан май қышқылдарының өкілі болып табылады, лаурин қышқылы деп те аталады. Көптеген зерттеулер додекан қышқылының бактерияға, вирусқа және зеңге қарсы қасиеттері бар екенін көрсетті. Бұл қышқылдың қолдану аясы өте кең. Атап айтқанда, косметология мен дерматологияда, сондай-ақ тамақ өнеркәсібі мен сусындар өндірісінде эмульгатор және консервант ретінде қолданылады. Сонымен қатар, ол ас қорыту жүйесінің инфекцияларының алдын алады. Фармацевтика өнеркәсібінде де иммундық жүйені қызметін арттыратын табиғи антибиотик ретінде үлкен маңызға ие (Kinart, et al., 2012).

н-Гексадекан қышқылы – қаныққан май қышқылы. Пальма майының негізгі компоненті болғандықтан, пальмитин қышқылы деген тривиалды атауы да бар. Оны фосфолипазаны тежей алатын қабынуға қарсы агент жасауда қолдануға болады. Бұл қышқыл гипохолестеринемиялық, нематичесидтік және пестичесидтік белсенділіктерге ие. Сонымен қатар бактериялардың биоқабықша түзуіне кедергі жасай алатын қосылыс (Siswadi, et al., 2021). Октадеценаль-17 табиғатта кездесетін қанықпаған альдегид. Ол кейбір өсімдіктер мен жәндіктердің кутикулярлы липидті қабатының компоненттерінің бірі бола отырып, қорғаныс механизмдері мен химиялық сигнал беруде маңызды роль атқарады. Өсімдіктердегі екіншілік метаболиттер бола отырып, тозандандырушыларды өзіне тартып, өсімдік жегіш жәндіктерді өсімдікке жолатпайтын қасиеттері бар. Жәндіктерде феромонды жүйенің бірі бола отырып, олардың бір түрінің бір-бірімен жолығуына мүмкіндік береді, мысалы кейбір қоңыздар көбейгенде ол жыныстық феромон ролін атқарады.

Гептакозанол-1-дың антимикробтық, антиоксиданттық қасиеттері, болжамды бактерияға және барлық *Candida* түрлеріне зегге қарсы маңызды белсенділігі бар екендігі ғылыми тұрғыда дәлелденген (Sánchez, et al., 2021). Октакозан — бактерияға қарсы эндогенді метаболит. Октакозан тышқан меланомасы B16F10-Nex2 жасушасына қарсы жоғары цитоуыттылыққа ие және қондырылған тері асты меланомасынан қорғау туғызу қабілеті бар. Сонымен қатар, октакозан антиоксиданттық қасиеттерге ие және жараларды емдеуге көмектеседі (Balachandran, et al., 2023). Фитокомпонент - 6,10,14-триметилпентадеканон-2 (карбонилді қосылыс) түрлі пайдалы қасиеттерге ие, айтарлық гипохолестеринемиялық, қабынуға, бактерияға қарсы, антиоксидантты және жақпа қасиеттерге ие (Hasan, et al., 2024). Гексадекан қышқылының этил эфиірі (этил пальмитат) - бұл қабыну процестерін басатын белгілі май қышқылының табиғи эфиірі (Bertoni, et al., 2023). Тетракозан құрамында 24 көміртек атомы бар алкан. Әдеби шолудан тетракозанның ешқандай фармакологиялық белсенділікке ие емес екендігін көруге болады. Бірақ мына дерекөзден қосылыстың айтарлықтай цитотоксикалық белсенділікке ие екендігі белгілі (Uddin, et al., 2012). Аталмыш қосылыс бар эфир майының түрлі фармакологиялық белсенділіктер көрсететіндігі де анықталған.

Қорытынды. *Phragmites communis* Республикамыздың ылғалды, шалғынды-батпақты топырақты жерлерінде өсетін өсімдік. Газ хроматография мен масс-спектрометрия (GC–MS) әдістерін біріктіру арқылы жүргізілген талдау нәтижесінде, жиырма үш органикалық қосылыстар анықталды. Табылған қосылыстар химиялық табиғаты бойынша түрлі тобтардың (көмірсутектер, карбонилді қосылыстар және т.б.) өкілдері екендігі және олардың белгілі бір биологиялық белсенділіктерге ие екендігі анықталды. Пайыздық мөлшері бойынша мажорлы және минорлы қосылыстарға жіктелді. Сығындыдағы доминант қосылыс - нонадекан (31,0281%). Түрлі биологиялық белсенді заттардың болуы, осы өсімдікті дәстүрлі медицинада қолдануына негіз болады.

References

- Balachandran A., Choi S.B., Morak-Młodawska B., Jeleń M., Froemming G.R.A., Lavilla C.A. Jr, Billacura M.P., Siyumbwa S.N., Okechukwu P.N. (2023) Antioxidant, Wound Healing Potential and In Silico Assessment of Naringin, Eicosane and Octacosane. *Molecules*, 28(3). — P. 1043. <https://doi.org/10.3390/molecules28031043> (in Eng.).
- Bertoni C., Abodi M., D'Oria V., Milani G. P., Agostoni C., Mazzocchi A. (2023) Alpha-linolenic acid and cardiovascular events: A narrative review. *Int J Mol Sci*, 24(18). — P. 14319. <https://doi.org/10.3390/ijms241814319> (in Eng.).
- Fang M., Kong L. —Y., Ji G.-H., Pu F. — L., Su Y.-Z., Li Y.-F., Moore M., Willcox M., Trill J., Hu X. — Y., Liu J. — P. (2024) Chinese *Phragmites communis* (Lu Gen) for Acute Respiratory Tract Infections: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Front Pharmacol*. 15. — P. 1242525. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1242525> (in Eng.).
- Gayathri V., Prakash B., Yashika J. V., Selvi S. V., Kumar D. J. (2022) Molecular docking analysis of long-chain alkanes with the β -lactamase BEL-1 from *Pseudomonas aeruginosa*. *Bioinformation*, 18(5). — P. 460-463. <https://doi.org/10.6026/97320630018460> (in Eng.).
- Ghavam M., Afzali A., Manconi M., Bacchetta G., Manca M.L. (2021) Variability in chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of *Rosa × damascena* Herrm. from mountainous regions of Iran. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 8(22). <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00219-6> (in Eng.).
- Hasan M.R., Haque M.M., Hoque M.A., Sultana S., Rahman M.M., Shaikh M.A.A., Sarker M.K.U. (2023) Antioxidant activity study and GC-MS profiling of *Camellia sinensis* Linn. *Heliyon*. 10(1): e23514. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23514> (in Eng.).
- Islam M.T., Ali E.S., Uddin S.J., Shaw S., Islam M.A., Ahmed M.I., Shill M.C., Karmakar U.K., Yarla N.S., Khan I.N., Billah M.M., Pieczynska M.D., Zengin G., Malainer C., Nicoletti F., Gulei D., Berindan-Neagoe I., Apostolov A., Banach M., Yeung A. W. K., Shilpi J.A., Atanasov A.G. (2018) Phytol: A review of biomedical activities. *Food Chem Toxicol.*, 121. — P. 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.08.032> (in Eng.).
- Kinart Z. (2023) Stability of the Inclusion Complexes of Dodecanoic Acid with α -Cyclodextrin, β -Cyclodextrin, and 2-HP- β -Cyclodextrin. *Molecules*, 28(7). — P. 3113. <https://doi.org/10.3390/molecules28073113> (in Eng.).
- Ren Y., Cui G.D., He L.S., Yao H., Zi C.Y., Gao Y.X., et al. (2022) Traditional Uses, Phytochemistry, Pharmacology and Toxicology of *Phragmitis Rhizoma*: A Narrative Review. *Chin. J. Integr* 28(12). — P. 1127-1136. <https://doi.org/10.1007/s11655-022-3572-1> (in Eng.).
- Sánchez-Hernández E., Buzón-Durán L., Lorenzo-Vidal B., Martín-Gil J., Martín-Ramos P. (2021) Physicochemical characterization and antimicrobial activity against *Erwinia amylovora*, *Erwinia vitivora*, and *Diplodia seriata* of a light purple *Hibiscus syriacus* L. cultivar. *Plants (Basel)*, 10(9). — P. 1876. <https://doi.org/10.3390/plants10091876> (in Eng.).
- Sasikumar R., Das D., Saravanan C., Deka S. C. (2020) GC-HRMS screening of bioactive compounds responsible for antimicrobial and antioxidant activities of blood fruit (*Haematocarpus validus* Bakh. F. Ex Forman) of North-East India. *Arch. Microbiol*. 202(10). — P. 2643-2654. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01985-x> (in Eng.).
- Siswadi S., Grace S. (2021) Phytochemical analysis of bioactive compounds in ethanolic extract of *Sterculia quadrifida* R.Br. *AIP Conf. Proc.*, 2353, 030098. <https://doi.org/10.1063/5.0053057> (in Eng.).
- Sun S. L. (2016) The pharmacological effects and clinical applications of the Chinese herb rhizome *Phragmitis*. *Cardiovasc. Dis. J. Integr. Traditional Chin. West. Med.* 4 (36), 165. <https://doi.org/10.16367/j.issn.1003-5028.2016.09.0622> (in Eng.).
- Uddin S.J., Grice D., Tiralongo E. (2012). Evaluation of cytotoxic activity of patriscabratine, tetracosane and various flavonoids isolated from the Bangladeshi medicinal plant *Acrostichum aureum*. *Comp Stud Pharm Biol*, 50(10). — P. 1276-1280. <https://doi.org/10.3109/13880209.2012.673628> (in Eng.).
- Zhang X. T. (2016) The efficacy of Yin Qiao San in the treatment of wind-heat cold. *Clin. J. Traditional Chin. Med.* 28 (04). — P. 546-548. <https://doi.org/10.16448/j.cjctm.2016.0196> (in Eng.).

© A. Yedilova^{1*}, Z. Inelova¹, N. Kurbatova¹, B. Turalin², 2025.

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: edilova.2020@gmail.com

PHYTOCHEMICAL STUDY OF MEDICINAL PLANT - HUMULUS LUPULUS L., FOR THE PURPOSE OF OBTAINING BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

A. Yedilova — PhD student of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: edilova.2020@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6733-0878>;

Z. Inelova — candidate of biological sciences, professor of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: z.inelova2015@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-5848>;

N. Kurbatova — candidate of biological sciences of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: kurbatova_nv77@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5883-6108>;

B. Turalin — senior lecturer of K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan,

E-mail: bauke_1982@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5520-0307>.

Abstract. Relevance. A phytochemical study was carried out on *Humulus lupulus* L., a promising species from the Cannabaceae family. Qualitative and quantitative analyses revealed that, regardless of environmental conditions, the Kazakh variety contains alkaloids, anthraquinones, proteins, hydrolysable compounds, and other bioactive components. This study aimed to investigate the phytochemical composition, identify key active substances, and evaluate the potential of various plant organs as raw material for medical and pharmaceutical use. Differences in extract coloration with analytical reagents suggest variability in the quantity of each compound group. Analysis showed that hop stems contain significant levels of alkaloids, anthraquinones, polysaccharides, and phenolic and hydroxycinnamic acids. Leaves accumulate more monosaccharides and flavonoids. Hop cones are a rich source of proteins, tannins, coumarins, xanthenes, triterpenoids, phospholipids, and essential oils. In total, 31 substances were identified in the Kazakh variety for the first time: 6 anthraquinones, 5 tannins, 4 xanthenes, 7 coumarins, 4 triterpenoids, and 5 carbohydrates. The composition and content of bioactive substances varied depending on the plant part analyzed. Practical value. These findings confirm the potential of Kazakh *Humulus lupulus* L. as a local source of pharmacologically valuable compounds and provide a scientific basis for further studies and the development of plant-based pharmaceuticals and nutraceuticals.

Keywords: *Humulus lupulus*, analysis of chemical composition, quantitative analysis of compounds, bioactive compounds

© А. Едилова^{1*}, З. Инелова¹, Н. Курбатова¹, Б. Туралин², 2025.

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан.

E-mail: edilova.2020@gmail.com

ДӘРІЛІК *HUMULUS LUPULUS* L. ӨСІМДІГІНЕН БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ЗАТТАРДЫ АЛУ МАҚСАТЫНДАҒЫ ФИТОХИМИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

А. Едилова — әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің PhD докторанты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: edilova.2020@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6733-0878>;

З. Инелова — биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің профессоры, Алматы, Қазақстан,

E-mail: z.inelova2015@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-5848>;

Н. Курбатова — биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: kurbatova_nv77@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5883-6108>;

Б. Туралин — Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің аға оқытушысы, Ақтөбе, Қазақстан,

E-mail: bauke_1982@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5520-0307>.

Аннотация. Өзектілігі. Фитохимиялық зерттеу Cannabaceae тұқымдасына жататын келешегі зор өсімдік түрі *Humulus lupulus* L. өсімдігіне жүргізілді. Бұл зерттеу аясында сапалық және сандық талдаулар жүргізіліп, қоршаған орта жағдайларына тәуелсіз түрде Қазақстан аумағында өсетін осы өсімдіктің құрамында алкалоидтар, антрахинондар, белоктар, гидролизденетін қосылыстар және басқа да биологиялық белсенді компоненттердің бар екендігі анықталды. Зерттеудің негізгі мақсаты — өсімдіктің фитохимиялық құрамын терең зерттеу, оның құрамындағы негізгі белсенді заттарды анықтау, сондай-ақ әртүрлі өсімдік бөліктерінің (сабақ, жапырақ, шишка) медициналық және фармацевтикалық мақсатта шикізат ретінде қолданылу әлеуетін бағалау болып табылады. Аналитикалық реагенттермен алынған сығындылардың түсінің әртүрлілігі фитохимиялық топтардың сандық құрамында өзгеріс бар екенін көрсетеді. Өсімдіктің әртүрлі бөліктеріне жүргізілген талдау нәтижесінде хмельдің сабағында алкалоидтар, антрахинондар, полисахаридтер, сондай-ақ фенолдық және гидроксикоричный қышқылдарының жоғары мөлшерде шоғырланғаны анықталды. Жапырақтары, негізінен, моносахаридтер мен флавоноидтарға бай екені белгілі болды. Ал құлмақтың шишкалары (гүлдері) ақуыздар, таниндер, кумариндер, ксантондар, тритерпеноидтар, фосфолипидтер және эфир майлары сияқты фармакологиялық тұрғыдан маңызды заттардың бай көзі болып табылады. Жалпы алғанда, Қазақстанда өсетін *Humulus lupulus* L. түрінің құрамынан алғаш

рет 31 әртүрлі химиялық қосылыс анықталды. Атап айтқанда, 6 антрахинон, 5 танин, 4 ксантон, 7 кумарин, 4 тритерпеноид және 5 көмірсу түрі тіркелді. Бұл заттардың құрамы мен мөлшері өсімдіктің қай бөлігінен алынғанына қарай өзгеріп отырды. Практикалық құндылығы. Аталған ғылыми нәтижелер Қазақстан аумағында өсетін *Humulus lupulus* L. өсімдігінің фармакологиялық тұрғыдан құнды табиғи қосылыстардың жергілікті көзі ретінде үлкен әлеуетке ие екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, бұл мәліметтер өсімдік негізіндегі фармацевтикалық және нутрицевтикалық өнімдерді әзірлеуге арналған ғылыми негіз қалыптастырады әрі болашақтағы зерттеулерге жол ашады.

Түйін сөздер: *Humulus lupulus* L., химиялық құрамды талдау, қосылыстардың сандық талдауы, биоактивті қосылыстар

© А. Едилова^{1*}, З. Инелова¹, Н. Курбатова¹, Б. Туралин², 2025.

¹Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,

Актобе, Казахстан.

E-mail: edilova.2020@gmail.com

ФИТОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТЕНИЯ – HUMULUS LUPULUS L. С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

А. Едилова — PhD докторант кафедры биологии Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: edilova.2020@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6733-0878>;

З. Инелова — кандидат биологических наук, профессор Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: z.inelova2015@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-5848>;

Н. Курбатова — кандидат биологических наук, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: kurbatova_nv77@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5883-6108>;

Б. Туралин — старший преподаватель Актюбинского регионального университета им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан,

E-mail: bauke_1982@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5520-0307>.

Аннотация. Актуальность. Фитохимическое исследование перспективного вида из семейства Cannabaceae – *Humulus lupulus* L., произрастающего на территории Казахстана, было проведено с целью всестороннего анализа его химического состава. В рамках данного исследования были проведены как качественные, так и количественные фитохимические анализы, которые показали, что независимо от условий произрастания казахстанская разновидность хмеля содержит ряд биологически активных веществ. К ним относятся алкалоиды, антрахиноны, белки, гидролизуемые соединения и другие важные метаболиты, обладающие потенциальной фармакологической активностью. Основной задачей исследования являлось выявление состава фитохимических компонентов,

определение ключевых активных веществ, а также оценка потенциала различных органов растения (стебли, листья, шишки) в качестве сырья для медицинского и фармацевтического применения. Разнообразие окраски экстрактов при использовании аналитических реагентов указывает на количественную вариативность групп соединений, что говорит о сложной и неоднородной химической природе растения. В результате анализа было установлено, что стебли хмеля содержат значительные концентрации алкалоидов, антрахинонов, полисахаридов, а также фенольных и гидроксикоричных кислот. Листья, в свою очередь, характеризуются более высоким содержанием моносахаридов и флавоноидов. Наибольшее богатство биологически активных веществ было выявлено в шишках хмеля были обнаружены белки, дубильные вещества, кумарины, ксантоновые соединения, тритерпеноиды, фосфолипиды, а также эфирные масла, играющие важную роль в фармакологии. Всего в казахстанской популяции хмеля впервые было идентифицировано 31 химическое соединение, в том числе 6 антрахинонов, 5 танинов, 4 ксантона, 7 кумаринов, 4 тритерпеноидных соединения и 5 различных углеводов. Установлено, что состав и концентрация этих веществ варьируются в зависимости от исследуемой части растения. Практическое значение. Полученные научные данные подтверждают высокий потенциал *Humulus lupulus* L. казахстанского происхождения как ценного местного источника биологически активных веществ с фармакологическим значением. Исследование служит научной основой для проведения дальнейших работ, направленных на разработку лекарственных средств и функциональных добавок растительного происхождения, а также расширяет представление о применимости данной культуры в фармацевтической и нутрицевтической промышленности.

Ключевые слова: *Humulus lupulus*, анализ химического состава, количественный анализ соединений, биоактивные соединения

Introduction. The growing interest in plant-derived bioactive substances has led to a notable increase in the use of natural products in modern medicine. Wild flora remains a fundamental source of therapeutic raw materials. However, due to increasing demand, there is an urgent need to improve collection practices and implement sustainable resource management within natural ecosystems. Medicinal plants are recognized for their broad pharmacological spectrum and mild therapeutic action, particularly in the treatment of chronic diseases. Nevertheless, anthropogenic pressure continues to diminish the reserves of such valuable biological resources. This reinforces the importance of researching the chemical profiles and pharmacological effects of medicinal plant species. Among the botanicals with promising pharmacological potential is *Humulus lupulus* L. (common hop), a species known for its anti-inflammatory, sedative, and anxiolytic properties. It is traditionally applied to manage nervous tension, sleep disturbances, and neuralgic pain. Despite its wide distribution, the natural populations of *Humulus lupulus* L. remain relatively scarce. This plant is widely used in both official and traditional phytotherapy and finds roles

in various industries (Callemien, et al., 2005).

This study aims to conduct a detailed analysis of the chemical constituents and biological features of *Humulus lupulus* L., assess its potential for use in medicine and traditional healing practices, and explore its broader applications, with attention to sustainable utilization and conservation strategies. *Humulus lupulus* L. is a herbaceous perennial climbing vine that reproduces via dioecious flowers. The perennial base includes underground organs such as rhizomes, roots, and dormant buds, while the aerial shoots develop annually from spring to autumn. The plant exhibits a climbing habit, with stems reaching lengths of 3–5 meters or more. These stems have ribbed surfaces and are covered in fine hooked spines arranged along the ribs. The foliage consists of large, rough-textured leaves with serrated margins, typically heart-shaped at the base and sharply pointed at the tips. Petioles are either equal to or shorter than the leaf blade. The stipules are lanceolate, often with bifurcated tips.

Male flowers form terminal panicles with stamens that contain long anthers. Female flowers are grouped in dense inflorescences, enclosed by bracts that later develop into characteristic cone-like structures. These cones, measuring 2.5–3.5 cm in length, are composed of enlarged bracts with glandular trichomes that produce biologically active substances. The plant is strictly dioecious, bearing either male or female inflorescences. The fruit is an ovoid achene enclosed in the persistent calyx. In herbal medicine, the female inflorescences (cones) are the principal part used (De Keukeleire, et al., 2003). The plant naturally occurs in riparian zones, forest clearings, and shrub thickets, and it is also cultivated in home gardens. In Kazakhstan, *Humulus lupulus* L. is found in river valleys and foothill zones. Its global range includes various parts of Europe, North America, the Caucasus, and Asia Minor (Yedilova, et al., 2025). Chemical investigations have identified a wide array of compounds in this species, including cyclitols (up to 0.03%) (Yedilova, et al., 2020), various mono- and diterpenes (e.g., α -pinene, myrcene, linalool, camphor), as well as numerous sesquiterpenes, steroids, and alicyclic compounds. These include humulon, lupulon, and several derivatives such as cohumulon and adhumulon. Phenolic components such as hydroxybenzaldehyde and phloroglucinol glycosides have also been identified, alongside stilbenes (e.g., resveratrol), flavonoids, chalcones, and xanthohumols (Silva, et al., 2023; Yu, et al., 2014; Zhoua, et al., 2018). Additionally, the plant contains important vitamins (B1, B2, C), phenolic acids (e.g., caffeic, gallic), and organic acids (e.g., citric, succinic) (Tanaka, et al., 2014).

Pharmacologically, compounds such as xanthohumol and 6-isopentenyl naringenin exhibit antifungal activity. Aqueous infusions and decoctions are applied in clinical phytotherapy to reduce inflammation, support gastrointestinal function, stimulate appetite, and aid in healing chronic skin lesions. These herbal preparations also find use in treating insomnia, menopausal syndromes, and functional nervous disorders. In gynecology, decoctions are used to treat amenorrhea, dysmenorrhea, and lactation issues. Clinical studies suggest that hop preparations improve sleep and emotional well-being and are applied in balneotherapy. Moreover, compounds like humulon and lupulon have demonstrated antimicrobial properties, while derivatives such as

cohumulon and adluplon exhibit antibacterial action (Sangiovanni, et al., 2019; Alonso-Esteban, et al., 2019). Scientific data also confirm that hop extracts have adaptogenic effects under chronic stress, protecting internal organs from degenerative changes and helping to stabilize neurotransmitter systems. Furthermore, the essential oil has insect-repelling properties. The pharmacological versatility of *Humulus lupulus* L. includes analgesic, antioxidant, sedative, and antimicrobial actions (Schiller, et al., 2006; Luzak, et al., 2016; DeGrandi-Hoffman, et al., 2012).

Given its phytochemical richness and pharmacological profile, studying the Kazakhstani variety of *Humulus lupulus* L. is highly relevant. This research seeks to address the limited data on this local ecotype and contribute to the development of phytopreparations based on Kazakhstan's endemic plant resources.

Methods and materials.

Sample collection

The plant (*Humulus lupulus* L.) was selected and then collected in the month of July 2021 from the Alakol district of Almaty Region during the fruiting period (Figure 1).



Figure 1. a) stems

b) leaves

c) cones.

Phytochemical analysis

The study was carried out using standard techniques widely applied in the analysis of medicinal plant materials.

Estimation qualitative analysis of alkaloids:

To detect alkaloids, 2 ml of 50% aqueous-alcoholic extract was mixed with 2 ml of 1% phosphomolybdic acid solution. The emergence of a yellow precipitate, which turned blue within 20 minutes, indicated a positive reaction.

Estimation quantitative analysis of alkaloids:

The amount of alkaloids was measured using a modified analytical technique, with the results expressed in percentage relative to berberine bisulfate content.

Estimation qualitative analysis of anthraquinones:

A 2 ml sample of the hydroalcoholic extract was combined with 2 ml of 1% zirconium nitrate in acidic medium and heated in a water bath for 5 minutes. The formation of a red-purple precipitate confirmed the presence of anthraquinones.

Estimation quantitative analysis of anthraquinones:

After hydrolyzing glycosidic forms using 5% sulfuric acid, anthraquinone content was determined using a refined procedure and calculated in terms of chrysophanic acid.

Estimation qualitative analysis of proteins:

For protein detection, 2 ml of aqueous extract was reacted with Millon's reagent. The mixture was heated in a boiling water bath for 10 minutes. A white precipitate appeared, turning brick-red with continued heating.

Estimation quantitative determination of protein content:

Protein concentration was established using the biuret reaction according to standard protocols.

Estimation qualitative analysis of tannins:

To determine the presence of tannins, 2 ml of aqueous extract was treated with 2 ml of 5% nitrosomethylurea and heated for 10 minutes. The resulting precipitate was filtered, and the filtrate was tested with 1% ammonium iron alum and a sodium acetate crystal. The purple coloration signified a positive result.

Estimation quantitative determination of tannins:

Tannin content was quantified using methods approved by the pharmacopoeia.

Estimation qualitative analysis of xanthoness:

2 ml of hydroalcoholic extract was mixed with 2 ml of 5% aluminum chloride solution. A green-blue coloration indicated the presence of xanthoness.

Estimation quantitative determination of xanthoness:

The amount of xanthoness was determined by applying thin-layer chromatography.

Estimation qualitative analysis of coumarins:

To 2 ml of hydroalcoholic extract, 3 ml of pyridine was added, followed by the gradual addition of 2 ml of 0.1 N sodium hydroxide. A color shift from yellow to green and then to blue was observed upon addition of 3 drops of bromothymol blue alcohol solution.

Estimation quantitative determination of coumarins:

The coumarin content was evaluated using an optimized method described in Bland, et al, (2015).

Estimation qualitative assessment of polysaccharides:

To detect polysaccharides, 5 ml of aqueous extract was mixed with four volumes of 95% ethanol. The formation of a visible precipitate confirmed their presence.

Estimation quantitative evaluation of polysaccharides:

Quantification was based on dry weight and conducted using an optimized analytical approach (Bland, et al., 2015).

Estimation qualitative analysis of triterpenoids:

The Kedde reaction was applied: 2 ml of chloroform extract was treated with 2 ml of 1% alcoholic m-dinitrobenzoic acid in an alkaline medium. A bright green coloration indicated a positive result.

Estimation quantitative evaluation of triterpenoids:

An improved method was used to calculate triterpenoid content, expressed as a percentage of absolutely dry raw material in terms of daziantozide.

Estimation qualitative analysis of phenolic acids:

To the acetone extract, an equal volume of reagent mixture (1% potassium ferricyanide and 2% ammonium iron alum) was added. A dark blue coloration was observed, indicating the presence of phenolic acids.

Estimation of phenolic acids (quantitative):

The content was determined using a refined spectrophotometric technique.

Estimation qualitative analysis of flavonoids:

The Martini-Bettolo reaction was employed: a saturated solution of antimony pentachloride in carbon tetrachloride was added to the hydroalcoholic extract, leading to the appearance of an orange hue.

Estimation quantitative identification of flavonoids:

Flavonoid content was measured based on the concentration of quercetin, the main reference component in the plant material.

Estimation qualitative and quantitative assessment of phospholipids:

Both qualitative and quantitative analysis of phospholipids were performed using a gravimetric (mass-based) approach. The total phospholipid content was calculated relative to absolutely dry plant mass.

Estimation qualitative analysis of essential oils:

To identify essential oils, the Sabettai reaction was applied. Equal volumes of 1% bromine in chloroform and chloroform extract were mixed, resulting in a blue color (Bland, et al., 2015).

Estimation quantitative determination of essential oils:

The technique described by Itavo, et al. (2015) was used: the ground raw material was weighed, placed into a 300 ml round-bottom flask with 100 ml of hot water, and subjected to steam distillation for 2–4 hours. Essential oils were collected in a calibrated tube and the volume measured after cooling, then expressed as a percentage of the initial material mass.

Results and Discussion. To evaluate the quality indicators of the medicinal plant material, standardized techniques outlined in the State Pharmacopoeia were applied (Itavo, et al., 2015). As part of the commodity analysis, moisture content was assessed by determining the percentage of weight loss upon drying.

In addition, the total ash content was measured, including both the portion insoluble in a 10% hydrochloric acid solution and the fraction containing sulfates. All values were expressed as percentages and are illustrated in (Figure 2).

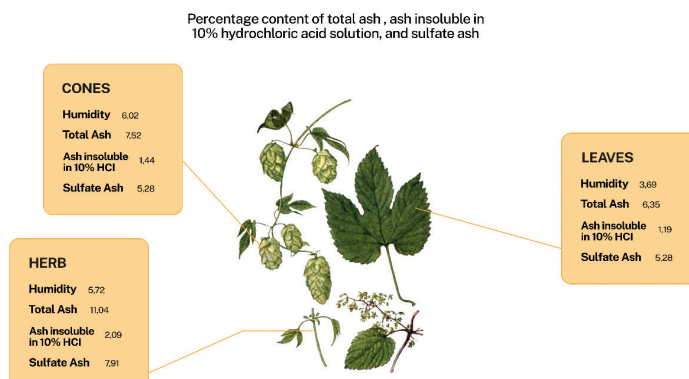


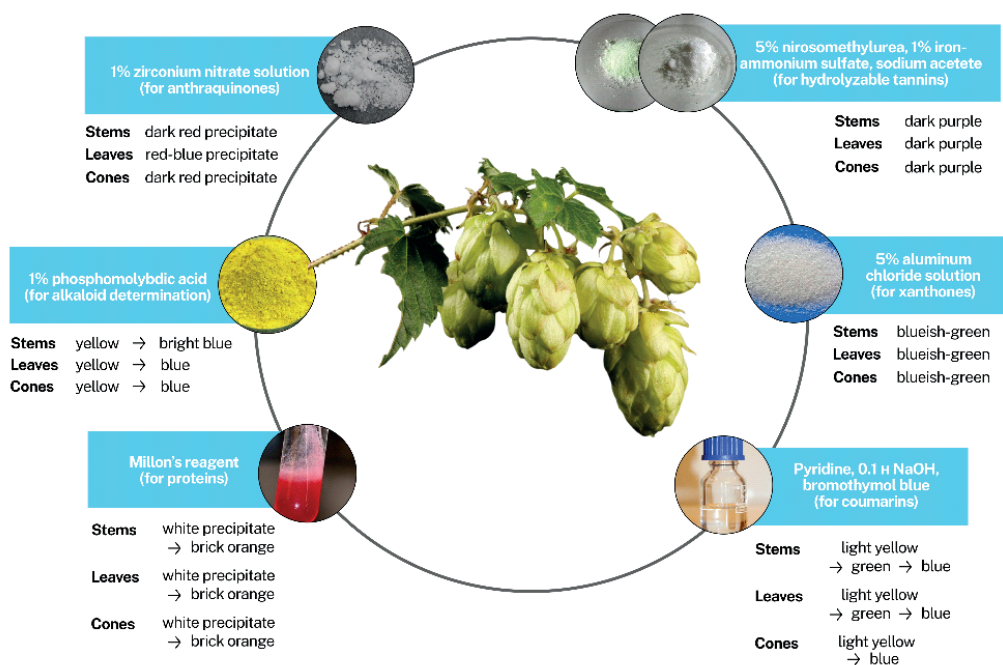
Figure 2. Percentage amount of overall ash, ash not soluble in 10% hydrogen chloride solution, and ash containing sulfate

The evaluation of the obtained data confirmed that the analyzed medicinal plant material met the quality requirements established by the Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan.

To perform a qualitative assessment of the biologically active compounds present in *Humulus lupulus* L., a variety of solvents with different polarities were utilized. These included aqueous acetone solutions at concentrations of 10%, 30%, 50%, and 70%, as well as aqueous ethanol solutions at the same respective concentrations. Non-polar solvents such as hexane, benzene, and chloroform were also incorporated into the extraction process. For the selective isolation of mono- and polycarboxylic acids, phenolic acids, siliceous compounds, and proteins, a 10% ethanol-in-water solution was applied. Extraction of anthraquinones, alkaloids, flavonoids, tannins, and coumarins was carried out using 50% and 70% hydroalcoholic solvents. Chloroform was employed specifically to extract triterpenoids and phospholipids.

All resulting extracts from *Humulus lupulus* L. were subjected to qualitative phytochemical screening via one-dimensional and two-dimensional paper chromatography using various solvent systems. Visualization of compound groups was performed with specific detection reagents. The findings of this chromatographic analysis are illustrated in Figure 3.

Qualitative properties of biologically active substances in *Humulus lupulus* L. by plant organs



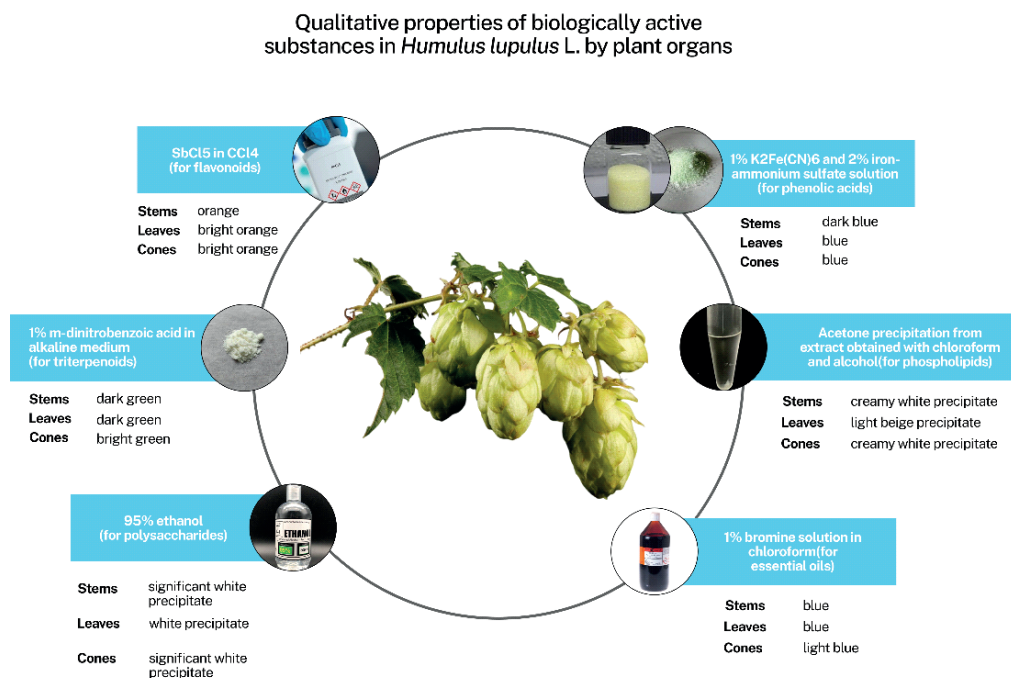


Figure 3. Qualitative properties of biologically active substances in *Humulus lupulus* L. by plant organs.

The chromatographic profiles presented in Figure 3 confirm that *Humulus lupulus* L. specimens from different ecological regions of Kazakhstan consistently contain alkaloids, anthraquinones, and other classes of biologically active compounds. Variations in the intensity of color reactions with diagnostic reagents reflect differences in the relative concentration of each structural group of metabolites. To perform a detailed phytochemical investigation of these compound classes, the powdered air-dried aerial parts of *Humulus lupulus* L. were subjected to a 2-hour thermal extraction using solvents selected based on polarity and compatibility with the chemical nature of the targeted metabolite group. This selective extraction approach was guided by the principle of structural affinity between solvents and specific natural compounds. Quantitative determination of the detected bioactive constituents was carried out in accordance with pharmacopoeial guidelines and internationally recognized protocols. The chemical profiling of anthraquinones, tannins, xanthenes, coumarins, and carbohydrate derivatives was performed using high-performance liquid chromatography (HPLC) with the use of certified reference standards. The analytical results are presented in Figure 4

Data from phytochemical and qualitative analysis of the components of biologically active substances in the aerial parts of *Humulus lupulus* L.

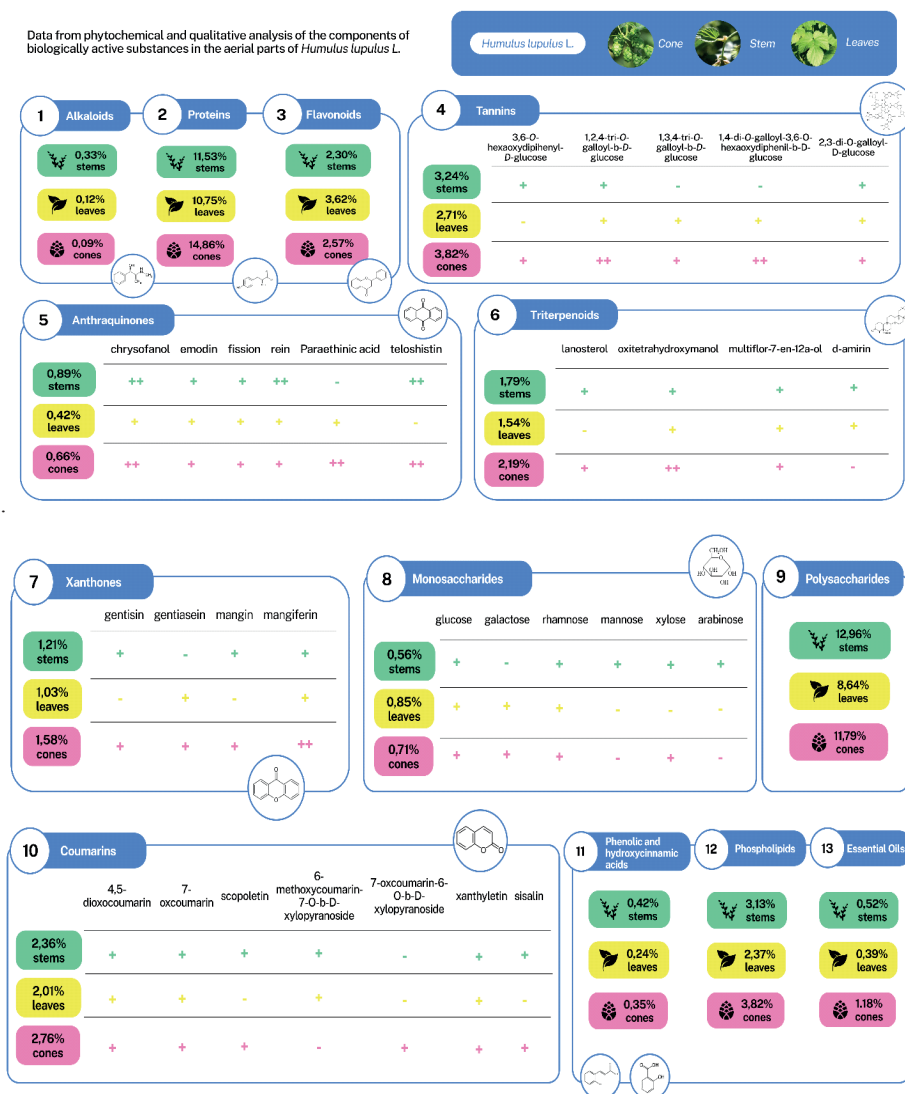


Figure 4. Data from phytochemical and qualitative assessment of the components of bioactive substances in the aerial parts of *Humulus lupulus* L.

An examination of the data summarized in Table 3 revealed distinct distribution patterns of phytochemicals across the aerial organs of *Humulus lupulus* L. The stem tissue demonstrated higher concentrations of alkaloids, anthraquinone derivatives, polysaccharides, as well as phenolic and hydroxycinnamic acids. Leaf samples showed predominant accumulation of flavonoids and monosaccharides. The inflorescences, or cones, were identified as a rich source of proteins, hydrolyzable tannins, xanthenes, coumarins, triterpenoids, phospholipids, and essential oil components, positioning them as valuable raw material for phytopharmaceutical development.

Conclusion. The present study provided the first comprehensive chemical characterization of the aerial parts of the Kazakh variety of *Humulus lupulus* L., focusing on the diversity and concentration of key categories of biologically active constituents. Phytochemical screening confirmed the presence of a broad spectrum of bioactive substances within this species.

Notably, 31 compounds were identified for the first time in this Kazakh ecotype of *Humulus lupulus* L., including 6 anthraquinones, 5 hydrolyzable tannins, 4 xanthonenes, 7 coumarins, 4 triterpenoids, and 5 carbohydrate-type metabolites. The study also revealed significant organ-specific differences in both the qualitative profiles and the quantitative levels of these phytochemicals.

These findings underscore the chemical uniqueness and pharmacological promise of the Kazakh *Humulus lupulus* L., laying a scientific foundation for its further exploration. The data highlight its potential as a raw material for the development of novel herbal medicines and offer a valuable contribution to Kazakhstan's phytochemical resource base. Continued research on this species may facilitate the creation of targeted phytopreparations and expand its application in pharmaceutical and nutraceutical fields.

References

- Callemien D., Jerkovic V., Rozenberg R., & Collin S. (2005) Hop as an interesting source of resveratrol for brewers: Optimization of the extraction and quantitative study by liquid chromatography (atmospheric pressure chemical ionization tandem mass-spectrometry). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, — 53(2). — P. 424–429. <https://doi.org/10.1021/jf048693g> (in English)
- De Keukeleire, J., Heyerick A., Roldan-Ruiz I., & Van Bockstaele E. (2003) Formation and accumulation of alpha-acids, beta-acids, desmethylxanthohumol, and xanthohumol during flowering of hops (*Humulus lupulus* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, — 51(15). — P. 4436–4441. <https://doi.org/10.1021/jf034240r> (in English)
- Yedilova A., Inelova Z., Zhamanbayeva M., Kiyekbayeva L., Yerubayeva G., Sarsembayeva A., ... Bauyrzhan T. (2025) Evaluating the status of *Humulus lupulus* populations in Kazakhstan: implications for conservation, sustainability and forest ecosystem management. *ES Energy & Environment*, 27. — P. 1426. <https://doi.org/10.30919/esee8c1426> (in English)
- Yedilova A.K., Inelova Z.A. (2020) Features of the structure of natural populations of *Humulus lupulus* L. *Bulletin of the National Academy of Sciences*, — Vol. 1, — No. 337. — 33–40. (in English)
- Silva de A.G.V., Arend G.D., Zielinski A.A.F., Luccio M.D., Ambrosi A. (2023). Xanthohumol properties and strategies for extraction from hops and brewery residues: A review. *Food Chemistry*, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134629404> (in English)
- Stevens J.F., Ivancic M., Hsu V.L., Deinzer M.L. (1997) Prenylflavonoids from *Humulus lupulus* L. *Phytochemistry*, — 44. — P. 1575–1585. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(96\)00744-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(96)00744-3) (in English)
- Yu L., Zhang F., Hu Zh., Ding H., Tang H., Ma Zh., Zhao X. (2014). Novel prenylated bichalcone and chalcone from *Humulus lupulus* and their quinone reductase induction activities. *Fitoterapia*, — 93. — P. 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2013.12.019> (in English)
- Zhou D., Wang C., Li X., Zhao Y., Jing D., Ma Y., Li J., Wei D., Li N. (2018) Dietary functional flavonoids as natural hepatoprotective agents against acute liver injury from hop (*Humulus lupulus* L.). *Journal of Functional Foods*, — 45. — P. 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.04.042> (in English)
- Tanaka Y., Yanagida A., Komeya S., Kawana M., Honma D., Tagashira M., Kanda T., Shibusawa Y. (2014) Comprehensive separation and structural analyses of polyphenols and related compounds from bracts of hops (*Humulus lupulus* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, — 62. — P. 2198–2206. <https://doi.org/10.1021/jf405544n> (in English)
- Sangiovanni E., Fumagalli M., Santagostini L., Forino M., Piazza S., Colombo E., Tagliatala-

Scafati O., Fico G. (2019) A bio-guided assessment of the anti-inflammatory activity of hop extracts (*Humulus lupulus* L. cv. Cascade) in human gastric epithelial cells. *Journal of Functional Foods*, — 57. — P. 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.03.041> (in English)

Alonso-Esteban J.I., Pinela J., Barros L., Ciric A., Sokovic M., Calhelha R.C., Torija-Isasa E., Cortes Sanchez-Mata de M., Ferreira I.C.F.R. (2019) Phenolic composition and antioxidant, antimicrobial and cytotoxic properties of hop (*Humulus lupulus* L.) seeds. *Industrial Crops and Products*, — 134. — P. 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.001> (in English)

Schiller H., Forster A., Vonhoff C., Hegger M., Biller A., Winterhoff H. (2006) Sedating effects of *Humulus lupulus* L. extracts. *Phytomedicine*, — 13. — P. 535-541. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2006.05.010> (in English)

Luzak B., Golanski J., Przygodzki T., Boncler M., Sosnowska D., Oszmianski J., Watala C., Rozalski M. (2016) Extract from spent hop (*Humulus lupulus* L.) reduces blood platelet aggregation and improves anticoagulant activity of human endothelial cells in vitro. *Journal of Functional Foods*, 22. — P. 257–269. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.01.029> (in English)

DeGrandi-Hoffman G., Ahumada F., Probasco G., Schantz L. (2012) The effects of beta acids from hops (*Humulus lupulus* L.) on mortality of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae). *Experimental and Applied Acarology*, — 58. — P. 407-421. <https://doi.org/10.1007/s10493-012-9593-2> (in English)

Bland J.S., Minich D., Lerman R., Darland G., Lamb J., Tripp M., & Grayson N. (2015) Isohumulones from hops (*Humulus lupulus*) and their potential role in medical nutrition therapy. *PharmaNutrition*, — 3. — P. 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2015.02.002> (in English)

Itavo L.C.V., Soares C.M., Ferreira Itavo C.C.B., Dias A.M., Petit H.V., Leal E.S., Souza de A.D.V. (2015) Calorimetry, chemical composition and in vitro digestibility of oilseeds. *Food Chemistry*, — 185. — P. 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.007> (in English)

©**A. Kuandykova**¹, **B. Taimasov**¹, **E. Potapova**², **B. Zhakipbayev**^{3*},
N. Zhanikulov⁴, 2025.

¹M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan;

²D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, Russia;

³Peoples' Friendship University named after Academician A. Kuatbekov,
Shymkent, Kazakhstan;

⁴Academician E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan;
E-mail: bibol.ye.zhakipbayev@mail.ru

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF CLINKERS OBTAINED FROM METALLURGICAL SLAG

A. Kuandykova — PhD student, M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: aknur.01.07.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9195>;

B. Taimasov — Doctor of technical sciences, Professor, M. Auezov South Kazakhstan University,
Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: taimasovukgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1844-4932>;

E. Potapova — Doctor of technical sciences, Professor D.I. Mendeleev Russian University of Chemical
Technology, Moscow, Russia,
E-mail: Potapova.e.n@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5796-2265>;

B. Zhakipbayev — PhD, Associate Professor, Chief Researcher Engineering and Technology Hub,
Peoples' Friendship University named after Academician A. Kuatbekov, Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: bibol.ye.zhakipbayev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>;

N. Zhanikulov — PhD, associate professor of E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda,
Kazakhstan,
E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>.

Abstract. Cement production is an energy-intensive industry. Key issues are increasing energy efficiency in the production of cement clinker, reducing CO₂ emissions and other harmful gases in the decarbonization process; increasing the technological efficiency of production and the transition to a green economy. In solving this problem, it is important to introduce man-made industrial waste into the raw mix during clinker firing. Studies were conducted using chemical, SEM, energy-dispersive microanalysis. Using energy- and resource-saving technology, a composition of the raw mix was developed using three wastes from the clinker firing process: 78.9-79.83% of limestone crushing waste from the Sastobe deposit, 15.21-17.34% of electrothermophosphorus slag and 3.59-5.15% of "zinc ore rolling clinker" from the Achisai Metallurgical Plant. Raw materials were fired at a temperature of 1350-1400°C. Obtained clinker contained 0.2-2.0% free CaO. Indicator fully complies with the requirements for cement clinker.

When determining the quality of the obtained clinker, it was found that the clinker formation process is affected by CaF_2 , which is present in the waste of the Achisai metallurgical production, as a mineralizer. Microscopic analysis showed that the distribution of minerals in the clinker is uniform, with most minerals being C_3S and C_2S . Intermediate phase consists of 1-3% C_3A minerals and 8-15% C_4AF minerals. Sizes of C_3S and C_2S minerals were 10-100 μm . Obtained scientific results will allow cement plants operating in Kazakhstan to use the "clinker from rolling zinc ores" of the Achisai Metallurgical Plant as a regulating additive and as a component replacing iron raw materials. Use of waste as raw material increases production efficiency, reduces CO_2 and NO_x emissions, lowers the clinker firing temperature by 100-150°C, and helps solve environmental problems.

Keywords: additives, industrial waste, energy saving, clinker, cement

©А. Қуандыкова¹, Б. Таймасов¹, Е. Потапова², Б. Жакипбаев^{3*},
Н. Жаникулов⁴, 2025.

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан;

²Д.И. Менделеев атындағы Ресей химиялық технология университеті,
Мәскеу, Ресей;

³Академик Ә. Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университеті,
Шымкент, Қазақстан;

⁴Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті,
Қарағанды, Қазақстан.

E-mail: bibol.ye.zhakipbayev@mail.ru

МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ШЛАКТАРДАН АЛЫНАТЫН КЛИНКЕРЛЕРДІҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫН ЗЕРТТЕУ

А. Қуандықова — PhD докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
Шымкент, Қазақстан,

E-mail: aknur.01.07.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9195>;

Б. Таймасов — техника ғылымдарының докторы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан
университетінің профессоры, Шымкент, Қазақстан,

E-mail: taimasovukgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1844-4932>;

Е. Потапова — техника ғылымдарының докторы, Д.И. Менделеев атындағы Ресей химиялық
технология университетінің профессоры, Мәскеу, Ресей,

E-mail: Potapova.e.n@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5796-2265>;

Б. Жакипбаев — PhD, қауымдастырылған профессор, Академик Ә. Қуатбеков атындағы
Халықтар достығы университетінің инженерлік-технологиялық хабтың бас ғылыми қызметкері,
Шымкент, Қазақстан,

E-mail: bibol.ye.zhakipbayev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>;

Н. Жаникулов — PhD, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінің
қауымдастырылған профессоры, Қарағанды, Қазақстан,

E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>.

Аннотация. Цемент өндірісі энергияны көп қажет ететін сала болып табылады. Цемент клинкерін алуда энергия тиімділікті арттыру, декарбонизация

процессінде CO_2 және басқа да газдардың шығарындыларын төмендету, өндірістің технологиялық тиімділігін арттыру, жасыл экономикаға көшу негізгі мәселе. Бұл мәселені шешуде клинкер күйдіру процессінде шикізат қоспа құрамына техногенді өнеркәсіптік қалдықтарды енгізу өзектілігін көрсетеді. Зерттеу жұмыстары химиялық, электрондық микроскопиялық, энергия дисперсиялық микроанализ пайдалана отырып жүргізілді. Энергия және ресурс үнемдеу технологиясын қолдана отырып клинкер күйдіру процесінде шикізат қоспасының құрамына үш бірдей қалдықтарды қолданып, 78,9-79,83% Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау қалдықтары, 15,21-17,34% электротермофосфор шлагы және 3,59-5,15% Ачисай металлургия зауытының «мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері» шикізат қоспа құрамы әзірленді. Шикізат қоспа құрамдарды 1350-1400°C күйдірілді. Нәтижесінде алынған клинкердің құрамында бос CaO мөлшері 0,2-2,0% аралығында болды. Бұл көрсеткіш цемент клинкері үшін қойылатын талапқа толық сәйкес келеді. Алынған клинкердің сапасын анықтау кезінде клинкер түзілу процессіне Ачисай металлургиялық қалдық құрамында кездесетін CaF_2 минерализатор ретінде әсер еткендігі анықталды. Микроскопиялық талдау нәтижесінде клинкерде минералдардың таралуы біркелкі, минералдардың басым бөлігін C_3S және C_2S құрайтындығы байқалды. Аралық фаза 1-3% C_3A және 8-15% C_4AF минералдарынан тұрады. C_3S және C_2S минералдарының өлшемдері 10-100 мкм болды. Алынған ғылыми нәтижелер елімізде жұмыс жасайтын цемент зауыттарға Ачисай металлургия зауытының «клинкерін» реттеуші қоспа ретінде пайдалануға, темір шикізатын алмастырушы компонент ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Өндіріс қалдықтарды шикізат ретінде пайдалану арқылы өндірістің тиімділігін арттырып, CO_2 және NO_x газдардың шығарындыларын азайтуға, клинкер күйдіру температурасын 100-150°C төмендетуге, экологиялық мәселелерді шешуге ықпал жасайды.

Түйін сөздер: қоспалар, өнеркәсіп қалдықтары, энергияны үнемдеу, клинкер, цемент

©А. Куандыкова¹, Б. Таймасов¹, Е. Потапова², Б. Жакипбаев^{3*},
Н. Жаникулов⁴, 2025.

¹Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан;

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва, Россия;

³Университет дружбы народов имени академика А. Куатбекова,
Шымкент, Казахстан;

⁴Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова,
Караганда, Казахстан.

E-mail: bibol.ye.zhakipbayev@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КЛИНКЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

А. Куандыкова — PhD докторант, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,

E-mail: aknur.01.07.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4727-9195>;

Б. Таймасов — доктор технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,

E-mail: taimasovukgu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1844-4932>;

Е. Потанова — доктор технических наук, профессор, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия,

E-mail: Potanova.e.n@muctr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5796-2265>;

Б. Жакипбаев — PhD, ассоциированный профессор, главный научный сотрудник Инженерно-технологического хаба, Университет дружбы народов имени академика А. Куатбекова, Шымкент, Казахстан,

E-mail: bibol.ye.zhakipbayev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>;

Н. Жаникулов — PhD, ассоциированный профессор Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан,

E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>.

Аннотация. Производство цемента является энергоемкой отраслью промышленности. Основными вопросами являются повышение энергоэффективности при производстве цементного клинкера, сокращение выбросов CO_2 и других вредных газов в процессе декарбонизации; повышение технологической эффективности производства и переход к зеленой экономике. В решении этой проблемы актуальным является введение техногенных промышленных отходов в сырьевую смесь в процессе обжига клинкера. Исследования проводились с использованием химического, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа. С использованием энерго- и ресурсосберегающей технологии разработан состав сырьевой смеси с использованием трех отходов процесса обжига клинкера: 78,9-79,83% отходов дробления известняка месторождения Састобе, 15,21-17,34% электротермофосфорного шлака и 3,59-5,15% «клинкера вальцевания цинковых руд» Ачисайского металлургического завода. Обжиг сырья производился при температуре 1350-1400°C. Полученный клинкер содержал 0,2-2,0% CaO свободного. Данный показатель полностью соответствует требованиям, предъявляемым к цементному клинкеру. При определении качества полученного клинкера было установлено, что на процесс клинкерообразования оказывает влияние CaF_2 , присутствующий в отходах металлургического производства Ачисай, в качестве минерализатора. Микроскопический анализ показал, что распределение минералов в клинкере равномерное, причем большинство минералов представляют собой C_3S и C_2S . Промежуточная фаза состоит из 1–3% минералов C_3A и 8–15% минералов C_4AF . Размеры минералов C_3S и C_2S составляли 10–100 мкм. Полученные научные результаты позволят цементным заводам, работающим в нашей стране, использовать «клинкера вальцевания цинковых руд» Ачисайского металлургического завода в качестве регулирующей добавки и как компонент, заменяющий железное сырье. Использование отходов в качестве сырья повышает эффективность производства, сокращает выбросы

CO₂ и NO_x, снижает температуру обжига клинкера на 100-150°C, способствует решению экологических проблем.

Ключевые слова: добавки, отходы промышленности, энергосбережение, клинкер, цемент

Кіріспе. Қазіргі уақытта еліміздің энергетикалық және экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етуде энергияны тиімді пайдалану және энергия үнемдеу саясатын іске асыру маңызды шаралардың бірі болып табылады. Өнеркәсіпті жаңғыртудың негізгі құралдарының бірі жаңа инновациялық технологиялар мен шешімдерді енгізуді қажет етеді, бұл өз кезегінде ғылым мен технологиялардың трансфертін дамытудың белсенді іс-қимылымен ынталандыру арқылы іске асырылады. Цемент өндірісіндегі көмірқышқыл газдың шығарындыларының негізгі көздері – отынды жағу кезінде бөлінетін түтінді газдар құрайды (Luis, және т.б., 2021). Сонымен қатар, цемент өндірісінде декарбонизациялау процессінде бөлінетін CO₂ шығарындыларын азайтудың қолданыстағы стратегиялары, ол экономикалық ынталандырудың болмауымен шектеледі (Mikulcic және т.б., 2013; Antunes және т.б., 2022). Энергия үнемдеу саясатында Үкімет үдемелі «Индустриялық-инновациялық дамудың Мемлекеттік бағдарламасы» (2010-2014 жылдар) және «ҚР-ның Индустриялық-инновациялық даму - 2 Мемлекеттік бағдарламасы» (2015-2019 жылдар) шеңберінде жалпы ішкі өнімнің энергия сыйымдылығын 2015 жылға қарай кемінде 10 %-ға және 2020 жылға қарай 25 %-ға төмендету міндетін қойған болатын. Қазақстандағы энергия ресурстарды ұтымды пайдалану құрылымын талдау барысында, энергия ресурстарының негізгі тұтынушылары ретінде өнеркәсіп секторы белгіленген, оның ішінде көпшілігі ескірген технологиялар мен айтарлықтай тозығы жеткен құрал-жабдықтарды пайдаланатын цемент өнеркәсібі болып табылатындығы анықталған (Құрылыс индустриясын дамыту бағдарламасы, 2010; Мемлекеттік бағдарлама, 2020).

Құрылыс материалдары өнеркәсібінің барлық салаларының ішінде энергияны көп қажет ететін өндіріс цемент өнеркәсібі. Негізгі энергия тұтыну көздеріне ұсатқыш диірмендер және пештерді жатқызуға болады (Планк, және т.б., 2016).

2023 жылы Қазақстанда 7,1 млн тонна цемент өндірілді, бұл 2022 жылдың сәйкес кезеңімен салыстырғанда 1,8 %-ға артық (Жаникулов, және т.б., 2022). Осу қарқыны бойынша Түркістан облысы сенімді түрде көш бастап тұр, елдегі 23,8 % цемент шығару көлемі аталған облысқа тиесілі. Осының есебінен 2023 жылы қаңтар-қыркүйек айларында Түркістан облысы мен Шымкент қаласын қоса алғанда 1,9 млн тонна портландцемент өндіру арқылы бірінші орынға шықты. Түркістан облысында «Standard Cement» ЖШС, «Shymkent Cement» АҚ және «Sas-Tobe Technologies» ЖШС компанияларының цемент зауыттары жұмыс істейді, олар энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру саласындағы келісімге қол қою арқылы өнімнің энергия сыйымдылығын 15 %-ға төмендетуді жоспарлаған (Kuandykova, және т.б., 2023).

Аталған келісімді орындау «SAS-Tobe Technologies» цемент зауыты үшін үш негізгі бағыт бойынша жаңғырту бағдарламасы әзірленген болатын:

- ескі жабдықты жаңарту және жаңа жабдықты орнату арқылы пештердің өнімділігін арттыру және отын шығынын азайту;
- пештердің электр сүзгілерін қайта құру есебінен экологиялық проблемаларды шешу;
- өнімнің өзіндік құнын төмендету және бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін кәсіпорынды көмір отынына ауыстыру.

Қазіргі уақытта, «SAS-Tobe Technologies» цемент зауытында тазарту жүйелерін жаңғырту жұмыстары аяқталды. Аталған бағыттар бойынша цемент өндіру кезінде пайда болатын қатты ластаушы заттарды 99,5 % қағып ұстап қалатын жаңа сүзгілер орнатты. Бұл қондырғы атмосфераға зиянды қалдықтарды шығаруды ұстап қалуды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, зауытта клинкердің ескірген салқындату жүйелерін ауыстырып, соңғы буын – даниялық FL-Smidt компаниясының тоңазытқыштарын орнату бойынша энергия үнемдейтін технологиялар белсенді түрде енгізілген болатын. Айналмалы пешті қатты отынға ауыстыру аясында зауытта көмір диірменін монтаждау жүргізілген, бұл өнімнің өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді (Жаникулов, және т.б., 2022). Цемент өнеркәсібінде шикізат қоспа құрамына әртүрлі өнеркәсіп қалдықтарын өндіру арқылы оларды кәдеге жарата алады. Бұл зерттеу жұмыста Ачисай металлургия зауытының «мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкер қалдығын» және Жаңа Жамбыл фосфор зауытының электротермофосфор шлағын пайдалану қарастырылған. Бұл өндіріс қалдықтарды пайдалану қосымша энергияны қажет етпейді, сонымен қатар айналмалы пештің жентектелу процессінде цемент клинкерінің минерал түзілу процессін жеделдетуге септігін тигізеді (Жаникулов, және т.б., 2022).

Материалдар мен зерттеу әдістері. Портландцемент клинкерін алу үшін шикізат шихтасының құрамына сазды компонент лесс, Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау кезінде жинақталған қалдықтары, Ачисай металлургиялық зауытының «мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері» балама шикізат және реттеуші қоспа ретінде пайдаланылды және Жаңа Жамбыл фосфор зауытының электротермофосфор шлактары зерттелді. Соңғы онжылдықта пиритті оғарлардың үлкен тапшылығына байланысты Қазақстанның көптеген цемент зауыттары темір кенін және өнеркәсіптің кейбір қалдықтарын пайдалануға көшті. Құрамында темір бар жергілікті қалдықтарды іздеу алюминий-феррит фазасын нығайту үшін өте маңызды. Цементтердің алюминий феррит фазасы $C_2A_xF_{1-x}$ құрамының қатты ерітінділері болып табылады. Мұндай қатты ерітінділер сериясының экстремалды бөлігі екі кальцийлі феррит C_2F болып табылады. Бұл құрылымдық позицияларды ескере отырып, Ca_2FeVIO_5, мұнда C_2F құрамындағы темір катион (октаэдрлерде) және анион (тетраэдрлерде) рөлін атқарады (Alwaeli, және т.б., 2020).

Портландцемент клинкерінің негізгі минералды фазасы құрамы Ca, Si, Al, Fe элементтерінен тұрады. Бұл элементтер цемент клинкерінің минерал түзілу процессіне қатысу арқылы силикатты фазалардың құрамын қалыптастырады (Fateh, 2022).

Цемент ертіндісінің қатаюы алғашқы кезеңде беріктік пайда болатын тас тәрізді дененің түзілуімен жүреді. Негізгі клинкер минералдары – C_3S , C_2S , C_3A және C_4AF гидратация процесінде цементтің қатаюына жауап береді. C_3S – цементтің ерте беріктігіне жауапты негізгі фаза, C_2S – баяу гидратацияланады, беріктіктің ұзақ уақыттан соң қалыптасуына жауапты фаза, C_3A – жоғары реактивті, су мен гипс болған кезде жылдам қатаю процессіне қатысады, C_4AF – цементтің түсін анықтайды және қатаюдың бастапқы кезеңінде рөл атқарады (Pribulova, және т.б., 2016).

Айта кетсек, алит (C_3S) бүкіл кезең бойы беріктікті арттыру процесіне қатысады, сумен әрекеттесуде өте белсенді және жоғары беріктікті қамтамасыз етеді. Сондай-ақ, алит қатаюдың бірінші айында тез қатаю қабілетіне ие болады. Белит (C_2S) ең аз белсенді минерал болып табылады және оның қатаю процессіне әсері цементті араластырғаннан кейін бір айдан кейін ғана басталады, бірақ оның беріктікке әсері бетон беріктігінің жоғарылауының бүкіл кезеңінде жылдар бойы сақталады. Үшқальций алюминаты (C_3A) ең белсенді минерал болып табылады – ол цемент тасының ерте беріктігіне жауап береді, ал C_4AF сумен реакциядағы белсенділігі, қатаю жылдамдығы және беріктігінің жоғарылауы бойынша C_3S және C_2S арасында аралық фаза ретінде орындалады (Yingyi, 2019). Шикізат материалдарының сапалық сипаттамаларын анықтау үшін стандартты және жалпыға бірдей танылған МЕСТ стандартты талдау әдістері қолданылды.

Шикізат материалдардың, шикізат қоспалар мен клинкерлердің рентгендік энергодисперсиялық микроанализі, рентгенофазалық және электронды-микроскопиялық зерттеу әдістерін пайдаланып орындалды. Ғылыми мақаланың зерттеу жұмыстары Д.И. Менделеев атындағы Ресей химия-технологиялық университеті жанындағы Д.И. Менделеев атындағы ұжымдық пайдалану орталығының сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) зертханасында және рентгенофлуоресцентті спектроскопия зертханасында (РФЛС) орындалған. Сонымен қатар, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Конструкциялық және биохимиялық материалдар» инженерлік бейіндегі өңірлік сынақ зертханасында JSM-6490LV расторлы электронды микроскоп көмегімен зерттелді. Алынған клинкерлердің микроқұрылымын зерттеу JSM6510LV (JEOL, Жапония) сканерлейтін электронды микроскопта максималды х300000 есе ұлғайту арқылы жүргізілді. Алынған клинкердің фазалық құрамын талдау DX2700BH рентгендік дифрактометрде жүргізілді (Dandong Haoyuan Instrument Co., Ltd., Қытай).

Нәтижелер және талқылаулар. Шикізат пен өнеркәсіптік қалдықтарға химиялық талдау жасалды. Көрсетілген шикізат материалдар негізінде цемент клинкерін алу көрсетілген.

1 – кесте. Табиғи, дәстүрлі емес шикізат пен өндірістік қалдықтардың химиялық құрамы

Табиғи және техногендік шикізат	Химиялық құрамы, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	жжж
Лесс	50,54	10,35	4,43	13,91	2,67	0,21	13,06

Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау қалдықтары	9,63	1,72	1,26	46,0	0,55	1,15	36,2
Ачисай металлургия зауытының мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері	27,55	5,74	33,5	17,33	6,07	1,31	6,5
Электротермофосфор шлағы	42,68	0,74	0,17	41,18	4,55	0,4	-

Шикізаттың химиялық құрамынан бөлек, оның минералогиялық құрамы да маңызды, себебі бұл технологиялық үдеріс пен клинкерді күйдіру және цемент қасиеттеріне тікелей әсер етеді. 2-кестеде Састөбе кен орнындағы әктасты ұсату қалдықтарының минералогиялық құрамы келтірілген.

2 – кесте. Састөбе кен орны әктасты ұсату қалдықтарындағы минералдар мөлшері

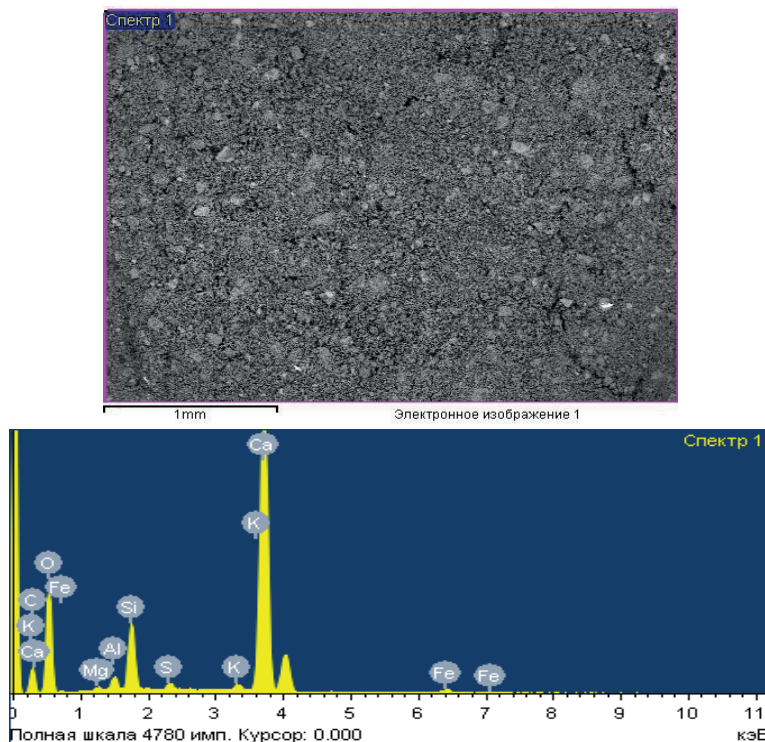
Шикізат	Минералогиялық құрамы, сал. %								
	Кальцит	Доломит	Кварц	Иллит	Хлорит	Альбит	K-Feld spar	R, wp	CO ₂
Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау қалдықтары	80,6	2,2	9,3	2,9	1,5	2,3	1,3	16,32	36,5

2-кестедегі мәліметтерге сәйкес, Састөбе кен орнындағы әктасты ұсату қалдықтарында кварц пен сазды минералдар – иллит, хлорит, альбит мөлшері жоғары. Өндірістің өнеркәсіптік қалдықтары түзілу процесінде термиялық өңдеуге ұшырамаған қалдықтарға (Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау қалдықтары); термиялық өңдеуге ұшыраған қалдықтарға (Ачисай металлургия зауытының мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері; Жаңа Жамбыл фосфор зауытының электротермофосфор шлағы) бөлінеді (Абдеев, 1985).

Жоғарыда сипатталған өнеркәсіп қалдықтары ресурстарды және энергияны үнемдейтін шикізат ретінде қызығушылық тудырады. Оларды пайдалану карьерлерде осы немесе басқа материалды өндіру қажеттілігін жояды, яғни клинкерді өндіру кезінде бұрғылау және жару жұмыстарын жүргізуді, әктас немесе сазды жынысты ұсақтау қажет етпейді. Олар алдыңғы процесте термиялық өңдеуден өткен, қалдықтардың құрамында кальций мен магний карбонаттары жоқ, кальций оксиді карбонатты емес күйде, белит, псевдоволластонит сияқты төмен негізді минералдар түрінде, сазды минералдар ылғалсызданып, ыдырайды. Оларды пайдалану кезінде шикізат шихтасын декарбонизациялау процессіне кететін жылу шығындары, пештегі жалпы меншікті отын шығыны, клинкер алу үшін шикізат шығыны айтарлықтай азайып, пештің өнімділігі арттырады (Marsh, 2021).

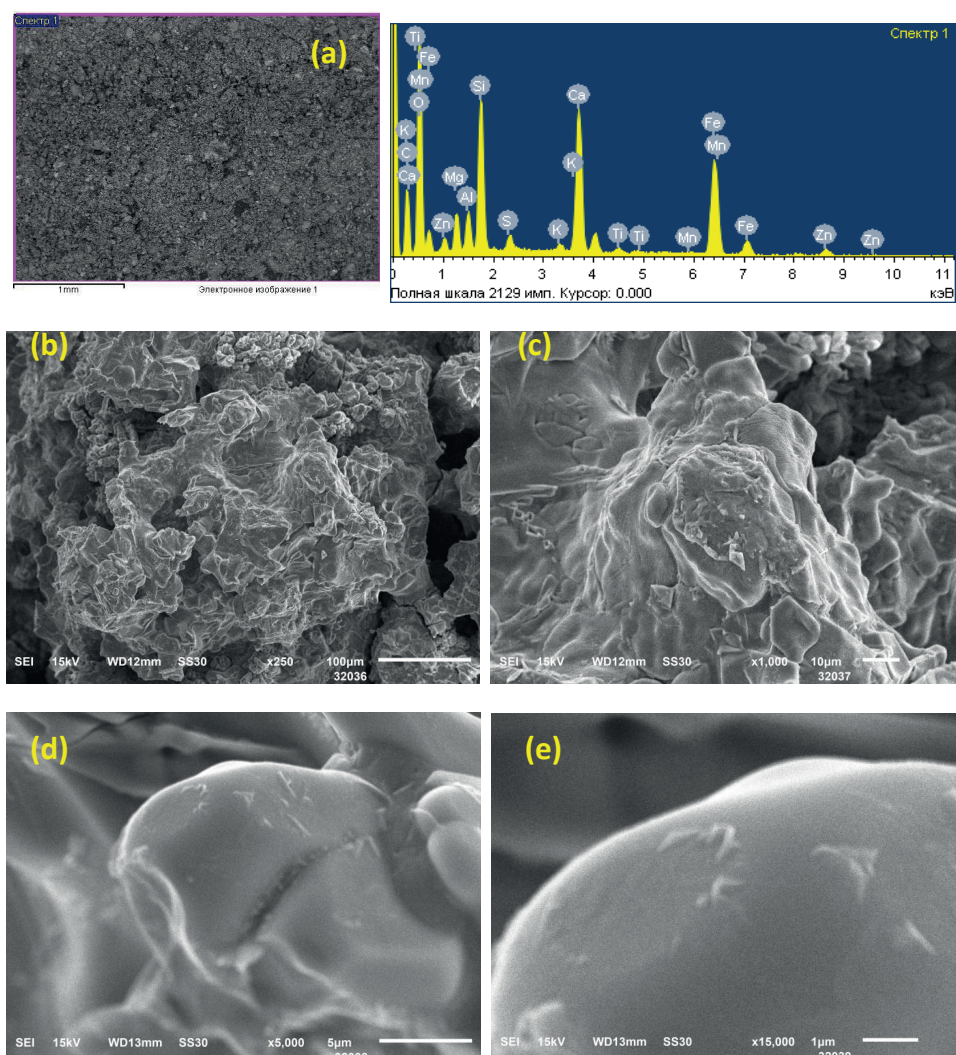
Электронды микроскопиялық зерттеу әдісі арқылы шикізаттарды талдау жүргізілді (Шадров, 2014). 1-3-суреттерде Састөбе кен орнының әктасты ұсату қалдықтарының (1-сурет), Ачисай металлургия зауытының мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкерінің (2-сурет), Жаңа-Жамбыл

фосфор зауытының электротермофосфор шлагының (3-сурет) электронды микроскопиялық талдау нәтижелері көрсетілген. Састөбе кен орнының әктасты ұсату қалдықтарының сканерлеуші электронды микроскопиялық талдау нәтижесі бойынша химиялық құрамы (%): SiO_2 - 9,62; Al_2O_3 - 1,71; Fe_2O_3 - 1,26; CaO - 46,0; MgO - 0,55; SO_3 - 1,15; K_2O - 1,59 (1-сурет).



Сурет 1. Састөбе кен орнының әктас ұсақтау қалдықтарының микроқұрылымы және элементтік құрамы

Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау қалдықтары зауыт ақ цемент түрін шығарған кезеңде пайда болды. Карьерде әктасты байыту жүзеге асырылды. Ұсатқыштан кейін әктас скринингтен өтіп, ақ клинкердің актығы мен әртүрлілігін төмендететін темір оксидтерінің көп мөлшері бар саз қоспаларымен 15-20 мм-ге дейін ұсақ фракцияны електен өткізу арқылы байытылған. Осы уақыт ішінде үйіндіде бірнеше миллион тонна қалдықтар жинақталды. Химиялық құрамы бойынша ұсақтау қалдықтарында кремний оксидінің мөлшері жоғары, CaO мөлшері біршама төмен. Жүргізілген зерттеулер әктас ұсақтау қалдықтарының цемент клинкерін алу үшін жарамды екендігін көрсетті. Ачисай металлургия зауытының «мырышты рудаларды вельцевалау клинкері» бойынша химиялық құрам (%) мынадай: SiO_2 - 13,82; Al_2O_3 - 3,23; Fe_2O_3 - 24,1; CaO - 12,7; MgO - 3,76; SO_3 - 1,5; K_2O - 0,37; TiO_2 - 0,65; Mn_2O_3 - 0,32; ZnO - 3,01; C (көміртек) - 23,15 (2-сурет).

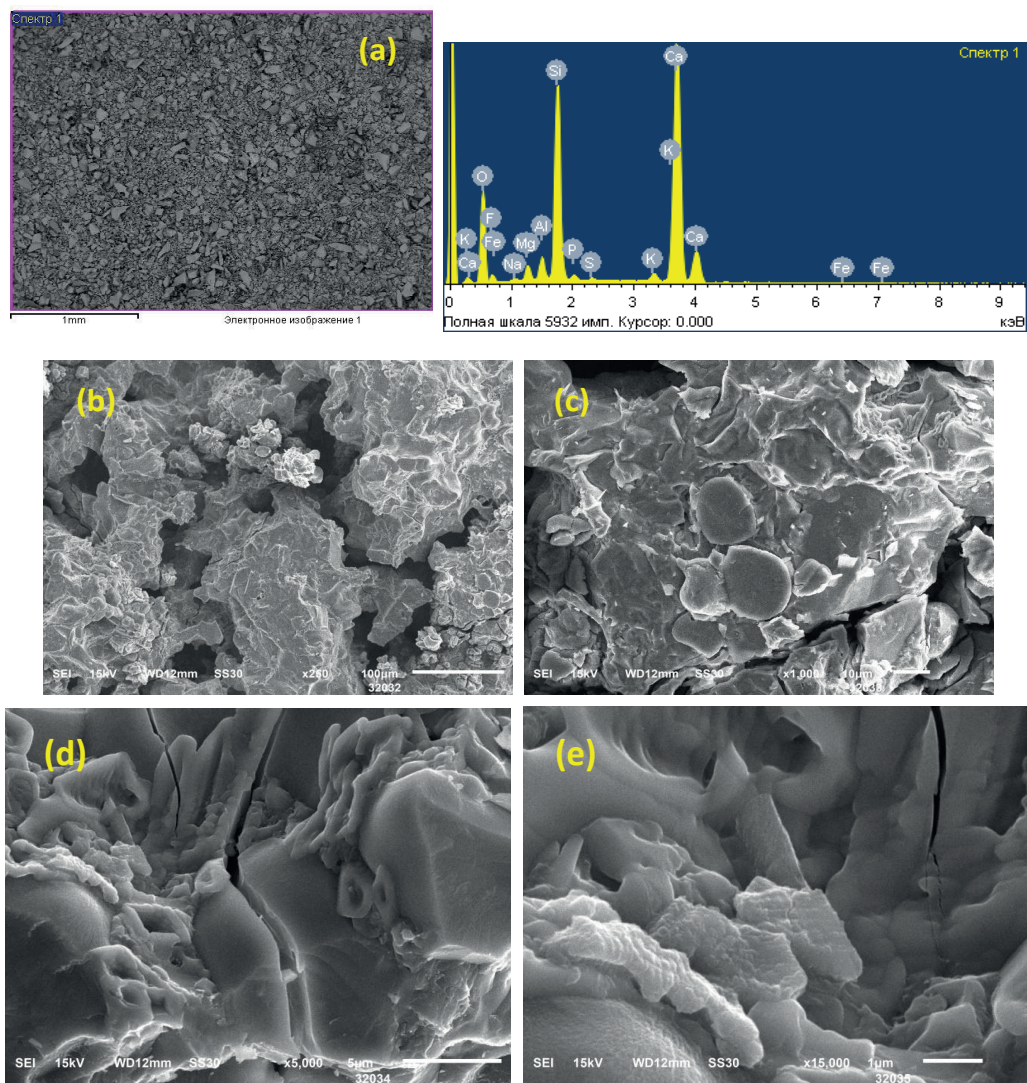


Сурет 2. Ачисай металлургиялық зауытының «мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкерінің» элементтік құрамы және (a); (b, c, d, e) РЭМ-микроқұрылымы

«Вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері» құрамында 15-20%-ға дейін кокс (көмір) бар, бұл клинкерді күйдіру кезінде қолданылатын көмірдің отын шығынын азайтады. Ачисай металлургиялық зауытының үйінділерінде 4,6 миллион тоннадан астам «мырыш кені вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері» жинақталған. Ащысай металлургиялық комбинатының «мырыш кені вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері» құрамында 24-33%-ға дейін темір оксидтері кездеседі. Шын мәнінде, бұл портландцемент клинкерлерін алу үшін шикізат қоспасына темір құрамдас түзеткіш қоспа ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, 3,01% мырыш тотығы күйдіру процесіне минерализатор ретінде әсер етіп, жентектелу процессінде температураның

төмендеуіне мүмкіндік жасайды. Соның нәтижесінде отын шығыны азайып, пеш өнімділігі артады, ал CO_2 шығарындылары азаяды.

Шикізат қоспаларында полиэвтектикалық аралық балқымалар пайда болатын қатты фазалық реакциялар мен жымдасу процестерінің заңдылықтарына сүйене отырып, шикізат компоненттерін механикалық белсендіру маңызды рөл атқарады. Сондықтан шикізат қоспасына алдын ала күйдірілген немесе балқытылған (шыны тәрізді) силикаттарды қосу әсіресе өндірістік процесті жеделдетеді. Ол үшін шикізат қоспа құрамына қосымша материал ретінде Жаңа Жамбыл фосфор зауытының электротермофосфор шлагын қолданады (3-сурет).



Сурет 3. Жаңа Жамбыл фосфор зауытының электротермофосфор шлагының элементтік құрамы және (a); (b, c, d, e) РЭМ-микроқұрылымы

Ең қолайлы химиялық және минералогиялық құрамы шыны тәрізді фазасы бар (90-95%) Жаңа Жамбыл фосфор зауытының түйіршіктелген электротермофосфор шлактары болып табылады, оның құрамында (%): $\text{CaO} - 43,91$; $\text{SiO}_2 - 32,78$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3,27$; $\text{MgO} - 2,49$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,57$; $\text{F}_2\text{O}_3 - 1,5$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 1,4-2,0$ кездеседі.

Клинкерде балқымалы фаза мен оның ішінде кристалдар қатар жүреді. Алит кристалдарының кеңеюі барысында пайда болатын жарықтар ұнтақтауды жеңілдетеді.

Цемент алу үшін шикізат қоспаларының құрамы есептелген. Есептеулер табиғи және әктас қалдықтары мен техногендік шикізатты пайдалана отырып (Bogue, 1950) формулалар бойынша жүргізілді.

Шикізат қоспаларды ұнтақтау үшін диаметрі 20 мм өлшемде, 10 кг мөлшерінде ұнтақтайтын металл шарлардың жиынтық ассортиментімен жүктелген СВМ-3 зертханалық диірменде 30 минут ішінде ұнтақталды. Цементтің меншікті бетінің ауданы мен бөлшектердің орташа мөлшері ПСХ-К құрылғысының көмегімен анықталды. ПСХ-К құрылғысы қатты материалдардың дисперсиялық процестерін зерттеуге және басқаруға арналған. Барлық есептеулер мен өлшемдер автоматтандырылған және ноутбук экранында көрсетіледі. Бетінің меншікті көлемін өлшеу диапазоны $200-50\,000\text{ см}^2/\text{г}$, орташа бөлшектердің мөлшері $0,5-250\text{ мкм}$. Құрылғының қателігі 1% аспайды. ПСХ-К бойынша алынған нәтижелер еуропалық (ISO) және американдық (ASTM) стандарттарына сәйкес келеді. Талдау үшін әрбір материалдың 10-15 г ұнтағы қажет. Өлшеу қондырғысына плунжері бар кюветка орналастырылған. Содан кейін кюветкадағы ұнтақ плунжермен тығыздалады. Құрылғыға енгізілген компьютерлік бағдарламаның көмегімен беттің меншікті ауданы мен бөлшектердің орташа өлшемі анықталады. Бұл параметрлер құрылғы экранында көрсетіледі. Өлшеу нәтижелері хаттама ретінде ноутбук экранында көрсетіледі.

20 МПа қысымда дайындалған шикізат қоспаларынан $\varnothing 30\text{ мм}$ және биіктігі 20-25 мм таблеткалар қалыпталды. Таблеткаларды күйдіру 1350 және 1400°C жоғары температураға дейін көтерілетін зертханалық пеште жүргізілді. Температураны максимумға дейін көтеру 2 сағат, жоғары температурада ұстау уақыты - 30 минут. Содан кейін клинкер ауада күрт салқындатылды.

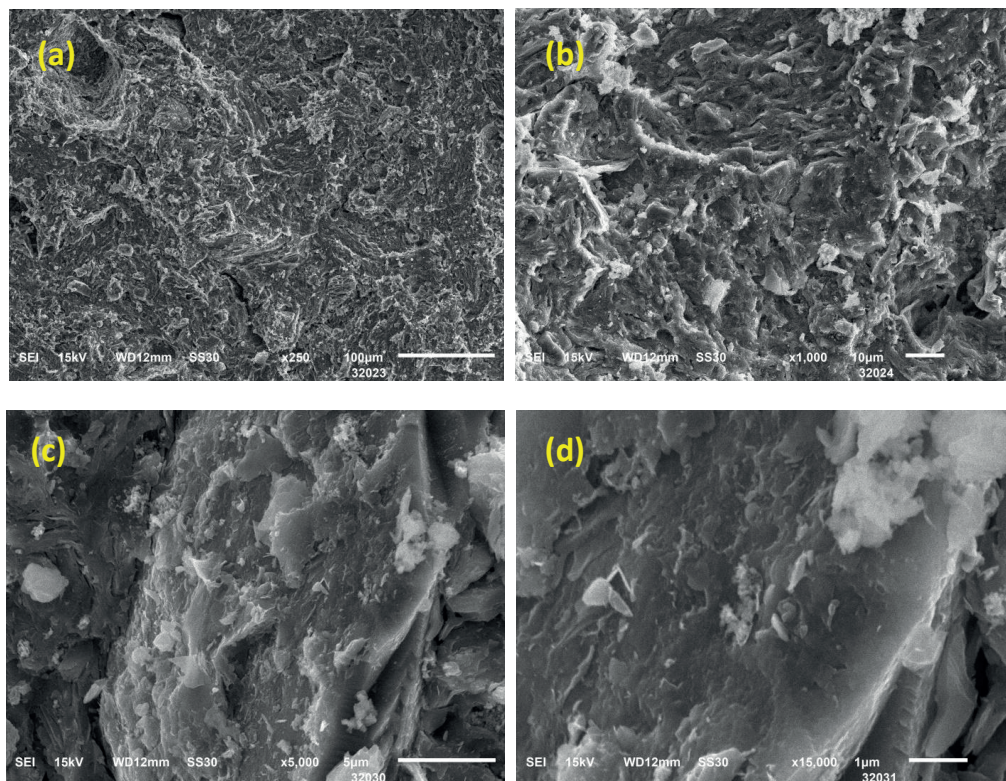
Өнеркәсіп қалдықтарының үш түрінен тұратын шикізат қоспаларды күйдіру процестерін зерттеу үшін ҚК (қанығу коэффициенті) 0,90-0,92 болатын 4 шикізат қоспасының құрамы (3-кесте) жасалды:

- Састөбе кен орнының әктасын ұсақтау қалдықтары (А);
- Жаңа Жамбыл фосфор зауытының электротермофосфор шлағы (В);
- Ачисай металлургия зауытының «мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкері» (С).

3 – кесте. Шикізат қоспаларының құрамдарының ресурс-энергия үнемдейтін клинкерлердегі СаО байланыстыру процесіне әсері

Қоспа нөмірі	Шикізат қоспасының компоненттері, %			ҚК	Модульдер		Бос СаО құрамы, %		1400°C кезінде сұйық фазаның саны, L%
	A	B	C		n	p	1350°C	1400°C	
1	78,90	15,93	5,15	0,90	3,5	0,64	1,4	0,2	26,10
2	78,82	17,34	3,84	0,90	4,0	0,73	1,9	0,3	24,45
3	79,90	15,21	4,89	0,92	3,5	0,66	1,5	0,2	25,83
4	79,83	16,58	3,59	0,92	4,0	0,76	2,0	0,4	24,20

3-кестенің нәтижесін көріп отырғанымыздай, шикізат қоспаларын 1350 °C күйдіру кезінде бос СаО_{бос} мөлшері 2 %-дан, ал 1400 °C кезінде бос СаО_{бос} мөлшері 0,2-0,4 %-дан аспады. Құрамында СаF₂ бар «В» қалдықтары мен «С» қалдықтары шикізат қоспасын күйдіру процесіне айтарлықтай минерализатор ретінде әсер етті. Бұл күйдіру температурасын 100°C төмендетуге және сапалы портландцемент клинкерін алуға мүмкіндік берді (4-сурет).



Сурет 4. №4 клинкердің СЭМ-микроқұрылымы (a, b, c, d)

4-суретте №4 клинкердің микроқұрылымының электронды-микроскопиялық суреттері көрсетілген. Клинкер минералдарының кристалдануы біркелкі. Клинкер минералдарының синтезі табиғи шикізаттан алынатын портландцемент

клинкеріне қарағанда 50-100°C төмен аяқталды. Бұл ретте, пеште жағуға жұмсалатын отын шығыны және ауаға зиянды газдар шығарындылары азаяды, техногенді қалдықтарды кәдеге жаратылады және қоршаған ортаның ластануы азаяды.

Осылайша, зерттеу нәтижесінде 1350 °C температурада клинкерді күйдіру кезінде табиғи компоненттердің орнына зерттелген өнеркәсіп қалдықтарды пайдаланған кезде энергия және ресурстар үнемдеуге, табиғи шикізат әктас пен лесс карьерлерін сақтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Қорытынды. Ресурс үнемдеу технологияларын пайдалана отырып, портландцемент клинкерін алу мүмкіндігі көрсетілген. Зерттелген өнеркәсіп қалдықтарының химиялық және минералогиялық құрамы, оларды аз энергияны қажет ететін портландцемент клинкерлерін алу үшін пайдалануға мүмкіндік беретіні анықталды. Табиғи шикізатты көп тоннажды өнеркәсіптік қалдықтармен толық немесе ішінара ауыстырған кезде портландцементті клинкерді алу үшін шикізат шихталарының жаңа тиімді құрамдары әзірленді. Оңтүстік Қазақстанның цемент зауыттары үшін Ачисай металлургиялық зауытының құрамында темірі бар «мырыш кендерін вельц-әдіспен өңдеу кезінде түзілетін клинкерімен» алмастыру перспективасы көрсетілген. Ачисай металлургиялық қалдықтың цемент клинкерін күйдіруде минерализатор рөлін атқарады және шикізат қоспасына көмір енгізу арқылы отын шығынын төмендететіндігін көрсеткен. Өнеркәсіп қалдықтарынан тұратын шикізат қоспаларды күйдіру 1350 °C кезінде клинкер түзілу процесі толығымен аяқталады. Портландцемент клинкерді төмен температурада алу табиғи отын шығынын азайтуға және ауаға CO₂ шығарындыларын азайтуға көмектеседі.

Өнеркәсіп қалдықтары негізінде әзірленген шикізат шихталарынан құрамында C₃A 1,3-1,7 % болды, бұл МемСТ 31108-2020 сәйкес келетін жалпы құрылыс цементтерін де, сульфатқа төзімді цементтерді алуға мүмкіндік береді (ГОСТ 31108–2020, 2020).

Әдебиеттер

Luis M. Romeo, David Catalina, Pilar Lisbona, Yolanda Lara, Ana Martinez (2021) Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, and CO₂ capture systems. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, — 1(1). — P. 72-82. DOI:10.1002/ghg 3.5

Mikulcic H., Vujanovic M., Markovska N., Filkoski R.V., Ban M., Dujc N. (2013) CO₂ Emission reduction in the cement industry. *Chemical engineering transactions*, — 35. — P. 703-708. DOI:10.3303/CET1335117

Antunes M., Santos R.L., Pereira J., Rocha P., Horta R.B., Colaço R. (2022) Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review. *Materials*, — 15. — P. 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>

Программа по развитию строительной индустрии и производства строительных материалов в Республике Казахстан на 2010-2014 годы. Астана, — 2010. — 90 с.

Государственная Программа по индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2021-2025 годы. Астана, — 2020. — 95 с.

Планк Й., Таймасов Б.Т., Штефан Д., Хирш К., Жакипбаев Б.Е. (2016) Химия строительных материалов. Алем: Шымкент, — 2016. — 220 с.

Жаникулов Н.Н., Жакипбаев Б.Е., Дауренбеков К.К. (2022) Химическая технология производства портландцемента. ТОО «Лантар Трейд»: Алматы, — 2022. — 187 с.

Kuandykova A., Zhanikulov N., Taimasov B., Zhakipbayev B. (2023) Investigation of the use of clinker of the ashchisai metallurgical plant as additive in the production of portlandcement clinker. Reports of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, — 3(347). — Б. 146-156. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1483.232>

Alwaeli M., Golaszewski J., Niesler M., Pizon J., Golaszewska M. (2020) Recycle option for metallurgical sludge waste as a partial replacement for natural sand in mortars containing CSA cement to save the environment and natural resources. Journal of Hazardous Materials, — 398. — 123101. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123101>

Fateh Belaid (2022) How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? Resources, Conservation & recycling advance, — 15. — 200084. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200084>

Alena Pribulova, Peter Futas, Dana Baricova (2016) Processing and utilization of metallurgical slag. Production Engineering archives, — 11(2). — P. 2-5.

Yingyi Zhang (2019) Recovery and utilization of metallurgical solid waste. — 110. — 76826. DOI10.5772/intechopen.76826

Абдеев М.А., Колесников А.В., Ушаков Н.Н. (1985) Вальцевание цинк-свинец содержащих материалов. Москва, Россия. — 185 с.

Marsh A.T.M., Yang T., Au-Amankwah S., Bernal S.A. (2021) 11-Utilization of metallurgical wastes as raw materials for manufacturing alkali-activated cements. Cement-Based materials. — P. 335–383. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00009-7>

Шадров В.И. (2014) Растровый электронный микроскоп JSM-6490L с системами энергодисперсионного микроанализа INCAEnergy.

Bogue R.H. (1950) The Chemistry of Portland Cement. Reinhold Pub. Corp: New York, — 1950, — P. 326.

ГОСТ 31108–2020 Цементы общестроительные. Технические условия (2020) Стандартинформ. Москва, — 12 с.

References

Luis M. Romeo, David Catalina, Pilar Lisbona, Yolanda Lara, Ana Martinez (2021) Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, and CO₂ capture systems. Greenhouse Gases: Science and Technology, — 1(1). — P. 72-82. DOI:10.1002/ghg 3.5 (in English)

Mikulcic H., Vujanovic M., Markovska N., Filkoski R.V., Ban M., Dujc N. (2013) CO₂ Emission reduction in the cement industry. Chemical engineering transactions, — 35. — P. 703-708. DOI:10.3303/CET1335117 (in English)

Antunes M., Santos R.L., Pereira J., Rocha P., Horta R.B., Colaço R. (2022) Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review. Materials, — 15. — P. 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209> (in English)

Programma po razvitiyu stroitel'noy industrii i proizvodstva stroitel'nykh materialov v Respublike Kazakhstan na 2010-2014 gody [Program for the development of the construction industry and production of building materials in the Republic of Kazakhstan for 2010-2014]. Astana, — 2010. — P. 90. (in Russian)

Gosudarstvennaya Programma po industrial'no-innovatsionnomu razvitiyu Respubliki Kazakhstan na 2021-2025 gody [State Program for Industrial and Innovative Development of the Republic of Kazakhstan for 2021-2025]. Astana, 2020. — P. 95. (in Russian)

Plank J., Taimasov B.T., Stefan D., Hirsch K., Zhakipbayev B.Ye. (2016) Khimiya stroitel'nykh materialov [Chemistry of building materials]. Alem: Shymkent, — 2016. — P. 220. (in Russian)

Zhanikulov N.N., Zhakipbayev B.Ye., Daurenbekov K.K. (2022) Khimicheskaya tekhnologiya proizvodstva portlandsementa [Chemical technology of Portland cement production]. Lantar Trade LLP: Almaty, — 2022. — P. 187. (in Russian)

Kuandykova A., Zhanikulov N., Taimasov B., Zhakipbayev B. (2023) Investigation of the use of clinker of the ashchisai metallurgical plant as additive in the production of portlandcement clinker. Reports of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, — 3(347). — P. 146-156. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1483.232> (in English)

Alwaeli M., Golaszewski J., Niesler M., Pizon J., Golaszewska M. (2020) Recycle option for metallurgical sludge waste as a partial replacement for natural sand in mortars containing CSA cement to save the environment and natural resources. *Journal of Hazardous Materials*, — 398. — P. 123101. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123101> (in English)

Fateh Belaid (2022) How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation & recycling advance*, — 15. — 200084. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200084> (in English)

Alena Pribulova, Peter Futas, Dana Baricova (2016) Processing and utilization of metallurgical slag. *Production Engineering archives*, — 11(2). — P. 2-5. (in English)

Yingyi Zhang (2019) Recovery and utilization of metallurgical solid waste. — 110. — 76826. DOI10.5772/intechopen.76826 (in English)

Abdeev M.A., Kolesnikov A.V., Ushakov N.N. (1985) Val'tsevaniye tsink-svinets sodержashchikh materialov [Rolling of zinc-lead containing materials]. Moscow, Russia. —P. 185. (in Russian)

Marsh A.T.M., Yang T., Au-Amankwah S., Bernal S.A. (2021) 11-Utilization of metallurgical wastes as raw materials for manufacturing alkali-activated cements. *Cement-Based materials*. — P. 335-383. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00009-7> (in English)

Shadrov V.I. (2014) Rastrovyy elektronnyy mikroskop JSM-6490L s sistemami energodispersionnogo mikroanaliza INCAEnergy [Scanning electron microscope JSM-6490LV with energy dispersive microanalysis systems INCAEnergy]. (in Russian)

Bogue R.H. (1950) *The Chemistry of Portland Cement*. Reinhold Pub. Corp: New York, — 1950. — P. 326. (in English)

GOST 31108-2020 Tsementy obshchestroitel'nyye. Tekhnicheskiye usloviya (2020) [General construction cements. Technical specifications]. Standartinform, Moscow, — 2020. — 12 p. (in Russian)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 2. Number 354 (2025), 258–274

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.357>

UDC 66.095.81:620.193

MRNTI 31.35.15, 31.15.17, 53.43.13

© X.A. Leontyeva^{1,2*}, G.M. Khussurova¹, D.S. Puzikova^{1,2}, A.N. Nefedov¹,
M. Zhurynov¹, 2025.

¹ «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry», JSC,
Almaty, Kazakhstan;

² «Al-Farabi Kazakh National University», Almaty, Kazakhstan.

E-mail: k.leonteva@ifce.kz

PERFORMANCE AND APPLICATION OF ORGANIC CORROSION INHIBITORS IN THE PETROCHEMICAL INDUSTRY OF THE CIS COUNTRIES. REVIEW

Leontyeva X.A. — PhD-student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; junior researcher laboratory of electrochemistry and nanotechnological processes «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry», JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: k.leonteva@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4740-1720>;

Khussurova G.M. — Master of chemistry. Researcher laboratory of electrochemistry and nanotechnological processes «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry», JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: g.khussurova@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8700-7472>;

Puzikova D.S. — PhD-student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; Senior researcher laboratory of electrochemistry and nanotechnological processes «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry», JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: d.puzikova@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5275-4769>;

Nefedov A.N. — Candidate of chemical science, Chief researcher, Head of the «Center of Competence on Corrosion Problems», «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry», JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: a.nefedov@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-0398>;

Zhurynov M. — Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Electrochemistry and Nanotechnological Processes, General Director of «D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry», JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: mur.zhurinov@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5003-5037>.

Abstract. Metal corrosion is one of the most serious technical and economic problems in the oil and gas industry, as it leads to equipment destruction, hydrocarbon leaks, environmental pollution, emergencies, and significant material losses. This issue is especially relevant in the CIS countries – particularly Kazakhstan, Russia, and Uzbekistan – during field development and refinery operations. In these regions, many factors accelerate the corrosion process: complex natural and climatic conditions (sharp temperature changes, high humidity, salts and sand in soil and groundwater), and the

presence of chemically aggressive components common in production environments, such as H_2S , CO_2 , O_2 . One of the most effective and universal methods to protect metal structures is the use of inhibitors – substances that significantly slow down electrochemical metal degradation. Organic inhibitors, due to their ability to adsorb on the metal surface and form protective films, have proven high efficiency in aggressive environments and are widely used in the oil and gas sector. Their main advantages include low dosage requirements, adaptability to various operating conditions, and better environmental safety compared to inorganic alternatives. Currently, the industry is increasingly shifting to eco-friendly, biodegradable “green” inhibitors, aligning with the principles of sustainable development. This review discusses the main types of organic inhibitors used in the CIS oil and gas sector and analyzes their mechanisms, application areas, and performance in real conditions.

Key words: corrosion in the oil and gas industry, organic inhibitors, nitrogen-containing inhibitors, phosphorus-containing inhibitors, green inhibitors

Acknowledgments

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992812 Development of materials and technologies aimed at comprehensive anticorrosion protection of process equipment in the petrochemical, machine and instrument-making industries).

© К.А. Леонтьева^{1,2*}, Г.М. Хусурова¹, Д.С. Пузикова^{1,2}, А.Н. Нефедов¹,
М. Жұрынов¹, 2025.

¹«Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты»
АҚ, Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: k.leonteva@ifce.kz

ТМД ЕЛДЕРІНІҢ МҰНАЙ-ХИМИЯ ӨНЕРКӘСІБІНДЕ КОРРОЗИЯҒА ҚАРСЫ ОРГАНИКАЛЫҚ ИНГИБИТОРЛАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІ ЖӘНЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ. ШОЛУ

К.А. Леонтьева — әл-Фараби атындағы ҚазҰУ PhD докторанты, Алматы, Қазақстан;
«Д.В.Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Электрохимия және нанотехнологиялық процестер зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,
E-mail: k.leonteva@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4740-1720>;

Г.М. Хусурова — химия магистрі, «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Электрохимия және нанотехнологиялық процестер зертханасының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,
E-mail: g.khusurova@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8700-7472>;

Д.С. Пузикова — әл-Фараби атындағы ҚазҰУ PhD докторанты, Алматы, Қазақстан; «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Электрохимия және нанотехнологиялық процестер зертханасының аға ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,
E-mail: d.puzikova@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5275-4769>;

А.Н. Нефедов — химия ғылымдарының кандидаты, бас ғылыми қызметкер, «Коррозия мәселелері

бойынша орталығының» жетекшісі, «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,
E-mail: a.nefedov@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-0398>;

М. Жұрынов — Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының академигі, химия ғылымдарының докторы, профессор, электрохимия және нанотехнологиялық процестер зертханасының меңгерушісі, «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ бас директоры, Алматы, Қазақстан,
E-mail: mur.zhurinov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5003-5037>.

Аннотация. Металл коррозиясы мұнай-газ өнеркәсібіндегі ең күрделі техникалық-экономикалық мәселелердің бірі болып табылады, өйткені ол жабдықтың бұзылуына, көмірсутектердің ағуына, қоршаған ортаның ластануына, төтенше жағдайларға және айтарлықтай материалдық шығындарға әкеледі. Бұл проблема Тәуелсіз Мемлекеттер Достастығы (ТМД) елдерінде, әсіресе Қазақстанда, Ресейде және Өзбекстанда кен орындарын игеру және мұнай-газ инфрақұрылымының объектілерін пайдалану кезінде өзекті болып табылады. Бұл аймақтарда коррозия процесін тездететін көптеген факторлар бар: табиғи-климаттық жағдайлардың күрделілігі (температураның күрт өзгеруі, жоғары ылғалдылық, топырақ пен жер асты суларында тұздар мен құмдар), сонымен қатар өндірістік ортада жиі кездесетін химиялық агрессивті компоненттердің болуы – H_2S , CO_2 және O_2 . Металл конструкцияларын коррозиядан қорғаудың ең тиімді және әмбебап әдістерінің бірі ингибиторларды пайдалану болып табылады – металды бұзудың электрохимиялық процестерін айтарлықтай баяулататын белсенді заттар. Органикалық ингибиторлар металл бетінде адсорбциялану және қорғаныш қабықшалар түзу қабілетіне байланысты агрессивті ортада жоғары тиімділігін көрсетті және мұнай-газ секторында кеңінен қолданылады. Органикалық қосылыстардың артықшылығы – олардың аз мөлшерде қолданылуы, әртүрлі өндіріс жағдайларына бейімделуі және бейорганикалық аналогтармен салыстырғанда экологиялық қауіпсіздігі мен тиімділігі. Қазіргі уақытта мұнай-газ өнеркәсібінде экологиялық таза, биологиялық ыдырайтын «жасыл» ингибиторларға көшу үрдісі кеңінен байқалуда. Бұл тұрақты даму қағидаттарына жауап беретін заманауи шешімдердің бірі болып саналады. Бұл шолуда ТМД мұнай-газ өнеркәсібінде қолданылатын органикалық ингибиторлардың негізгі топтары қарастырылып, олардың әсер ету механизмі, қолдану аймақтары және нақты жұмыс жағдайында тиімділігі жан-жақты талданады.

Түйін сөздер: мұнай-газ өнеркәсібіндегі коррозия, органикалық ингибиторлар, азот құрамды ингибиторлар, фосфор құрамды ингибиторлар, жасыл ингибиторлар

© К.А. Леонтьева^{1,2*}, Г.М. Хусурова¹, Д.С. Пузикова^{1,2}, А.Н. Нефедов¹,
М. Журинов¹, 2025.

¹АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского»,
Алматы, Казахстан;

²«Казахский национальный университет имени аль-Фараби»,
Алматы, Казахстан.

E-mail: k.leonteva@ifce.kz

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРАН СНГ. ОБЗОР

К.А. Леонтьева — докторант PhD, «Казахский национальный университет имени аль-Фараби», Алматы, Казахстан; младший научный сотрудник лаборатории электрохимии и нанотехнологических процессов АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: k.leonteva@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4740-1720>;

Г.М. Хусурова — магистр химии, научный сотрудник лаборатории электрохимии и нанотехнологических процессов АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: g.khusurova@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8700-7472>;

Д.С. Пузикова — докторант PhD, «Казахский национальный университет имени аль-Фараби», Алматы, Казахстан; старший научный сотрудник лаборатории электрохимии и нанотехнологических процессов АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: d.puzikova@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5275-4769>;

А.Н. Нефедов — кандидат химических наук, главный научный сотрудник, руководитель «Центра компетенции по проблемам коррозии», АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: a.nefedov@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-0398>;

М. Журинов — академик НАН РК, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией электрохимии и нанотехнологических процессов, генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: mur.zhurinov@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5003-5037>.

Аннотация. Коррозия металлов является одной из наиболее серьезных технических и экономических проблем в нефтегазовой промышленности, поскольку она приводит к разрушению оборудования, утечкам углеводородного сырья, загрязнению окружающей среды, аварийным ситуациям и значительным материальным потерям. Особую актуальность данная проблема приобретает в странах СНГ – особенно в Казахстане, России и Узбекистане – при разработке месторождений и эксплуатации объектов нефтегазовой инфраструктуры. В этих регионах существует множество факторов, ускоряющих процесс коррозии: сложность природно-климатических условий (резкие перепады температур, высокая влажность, соли и песок в почве и грунтовых водах), а также наличие химически агрессивных компонентов, часто встречающихся в производственной среде – H_2S , CO_2 , O_2 . Одним из наиболее эффективных и универсальных способов

защиты металлических конструкций от коррозии является использование ингибиторов – веществ, способных значительно замедлять электрохимические процессы разрушения металла. Органические ингибиторы, благодаря своей способности к адсорбции на поверхности металла и образованию защитных плёнок, доказали высокую эффективность в агрессивных средах и получили широкое распространение в нефтегазовом секторе. Преимущества органических соединений заключаются в использовании в малых количествах, адаптивность к различным производственным условиям, а также их экологическая безопасность по сравнению с неорганическими аналогами. В настоящее время в нефтегазовой отрасли наблюдается тенденция перехода на экологически чистые, биоразлагаемые «зеленые» ингибиторы. Это считается одним из современных решений, отвечающих принципам устойчивого развития. В данном обзоре рассматриваются основные группы органических ингибиторов, применяемых в нефтегазовой отрасли СНГ, а также анализируются их механизм действия, области применения и эффективность в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: коррозия в нефтегазовой отрасли, органические ингибиторы, азотсодержащие ингибиторы, фосфорсодержащие ингибиторы, зеленые ингибиторы

Introduction. Steel is the main structural material used in oilfield equipment, but it is prone to various forms of corrosion, including pitting, crevice, and hydrogen corrosion. High water content in many CIS oil and gas fields intensifies corrosion of drill strings, heat exchangers, pumps, tanks, and pipelines operating under harsh chemical and thermal conditions. The composition of oil, formation water, and associated gas often includes corrosive compounds such as hydrogen sulfide, mercaptans, thiophenes, carbon dioxide, oxygen, organic acids, and other oxygen- and sulfur-containing substances (Groysman, 2014). Dissolved salts like chlorides and sulfates also accelerate corrosion and promote the formation of salt deposits on internal surfaces of equipment. Corrosion and scaling reduce equipment life and pose serious operational and environmental risks, including leaks and soil or groundwater contamination. They also complicate well operation and increase production costs.

To enhance reliability and extend the service life of equipment in aggressive environments, corrosion and scale inhibitors are widely used. In recent years, increasing attention has been paid to highly effective and often eco-friendly organic inhibitors, making them promising for oilfield applications in the CIS countries. The most common are nitrogen-, oxygen-, and sulfur-containing organic compounds with polar functional groups or aromatic rings (e.g., quaternary ammonium salts, imidazole's, fatty acid amides) (Verma, et al., 2016). These compounds form protective films on metal surfaces, preventing electrochemical corrosion and scale formation. This review aims to classify organic corrosion inhibitors, describe their mechanisms of action, and analyze their effectiveness in CIS oilfield operations. It also explores development prospects, considering environmental safety, cost-effectiveness, and technological compatibility.

Materials and methods. Organic corrosion and scale inhibitors. Organic

corrosion inhibitors are typically salts of organic bases and inorganic or organic acids, allowing them to inhibit both anodic and cathodic corrosion processes. These inhibitors are considered universal due to their dual-action capability. Their efficiency depends on the presence of hydrophobic and polar fragments, as well as functional groups such as amines, aldehydes, thiourea, phenols, heterocycles, and aromatic carboxylic acid salts. These groups enhance adsorption on metal surfaces, forming protective layers that slow corrosion. The action mechanism of organic inhibitors is based on adsorption onto the metal surface, forming a barrier against aggressive agents. Figure 1 illustrates possible adsorption mechanisms of organic inhibitors on steel.

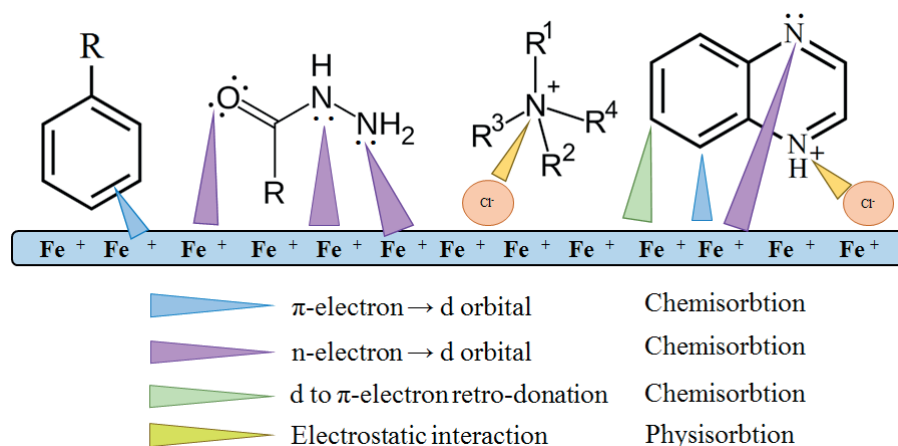


Figure 1 – Adsorption mechanism of organic corrosion inhibitors on the steel surface

Inhibitor molecules orient themselves so that their polar functional groups (e.g. amines, hydroxyls, benzoic rings, carboxylic and sulfonic acids) interact with the metal surface via physical adsorption (van der Waals forces, electrostatic attraction) and chemisorption through coordination bonds between π - or n -electrons and the metal's d -orbitals (figure 1). The hydrophobic parts of the molecules face the solution, forming a barrier against aggressive agents (Lessa, 2023). Aromatic rings further enhance adsorption via π -electron interactions. The adsorption layers formed by organic inhibitors are more stable than those of inorganic ones, which are more fragile and prone to mechanical damage and localized corrosion such as pitting and crevice corrosion.

Classification of organic corrosion inhibitors

Organic corrosion inhibitors are classified depending on the presence of active functional groups that determine their effectiveness and scope of application. Figure 2 shows the main types of functional groups in organic corrosion inhibitors used in the oil field and oil refining industries (Alhaida, et al., 2024).

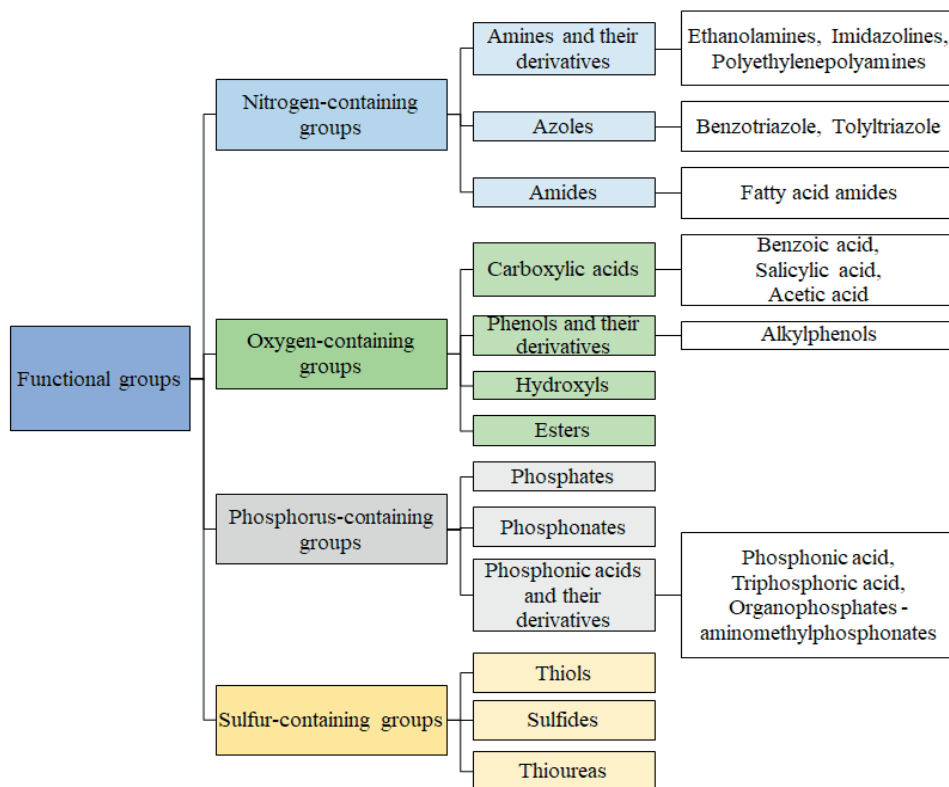


Figure 2 – Functional groups of organic corrosion inhibitors used in the oil and gas industry

The most effective organic corrosion inhibitors are compounds with electron-donating functional groups (e.g. $-\text{OCH}_3$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$) and flat molecular geometry, which promotes adsorption on steel surfaces. In contrast, inhibitors with electron-accepting groups (e.g. $-\text{NO}_2$, $-\text{CN}$, $-\text{COOR}$) show lower efficiency due to reduced electron density and hindered adsorption from bulky structures (Goyal, et al., 2018). The choice of inhibitor depends on operating conditions and the nature of the corrosive environment. A distinct group consists of “green” inhibitors – eco-friendly compounds derived from natural sources such as plant extracts. They often contain terpenoids, polyphenols, and organic acids (e.g. tannin, caffeine, succinic and ascorbic acids) and show good performance in aggressive media (Galleguillos Madrid, et al., 2024).

Nitrogen-containing organic corrosion inhibitors

Among the variety of functional groups of organic inhibitors, nitrogen-containing compounds, especially amines, imidazolines, triazoles and other heterocyclic derivatives, demonstrate the greatest efficiency in the oil and gas industry. The high inhibitory activity of nitrogen-containing inhibitors is due to the ability of nitrogen atoms to donor-acceptor interaction with a metal surface, which contributes to the formation of a protective adsorption film. The type of corrosive environment and process operating conditions determines the specific choice of compound.

1. Amines and their derivatives

Fatty amines and their ethoxylated derivatives are among the most widely used inhibitors. They are effective against corrosion caused by the presence of CO_2 and H_2S , both at the production stage and during transportation of oil and gas.

Quaternary ammonium salts are also common, which demonstrate high efficiency in the presence of H_2S due to their ability to adsorb on the metal surface and inhibit anodic and cathodic reactions (Hassan, et al., 2022).

2. Pyridine and its derivatives

Pyridine and its derivatives are also widely used in the oil and gas industry as inhibitors of corrosion caused by the action of acid gases typical of oil refining. Pyridine contains a heteroaromatic ring with a nitrogen atom, with an unshared electron pair, which ensures high adsorption activity of pyridine and its derivatives (Hegazy, et al., 2023).

3. Imidazolines and their derivatives

Imidazole's are used to protect against CO_2 corrosion in the oil and gas industry of the CIS countries - especially in Russia, Kazakhstan and Uzbekistan. These compounds form strong, hydrophobic protective films on the surface of steel, providing resistance to aggressive environments. The ability to modify the structure of imidazoline allows its properties to be adapted to specific operational requirements (Abbasov, et al., 2014).

3. Triazoles, benzotriazoles and their derivatives

Triazoles are a promising class of inhibitors that demonstrate high efficiency in acidic environments and at elevated temperatures, which is especially important in the acid treatment of oil wells. Due to their resistance to extreme conditions and the ability to form stable complexes with a metal surface, triazoles are finding increasing use in the oil and gas industry (Ibrahimi & Guo, 2020).

4. Other heterocyclic compounds

Benzimidazole derivatives are among the effective nitrogen-containing inhibitors, demonstrating strong anticorrosive performance in acidic media. They are currently under active investigation as promising corrosion inhibitors for applications in the oil and gas industry (Keshavarz et al., 2016).

Oxygen-containing organic corrosion inhibitors

Oxygen-containing organic corrosion inhibitors include functional groups with oxygen and are known for high adsorption capacity and the ability to form stable protective films on metal surfaces. They are often used in combination with nitrogen- or phosphorus-containing groups as part of complex formulations. Common types include phenols, polyphenols, alcohols, esters, organic acids, and flavonoids. These compounds are biodegradable and environmentally safe, making them suitable for use in the oil and gas industry. They also serve as bases, solvents, or auxiliary components in inhibitor solutions.

1. Phenols and Polyphenols

Phenolic and polyphenolic compounds - such as catechin, gallic acid, tannins, and rosemary oil, often derived from plant extracts – are currently being actively explored as potential “green” corrosion inhibitors. Sulfonated alkyl phenols have demonstrated high

efficacy against corrosion caused by naphthenic acids, a serious problem in refineries processing certain types of crude oil. Thus, phenolic compounds are considered as a promising direction in the development of environmentally friendly and sustainable corrosion inhibitors for the oil and gas industry (Ansari et al., 2020).

2. Alcohols, polyols, ethers

Alcohols, polyols, and ethers are commonly used as auxiliary substances in corrosion inhibitor formulations to adjust physicochemical properties for specific applications. Methanol, isopropanol, glycerol, ethylene glycol, and sorbitol are frequently employed as solvents to enhance inhibitor solubility and stability. Additionally, ethoxylated alcohols form the basis of some phosphate ester-based inhibitors used in oil and gas production, transportation, and processing.

3. Carboxylic acids and their salts

Carboxylic acids in crude oil can cause severe corrosion of metal equipment. Their modified derivatives can act as effective corrosion inhibitors by adsorbing onto metal surfaces and forming hydrophobic protective films. In Azerbaijan, these compounds are actively studied to enhance corrosion resistance in the oil and petrochemical sectors. Research focuses on their composition, solubility, stability in acidic and saline media, and the influence of temperature and pressure (Alimadatli, 2025). Fatty acid salts, due to their biodegradability and low toxicity, are considered promising components of "green" inhibitors.

Phosphorus-containing organic corrosion inhibitors

Phosphorus-containing organic corrosion inhibitors are highly effective under elevated temperature, pressure, and mineralization due to their multifunctionality and thermal stability. They are commonly used in cooling water systems and in combination with other inhibitors (L. Liu et al., 2018). These compounds – such as phosphate esters, phosphonates, and organophosphorus derivatives – are also effective in protecting drilling equipment in aerated environments, providing defense against both electrochemical and microbial corrosion.

1. Phosphate Esters

Phosphate esters are widely used at various stages of oil and gas operations – from drilling to formation water treatment, demonstrating inhibitory activity in oxygen-containing systems such as drilling muds and brines. Phosphate esters can be used both independently and in combination with other inhibitors, for example, with fatty amines or quaternary ammonium salts, enhancing the properties of the complex composition of the inhibitor. An example is the phosphate-based inhibitor CONQOR 404 EH, which is used in drilling systems with high oxygen and salt ion content (Юцынова et al., 2023).

2. Phosphonates

Phosphonates are multifunctional compounds that effectively prevent both corrosion and scale formation, and are actively used in circulation and water circulation systems of oil refineries and production wells (Kafarski, 2019).

In the conditions of the CIS countries, new generation phosphonates, for example, Sintanol phosphonates, developed by Russian manufacturers, are becoming especially relevant. These inhibitors are highly resistant to calcium, thermally stable and effective

at high pH and mineralization values. They are used to protect pipelines, heat exchangers and other equipment operated at temperatures above 100°C and in solutions saturated with salts (Шығарбаев et al., 2019).

Phosphorus-containing polymeric corrosion inhibitors are increasingly used in oil production due to their combined properties: polymers provide strong adsorption and film formation, while phosphonate groups ensure chemisorption, resistance to Ca^{2+} ions, and effectiveness across a wide pH range. Their high thermal stability makes them suitable for high-temperature refining processes. Unlike low-molecular analogs, they resist deposit formation in the presence of calcium ions.

3. Other organophosphorus compounds

New phosphorus-containing inhibitors, such as melamine phosphate and hexamethylenediamine phosphate, are being actively studied for their ability to interact with metal ions and form protective films. The combination of phosphorus- and nitrogen-containing groups enhances protection: phosphorus promotes metal passivation, while nitrogen stabilizes the protective layer and prevents its degradation.

Sulfur-containing organic corrosion inhibitors

Sulfur-containing organic corrosion inhibitors are widely used in the CIS oil and gas industry due to their high efficiency during production, transportation, and processing. Sulfur atoms (in thiol, thioamide, thiocarbamide, or disulfide groups) enhance adsorption on metal surfaces, forming dense protective films that block aggressive agents. In Russia and Kazakhstan, such inhibitors are commonly applied in in-field pipeline systems, oil gathering networks, acid well treatments, and secondary recovery processes like water injection.

1. Thiourea and its derivatives

Thioureas and their derivatives are among the most widely used sulfur-containing compounds in the CIS oil and gas industry. Thioureide-imidazolinium quaternary ammonium salts show high inhibitory activity in aqueous and water-oil systems, especially under high H_2S concentrations. Their effectiveness is due to the formation of strong Fe–S bonds and a dense protective adsorption layer (Sun et al., 2024). The presence of both sulfur and nitrogen atoms enhances donor–acceptor interactions, providing combined physical and chemical protection by inhibiting both anodic and cathodic processes.

2. Sulfonates and sulfides

Sulfonates (including petroleum-based) are important components of inhibitors and additives used in oil processing and transport. They act both as corrosion inhibitors and emulsifiers. Widely applied in metalworking fluids at refineries, sulfonates ensure corrosion protection and emulsion stability. In pipelines, their ability to form stable protective films under varying temperatures and pressures makes them particularly effective (Arellanes-Lozada et al., 2023).

3. Mercaptan-based inhibitors

Mercaptans (thiols) in their original form can enhance environmental corrosivity due to the formation of volatile sulfur compounds, especially in fuels. However, modified derivatives like mercaptopyrimidines demonstrate promising inhibitory properties.

Russian studies highlight that proper substitution in the heterocyclic core significantly reduces aggressiveness and enhances corrosion inhibition (Мамедов, 2024). To improve stability and efficiency under dynamic and high-temperature conditions, complex formulations based on organosulfur compounds and surfactants are being actively developed.

Results and discussion. In oil-producing regions of Russia, Kazakhstan, and Uzbekistan, multifunctional industrial inhibitors are widely used. These formulations combine anti-corrosion and anti-scale components, providing effective protection of metal equipment in environments with H_2S , CO_2 , high salinity, and temperature fluctuations. Table 1 summarizes key industrial inhibitors used in the CIS, with their chemical composition, application area, efficiency, and usage geography.

Table 1. Composition, purpose and efficiency of industrial corrosion inhibitors used in the oil and gas industry of the CIS countries

Inhibitor	Country	Description / composition	Application area	Efficiency
Nitrogen-containing organic corrosion inhibitors				
IKB-2-2	Russia	Amidoimidazoline	Protection against CO_2 corrosion of pipelines	Effective at temperatures up to 90°C, pH 3-7, up to 98 % protection
VFIKS-82	Russia, Kazakhstan	Complex inhibitor based on imidazolines	Oilfield protection against H_2S/CO_2 corrosion	Up to 94 % protection from corrosion and up to 80 % protection from scale formation
DON-52	Russia, Kazakhstan	Mixtures of quaternary ammonium salts	From oxygen corrosion	Up to 90 % protection
PF-1	Uzbekistan	Amines + fatty acids	General protection at oil refineries	Effective, local production
IFHAN-1	Russia	Mixtures of quaternary ammonium salts	From H_2S corrosion	Up to 85 – 95 % protection
INK-1	Uzbekistan, Kazakhstan	Mixtures of quaternary ammonium salts	Under mechanical loads	Up to 85 % protection
Catasol 28-5-1	Russia	Salt of higher aliphatic amines	At high temperatures	Up to 85 % protection
Napor-1007	Kazakhstan	Salt of higher aliphatic amines	In water-oil mixtures	Up to 88 – 93 % protection
HOPS-10	Russia, Uzbekistan	Salt of higher aliphatic amines	In the presence of complex salt compositions	Up to 90 % protection
Olazol-T2P	Russia	Imidazolines	Protection against CO_2 corrosion of pipelines	Up to 95 % protection
Vokor-1	Kazakhstan	Imidazolines	Protection of pipelines in contact with formation waters	Up to 88 - 92 % protection

Sepakor 5478AM	Russia, Kazakhstan, Uzbekistan	Imidazolines	At high temperatures up to 120 °C	Over 90 % protection
MAD-20	Uzbekistan	Diazoctanedinitrile with functional groups	Protection against acid corrosion of columns	High level of protection, up to 99 % protection
Oxygen-containing organic corrosion inhibitors				
Polyethylenegly- col based inhib- itors	Russia	Polyesters	Inhibitors in water circulation cooling systems	Effective in combination with phosphonates, non- toxic
Salicyli- eneaniline	Russia	Aldimin (azomethine compound with phenolic group)	Protection of tanks and pipelines	Good adsorption on steel, thermal stability
Oxyl inhibitors	Kazakhstan	Derivatives of ethoxylated fatty alcohols (oxyl)	Anti-corrosion emulsions for drilling fluids	Improved solubility in oil and water, stability of surfactants
GPMSH	Uzbekistan	Surfactant composition based on hydrolyzed polyacrylonitrile and urotropine	Heat exchange equipment of the oil refinery (Fergana)	up to 97.5 % protection from corrosion and up to 91.76 % protection from scale formation
Phosphorus-containing organic corrosion inhibitors				
Sintanol phosphonates	Russia	Phosphonates	Oil pipeline protection	High level of protection
IKF-1, IKF-2	Uzbekistan	Oligomers based on crotonaldehyde and phosphates	Protection of oil refinery heat exchangers	Up to 99 % protection
HEDP/OEDFK	Russia, Kazakhstan	Oxyethylidene diphosphonic acid (1-hydroxyethylidene- 1,1-diphosphonic acid)	Inhibition of scale and corrosion at T up to 250 °C.	Up to 94,11 % protection from scale formation
Zn-OEDF	Russia	Zinc Complex Disodium Salt HEDP	Inhibition of corrosion and salt deposits in the presence of Zn ions of heat exchange equipment, pipelines	Up to 94 % protection
AFON 200–60A	Russia, Kazakhstan	60% solution of 1-hydroxyethyl- idenediphosphonic acid	Oil production, circulation cooling systems, additive to drilling fluids and detergents	High efficiency against scale and salt deposits in the pH range of 2–12; resistant to H ₂ S, up to 80 % protection
PHOSPHONE+	Kazakhstan, Uzbekistan	A mixture of polyamines and phosphonates	Protection of oil gathering and transportation systems, inhibition H ₂ S corrosion	Up to 97% corrosion protection at 60 °C and pH = 6–8

Sulfur-containing organic corrosion inhibitors				
Thiourea and derivatives	Russia, Kazakhstan	Contain nitrogen and sulfur atoms (N,S-containing)	Water-oil emulsions, H ₂ S environments	High efficiency in acidic environments (pH < 4), up to 90–95 % inhibition
Mercap-topyrimidines	Russia	Heterocyclic compounds with a sulfur atom	Acid corrosion, aggressive environments with CO ₂ and H ₂ S	Up to 85–90 % inhibition, especially in HCl and H ₂ S environments
Thiourea inhibitors	Kazakhstan, Uzbekistan	Thiourea derivatives, often with donor groups	Gas lift wells, oil transportation, refineries	Up to 92 % corrosion inhibition of steel and alloys
Thioethanol-based inhibitors	Russia, Kazakhstan	Mono- and di-thiols, derivatives of thioalkanols	Oil dehydration, H ₂ S corrosion inhibition	85–90 % protection in environments with high H ₂ S concentrations
Sulfide-containing amino acids	Russia, Uzbekistan	Taurine and analogues. Biodegradable compounds of natural origin	Eco-technological inhibitors in production systems	Up to 80 % in neutral and slightly acidic environments, high biodegradability

According to Table 1, organic corrosion inhibitors with various functional groups are widely used in the oil industry of CIS countries. The choice of inhibitor depends on operating conditions, chemical composition of oil and gas, presence of aggressive components (O₂, CO₂, H₂S), formation water composition, pH, and temperature. Russia leads in both the development and industrial use of organic inhibitors. The most common are nitrogen-containing compounds – imidazoline derivatives (IKB-2-2, VFIKS-82, Olazol-T2P) and quaternary ammonium salts (DON-52, IFHAN-1, INK-1). Phosphorus-containing inhibitors like HEDP, Zn-OEDFK, and AFON 200-60A are used in systems with thermal and acidic stress. Due to environmental concerns, biodegradable oxygen-containing inhibitors based on polyethylene glycol and salicylidene aniline are gaining attention.

In Kazakhstan, both local and mainly Russian inhibitors are applied. Imidazolines (VFIKS-82, Vikor-1, Sepakor 5478AM), thiourea, and thioethanol-based compounds are effective in H₂S-containing environments. Phosphorus-based complexes (PHOSPHON+, HEDP) are used for corrosion and scale control during oil production and transportation. Uzbekistan is developing inhibitors from local raw materials. Nitrogen-based inhibitors (INK-1), diazo compounds (MAD-20), and phosphorus- and oxygen-containing formulations (GPMSH) are used to protect heat exchange and circulation systems. Overall, the most widely used functional groups are nitrogen-containing (imidazolines, ammonium salts) and phosphorus-containing (phosphonates), due to their multifunctionality and resistance in aggressive environments.

Current trends in the development of organic corrosion inhibitors in the CIS countries

In connection with global environmental changes and tightening environmental protection requirements, the oil and gas industry of the CIS countries is moving towards the

use of environmentally friendly and biodegradable corrosion inhibitors. As an alternative to traditional nitrogen- and phosphorus-containing organic corrosion inhibitors, a range of plant-based materials is being investigated. These include vegetable oils and their derivatives – such as sunflower, soybean, linseed, corn, and rapeseed oils – which serve as bases for inhibitors due to their surface-active properties and ability to adsorb onto metal surfaces. Additionally, plant extracts, fruit residues, and agricultural waste rich in biologically active compounds are being explored. Amino acids, particularly sulfur-containing ones such as taurine and cysteine, are also of interest due to their functional groups ($-\text{NH}_2$, $-\text{SH}$), which enable strong interactions with metal surfaces and confer effective anti-corrosion performance. Combined inhibitors that combine the functions of anti-corrosion and anti-salt protection are also being actively developed; they are relevant for areas with a high content of mineralized formation waters.

Conclusion. Organic corrosion inhibitors are widely used in the CIS oil and gas industry to protect drilling, refining, and pipeline equipment. Nitrogen-containing compounds like amines and imidazolines are most common due to their effectiveness in CO_2 - and H_2S -rich environments. Phosphorus-containing inhibitors (phosphonates, phosphate esters) are applied where both corrosion and scale must be controlled, especially under high temperature and salinity. Many modern formulations combine functional groups for a synergistic effect. Growing interest is seen in eco-friendly “green” inhibitors based on vegetable oils, phenolics, and plant waste, which meet tightening environmental standards. CIS countries are expanding local production of tailored organic inhibitors. Russia leads in research and industrial base and manufacturing, while Kazakhstan and Uzbekistan adopt both established and green formulations using local resources. Future developments focus on nanotechnology and formulations that withstand extreme conditions – high temperature, pressure, and H_2S – enhancing long-term corrosion protection.

Литература

Abbasov V.M., Mursalov N.I., Dzhabrailzade Sh.Z., Alieva L.I., Rzayeva N.Sh., & Talybov A.G. (2014) Synthesis of S-containing imidazolines and the study of their anti-corrosion action in CO_2 saturated solutions. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 15(4 (60)). — P. 257-264.

Alhaida B., Reeshah F., & Jammoal Y. (2024) Natural Sources Extract as Acidic Corrosion Inhibitors. In *Corrosion Engineering - Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*, 212. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005150>.

Alimadatli N.Y. (2025) Summary of research on the development of multifunctional corrosion protection agents at the Academician Y.H. Mammadaliyev Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan. *PPOR*, 26(2). — P. 534-543. <https://doi.org/10.62972/1726-4685.2025.2.534>.

Ansari K.R., Chauhan D.S., Singh A., Saji V.S., & Quraishi M.A. (2020) Corrosion inhibitors for acidizing process in oil and gas sectors. In V. S. Saji & S. A. Umoren (Eds.), *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*. — P. 153-176. <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch6>.

Arellanes-Lozada P., Hernández-Cocoletzi H., Lijanova I.V., Olivares-Cuapa J.C., Olivares-Cuapa J.M., Calvillo-Muño, E.Y., & Likhanova N.V. (2023) Effect of sulfonate anions on the performance of triethylmethylammonium-derived ionic liquids as corrosion inhibitors. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37(18). — P. 2642-2666. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2163843>.

Galleguillos Madrid F.M., Soliz A., Cáceres L., Bergendahl M., Leiva-Guajardo S., Portillo C., Olivares D., Toro N., Jimenez-Arevalo V., & Páez M. (2024) Green Corrosion Inhibitors for Metal and

Alloys Protection in Contact with Aqueous Saline. In *Materials*, 17(16), 3996. <https://doi.org/10.3390/ma17163996>.

Goyal M., Kumar S., Bahadur I., Verma C., & Ebenso E.E. (2018) Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256(2017). — P. 565-573. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.045>.

Groysman A. (2014) Corrosion in Systems for Storage and Transportation of Petroleum Products and Biofuels, (1). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7884-9>.

Hassan A., Numin M.S., Jumbri K., Kee K.E., & Borhan N. (2022). Review on the Recent Development of Fatty Hydrazide as Corrosion Inhibitor in Acidic Medium: Experimental and Theoretical Approaches. *Metals*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/met12071058>.

Hegazy M.M., Khalil E.M., Badr E., & Mansour M A.F. (2023) Amino pyridine derivatives as new corrosion inhibitors for protection cabling metal of crude oil well during acidizing. *Egyptian Journal of Petroleum*, 32(4). — P. 8-20. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2023.08.003>.

Ibrahimi B.E.I., & Guo L. (2020) Azole-Based Compounds as Corrosion Inhibitors for Metallic Materials. In *Azoles - Synthesis, Properties, Applications and Perspectives*, 28. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87765>.

Kafarski P. (2019) Phosphonates: Their Natural Occurrence and Physiological Role. In D.G. Churchill, M.D. Sikirić, B. Čolović, & H.F. Milhofer (Eds.), *Contemporary Topics about Phosphorus in Biology and Materials*, 19. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87155>.

Keshavarz M.H., Esmailpour K., Golikand A.N., & Shirazi Z. (2016) Simple Approach to Predict Corrosion Inhibition Efficiency of Imidazole and Benzimidazole Derivatives as well as Linear Organic Compounds Containing Several Polar Functional Groups. *Zeitschrift Fur Anorganische Und Allgemeine Chemie*, 642(16), 906-913. <https://doi.org/10.1002/zaac.201600230>.

Lessa R.C. da S. (2023) Synthetic Organic Molecules as Metallic Corrosion Inhibitors: General Aspects and Trends. *Organics*, 4(2). — P. 232-250. <https://doi.org/10.3390/org4020019>.

Liu L., Cao T.T., Zhang Q.W., & Cui C.W. (2018) Organic Phosphorus Compounds as Inhibitors of Corrosion of Carbon Steel in Circulating Cooling Water: Weight Loss Method and Thermodynamic and Quantum Chemical Studies. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1. — P. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2018/1653484>.

Sun Z., Wu H., Wei G., Zhang R., Deng S., Lei R., Xu D., & Li X. (2024) Adsorption and inhibition of rosin thiourea imidazole quaternary ammonium salt on steel surface in HCl solution. *Colloids and Interface Science Communications*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2024.100788>.

Verma C., Quraishi M.A., & Sing, A. (2016) 5-Substituted 1H-tetrazoles as effective corrosion inhibitors for mild steel in 1 M hydrochloric acid. *Journal of Taibah University for Science*, 10(5) 718-733. <https://doi.org/10.1016/J.JTUSCI.2015.10.005>.

Мамедов, К. А. (2024). Изучение влияния новых комбинированных ингибиторов на процессы коррозии и солеотложения в нефтепромысловом оборудовании. *Нефтегазовое Дело*. — 22(2). — С. 175-182. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-2-175-182>.

Шуматбаев, Г. Г., Никитин, Е. Н., Теренжев, Д. А., & Синяшин, К. О. (2019). Новые α-аминофосфонаты на основе синтанолов - синтез и антикоррозионная активность. *Журнал Общей Химии*. — 89(6). — P. 977-984. <https://doi.org/10.1134/S0044460X19060166>.

Юсупова Л.А., Исмаилов Б. М., Нурманов С.Э., Уразов Ф.Б., Обидов Ш.Б., & Эргашев Ж.Р. (2023). Ингибирующие свойства 2,5-дифенилгексин-3-диола-2,5. *Universum: Технические Науки*. — 2(107). — P. 59-64. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.107.2.15008>.

References

Abbasov V.M., Mursalov N.I., Dzhabrailzade Sh.Z., Alieva L.I., Rzayeva N.Sh., & Talybov A.G. (2014) Synthesis of S-containing imidazolines and the study of their anti-corrosion action in CO₂ saturated solutions. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 15(4 (60)). — P. 257-264. (in English)

Alhaida B., Reeshah F., & Jammoal Y. (2024) Natural Sources Extract as Acidic Corrosion Inhibitors. In *Corrosion Engineering - Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*, 212. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005150>. (in English)



Alimadatli N.Y. (2025) Summary of research on the development of multifunctional corrosion protection agents at the Academician Y.H. Mammadaliyev Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan. *PPOR*, 26(2). — P. 534-543. <https://doi.org/10.62972/1726-4685.2025.2.534>. (in English)

Ansari K.R., Chauhan D.S., Singh A., Saji V.S., & Quraishi M.A. (2020) Corrosion inhibitors for acidizing process in oil and gas sectors. In V. S. Saji & S. A. Umoren (Eds.), *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*. — P. 153-176. <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch6>. (in English)

Arellanes-Lozada P., Hernández-Cocoletzi H., Lijanová I.V., Olivares-Cuapa J.C., Olivares-Cuapa J.M., Calvillo-Muñoz, E.Y., & Likhanova N.V. (2023) Effect of sulfonate anions on the performance of triethylmethylammonium-derived ionic liquids as corrosion inhibitors. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37(18). — P. 2642-2666. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2163843>. (in English)

Galleguillos Madrid F.M., Soliz A., Cáceres L., Bergendahl M., Leiva-Guajardo S., Portillo C., Olivares D., Toro N., Jimenez-Arevalo V., & Páez M. (2024) Green Corrosion Inhibitors for Metal and Alloys Protection in Contact with Aqueous Saline. In *Materials*, 17(16), 3996. <https://doi.org/10.3390/ma17163996>. (in English)

Goyal M., Kumar S., Bahadur I., Verma C., & Ebenso E.E. (2018) Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256(2017). — P. 565-573. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.045>. (in English)

Groysman A. (2014) Corrosion in Systems for Storage and Transportation of Petroleum Products and Biofuels, (1). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7884-9>. (in English)

Hassan A., Numin M.S., Jumbri K., Kee K.E., & Borhan N. (2022). Review on the Recent Development of Fatty Hydrazide as Corrosion Inhibitor in Acidic Medium: Experimental and Theoretical Approaches. *Metals*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/met12071058>. (in English)

Hegazy M.M., Khalil E.M., Badr E., & Mansour M.A.F. (2023) Amino pyridine derivatives as new corrosion inhibitors for protection cabling metal of crude oil well during acidizing. *Egyptian Journal of Petroleum*, 32(4). — P. 8-20. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2023.08.003>. (in English)

Ibrahimi B.E.I., & Guo L. (2020) Azole-Based Compounds as Corrosion Inhibitors for Metallic Materials. In *Azoles - Synthesis, Properties, Applications and Perspectives*, 28. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87765>. (in English)

Kafarski P. (2019) Phosphonates: Their Natural Occurrence and Physiological Role. In D.G. Churchill, M.D. Sikirić, B. Čolović, & H.F. Milhofer (Eds.), *Contemporary Topics about Phosphorus in Biology and Materials*, 19. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87155>. (in English)

Keshavarz M.H., Esmailpour K., Golikand A.N., & Shirazi Z. (2016) Simple Approach to Predict Corrosion Inhibition Efficiency of Imidazole and Benzimidazole Derivatives as well as Linear Organic Compounds Containing Several Polar Functional Groups. *Zeitschrift für Anorganische Und Allgemeine Chemie*, 642(16), 906-913. <https://doi.org/10.1002/zaac.201600230>. (in English)

Lessa R.C. da S. (2023) Synthetic Organic Molecules as Metallic Corrosion Inhibitors: General Aspects and Trends. *Organics*, 4(2). — P. 232-250. <https://doi.org/10.3390/org4020019>. (in English)

Liu L., Cao T.T., Zhang Q.W., & Cui C.W. (2018) Organic Phosphorus Compounds as Inhibitors of Corrosion of Carbon Steel in Circulating Cooling Water: Weight Loss Method and Thermodynamic and Quantum Chemical Studies. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1. — P. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2018/1653484>. (in English)

Sun Z., Wu H., Wei G., Zhang R., Deng S., Lei R., Xu D., & Li X. (2024) Adsorption and inhibition of rosin thiourea imidazole quaternary ammonium salt on steel surface in HCl solution. *Colloids and Interface Science Communications*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2024.100788>. (in English)

Verma C., Quraishi M.A., & Sing, A. (2016) 5-Substituted 1H-tetrazoles as effective corrosion inhibitors for mild steel in 1 M hydrochloric acid. *Journal of Taibah University for Science*, 10(5) 718-733. <https://doi.org/10.1016/J.JTUSCI.2015.10.005>. (in English)

Mamedov K.A. (2024). Izuchenie vliyaniya novykh kombinirovannykh ingibitorov na protsessy korrozii i soletozlozheniya v neftepromyslovom oborudovanii [Study of the effect of new combined inhibitors on corrosion and salt deposition processes in oilfield equipment]. *Neftegazovoe Delo*. — 22(2). — P. 175-182 p. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-2-175-182>. (in Russian)

Shumatbaev G.G., Nikitin E.N., Terenzhev D.A., & Sinyashin K.O. (2019) Novye α -aminofosfonaty na osnove sintanolov - sintez i antikorroziionnaya aktivnost' [New α -aminophosphonates based on syntanols - synthesis and anticorrosion activity]. Zhurnal Obshchey Khimii. – 89(6). – P. 977-984 p. <https://doi.org/10.1134/S0044460X19060166>. (in Russian)

Yusupova L.A., Ismailov B.M., Nurmanov S.E., Urazov F.B., Obidov Sh.B., & Ergashev Zh.R. (2023) Ingibiruyushchie svoystva 2,5-difenilgexin-3-diola-2,5 [Inhibitive properties of 2,5-diphenylhexine-3-diol-2,5]. Universum: Tekhnicheskie Nauki. – 2(107). – P. 59-64 p. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.107.2.15008>. (in Russian)

© **L.K. Orazzhanova, Zh.S. Kassymova*, Zh.Zh. Nurtazina, D.K. Asserzhanov, K.K. Kabdulkarimova, 2025.**

Shakarim University, Semey, Kazakhstan.

E-mail: kasymova-z@mail.ru

SYNTHESIS AND APPLICATION OF IRON NANOPARTICLES FOR THE PRODUCTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES CHLORELLA VULGARIS

L.K. Orazzhanova — candidate of chemical sciences, associate professor of Shakarim University, Semey, Kazakhstan,

E-mail: lazzyat.orazzhanova.70@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7881-0589>;

Zh.S. Kassymova — candidate of biological sciences, associate professor of Shakarim University, Semey, Kazakhstan,

E-mail: kasymova-z@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4971-6638>;

Zh.Zh. Nurtazina — PhD student of Shakarim University, Semey, Kazakhstan,

E-mail: nurtazina830912@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-3731>;

D.K. Asserzhanov — PhD student of Shakarim University, Semey, Kazakhstan,

E-mail: dastan2194.as@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-9217-9368>;

K.K. Kabdulkarimova — candidate of chemical sciences, associate professor, Semey, Kazakhstan,

E-mail: gk2107@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0475-9906>.

Abstract. Relevance. Iron nanoparticles with small sizes, high surface area, various shapes, low toxicity, and unique physicochemical properties are relevant for modifying the *Chlorella vulgaris* nutrient medium. Methods. They were synthesized via sodium borohydride reduction and stabilized with chitosan biopolymer. Optical analysis determined their morphology and size. The iron nanoparticles have an average size of 50–80 nm, black color, and an amorphous structure. IR spectroscopy of the nanoparticles reveals characteristic stretching vibrations of NH groups of chitosan and Fe-O bonds of iron, confirming the stabilizing role of the chitosan matrix. The chemical modification of Tamiya medium was performed by adding 5 g/L of urea and a mixture of 5 g/L urea with 0.55 mg/L iron nanoparticles. Main conclusions. Optical, microscopic, FTIR, and UV spectrophotometric analyses confirmed the efficiency of urea and iron nanoparticles in modifying the *Chlorella* culture medium. Biomass growth increased by 28–50%, while Al, Cu, Cr, and K concentrations doubled, Li and Mn increased fivefold, Fe tenfold, and Mg thirteenfold. Total nitrogen and crude protein content doubled. FTIR spectroscopy revealed the biologically active substances such protein, polysaccharide, and amino acid accumulation in *Chlorella*. UV spectrophotometric analysis showed increased chlorophyll *a* content. Practical

value. This modification of Tamiya nutrient medium enables targeted enhancement of biologically active compounds in *Chlorella* biomass.

Keywords: iron nanoparticles, chitosan, biologically active substances, microalgae, *Chlorella vulgaris*, chemical modification, Tamiya nutrient medium

Funding: *This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23488216).*

© Л.К. Оразжанова, Ж.С. Касимова*, Ж.Ж. Нуртазина, Д.Қ. Әсержанов,
К.К. Кабдулкаримова, 2025.

«Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан.

E-mail: kasymova-z@mail.ru

CHLORELLA VULGARIS БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ЗАТТАРЫН АЛУ ҮШІН ТЕМІР НАНОБӨЛШЕКТЕРІН СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ

Л.К. Оразжанова — химия ғылымдарының кандидаты, Шәкәрім университетінің қауымдастырылған профессоры, Семей, Қазақстан,

E-mail: lazzyat.orazghanova.70@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7881-0589>;

Ж.С. Касимова — биология ғылымдарының кандидаты, Шәкәрім университетінің доценті, Семей, Қазақстан,

E-mail: kasymova-z@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4971-6638>;

Ж.Ж. Нуртазина — Шәкәрім университетінің 3-курс докторанты, Семей, Қазақстан,

E-mail: nurtazina830912@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-3731>;

Д.Қ. Әсержанов — Шәкәрім университетінің 3-курс докторанты, Семей, Қазақстан,

E-mail: dastan2194.as@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-9217-9368>;

К.К. Кабдулкаримова — химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Семей, Қазақстан,

E-mail: gk2107@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0475-9906>.

Аннотация. Өзектілігі. Кіші өлшемді, үлкен меншікті беті, әртүрлі пішіні, төмен уыттылығы, ерекше физика-химиялық және антибактериалды қасиеттері бар темір нанобөлшектерін синтездеу және қолдану *Chlorella vulgaris* микробалдырын өсіруге арналған қоректік ортаны химиялық модификациялау үшін өzekті болып табылады. Әдістер. Темір нанобөлшектері натрий боргидридімен химиялық тотықсыздандыру әдісі арқылы синтезделіп, хитозан биополимерімен тұрақтандырылды. Оптикалық талдау арқылы олардың морфологиясы мен өлшемдері анықталды. Темір нанобөлшектерінің орташа мөлшері 50-80 нм, қара түсті және аморфты құрылымды екенін көрсетті. ИК-спектроскопия нанобөлшектерінің талдауы хитозанның NH-топтарының және темірдің Fe–O байланыстарына тән созылуын көрсетеді, бұл хитозан матрицасының тұрақтандырушы рөлін көрсетеді. Тамия қоректік ортасына 5 г/л несепнәр және 5 г/л несепнәр мен 0,55 мг/л темір нанобөлшектерінің қоспасын қосу арқылы қоректік ортаның химиялық модификациялауы жүргізілді. Негізгі тұжырымдар. Оптикалық, микроскопиялық әдістер, ИК-Фурье спектрометрия және УФ-спектрофотометриялық талдаулар несепнәр мен

темір нанобөлшектерінің хлорелла үшін қоректік ортаны модификациялаудағы тиімділігін растады. Нәтижесінде биомассаның өсуі 28–50%-ға артты, ал элементтердің концентрациясы Al, Cu, Cr, K үшін 2 есе, Li, Mn үшін 5 есе, Fe үшін 10 есе, Mg үшін 13 есе өсті. Жалпы азот пен шикі протеин мөлшері 2 есе артты. ИК-спектрометриялық талдау *Chlorella vulgaris*-тің ақуыз, полисахаридтер және амин қышқылдары сияқты биологиялық белсенді заттардың жинақталғанын көрсетті. УФ-спектрофотометрия хлорофилл *a* мөлшерінің артқанын көрсетті. Практикалық құндылық. Зерттелген Тамия қоректік ортасының бұл химиялық модификациясы *Chlorella* биомассасындағы биологиялық белсенді заттардың мақсатты түрде көбеюіне мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: темір нанобөлшектері, хитозан, биологиялық белсенді заттар, микробалдыр, *Chlorella vulgaris*, химиялық модификация, Тамия өсіру ортасы

© Л.К. Оразжанова, Ж.С. Касымова*, Ж.Ж. Нуртазина, Д.К. Асержанов,
К.К. Кабдулкаримова, 2025.

НАО «Университет Шакарима», Семей, Казахстан.

E-mail: kasymova-z@mail.ru

СИНТЕЗ И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ CHLORELLA VULGARIS

Л.К. Оразжанова — кандидат химических наук, ассоциированный профессор Университета Шакарима, Семей, Казахстан,

E-mail: lazzyat.orazghanova.70@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7881-0589>;

Ж.С. Касымова — кандидат биологических наук, доцент Университета Шакарима, Семей, Казахстан,

E-mail: kasymova-z@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4971-6638>;

Ж.Ж. Нуртазина — докторант 3 курса Университета Шакарима, Семей, Казахстан,

E-mail: nurtazina830912@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-3731>;

Д.К. Асержанов — докторант 3 курса Университета Шакарима, Семей, Казахстан,

E-mail: dastan2194.as@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-9217-9368>;

К.К. Кабдулкаримова — кандидат химических наук, доцент, Астана, Казахстан,

E-mail: gk2107@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0475-9906>.

Аннотация. Актуальность. Синтез и применение наночастиц железа с малыми размерами, большой удельной поверхностью, различными формами, малой токсичностью, уникальными физико-химическими и антибактериальными свойствами является актуальным при химической модификации питательной среды для культивирования микроводоросли хлорелла *Chlorella vulgaris*. Методы. Наночастицы железа были получены методом химического восстановления боргидридом натрия и стабилизацией биополимером хитозаном. Методами оптического анализа установлена морфология и размеры наночастиц. Наночастицы железа имеют средний размер 50–80 нм, черный цвет и аморфную структуру. ИК-спектроскопия наночастиц показала характерное растяжение NH-групп хи-

тозана и Fe-O связей железа, что подтверждает стабилизирующую роль хитозановой матрицы. Химическая модификация стандартной среды Тамия осуществлялась внесением 5 г/л мочевины и смеси из 5г/л мочевины и 0.55 мг/л наночастиц железа. Основные выводы. Методами оптического, микроскопического, ИК-Фурье-спектрометрического и УФ-спектрофотометрического анализов показали эффективность мочевины и наночастиц железа в химической модификации культуральной среды хлореллы. При этом прирост биомассы увеличился на 28-50 %, концентрации элементов возросли в 2 раза для Al, Cu, Cr, K, в 5 раз для Li, Mn, в 10 раз для Fe и в 13 раз для Mg, содержание общего азота и сырого протеина возросло в 2 раза. ИК-спектрометрическое исследование химического состава *Chlorella vulgaris* показало накопление таких биологически активных веществ, как белки, полисахариды, аминокислоты. УФ-спектрофотометрический анализ показал накопление хлорофилла *a*. Практическая значимость. Изученная химическая модификация питательной среды Тамия представляет возможность целенаправленного увеличения биологически активных веществ в биомассе хлореллы.

Ключевые слова: наночастицы железа, хитозан, биологически активные вещества, микроводоросль, *Chlorella vulgaris*, химическая модификация, питательная среда Тамия

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант AP23488216 «Разработка технологии химической модификации культивирования хлореллы с применением биополимеров и наночастиц для создания биологически активных веществ».

Введение. Анализ литературных данных показывает устойчивую тенденцию в области синтеза и применения наночастиц (НЧ) железа в различных отраслях науки и техники, в том числе в химической модификации состава биологически активных веществ (БАВ) на основе живых объектов (рисунок 1).

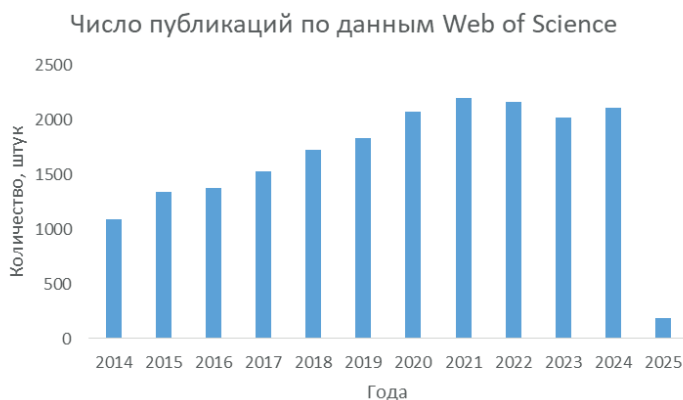


Рисунок 1. Сведения о публикациях по синтезу и применению НЧ железа.

Широкое распространение НЧ железа связано с их малыми размерами, большой удельной поверхностью, различными формами и уникальными физико-химическими и антибактериальными свойствами. Также отмечается их менее выраженная токсичность по сравнению с НЧ серебра, золота и др. (Kumar, et al., 2023; Hussain, et al., 2023; Ashrafi-Saiedlou, et al., 2025). Существующие методы синтеза НЧ железа делятся на физические, химические и биологические (Xu, et al., 2022). В отличие от других методов химический синтез основан на восстановлении ионов металла до НЧ с помощью восстановителя. Отличием химического метода является то, что можно получить НЧ металлов с заданными параметрами: наноразмерность и форма. Также при необходимости можно выделить НЧ из реакционной среды, не теряя их функциональной активности. Главной задачей в химическом методе является стабилизация полученных НЧ, так как они подвержены агрегации и обратному превращению в ионы металла. Выбор стабилизатора является главной задачей в химическом синтезе.

В связи с разработкой новых методов химического синтеза экологически чистых НЧ железа приоритетными стабилизаторами являются природные и нетоксичные материалы, к числу которых относятся такие природные полимеры, как хитозан. Биополимер хитозан благодаря биоразлагаемости, биосовместимости, своим терапевтическим свойствам может безопасно взаимодействовать с живыми организмами, что позволит использовать его в сельском хозяйстве для получения биоактивных добавок для почвы, растений и животных (Hisham, et al., 2024; Jiménez-Gómez, et al., 2020).

Хитозан является одним из дешевых и доступных среди биополимеров. Благодаря наличию активных amino- и гидроксильных функциональных групп в химической структуре (рисунок 2), хитозан обладает такими уникальными свойствами как поликатионность, хелатируемость и пленкообразуемость.

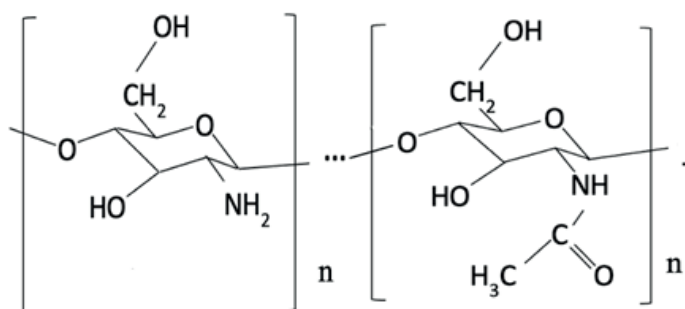


Рисунок 2. Химическая формула хитозана.

Поликатион хитозан играет стабилизирующую роль за счет взаимодействия функциональных групп с НЧ и приводит к их коллоидной устойчивости [Протас и др., 2014]. Стабилизированные хитозаном НЧ железа могут быть использованы для химического модифицирования питательной среды при культивировании микроводоросли хлореллы *Chlorella vulgaris*. Важной особенностью

микроводоросли является ее способность менять свой химический состав в зависимости от питательной среды, что позволяет получить культуру с необходимым набором питательных компонентов (белка до 88%, липидов до 86%, углеводов до 38%) (Kendirlioglu, et al., 2019).

Модификация методов культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris* для их максимального роста и развития, включает создание и изучение физико-химических условий выращивания, таких как температура, освещение, pH, концентрации CO_2 и питательных веществ (Богданова и др., 2019; Deniz, 2020; Дудина и др., 2023). На содержание белка, углеводов, липидов и других химических компонентов в хлорелле значительно влияет концентрация и доступность питательных веществ, таких как макроэлемент азот и микроэлемент железо. Например, концентрация и химическая форма азота в питательной среде оказывают влияние на рост клеток и белковой биомассы хлореллы, поскольку азот является ключевым компонентом аминокислот и белков (Amin, et al., 2013; Yuniarti, et al., 2023). Концентрация железа определяет содержание хлорофилла и активизирует фотосинтетическую деятельность микроводоросли (Плутахин и др., 2017).

Целью данной работы является синтез НЧ железа с применением восстановителя боргидрида натрия и стабилизатора хитозана, а также исследование влияния различных питательных сред с содержанием мочевины и НЧ железа на рост биомассы и химический состав БАВ микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

Материалы и методы. Получение НЧ железа проводили химическим методом путем восстановления катиона железа в растворе $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ боргидридом натрия в присутствии экологического и нетоксичного стабилизатора хитозана в соотношении матрица:биополимер $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ М} : 0,15\%$ (Верная и др., 2019; Jaha, et al., 2024). ИК-спектроскопический анализ НЧ железа и сухой биомассы хлореллы проводили на ИК Фурье-спектрометре ФТ-801 с ATR-приставкой при длинах волн от 400 до 4000 см^{-1} . Исследование морфологии нанопорошка железа и клеток микроводоросли проводили на низковакуумном растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6390 LV компании «JEOL» с системой рентгеноспектрального микроанализа INCA ENERGY 250 фирмы «OXFORD INSTRUMENTS» (Jaha, et al., 2024). Размеры НЧ железа определяли методом динамического лазерного светорассеяния с помощью Malvern Zetasizer NanoZS 90.

Для культивирования микроводоросли использовали коммерческий штамм *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 и три вида питательных сред: стандартная среда Тамия (среда 1) и две модифицированные среды Тамия (среда 2 и среда 3). Стандартная среда Тамия характеризовалась следующим составом (г/л): $\text{KNO}_3 - 5.0$; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 2.5$; $\text{KH}_2\text{PO}_4 - 1.25$; $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} - 0.003$; $\text{H}_3\text{BO}_3 - 2.86$; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 1.81$; $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8 - 0.044$; $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} - 0.222$; $\text{MoO}_3 - 0.01764$; $\text{NH}_4\text{VO}_3 - 0.0226$. С целью увеличения белковой массы химическое модифицирование среды 2 проводили добавлением в стандартную среду Тамия

5 г/л мочевины. Для получения модифицированной среды 3 в стандартную среду Тамия добавляли 5г/л мочевины, 0.55 мг/л НЧ железа и 0.94 мкг/л хитозана. Процедуру культивирования проводили в лабораторных условиях в светонепроницаемом гроубоксе при температуре $28 \pm 2^\circ\text{C}$ и искусственном освещении с интенсивностью 3000 лк, рН среды 7-9. Фотопериод составлял 16 ч света, 8 ч темноты. Микроводоросль выращивали в прозрачных стеклянных колбах, заполненных культурой и питательной средой в объемном соотношении 1:5. Суспензию микроводоросли непрерывно перемешивали потоком воздуха со скоростью 3 л/ч и концентрацией CO_2 в воздушной смеси 0,03%. Эксперименты проводили в трехкратной биологической и аналитической повторностях. Рост биомассы хлореллы определяли оптическим и микроскопическим методами. Измерение оптической плотности суспензии проводили ежедневно в течение 5 суток с помощью УФ-видимого спектрофотометра Specord 210 plus при длине волны 685 нм.

Микроскопическое изучение суспензии хлореллы проводили путем ежедневного подсчета общего количества клеток в камере Горяева при $\times 400$ увеличении с помощью светового бинокулярного микроскопа LOMO. Выделение НЧ железа из коллоидного раствора и биомассы хлореллы из суспензии проводили центрифугированием при оборотах 1500 мин^{-1} в течение 3 минут. Выделенные НЧ железа и биомассу хлореллы сушили в лиофилизаторе Scientz-12 при температуре -59.1°C . Массовую долю общего азота (W_N , %) и содержание сырого протеина ($W_{\text{пр}}$, %) в биомассе хлореллы определяли методом Кьельдаля и рассчитывали по формулам 1 и 2:

$$W_N = \frac{(V_1 \cdot C_{N1} - V_2 \cdot C_{N2}) \cdot 14 \cdot 100}{m \cdot 1000} \quad (1)$$

где V_1 – объем H_2SO_4 в приемнике, мл; C_{N1} – нормальная концентрация H_2SO_4 , ммоль/мл; V_2 – объем раствора гидроксида натрия, израсходованного на титрование, мл; C_{N2} – нормальная концентрация NaOH , ммоль/мл; 14 – атомная молярная масса азота, m – навеска сухой биомассы хлореллы, г; 1000-коэффициент пересчета мг атомной массы азота в г.

$$W_{\text{пр}} = 6.25 \cdot N \cdot 0,1 \quad (2)$$

где 6.25 – коэффициент перевода массовой доли азота в массовую долю сырого протеина, N – масса азота в анализируемой пробе (г/кг), пересчитанная из W_N (%); 0,1 – коэффициент, переводящий единицы массовой доли (г/кг) в проценты.

Элементный анализ сухой биомассы хлореллы проводили оптико-эмиссионным методом на спектрометре EXPEC 6500.

Спектрофотометрический анализ хлорофиллов и каротиноидов проводили экстракцией ацетоном при длинах волн 542.5, 663 и 645 нм, соответствующих спектрам поглощения каротиноидов, хлорофилла *a* и хлорофилла *b*.

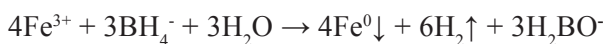
Концентрации (C , мг/л) хлорофиллов a , b и каротиноидов рассчитывали по формулам 3-5 (Iriani, et al., 2024):

$$C_{\text{хлорофилл } a} = (12.7 \cdot D_{663}) - (2.69 \cdot D_{645}) \quad (3)$$

$$C_{\text{хлорофилл } b} = (22.9 \cdot D_{645}) - (4.68 \cdot D_{663}) \quad (4)$$

$$C_{\text{каротиноидов}} = 4.75 \cdot D_{542.5} - 0.226 \cdot D_{663+645} \quad (5)$$

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлен нанопорошок нейтрального железа, синтезированный химическим методом с применением восстановителя боргидрида натрия и стабилизатора хитозана. Восстановление НЧ железа протекает по химической реакции, приведенной в работе [Xu, et al., 2022]:



Стабилизация наночастиц протекает за счет структурного взаимодействия НЧ железа с аминогруппами хитозана, что подтверждается также результатами ИК-спектрометрического анализа (рисунок 3).

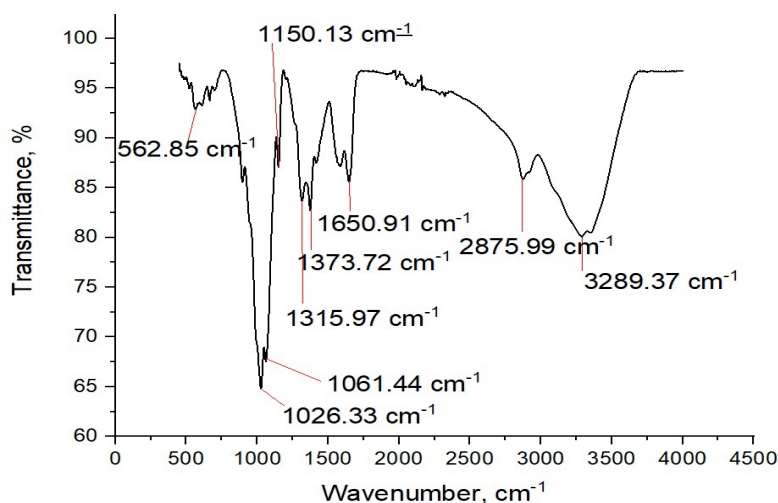


Рисунок 3. ИК-спектры НЧ железа, стабилизированных хитозаном.

ИК-спектры железа с хитозаном показали характерный пик при $3289,37 \text{ см}^{-1}$, что объясняется растяжениями $-\text{OH}$ и $-\text{NH}$ групп хитозана (Jaha, et al., 2024, Лялина и др., 2022). Синтезированные наночастицы показали пик при 526.85 см^{-1} , что соответствует растяжению $\text{Fe}-\text{O}$. Структура хитозана также демонстрирует режимы растяжения $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ в области 1315.97 , 1373.72 см^{-1} , подтверждающие включение хитозановой полимерной матрицы в синтезируемые

НЧ. Полиэлектролиты и другие поверхностно-активные вещества могут модифицировать поверхность НЧ посредством физического осаждения и химических связей, что приводит к электростатическому и пространственному отталкиванию и преодолению агрегации между частицами, вызванной ван-дер-Ваальсовыми и магнитными силами.

Полученные НЧ железа имеют черный цвет и аморфную структуру (рисунок 4).

Метод РЭМ показывает, что полученный наноккомпозит почти полностью покрыт полимерной пленкой хитозана, что обеспечивает стабилизацию НЧ железа (рисунок 5). Средний размер НЧ железа составил 50-80 нм (рисунок 6).

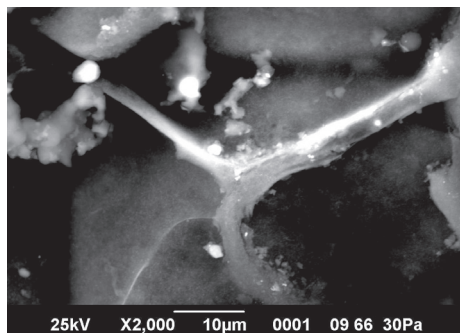
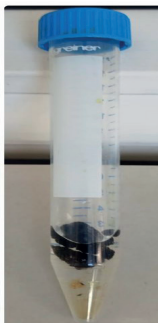
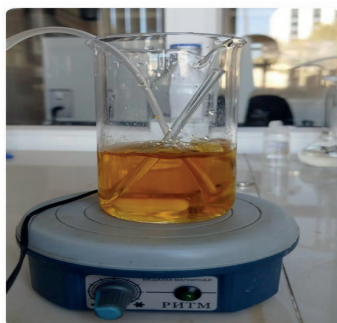


Рисунок 4. Наночастицы железа, полученные с применением биополимера хитозана и боргидрида натрия.

Рисунок 5. РЭМ-изображение НЧ железа с хитозаном.

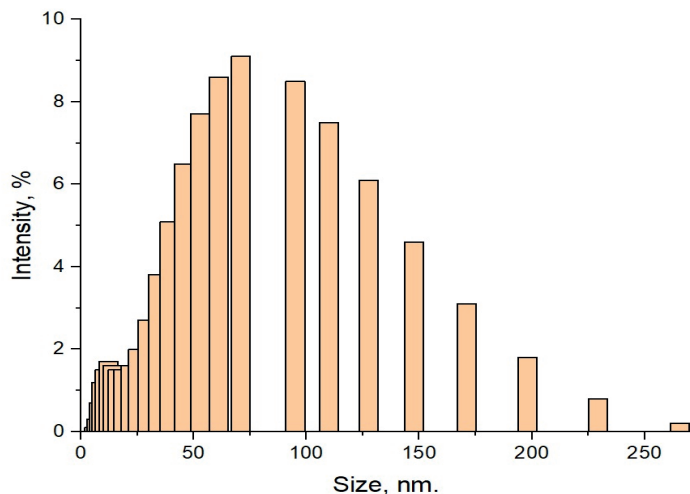


Рисунок 6. Размеры наночастиц железа.

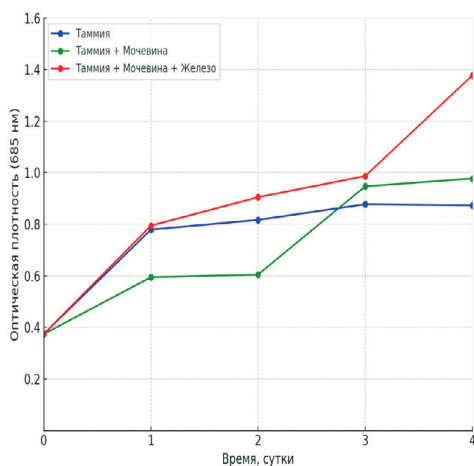
Низкая токсичность НЧ железа, стимулирующее влияние на синтез железосодержащих ферментов, пролонгированность действия на

фотосинтетическую деятельность биосистемы являются предпосылками для использования их в качестве биостимулятора роста хлореллы.

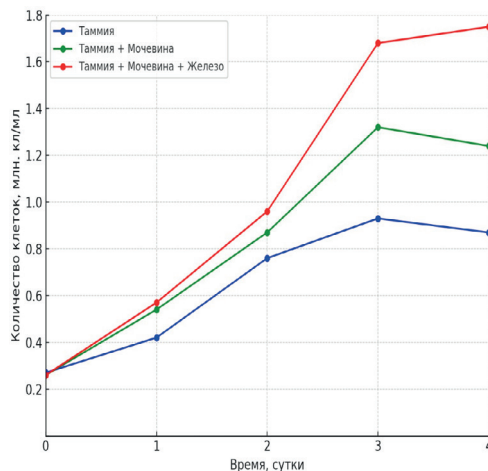
Также для физиологии и роста клеток микроводоросли очень важен источник азота, которым является мочевина.

На рисунке 7 представлена динамика изменения оптической плотности суспензии (рис. 7а) и количества клеток (рис. 7б) микроводоросли *Chlorella vulgaris* (685 нм) в зависимости от продолжительности культивирования для трех питательных сред.

Как видно из рисунка 7, в течение первого дня эксперимента оптическая плотность культуры и концентрация клеток во всех питательных средах изменялись менее заметно, что может быть связано с адаптацией клеток к условиям среды. Со 2-го дня наблюдалось увеличение оптической плотности и количества клеток культуры во всех средах, которое указывает на рост биомассы и жизнеспособность микроводоросли. Результаты измерений показали, что все три питательные среды стимулируют рост *Chlorella vulgaris*, однако модифицированная среда 3 демонстрирует большую эффективность в увеличении биомассы микроводорослей, при этом на 4 сутки их культивирования прирост биомассы в этой среде на 28-50 % больше, чем в средах 1 и 2. Значительный рост биомассы в среде 3 объясняется присутствием мочевины и НЧ железа (Плутахин и др., 2017; Gasanova, et al., 2019). Сухая биомасса микроводоросли, культивированной на модифицированных средах, увеличилась на 11% по сравнению со стандартной средой 1.



(а)



(б)

Рисунок 7. Динамика роста микроводоросли *Chlorella vulgaris* в стандартной и модифицированных средах Таммийя: изменение оптической плотности (а), количество клеток (б).

На рисунке 8 представлены РЭМ микрофотографии микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

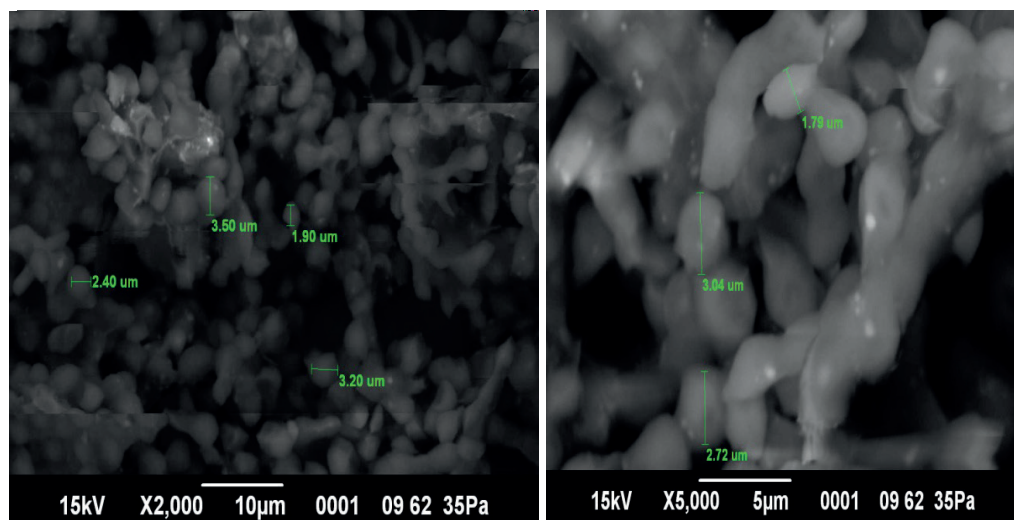


Рисунок 8. Сканирующая электронная микрофотография *Chlorella vulgaris*.

На сканирующих электронных микрофотографиях видно, что клетки микроводоросли имеют чаще округлую и реже овальную форму со средними размерами 2-3 мкм.

В результате элементного анализа изучено содержание наиболее распространенных элементов в сухой биомассе хлореллы (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты элементного анализа сухой биомассы хлореллы.

Питательная среда	Содержание элементов, мг/г			
	Al	Cu	Cr	Fe
	1	2	3	4
Среда 1	0.731±0.005	0.368±0.001	0.496±0.001	0.239±0.001
Среда 2	0.758±0.002	1.321±0.003	1.042±0.003	1.833±0.004
Среда 3	1.621±0.001	1.323±0.002	1.039±0.002	2.429±0.003
Питательная среда	Содержание элементов, мг/г			
	K	Li	Mg	Mn
	5	6	7	8
Среда 1	2.088±0.002	0.014±0.001	0.704±0.007	0.019±0.001
Среда 2	4.458±0.003	0.3875±0.01	7.562±0.003	0.09125±0.003
Среда 3	4.329±0.001	0.0744±0.002	9.829±0.004	0.102±0.002

Данные элементного анализа показали увеличение концентрации всех элементов в хлорелле, культивированной на модифицированных средах в 2 раза для Al, Cu, Cr, K, в 5 раз для Li, Mn, в 10 раз для Fe и в 13 раз для Mg. Добавление в питательную среду мочевины и НЧ железа оказывает стимулирующее действие на накопление жизненно важных компонентов, которые усиливают рост биомассы хлореллы.

С целью подтверждения и наличия в хлорелле белков было проведено ИК-спектрометрическое исследование биомассы (рисунок 9, таблица 2).

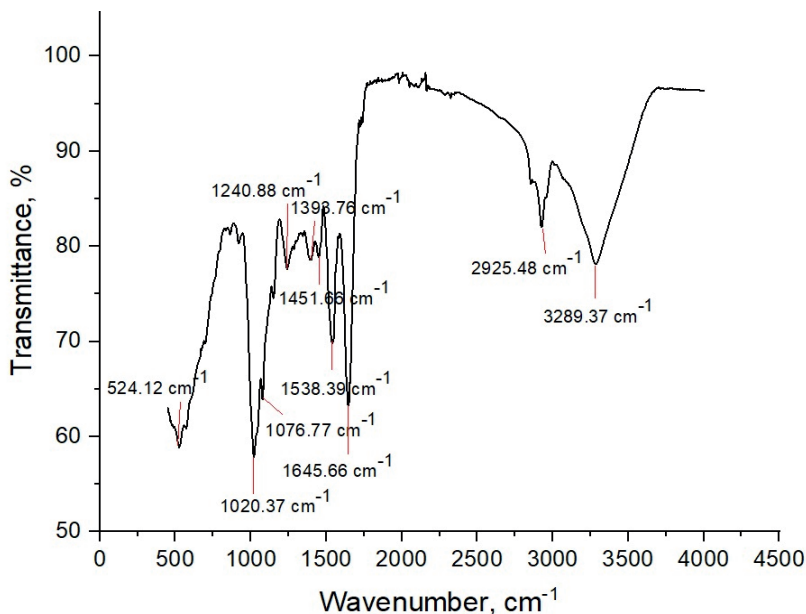


Рисунок 9. ИК-спектры микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

Идентификация спектров показала наличие:

валентных колебаний OH-, NH- групп при 3286.54 см⁻¹ для воды, полисахаридов и белков;

валентных колебаний NH- и CH- групп при 2925.48 см⁻¹ для полисахаридов, аминокислот и белков;

валентных колебаний C=O при 1645.66; 1538.39; 1451.66 и 1393.76 см⁻¹ для белков

валентных колебаний CO- и деформационных колебаний OH- при 1240,00 см⁻¹ для спиртов;

валентных колебаний при 1076.77 и 1020.37 см⁻¹ возможно для карбонильных соединений (Ponnuswamy, et al., 2013).

В целом, изученный спектр показывает способность хлореллы к накоплению белка - основного компонента в химическом составе микроводоросли.

В результате химического анализа выявлены невысокие концентрации белка и общего азота в сухой биомассе хлореллы. Содержание общего азота и сырого протеина в хлорелле, выращенной на всех питательных средах приведено в таблице 2.

Таблица 2 - Содержание общего азота и сырого протеина в *Chlorella vulgaris*, культивированной в стандартной и модифицированной средах Тамийя.

Содержание БАВ	Питательная среда		
	Среда 1	Среда 2	Среда 3
Общий азот (%)	2.0	2.3	4.2
Сырой протеин (%)	12.5	14.7	27.4
Хлорофилл <i>a</i> (мг/л)	29.39	30.20	31.17
Хлорофилл <i>b</i> (мг/л)	52.64	49.93	25.66
Каротиноиды (мг/л)	0.38	0.82	0.38

Невысокую концентрацию общего азота и сырого протеина в биомассе хлореллы, культивированной на среде Тамийя, можно объяснить тем, что маточная культура микроводоросли *Chlorella vulgaris* адаптирована к базовой среде Богданова и на среде Тамийя возможен стрессовый эффект в первом цикле развития. Тем не менее, при модифицировании среды наблюдается увеличение содержания общего азота и сырого протеина в 2 раза. Представленные в таблице 2 результаты содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, показывают хорошую фотосинтетическую деятельность микроводоросли и ее активный рост в начале цикла. Последующее снижение концентрации пигментов позволяют предположить завершение 1 цикла развития хлореллы и необходимость перехода на новый цикл культивирования.

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные демонстрируют высокие биостимулирующие свойства мочевины и НЧ железа для модификации питательной среды микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

Заключение. Методом химического восстановления со стабилизацией хитозаном синтезированы наночастицы железа со средним размером 50-80 нм. Физико-химическими методами проведена идентификация полученных наночастиц. Проведена химическая модификация питательной среды Тамийя с применением наночастиц железа и мочевины. Изучено влияние различных питательных сред Тамийя на физико-химические показатели (оптическая плотность, количество клеток, содержание общего азота и сырого протеина, хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) микроводоросли *Chlorella vulgaris*. Модифицирование питательных сред приводит к росту биомассы, увеличению содержания БАВ – общего азота, сырого протеина, макро- и микроэлементов, пигментов. Полученные результаты показывают возможность целенаправленного увеличения белковой биомассы хлореллы путем модифицирования питательной среды.

Литература

Amin N., Khalafallah M., Ali M.A., Abou-Sdera S.A., & Matter I.A. (2013) Effect of some nitrogen sources on growth and lipid of microalgae *Chlorella* sp. for biodiesel production. The Journal of Applied Sciences Research, — 9(8). — P. 4845-4855.

Ashrafi-Saiedlou S., Rasouli-Sadaghiani M., Fattahi M., Ghosta Y. (2025) Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles fabricated using cell-free supernatant of *Pseudomonas fluorescens* for antibacterial, antifungal, antioxidant, and photocatalytic applications. Scientific Reports, — 15. — P. 1018. <https://orcid/10.1038/s41598-024-84974-0>

Богданова А., Флерова Е., Паюта А. (2019) Влияние условий культивирования на качественные и количественные показатели *Chlorella vulgaris*. *Chemistry of Plant Raw Material*. — P. 293-304. <https://orcid/10.14258/jcpr.m.2019045130>.

Верная О.И., Пейсикова А.В., Фуки М.К., Шабатин В.П., Шабатина Т.И. (2019) Влияние реакционных условий на процесс образования наночастиц железа при восстановлении ионов железа (III) боргидридом натрия. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия*, — № 6 (60). — P. 430-434.

Deniz İ. (2020) Determination of growth conditions for *Chlorella vulgaris*. *Marine Science and Technology Bulletin*, — 9(2). — P. 114-117. <https://orcid/10.33714/masteb.717126>

Дудина Ю.А., Калашникова Е.А., Киракосян Р.Н. (2023) Создание фотобиореактора для эффективного роста хлореллы и изучение влияния спектрального состава света на ее биомассу. *Тимирязевский биологический журнал*, — 1. — P. 15-22. <https://orcid/10.26897/2949-4710-2023-1-15-22>.

Gasanova F. V. (2019) Vliyanie nanochastic na fiziologicheskie karakteristiki i aktivnost' fermentov rastenij, vyrashchennyh v solenyyh pochvah. *Byulleten' nauki i praktiki*, — 5:2. — P. 142-151. <https://orcid/10.33619/2414-2948/39/19>

Hisham F., Maziati Akmal M., Ahmad F., Ahmad K., Samat N. (2024) Biopolymer chitosan: Potential sources, extraction methods, and emerging applications. *Ain Shams Engineering Journal*, — 15:2. — P. 102424. <https://orcid/10.1016/j.asej.2023.102424>

Hussain A., Yasar M., Ahmad G., Ijaz M., Aziz A., Gharib Nawaz M., Ahmad Khan F., Iqbal H., Shakeel W., Momand H., Ali R., Ahmad S., Shah H., Nadeem M., Ahmad D., Anjum F., Faisal S. (2023) Synthesis, characterization, and applications of iron oxide nanoparticles. *International Journal of Health Sciences*, — 17:4. — P. 3-10.

Iriani D., Feliatra H., Karnila R., Chaianate N., Rozi. (2024) Effect of Media Formulations on Chlorophyll, Antioxidant Activity of *Chlorella vulgaris* and Its Potential as a Health Supplement. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, — 17(1). <https://orcid/10.20473/jipk.v17i.157014>

Jaha H.F., Anwar Y., Al-Maaqar S.M., Kamal T., Khan S.B. (2024). Iron-Based Nanoparticles Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Effectiveness. *Adv. Life Sci.*, — 11(2). — P. 525-532. <https://orcid/10.62940/als.v11i2.3096>

Jiménez-Gómez C., Cecilia Ju. (2020) Chitosan: A Natural Biopolymer with a Wide and Varied Range of Applications. *Molecules*, — 25(17). — P. 3981. <https://orcid/10.3390/molecules25173981>

Kendirlioglu S., Kadri C. (2019) Effect on nitrogen sources on growth, protein, total lipid amount and pigment content in *Chlorella vulgaris*. *Fresenius Environmental Bulletin*, — No. 4A (28). — P. 3065-3072.

Kumar V., Kumar Kaushik N., Tiwari S.K., Singh D., Singh B. (2023). Green synthesis of iron nanoparticles: Sources and multifarious biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, — 253:4. — P. 127017. <https://orcid/10.1016/j.ijbiomac.2023.127017>

Лялина Т.С., Луньков А.П., Варламов В.П. (2022) Получение наночастиц металлов с использованием восстанавливающих агентов и хитозана. *Прикладная биохимия и микробиология*, — Т. 58. — № 2. — P. 108-116. <https://orcid/10.31857/S0555109922020131>

Протас С.А., Богомолова Н.А., Тюкова И.С. (2014) Стабилизация золей наночастиц оксида железа в растворах хитозана разной концентрации. *Проблемы теоретической и экспериментальной химии: Тезисы докладов XXIV Российской молодежной научной конференции, посвященной 170-летию открытия химического элемента рутений*. — С. 31-32.

Xu W., Yang T., Liu Sh., Du L., Chen Q., Li X., Dong J., Zhang Zh., Lu S., Gong Y., Zhou L., Liu Y., Tan X. (2022) Insights into the Synthesis, types and application of iron Nanoparticles: The overlooked significance of environmental effects. *Environment International*, — 158. — P. 106980. <https://orcid/10.1016/j.envint.2021.106980>

Yuniarti A., Fakhri M., Arifin N. B., & Hariati A. M. (2023) Effects of Various Nitrogen Sources on the Growth and Biochemical Composition of *Chlorella* sp. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, — 15(2). — P. 448–457. <https://orcid/10.20473/jipk.v15i2.43182>

Плутахин Г.А., Мачнева Н. Л., Трохимчук Н.Н. (2017) Интенсификация культивирования хлореллы с использованием наночастиц железа. *Научный журнал КубГАУ*, — №126 (02). <https://orcid/10.21515/1990-4665-126-054>

Ponnuswamy I., Madhavan S. and Shabudeen S. (2013) Isolation and Characterization of Green Microalgae for Carbon Sequestration, Waste Water Treatment and Bio-fuel Production. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, — 5:2. — P. 17-26.

References

Amin N., Khalafallah M., Ali M.A., Abou-Sdera S.A., & Matter I.A. (2013) Effect of some nitrogen sources on growth and lipid of microalgae *Chlorella* sp. for biodiesel production. *The Journal of Applied Sciences Research*, — 9(8). — P. 4845-4855. (in English)

Ashrafi-Saiedlou S., Rasouli-Sadaghiani M., Fattahi M., Ghosha Y. (2025) Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles fabricated using cell-free supernatant of *Pseudomonas* f luorescens for antibacterial, antifungal, antioxidant, and photocatalytic applications. *Scientific Reports*, — 15. — P. 1018. <https://orcid/10.1038/s41598-024-84974-0> (in English)

Bogdanova A., Flerova E., Payuta A. (2019) Vliyanie uslovii kultivirovaniya na kachestvennye i kolichestvennye pokazateli *Chlorella vulgaris* [Influence of cultivation conditions on qualitative and quantitative indicators of *Chlorella vulgaris*]. *Chemistry of Plant Raw Material*, — P. 293-304. <https://orcid/10.14258/jcprm.2019045130>. (in Russian)

Vernaya O.I., Peisikova A.V., Fuki M.K., Shabatin V.P., Shabatina T.I. (2019) Vliyanie reaktsionnykh uslovii na protsess obrazovaniya nanochastits jeleza pri vosstanovlenii ionov jeleza (III) borgidridom natriya [The effect of reaction conditions on the formation of iron nanoparticles during the reduction of iron (III) ions with sodium borohydride]. *Bulletin of the Moscow University. Series. 2. Chemistry*, — N 6 (60). — P. 430-434. (in Russian)

Deniz İ. (2020) Determination of growth conditions for *Chlorella vulgaris*. *Marine Science and Technology Bulletin*, — 9(2). — P. 114-117. <https://orcid/10.33714/masteb.717126> (in English)

Dudina Yu.A., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. (2023) Sozдание fotobioreaktora dlya effektivnogo rosta hlorelly i izuchenie vliyaniya spektralnogo sostava sveta na ee biomassu [Creation of a photobioreactor for efficient *chlorella* growth and study of the effect of the spectral composition of light on its biomass]. *Timiryazevsky Biological Journal*, — 1. — P. 15-22. <https://orcid/10.26897/2949-4710-2023-1-15-22> (in Russian)

Gasanova F. V. (2019) Vliyanie nanochastich na fiziologicheskie harakteristiki i aktivnost' fermentov rastenij, vyrashchennykh v solenyykh pochvah. *Byulleten' nauki i praktiki*, — 5:2. — P. 142-151. <https://orcid/10.33619/2414-2948/39/19> (in English)

Hisham F., Maziati Akmal M., Ahmad F., Ahmad K., Samat N. (2024) Biopolymer chitosan: Potential sources, extraction methods, and emerging applications. *Ain Shams Engineering Journal*, — 15:2. — P. 102424. <https://orcid/10.1016/j.asej.2023.102424> (in English)

Hussain A., Yasar M., Ahmad G., Ijaz M., Aziz A., Gharib Nawaz M., Ahmad Khan F., Iqbal H., Shakeel W., Momand H., Ali R., Ahmad S., Shah H., Nadeem M., Ahmad D., Anjum F., Faisal S. (2023) Synthesis, characterization, and applications of iron oxide nanoparticles. *International Journal of Health Sciences*, — 17:4. — P. 3-10. (in English)

Iriani D., Feliatra H., Karnila R., Chaiyanate N., Rozi. (2024) Effect of Media Formulations on Chlorophyll, Antioxidant Activity of *Chlorella vulgaris* and Its Potential as a Health Supplement. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, — 17(1). <https://orcid/10.20473/jipk.v17i.157014> (in English)

Jaha H.F., Anwar Y., Al-Maaqar S.M., Kamal T., Khan S.B. (2024) Iron-Based Nanoparticles Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Effectiveness. *Adv. Life Sci.*, — 11(2). — P. 525-532. <https://orcid/10.62940/als.v11i2.3096> (in English)

Jiménez-Gómez C., Cecilia Ju. (2020) Chitosan: A Natural Biopolymer with a Wide and Varied Range of Applications. *Molecules*, — 25(17). — P. 3981. <https://orcid/10.3390/molecules25173981> (in English)

Kendirlioglu S., Kadri C. (2019) Effect on nitrogen sources on growth, protein, total lipid amount and pigment content in *Chlorella vulgaris*. *Fresenius Environmental Bulletin*, — No. 4A (28). — P. 3065-3072. (in English)

Kumar V., Kumar Kaushik N., Tiwari S.K., Singh D., Singh B. (2023) Green synthesis of iron nanoparticles: Sources and multifarious biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, — 253:4. — P. 127017. <https://orcid/10.1016/j.ijbiomac.2023.127017> (in English)

Lyalina T.S., Lunkov A.P., Varlamov V.P. (2022) Poluchenie nanochastits metallov s ispolzovaniem vosstanavlivayushih agentov i hitozana [Production of metal nanoparticles using reducing agents and chitosan]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, — T. 58, № 2. — P. 108-116. <https://orcid/10.31857/S0555109922020131> (in Russian)

Protas S.A., Bogomolova N.A., Tyukova I.S. (2014) Stabilizatsiya zolei nanochastits oksida jeleza v rastvorah hitozana raznoi kontsentratsii [Stabilization of sols of iron oxide nanoparticles in chitosan solutions of different concentrations]. *Problems of theoretical and experimental chemistry: Abstracts of the XXIV Russian Youth Scientific Conference dedicated to the 170th anniversary of the discovery of the chemical element ruthenium*. — P. 31-32. (in Russian)

Xu W., Yang T., Liu Sh., Du L., Chen Q., Li X., Dong J., Zhang Zh., Lu S., Gong Y., Zhou L., Liu Y., Tan X. (2022) Insights into the Synthesis, types and application of iron Nanoparticles: The overlooked significance of environmental effects. *Environment International*, — 158. — P. 106980. <https://orcid/10.1016/j.envint.2021.106980> (in English)

Yuniarti A., Fakhri M., Arifin N. B., & Hariati A. M. (2023) Effects of Various Nitrogen Sources on the Growth and Biochemical Composition of Chlorella sp. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, — 15(2). — P. 448–457. <https://orcid/10.20473/jipk.v15i2.43182> (in English)

Plutakhin G.A., Machneva N. L., Trokhimchuk N.N. (2017) Intensifikatsiya kultivirovaniya hlorelly s ispolzovaniem nanochastits jeleza [Intensification of chlorella cultivation using iron nanoparticles]. *Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, — N 126(02). <https://orcid/10.21515/1990-4665-126-054> (in Russian)

Ponnuswamy I., Madhavan S. and Shabudeen S. (2013) Isolation and Characterization of Green Microalgae for Carbon Sequestration, Waste Water Treatment and Bio-fuel Production. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, — 5:2. — P. 17-26. (in English)

© **B.Kh. Khussain, A.R. Brodskiy*, A.S. Sass, I.I. Torlopov,
K.S. Rakhmetova, 2025.**

JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”,
Almaty, Kazakhstan.
E-mail: albrod@list.ru

SOLID CARBON DIOXIDE ADSORBENT BASED ON ALKALI METAL CARBONATES WITH PROMOTER ADDITIVES

Khussain Bolatbek Khussainovich — Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: b.khussain@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9588-1012>;

Brodskiy Aleksandr Rafaelevich — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Physical Methods, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: albrod@list.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6216-4738>;

Sass Alexander Sergeyevich — Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Sector of Modeling of Technological Processes, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: aleksandr-sass@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>;

Torlopov Ivan Igorevich — Junior Researcher, Sector of Design of Technological Processes, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: myndfrea@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

Rakhmetova Kenzhegul Saginbayevna — Researcher, Sector of Modeling of Technological Processes, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: rahmetova_75@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>.

Abstract. The state of the environment is an international, transboundary problem. In this context, issues related to the enormous emissions of greenhouse gases by industrialized countries and the global warming process are considered. One of the most significant components of greenhouse gases is carbon dioxide. In this regard, globally, including Kazakhstan, more and more attention is paid to decarbonization issues. Decarbonization includes several aspects, with one of the most important being carbon dioxide capture. The paper describes the procedure for the synthesis of a solid sorbent based on alkali metal carbonates using an original technique, designed to absorb carbon dioxide from flue gases of thermal devices through the adsorption method. The sorbent is a solid material consisting of two or more components: a support (matrix) characterized by good binding properties, an active component - alkali metal carbonates (Na, K, Li) - and additional promoting additives introduced

to increase sorbent activity and strength. Aluminosilicate-based materials (kaolins, etc.) were used as the support. The developed method allows introduction of various promoting additives - oxides of calcium, magnesium and other alkaline earth metals, which provide an increase in the strength and water resistance of the sorbent. In this capacity, TPP ash and asbestos, including as waste products, can also be used, which, as shown in the course of experiments, provide good properties when used as a support or promoter.

Key words: decarbonization, solid sorbents, synthesis of solid sorbents

© **Б.Х. Хусайн, А.Р. Бродский*, А.С. Сасс, И.И. Торлопов,
К.С. Рахметова, 2025.**

«Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты»
АҚ, Алматы, Қазақстан.
E-mail: albrod@list.ru

ПРОМОУТЕРЛІК ҚОСПАЛАРЫ БАР СІЛТІЛІ МЕТАЛЛ КАРБОНАТТАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗЫНЫҢ ҚАТТЫ АДСОРБЕНТІ

Хусан Болатбек Хуссанұлы — техника ғылымдарының кандидаты, «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ Бас директорының орынбасары, Алматы, Қазақстан,

E-mail: b.khusain@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9588-1012>;

Бродский Александр Рафаэлевич — химия ғылымдарының кандидаты, доцент, «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ физикалық әдістер зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан,

E-mail: albrod@list.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6216-4738>;

Сасс Александр Сергеевич — химия ғылымдарының кандидаты, Технологиялық процестерді модельдеу секторының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: aleksandr-sass@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>;

Торлопов Иван Игоревич — технологиялық процестерді модельдеу секторының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: myndfrea@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

Рахметова Кенжегүл Сағынбайқызы — технологиялық процестерді модельдеу секторының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан,

E-mail: rahmetova_75@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>.

Аннотация. Тіршілік ету ортасының экологиялық жағдайы халықаралық, трансшекаралық мәселе болып табылады. Бұл тұрғыда индустриалды дамыған елдердің парниктік газдардың үлкен шығарындыларына және "жаһандық жылыну" процесіне қатысты мәселелер қарастырылады. Парниктік газдардың маңызды компоненттерінің бірі –көмірқышқыл газы. Осыған байланысты әлемде, соның ішінде Қазақстанда да декарбонизация мәселелеріне көбірек көңіл бөлінуде. Декарбонизация бірнеше аспектілерді қамтиды және ең маңыздыларының бірі-көмірқышқыл газын алу (шығару). Жұмыста жылу құрылғыларының түтін газдарынан көмірқышқыл газын адсорбциялық әдіспен

сіңіруге арналған сілтілі металл карбонаттарына негізделген қатты сорбенттің бастапқы әдісіне сәйкес синтездеу процедурасы сипатталған. Сорбент – бұл екі немесе одан да көп компоненттерден тұратын қатты материал: жақсы байланыстырушы қасиеттерімен сипатталатын тасымалдаушы (матрица), белсенді компонент – сілтілі металл карбонаттары (Na, K, Li) – және сорбенттің белсенділігі мен беріктігін арттыру мақсатында енгізілген қосымша промоторлік қоспалар. Тасымалдаушы (матрица) ретінде алюминий силикаты негізіндегі материалдар (каолиндер және т.б.) болды. Белсенді компонент ретінде сілтілі металдардың карбонаттары мен бикарбонаттары және олардың гидроксидтері сыналды. Ең перспективалы сілтілі металл карбонаттары болды. Өзірленген әдістемеде сіңіргіштің беріктігі мен суға төзімділігін арттыруды қамтамасыз ететін әртүрлі промоторлік қоспаларды – кальций, магний оксидтерін және басқа сілтілі жер металдарын енгізу көзделген. Бұл сапада ЖЭО күлі мен асбест, соның ішінде жергілікті шыққан қалдықтар түрінде де қолданылуы мүмкін, олар эксперименттерде көрсетілгендей, тасымалдаушы немесе промотор ретінде енгізілгенде сіңіргіштің жақсы өнімділігін қамтамасыз етеді. Қатты сорбенттерді қолдану шарттарына байланысты ұнтақ түрінде де, түйіршікті түрінде де алуға болады.

Түйін сөздер: декарбонизация, қатты сорбенттер, қатты сорбенттердің синтезі

**© Б.Х. Хусайн, А.Р. Бродский*, А.С. Сасс, И.И. Торлопов,
К.С. Рахметова, 2025.**

АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского»,
Алматы, Казахстан.
E-mail: albrod@list.ru

ТВЁРДЫЙ АДСОРБЕНТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ КАРБОНАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРОМОТИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

Хусайн Болатбек Хусайнович — кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: b.khusain@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9588-1012>;

Бродский Александр Рафаэлевич — кандидат химических наук, ассоциированный профессор, заведующий лабораторией АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: albrod@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6216-4738>;

Сасс Александр Сергеевич — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: aleksandr-sass@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>;

Торлопов Иван Игоревич — младший научный сотрудник АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: myndfrea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

Рахметова Кенжегуль Сагинбаевна — научный сотрудник АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: rahmetova_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>.

Аннотация. Экологическое состояние среды обитания является международной, трансграничной проблемой. В этом контексте рассматриваются вопросы, связанные с огромными выбросами парниковых газов промышленно развитыми странами и процесс глобального потепления. Одним из самых значимых компонентов парниковых газов является диоксид углерода. В связи с этим в мире, а также в Казахстане, вопросам декарбонизации уделяется большое внимание. Декарбонизация включает в себя несколько аспектов и одним из наиболее важных является улавливание диоксида углерода. В работе описывается процедура синтеза по оригинальной методике твердого сорбента на основе карбонатов щелочных металлов, предназначенного для поглощения диоксида углерода из дымовых газов тепловых устройств адсорбционным методом. Сорбент представляет собой твердый материал, состоящий из двух и более компонентов: носителя (матрицы), характеризующейся хорошими связующими свойствами, активного компонента – карбонатов щелочных металлов (Na, K, Li) – и дополнительных промотирующих добавок, вводимых в целях увеличения активности и прочности сорбента. Носителем (матрицей) служили материалы на алюмосиликатной основе (каолины и т.п.). В качестве активного компонента были опробованы карбонаты и бикарбонаты щелочных металлов и их гидроксиды. Наиболее перспективными оказались карбонаты щелочных металлов. Разработанной методикой предусмотрено введение различных промотирующих добавок – оксидов кальция, магния и других щелочноземельных металлов, обеспечивающих увеличение прочности и водостойкости поглотителя. В этом качестве также могут применяться зола ТЭЦ и асбест, в том числе в виде отходов местного происхождения, которые, как показано в ходе экспериментов, при использовании в виде носителя или промотора обеспечивают хорошие характеристики поглотителя. Твердые сорбенты могут быть получены как в виде порошка, так и в гранулированной форме.

Ключевые слова: декарбонизация, твёрдые сорбенты, синтез твёрдых сорбентов

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе целевого финансирования МОН РК ИРН BR21882241 «Исследование и разработка комплексной системы улавливания и хранения CO₂ на промышленных объектах Республики Казахстан для сокращения выбросов парниковых газов».

Введение

Экологическое состояние среды обитания является международной, трансграничной проблемой. В этом контексте рассматриваются вопросы, связанные с огромными выбросами парниковых газов промышленно развитыми странами и процесс «Глобального потепления». Одним из самых значимых компонентов парниковых газов является диоксид углерода. В связи с этим в мире, в том числе и Казахстане, вопросам декарбонизации уделяется всё большее внимание (Aminu, et al., 2017; Hüser, et al., 2017; Ахметов, и др., 2020; Adáñez,

et al., 2018; Koons, 2022; Mirza, et al., 2022; Robertson, et al., 2022; Munson, et al., 2022). Являясь подписантом Парижского соглашения (Wang, et al., 2019). Казахстан взял на себя обязательства по снижению эмиссии парниковых газов, в том числе и диоксида углерода. Кроме того, с 2026 года ЕС планирует ввести налог на продукцию тех стран и производителей, которые оставляют высокий углеродный след, а прогнозируемая цена квоты CO₂ к 2030 году составит \$129 за тонну (Adam, et al., 2022). Решение проблемы лежит на пути декарбонизации выбросов дымовых газов тепловых устройств, путём использования эффективных сорбентов для поглощения углекислого газа. Именно вопросам синтеза эффективных сорбентов CO₂ по оригинальной методике посвящена данная работа, являясь продолжением цикла наших статей (Хусаин, и др., 2024; Тельманов, и др., 2024) по декарбонизации.

Разработанной методикой предусмотрено введение различных промотирующих добавок – оксидов кальция, магния и других щелочноземельных металлов, обеспечивающих увеличение прочности и в особенности водостойкости поглотителя (Ильин, и др., 2004; Fu, et al., 2022; Pan, et al., 2023). В этом качестве также могут применяться зола ТЭЦ и асбест, в том числе в виде отходов, местного происхождения, которые, как показано в ходе экспериментов, при введении в виде носителя или промотора обеспечивают высокие характеристики поглотителя.

Материалы и основные методы

Сырьём для получения предлагаемого поглотителя (сорбента) служили:

- носитель – каолины состава Al₂O₃-SiO₂ и другие алюмосиликаты;
- активные компоненты - карбонаты щелочных металлов (сода кальцинированная - Na₂CO₃ или поташ - K₂CO₃);
- промотирующие добавки – оксид кальция (CaO), оксид магния (MgO) и других щелочноземельных металлов, зола уноса ТЭС (элементный состав: O>55,0; Na<0,5; Al ~ 15,0; Si~25,0; S<0,3; Cl<0,3; K~0,3; Ca<0,3; Ti~0,5; Fe~1,3 %, вес.) и асбест хризотилковый (MgSi(OH)₆) для увеличения прочности и водостойкости поглотителя.

Состав дымовых газов определялся с помощью газовых анализаторов семейства OPTIMA 7 (MRU, ФРГ).

Элементный анализ проводился с помощью энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии на энергодисперсионной системе микроанализа INCA Energy 450, установленной на сканирующий электронный микроскоп JSM 6610 LV, JEOL, Япония.

Фазовый состав проводился на автоматизированном рентгеновском дифрактометре Дрон-4-07 Россия. Трубка с кобальтовым анодом.

Режим съёмки:

- скорость развёртки 2 град./мин;
- рабочие параметры трубки: 30 кВ, 20 мА.

Для определения площади удельной поверхности применялся метод БЭТ, по низкотемпературной адсорбции азота. Стандартная методика. Прибор - AccuSorb, фирма Micromeritics, USA.

Результаты и обсуждение.

Известно несколько способов получения адсорбента диоксида углерода, в частности:

- способ получения адсорбента диоксида углерода, в котором для сохранения необходимого для сорбции диоксида углерода содержания воды в качестве модифицирующего агента используют гидроксид натрия и калия и хлорид кальция. Недостатком способа являются небольшая динамическая активность адсорбента, в особенности при эксплуатации в условиях повышенной теплоотдачи;

- способ получения адсорбента диоксида углерода, содержащего гидроксиды щелочноземельных металлов и предназначенного для использования в дыхательных аппаратах. Способ получения адсорбента заключается в формировании гидроксида кальция, сушке гранул и стабилизации адсорбента. На стадии формирования или после сушки в адсорбент вводят модифицирующий агент, в качестве которого используют карбонат калия в количестве 3-10 вес. %. Недостатками способа являются низкая механическая прочность адсорбента на раздавливание и на истирание, в особенности при транспортировке и загрузке, связанная с использованием в качестве носителя малопрочного гидроксида кальция, а также высокие температуры регенерации карбоната кальция, образующегося при поглощении диоксида углерода сорбентом;

- способ удаления CO_2 из газовых потоков, заключающийся в контакте потока с адсорбента, полученного пропиткой пористого оксида алюминия оксидом или солью щелочного или щелочноземельного металла, разлагающимся при термообработке, предпочтительно карбонатом или бикарбонатом натрия или калия с дальнейшим прокаливанием при $350\text{--}700^\circ\text{C}$. Недостатками способа являются применение дефицитного сырья – активного оксида алюминия, получение которого характеризуется высокими затратами энергии и большим количеством сточных вод, а также недостаточная эффективность адсорбента;

- способ удаления диоксида углерода из газовых смесей, такой, что поглотитель получают пропиткой карбонатом калия пористого оксида алюминия, при этом оксид алюминия предварительно обрабатывают щелочным раствором, затем в поры подготовленного таким образом оксида алюминия пропиткой вносят карбонат калия. В качестве щелочного раствора используют раствор гидроксидов или карбонатов щелочных металлов, или любую их смесь. Количество внесенного карбоната калия составляет 5-30 масс. %. Способ удаления диоксида углерода из газовых смесей, в т.ч. для адсорбционного выделения диоксида углерода из атмосферного воздуха в циклических процессах в условиях термической регенерации либо короткоцикловой безнагревной адсорбции заключается в том, что его проводят при температуре $20\text{--}200^\circ\text{C}$ и используют вышеуказанный поглотитель. Недостатками являются применение в качестве носителя поглотителя диоксида углерода дефицитного активного оксида алюминия, а также необходимость использования опасных высокотемпературных щелочных растворов;

- способ получения сорбента для удаления CO_2 с высокой химической

стабильностью на протяжении нескольких циклов, путем соединения глинистого носителя, щелочной соли и аминовой жидкости. Щелочная соль присутствует относительно глинистого субстрата в весовом соотношении 1-50 частей на 100 частей глинистого субстрата. Аминовая жидкость присутствует относительно комбинации глина-щелочь в весовом соотношении 1-10 частей на 10 частей комбинации глина-щелочь. Сорбент CO_2 особенно эффективен в низкотемпературных циклах очистки от CO_2 в газовых потоках с концентрацией CO_2 менее 2000 ppm и концентрацией кислорода около 21% (Fu, et al., 2022). Недостатками являются необходимость использования растворов этаноламинов, характеризующихся резким запахом и высокой токсичностью. Всем этим способам синтеза сорбента диоксида углерода присущи, те или иные недостатки. Процесс приготовления сорбента, предлагаемый и описываемый в настоящей работе учитывает вышеперечисленные проблемы. Его можно условно разделить на три этапа, которые частично описаны в (Ильин, и др., 2004). На первом этапе исходное сырье (носитель, активный компонент и промоторы) взвешивались и тщательно смешивались в необходимой пропорции:

носитель: активный компонент: промотор = 3: 6: 1.

Полученную порошкообразную смесь увлажняли водой до получения влажной массы для формования «лепешки». Массу заворачивали в пленку, прокатывали и выдерживали в течение 90 – 100 мин при комнатной температуре.

На втором этапе из полученной массы получали гранулы, которые формовали на экструзионном аппарате-грануляторе. Сформованные гранулы выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 18–24 ч. На последнем третьем этапе проводили сушку гранул на воздухе при температуре 250°C в течение 3 – 4 ч. Высушенные гранулы фасовали, что обеспечивало сохранение адсорбционных и структурно-прочностных характеристик. На основе этой методики проводился синтез образцов с их дальнейшим исследованием с целью проверки влияния различных добавок на адсорбционные и структурно-прочностные характеристики сорбента. Предварительными исследованиями было показано, что оптимальное содержание активного компонента в сорбентах типа на основе карбоната натрия составляет ~25%, масс. При большем процентном содержании происходит резкое ухудшение формуемости массы, прочности на раздавливание и истирание, а также влагостойкости гранул. Дальнейшая работа проводилась именно с 25%, масс. содержанием активного компонента. Данные с техническими характеристиками синтезированных сорбентов различного состава приведены в таблице.

Таблица — Технические характеристики гранулированного сорбента «С»

Наименование показателя	Сорбент				
	С-1(6)	С-2(9)	С-3(10)	С-4(7)	С-5
Внешний вид	Гранулы цилиндрической формы белого цвета (допускается бежевый или серый оттенок)				
Размеры гранул, мм:					
– диаметр	$4,00 \pm 0,50$	$4,00 \pm 0,50$	$4,00 \pm 0,50$	$4,00 \pm 0,50$	$4,00 \pm 0,50$
– длина	$12,50 \pm 2,50$	$12,50 \pm 2,50$	$12,50 \pm 2,50$	$12,50 \pm 2,50$	$12,50 \pm 2,50$

Фазовый состав	Na ₂ CO ₃ , каолин	Na ₂ CO ₃ , каолин, CaCO ₃	Na ₂ CO ₃ , каолин, MgO	Na ₂ CO ₃ , каолин, зола ТЭЦ	Na ₂ CO ₃ , каолин, хризотил
Насыпная плотность, г/ см ³	0,69	0,59	0,74	0,70	0,63
Площадь удельной поверхности, м ² /г	21	38	22	20	26
Механическая прочность на раздавливание, МПа, не менее	0,50	1,00	1,00	0,80	0,80
Сорбционная ёмкость по CO ₂ , ммоль/г	3,846	1,250	1,972	2,959	2,543
Диапазон температур десорбции CO ₂ , °C	70–125 200–290	90–135	120–160	85–190	85–175

Сравнение данных, приведённых в таблице, позволяет прийти к нескольким заключениям:

- наилучшие характеристики имеют сорбенты C1; C4; C5;
- диапазон десорбции для сорбента C1 имеет две неперекрывающиеся области, одна из которых расположена в высокотемпературном интервале;
- механические характеристики (прочность на раздавливание) у сорбентов C4; C5 существенно выше чем у C1;
- ёмкость гранул свежеприготовленных сорбентов по отношению к CO₂ после прохождения 10 циклов уменьшается не более чем на 10 – 15%.

Принимая во внимание узкий температурный интервал десорбции для сорбентов C4; C5 и более низкую максимальную температуру по сравнению с сорбентом C1, несмотря на высокую сорбционную ёмкость последнего, можно констатировать большую технологичность использования сорбентов C4; C5, особенно сравнивая величины прочности на раздавливание. Широкий двухдиапазонный температурный интервал и высокая максимальная температура десорбции приводят к высоким энергетическим затратам на процесс регенерации адсорбента. При дальнейшем развитии технологии синтеза сорбенты C4; C5 можно будет рекомендовать для промышленного применения.

Заключение

Резюмируя, можно сделать вывод о существенных преимуществах предлагаемого способа синтеза твёрдого сорбента диоксида углерода.

Отличительными особенностями метода являются:

- использование нетоксичных и не обладающих отрицательными органолептическими свойствами реагентов (носитель, активный компонент, промотирующие добавки);
- использование в качестве носителя каолина или других алюмосиликатов;
- использование в качестве промотирующих добавок оксидов кальция, магния и других щелочноземельных металлов, а также золы ТЭЦ и (или) асбестовой крошки - отходов местных производств;

- твердые сорбенты могут быть получены как в виде порошка, так и в гранулированной форме.

Предложенный способ позволяет использовать местное Казахстанское сырьё, а именно, отходы в виде золы уноса отечественных ТЭЦ и других тепловых устройств, использующих твердое ископаемое топливо, а также отходов в виде мелкодисперсной асбестовой крошки, направляемой в отвалы, от местных производств, применяющих в качестве сырья асбест. Использование подобного рода отходов, помимо прочего, позволит обеспечить их частичную утилизацию и таким образом улучшить состояние окружающей среды.

Литература

- Adam S., Delestre I., Levell P., Miller H. (2022) Tax policies to reduce carbon emissions, *Fisc Stud*, 43:235 — 263. DOI: 10.1111/1475-5890.12308
- Adánez J., Abad A., Mendiara T., Gayán P., García-Labiano F. (2018) Chemical looping combustion of solid fuels, *Prog Energy Combust Sci*, 65:6. — P. 66. DOI: 10.1016/j.peccs.2017.07.005
- Aminu M.D., Nabavi S.A., Rochelle C.A., Manovic V. (2017) A review of developments in carbon dioxide storage, *Appl Energy*, 208:1389. — P. 1419. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2017.09.015
- Ахметов В.Р., Смирнов О.В. (2020) Улавливание и хранение диоксида углерода. Проблемы и перспективы, *Башкирский химический журнал*, 27:3:103. — P. 115. DOI: 10.17122/bcj-2020-3-103-115
- Ильин А.П., Прокофьев В.Ю. Физико-химическая механика в технологии катализаторов и сорбентов: Монография. — Иваново: ИГХТУ, 2004. — 316 с. ISBN 5-9616-0049-1
- Koons E. Top Carbon Capture Projects in 2022 — Great Plains. *Energy Tracker Asia* (2022). URL: <https://energytracker.asia/carbon-capture-projects>
- MacGregor C.D.R., Forsyth W.G. (1983) Absorption of carbon dioxide. US Patent 4407723. 04.10.1983.
- Mirza N., Kearns D. Technical report. State of the art: CCS technologies 2022. Global CCS Institute (2022). URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-ofthe-Art-CCS-Technologies-2022.pdf>
- Munson R., Point Source Carbon Capture Program. National Energy Technology Laboratory (2022). URL: <https://netl.doe.gov/coal/carbon-capture/pre-combustion>
- Pan H., Yu C., Suo X., Yang L., Cui X., Xing H. (2023) Emerging porous materials for carbon dioxide adsorptive capture: Progress and challenges, *Mater Chem Front*, 7:6463 — 6482. DOI: 10.1039/D3QM00705G
- Robertson B., Mousavian M. Shute Creek – world's largest carbon capture facility sells CO₂ for oil production, but vents unsold. IEEFA (2022). URL: <https://ieefa.org/articles/shute-creek-worlds-largest-carbon-capture-facility-sells-co2-oilproduction-vents-unsold>
- Siriwardane R.V., Rosencwaig S. (2015) Method of preparation of a CO₂ removal sorbent with high chemical stability during multiple cycles. US Patent 9079160. 14.07.2015.
- Slaugh L.H., Willis C.L. (1984) CO₂ removal from gaseous streams. US Patent 4433981. 28.02.1984.
- Симаненков С.И., Александрова Т.И., Кулаков Н.И., Путин Б.В. (1998) Способ получения адсорбента диоксида углерода. Патент на изобретение Российской Федерации № 2152251
- Тельманов М.М., Хусаин Б.Х., Хусаин А.Х., Бродский А.Р. (2024) Создание цифровых двойников, включая модуль декарбонизации, при моделировании и визуализации систем очистки дымовых газов промышленных предприятий, *Доклады НАН РК*, 352:4:179-194. DOI: 10.32014/2023.2518 — 1483.318
- Wang X., Zheng H., Wang Z., Shan Y., Meng J., Liang X., Feng K., Guan D. (2019) Kazakhstan's CO₂ emissions in the post-Kyoto Protocol era: Production-and consumption-based analysis, *J Environ Manag*, 249:109393. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109393
- Fu L., Ren Z., Si W., Ma Q., Huang W. (2022) Research progress on CO₂ capture and utilization technology, *J CO₂ Util*, 66:102260. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102260

Hüser N., Schmitz O., Kenig E.Y. (2017) A comparative study of different amine-based solvents for CO₂-capture using the rate-based approach, *Chem Eng Sci*, 157:221 — 231. DOI: 10.1016/j.ces.2016.06.027

Хусаин Б.Х., Бродский А.Р., Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С. Предварительная очистка газов тепловых устройств в технологии декарбонизации, *Доклады НАН РК*, 349:1:271-282. DOI: 10.32014/2024.2518 — 1483.272

Шаронов В.Е., Окунев А.Г., Губарь А.В., Аристов Ю.И. (2003) Поглотитель диоксида углерода и способ удаления диоксида углерода из газовых смесей. Патент на изобретение Российской Федерации № 2244586

References

Adam S., Delestre I., Levell P., Miller H. (2022) Tax policies to reduce carbon emissions, *Fisc Stud*, 43:235-263. DOI: 10.1111/1475 — 5890.12308 (in Eng.)

Adánez J., Abad A., Mendiara T., Gayán P., García-Labiano F. (2018) Chemical looping combustion of solid fuels, *Prog Energy Combust Sci*, 65:6. — P. 66. DOI: 10.1016/j.pecs.2017.07.005 (in Eng.)

Akhmetov V.P., Smirnov O.V. (2020) Upravlyanie i hranenie dioksida ugleroda. Problemy i perspektivy [Carbon dioxide capture and storage. Problems and perspectives]. *Bashkir Chemical Journal*, 27:3:103 — P. 115. DOI: 10.17122/bcj-2020-3- 103-115 (in Russ.)

Aminu M.D., Nabavi S.A., Rochelle C.A., Manovic V. (2017) A review of developments in carbon dioxide storage, *Appl Energy*, 208:1389. — P. 1419. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2017.09.015 (in Eng.)

Fu L., Ren Z., Si W., Ma Q., Huang W. (2022) Research progress on CO₂ capture and utilization technology, *J CO₂ Util*, 66:102260. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102260 (in Eng.)

Hüser N., Schmitz O., Kenig E.Y. (2017) A comparative study of different amine-based solvents for CO₂-capture using the rate-based approach, *Chem Eng Sci*, 157:221 — 231. DOI: 10.1016/j.ces.2016.06.027 (in Eng.)

Il'in A.P., Prokof'ev V.Ju. *Fiziko-himicheskaya mekhanika v tekhnologii katalizatorov i sorbentov* [Physicochemical Mechanics in Catalyst and Sorbent Technology]: Monograph. Ivanovo: ISUTU, 2004. 316 p. ISBN 5-9616-0049-1 (in Russ.)

Koons E. Top Carbon Capture Projects in 2022 — Great Plains. *Energy Tracker Asia* (2022). URL: <https://energytracker.asia/carbon-capture-projects> (in Eng.)

Khussain B.Kh., Brodskiy A.R., Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S. (2024) Predvaritel'naya oshistka gazov teplovykh ustroystv v tekhnologii dekarbonizatsii [Preliminary treatment of thermal devices' emissions in decarbonization technology]. Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 349:1:271 — 282. DOI: 10.32014/2024.2518-1483.272 (in Russ.)

MacGregor C.D.R., Forsyth W.G. (1983) Absorption of carbon dioxide. US Patent 4407723. 04.10.1983 (in Eng.)

Mirza N., Kearns D. Technical report. State of the art: CCS technologies 2022. Global CCS Institute (2022). URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/State-ofthe-Art-CCS-Technologies-2022.pdf> (in Eng.)

Munson R., Point Source Carbon Capture Program. National Energy Technology Laboratory (2022). URL: <https://netl.doe.gov/coal/carbon-capture/pre-combustion> (in Eng.)

Pan H., Yu C., Suo X., Yang L., Cui X., Xing H. (2023) Emerging porous materials for carbon dioxide adsorptive capture: Progress and challenges, *Mater Chem Front*, 7:6463 — 6482. DOI: 10.1039/D3QM00705G (in Eng.)

Robertson B., Mousavian M. Shute Creek – world's largest carbon capture facility sells CO₂ for oil production, but vents unsold. IEEFA (2022). URL: <https://ieefa.org/articles/shute-creek-worlds-largest-carbon-capture-facility-sells-co2-oilproduction-vents-unsold> (in Eng.)

Sharonov V.E., Okunev A.G., Gubar' A.V., Aristov Ju.I. (2003) Poglotitel' dioksida ugleroda i sposob udaleniya dioksida ugleroda iz gazovykh smesey [Carbon dioxide absorbent and method for removing carbon dioxide from gas mixtures]. Russian Federation Invention Patent No. 2244586 (in Russ.)

Simanenkova S.I., Aleksandrova T.I., Kulakov N.I., Putin B.V. (1998) Sposob polucheniya adsorbenta dioksida ugleroda [Method for producing a carbon dioxide adsorbent]. Russian Federation Invention Patent No. 2152251 (in Russ.)

Siriwardane R.V., Rosencwaig S. (2015) Method of preparation of a CO₂ removal sorbent with high chemical stability during multiple cycles. US Patent 9079160. 14.07.2015 (in Eng.)

Slaugh L.H., Willis C.L. (1984) CO₂ removal from gaseous streams. US Patent 4433981. 28.02.1984 (in Eng.)

Telmanov M.M., Khussain B.Kh., Khussain A.Kh., Brodskiy A.R. (2024) Sozdanie cifrovyyh dvojnikov, vklyuchaya modul' dekarbonizatsii, pri modelirovanii i vizualizatsii sistem ochistki dymovykh gazov promyshlennykh predpriyatij [Creation of digital twins, including the decarbonization module, in modelling and visualization of flue gas cleaning systems in industrial plants], Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 352:4:179-194. DOI: 10.32014. — 2023.2518 — 1483.318 (in Russ.)

Wang X., Zheng H., Wang Z., Shan Y., Meng J., Liang X., Feng K., Guan D. (2019) Kazakhstan's CO₂ emissions in the post-Kyoto Protocol era: Production-and consumption-based analysis, J Environ Manag, 249:109393. DOI: 10.1016/j.jenvman. — 2019. — 109393 (in Eng.)

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Cross Check <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Директор отдела издания научных журналов НАН РК *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Ж.Ш. Әден*

Верстка на компьютере *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 23.06.2025.

Формат 60x88¹/₈.

18,0 п.л. Заказ 2.