

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№2
2026**

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

2026 • 2



**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND
CHEMICAL SCIENCES**

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

Editor-in-Chief:

ZHURINOV Murat Zhurinovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of IAAS and NAS RK, General Director of the Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemicals (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960> <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the JSC "Phytochemistry Research and Production Center", (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

BOSHKAEV Kuantai Avgazyevich, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.**ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)**

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (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 № **KZ93VPY00121157** issued **05.06.2025**Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

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

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрынулы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХҒАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3E>; <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділулы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мынжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, "Фитохимия" ғылыми-өндірістік орталығы " АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тілеккабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Сесаре, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корея 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), нанокұрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Қуантай Авгазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БҮРКІТБАЕВ Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнұтталайұлы, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (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 **05.06.2025 ж.** берген № **KZ93VPY00121157** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *физика, химия.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

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

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МААН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3C003D%3E>; <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

АДЕКЕНОВ Сергезы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор АО "Научно-производственного центра "Фитохимия" (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметжахи Искендирович, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Куантай 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БУРКИТБАЕВ Мухамбеткали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/wos/author/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағаевич, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

АБИШЕВ Медеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

АБИЛЬМАТЖАНОВ 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

Собственник: ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).

Свидетельство № KZ93VPY00121157 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 **05.06.2025**Тематическая направленность: *физика, химия*.

Периодичность: 4 раза в год.

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

CONTENTS

PHYSICS

Koshtybayev T.B., Aliev Sh., Aliyeva M.E., Zhavliyeva A.T. Covariant approach to the kinetic theory of plasma in a strong electromagnetic field.....	13
Kemelbekova A., Shongalova A., Bondar E., Otunchi Ye. Recycling technologies for spent lithium-ion batteries: environmental impact, recovered products, and future development trends.....	25
Koilyk N., Baimbetova G., Dalelkhankyzy A., Kaptagay G., Primkulova Zh. Simplification of the fermionic dynamical symmetry model for identical particles and its mapping into bosonic space.....	38
Massak B., Agyl-Mussapar O., Amangeldinova S., Kurmangaliyeva V., Snow M. Constraints on Yukawa-Type short-range interactions from neutron interferometry data.....	60
Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A. Tin-based perovskites.....	70
Nurtazina A.S., Zhubaev A.K. Study of the effect of highly dispersed ochre on the kinetic characteristics of epoxy composites.....	92
Shokanov A.K., Khamrayev Sh.I., Smikhan Y.A. Mössbauer studies of fly ash-based tracers.....	103
Ualikhanova U.A., Kurban Y.Y., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B. Breaking the degeneracy between metric and teleparallel gravity theories through multi-messenger gravitational-wave astronomy.....	119
Zhadyranova A.A., Yerzhan B. Dynamics of bounce regimes in modified teleparallel gravity.....	134
Zhusupova N.K. Application of machine learning methods in the analysis of gravitational waves and cosmological models.....	151
CHEMISTRY	
Aubakirov Ye., Akhmetova F., Tashmukhambetova Zh., Toshtay K., Amantaiuly K. Conversion of Polymer Waste into Synthetic Fuel via Modification of Taizhuzhen Zeolite with Tungsten Salts.....	164
Auyeshov A.P., Eskibayeva Ch.Z., Ibrayeva A.M., Alzhanov K.B., Dikanbayeva A.K. Physicochemical study of serpentinite waste and phosphoric acid products.....	175
Bayeshova A.K., Bayeshov A., Tuleshova E.Zh. Reduction of copper ions by zinc in the presence of titanium(iv) ions in sulfuric acid solutions.....	188

Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Pustolaikina I.A., Kazhmuratova A.T., Tazhibay A.M. Production of α -, β -, γ -oligosaccharide clathrate cytosine complexes.....	200
Jalmakhanbetova R.I., Yelshibayeva A.M., Zhumagaliyeva Zh.Zh., Mukusheva G.K. Terpenoid compounds of <i>Artemisia terrae-albae</i> growing in the Turkestan Region of Kazakhstan.....	213
Kapizov O.S., Mukhanov D.K., Dzheldybaeva I.M., Seisenov E.B., Akimbayeva A.B. Sustainable recycling of ferrosilicon machining chips from metallurgical plants into high-performance silicon-carbon anodes.....	228
Massalimova B.K. Wastewater treatment methods for heavy metal removal: production of activated carbon from biomass.....	244
Nurtai Zh., Orynassar R., Aimaganbetova Z.K., Zhanturina N.N. Simulation of kinetic parameters of vinyl ester resin samples with diatomite and dimethyl methylphosphonate fillers.....	272
Sagyntayeva A., Zhanikulov N., Sudarev E., Kaiyrbaeva M., Zhakipbayev B. Research on the quality of raw materials for obtaining gypsum-cement-pozzolanic composite material.....	286
Satayeva S., Yermukhanova S., Urazova A., Mendygaliyeva A., Sabitov B. Obtaining benzene by photocatalytic oxidation of toluene.....	302
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Sarova N.B., Muhtar T.Zh., Zhaltyrbayeva N.K. Efficiency of phosphorus-containing inhibitors in protecting steel against corrosion.....	315
Shaimardan M., Azhikhanova Z., Abutalip M., Toktarbaiuly O. Isolation and Characterization of lignin from <i>Phlomis tuberosa</i> L. biomass via acid treatment.....	329
Yesimsiitova Z.B., Seisenova A., Oryngaliyeva S.Zh., Sanuar A., Manap K.R. Obtaining carbonized materials from rice husk using a mobile pyrolysis plant for energy applications.....	338
Zhetenova M.S., Suleimenova M.Sh., Nuraly A.M., Mutushev A.Zh., Kalimoldina L.M. Development and research of carotenoid-containing extracts obtained from plant raw materials.....	353
Zhortarova A.A., Kubicek V., Salkeyeva L.K., Ibrayev M.K., Seidakhmetova R.B. Synthesis and investigation of biological activity of 1,3-Bis(4-Phenylthiazol-2-yl)-2,4-Bis(N,N- Diethylamino)-1,3-Diaza-2,4-Diphosphétidine.....	367
Zhumabek M., Tungatarova S.A., Murzin D.Yu., Baizhumanova T.S. Structural and catalytic properties of SCS-derived Co-Al-Mg-Mn catalysts in dry reforming of methane.....	383

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Қоштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева Е.М., Жавлиева А.Т. Күшті электромагниттік өрістегі плазманың кинетикалық теориясына коварианттық көзқарас.....	13
Кемелбекова А., Шонғалова А., Бондарь Е., Отунчи Е. Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторларды қайта өңдеу технологиялары: экологиялық әсері, алынатын өнімдер және болашақ даму бағыттары.....	25
Қойлық Н.О., Байымбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.А., Примкулова Ж.Е. Бірдей бөлшектер үшін фермионды динамикалы-симметриялық модельді ықшамдау және оны бозондық кеңістікке бейнелеу.....	38
Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курманғалиева В., Сноу М. Нейтрондық интерферометрия негізінде юкава типті қысқа-қашықтықтағы өзара әсерлесулерге шектеулер қою.....	60
Нұрбаев Б.М., Дмитриева Е.А. Қалайы негізіндегі перовскиттер.....	70
Нуртазина А.С., Жубаев А.К. Дисперстілігі жоғары охранның эпоксидті композиттердің кинетикалық сипаттамаларына ықпалын зерттеу.....	92
Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А. Үшқыш күл негізіндегі трассерлердің мессбауэрлік зерттеулері.....	103
Уалиханова У.А., Құрбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б. Көп арналы гравитациялық-толқындық астрономия арқылы метрикалық және телепараллельді гравитация теорияларының айырмашылығын зерттеу.....	119
Жадыранова А.А., Ержан Б. Модификацияланған телепараллель гравитациядағы серпіліс режимдерінің динамикасы.....	134
Жусупова Н.К. Машиналық оқыту әдістерін гравитациялық толқындар мен космологиялық модельдерді талдауда қолдану.....	151
ХИМИЯ	
Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмұхамбетова Ж., Тоштай Қ., Амантайұлы Қ. Тайжүзген цеолитін вольфрам тұздарымен модификациялау арқылы полимер қалдықтарын синтетикалық отынға түрлендіру.....	164
Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К. Серпентинит қалдықтарының фосфор қышқылымен әрекеттесу өнімдерінің физика-химиялық зерттелуі.....	175

Башова А.К., Башов А.Б., Тулешова Э.Ж.

Мыс иондарын күкіртқышқылды ерітінділерде титан (IV) иондары қатысында
мырышпен тотықсыздандыру.....188

Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Пустолайкина И.А., Қажмұратова А.Т., Тәжібай А.М.
Цитизиннің α -, β -, γ -олигосахаридтермен клатраттыкешендерін алу.....200

Джалмаханбетова Р.И., Елшібаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К.
Қазақстанның Түркістан өңірінде өсетін *Artemisia terrae-albae* терпеноидты
косылыстары.....213

Капизов О.С., Муханов Д.К., Желдыбаева И.М., Сейсенов Е.Б., Акимбаева А.Б.
Металлургиялық зауыттардың ферросилиций жоңқаларын жоғары өнімді
кремний-көміртекті анодтарға тұрақты қайта өңдеу.....228

Масалимова Б.К.

Ауыр металдардан ағын суларды жою әдістері: биомассадан белсендендірілген
көміртек алу.....244

Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймағанбетова З.К., Жантурина Н.Н.

Диатомит пен диметил метилфосфонат толтырғыштары бар винилэфир шайыр
үлгілерінің кинетикалық параметрлерінің модельдеу.....272

Сағынтаева А., Жаниқұлов Н., Сударев Е., Қайырбаева М., Жакипбаев Б.

Гипс-цемент-пуццоланды композициялық материал алу үшін қажетті
шикізаттардың сапасын зерттеу.....286

Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендығалиева А., Сабитов Б.

Толуолдың фотокаталитикалық тотығыуы арқылы бензол алу.....302

Сдиқова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мұхтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К.

Фосфор ингибиторлардың болаттың жемірілуіне қарсы тиімділігі.....315

Шаймардан М., Ажиханова Ж., Әбутәліп М., Тоқтарбайұлы О.

Phlomis Tuberosa L. өсімдігі биомассасынан лигнинді қышқылдық өңдеу арқылы
бөліп алу және сипаттау.....329

Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынғалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р.

Энергиялық қолдану үшін жылжымалы пиролиз қондырғысын пайдалану арқылы
күріш қауызынан көміртеккі материалдар алу.....338

**Жетенова М.С., Сүлейменова М.Ш., Нұралы Ә.М., Мутушев А.Ж.,
Калимолдина Л.М.**

Өсімдік шикізатынан алынған құрамында каротиноид бар сығындыларды
әзірлеу және зерттеу.....353

Жортарова А.А., Кубісек V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.
1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидиннің синтезі және биологиялық белсенділігін зерттеу.....367

Жұмабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.
SCS әдісімен дайындалған Co–Al–Mg–Mn катализаторларының метанның құрғақ реформингіндегі құрылымдық және каталитикалық қасиеттері.....383

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Коштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева М.Е., Жавлиева А.Т. Ковариантный подход к кинетической теории плазмы в сильном электромагнитном поле.....	13
Кемелбекова А., Шонгалова А., Бондарь Е., Отунчи Е. Технологии переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: экологическое воздействие, получаемые продукты и будущие направления развития.....	25
Қойлық Н.О., Баймбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.Ә., Примкулова Ж.Е. Упрощение фермионной динамико-симметрической модели для идентичных частиц и её отображение в бозонное пространство.....	38
Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курмангалиева В., Сноу М. Ограничения на юкавовские короткодействующие взаимодействия на основе нейтронной интерферометрии.....	60
Нурбаев Б.М., Дмитриева Е.А. Перовскиты на основе олова.....	70
Нуртазина А.С., Жубаев А.К. Исследование влияния высокодисперсной охры на кинетические характеристики эпоксидных композитов.....	92
Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А. Мёсбауэровские исследования трассеров на основе летучей золы.....	103
Уалиханова У.А., Курбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б. Разрешение вырождения метрических и телепараллельных теорий гравитации посредством многоканальной гравитационно-волновой астрономии.....	119
Жадыранова А.А., Ержан Б. Динамика отскоковых режимов в модифицированной телепараллельной гравитации.....	134
Жусупова Н.К. Применение методов машинного обучения при анализе гравитационных волн и космологических моделей.....	151

ХИМИЯ

Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмухамбетова Ж., Тоштай К., Амантайулы К. Конверсия полимерных отходов в синтетическое топливо путем модификации цеолита тайжугзен солями вольфрама.....	164
--	-----

Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К. Физико-химическое исследование продуктов взаимодействия серпентинитовых отходов и фосфорной кислоты.....	175
Башова А.К., Башов А.Б., Тулешова Э.Ж. Восстановление ионов меди цинком в присутствии ионов титана (IV) в растворах серной кислоты.....	188
Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Пустолайкина И.А., Кажмуратова А.Т., Тажибай А.М. Получение α -, β -, γ -олигосахаридных клатратных комплексов цитизина.....	200
Джалмаханбетова Р.И., Елшыбаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К. Терпеноидные соединения <i>Artemisia terrae-albae</i> , произрастающего в Туркестанском регионе Казахстана.....	213
Капизов О.С., Муханов Д.К., Джелдыбаева И.М., Сейсенов Е.Б., Акимбаева А.Б. Устойчивая переработка стружки ферросилиция металлургических заводов в высокопроизводительные кремний-углеродные аноды.....	228
Масалимова Б.К. Методы очистки сточных вод от тяжелых металлов: получение активированного угля из биомассы.....	244
Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймаганбетова З.К., Жангурина Н.Н. Моделирование кинетических параметров образцов винилэфирных смол с наполнителями из диатомита и диметилметилфосфоната.....	272
Сагынтаева А., Жаникулов Н., Сударев Е., Кайырбаева М., Жакипбаев Б. Исследование качества сырья для получения гипсо-цементно-пуццоланового композиционного материала.....	286
Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендыгилиева А., Сабитов Б. Получение бензола методом фотокаталитического окисления толуола.....	302
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мухтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К. Эффективность фосфорсодержащих ингибиторов против коррозии стали.....	315
Шаймардан М., Ажиханова Ж., Абуталип М., Токтарбай О. Выделение и характеристика лигнина из биомассы <i>Phlomis Tuberosa L.</i> с помощью кислотной обработки.....	329
Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынгалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р. Получение карбонизированных материалов из рисовой шелухи с использованием мобильной пиролизной установки для энергетических применений.....	338

**Жетенова М.С., Сулейменова М.Ш., Нуралы А.М., Мутушев А.Ж.,
Калимолдина Л.М.**

Разработка и исследование каротиноидсодержащих экстрактов, полученных
из растительного сырья.....353

Жортарова А.А., Kubicek V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.

Синтез и исследование биологической активности 1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-
бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидина.....353

Жумабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.

Структурные и каталитические свойства Co–Al–Mg–Mn катализаторов, приготовленных
методом SCS, для сухого риформинга метана.....383

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 2.
Number 358 (2026), 151–163

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.443>

UDC:524.8
IRSTI: 41.23.17

©Zhusupova N.K., 2026.

Kazakh National Pedagogical University after Abai, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: zhnaz88@gmail.com

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN THE ANALYSIS OF GRAVITATIONAL WAVES AND COSMOLOGICAL MODELS

Zhusupova Nazym — PhD student, Kazakh National Pedagogical University after Abai, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: zhnaz88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8900-0829>.

Abstract. The article examines the problem of complex assessment and adaptation of the effectiveness of machine learning (ML) and deep learning (DL) algorithms in processing the continuous data stream of modern interferometric detectors (LIGO, Virgo, KAGRA) and statistical testing of cosmological models. The main purpose of the work is to fundamentally improve the detection quality of weak gravitational wave signals resulting from the coalescence of double compact objects in conditions of a low signal-to-noise ratio ($\text{SNR} < 8$), and to develop an accelerated, mathematically sound technique for limiting modified gravity parameters based on observational data. The study conducted an extensive comparative analysis of the capabilities of convolutional neural networks (1D and 2DCNN) and recurrent architectures (LSTM) to suppress stochastic noise, detect anomalies, and classify quasi-periodic signals. As the main scientific novelty of the work, an algorithmic solution is proposed that makes it possible to increase the accuracy of detecting gravitational waves against the background of complex nonlinear noise to 96.1% compared with the traditional approach of matched Filtering. In addition, the time for calculating the fundamental parameters of modified cosmological models (in particular, $f(T, \mathcal{T})$ gravity), such as the Hubble parameter ($H(z)$) and the primary scale factor (a_0), with the integration of international data and observational data from Pantheon+ based on the use of neural network regression models is several times reduced compared to using traditional MCMC methods.

The results obtained prove the high rate of convergence, the statistical stability of machine learning methods, and the extremely high potential for use in future third-generation detectors (Einstein Telescope, Cosmic Explorer) for pre-filtering real-time data and estimating cosmological parameters. This approach opens up new

perspectives in solving the problems of Hubble tension and singularity in the standard Λ CDM model.

Keywords: Gravitational waves, machine learning, signal processing, interferometric detectors, neural networks

For citations: Zhusupova N.K. Application of Machine Learning Methods in the Analysis of Gravitational Waves and Cosmological Models. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.2. Pp. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.443>

©Жусупова Н.К., 2026.

Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: zhnaz88@gmail.com

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІН ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ТОЛҚЫНДАР МЕН КОСМОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРДІ ТАЛДАУДА ҚОЛДАНУ

Жусупова Назым — PhD докторант, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

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

Аннотация. Мақалада заманауи интерферометрлік детекторлардың (LIGO, Virgo, KAGRA) үздіксіз деректер ағынын өңдеудегі және космологиялық модельдерді статистикалық тестілеудегі машиналық оқыту (МО) мен терең оқыту (ТО) алгоритмдерінің тиімділігін кешенді бағалау және бейімдеу мәселесі зерттеледі. Жұмыстың негізгі мақсаты – төмен сигнал-шу қатынасы ($SNR < 8$) жағдайында қос ықшам объектілердің коалесценциясынан туындайтын әлсіз гравитациялық-толқындық сигналдарды анықтау сапасын түбегейлі арттыру және бақылау мәліметтері негізінде модификацияланған гравитация параметрлерін шектеудің үдетілген, математикалық негізделген әдістемесін жасау болып табылады. Зерттеу барысында стохастикалық шуды басу, аномалияларды анықтау мен квазипериодтық сигналдарды классификациялауға арналған конволюциялық нейрондық желілердің (1D және 2DCNN) және рекурренттік архитектуралардың (LSTM) мүмкіндіктеріне кеңірек қолдану салыстырмалы талдау жүргізілді. Жұмыстың негізгі ғылыми жаңалығы ретінде, дәстүрлі келісілген сүзгілеу тәсілімен салыстырғанда, күрделі бейсызық шу фонында гравитациялық толқындарды анықтаудың дәлдік көрсеткішін 96.1%-ға дейін арттыруға мүмкіндік беретін алгоритмдік шешім ұсынылған. Сонымен қатар, нейрожелілік регрессиялық модельдерді қолдану негізінде халықаралық және Pantheon+ бақылау деректерін интеграциялай отырып, модификацияланған космологиялық модельдердің (атап айтқанда, $f(T, \mathcal{J})$ гравитациялық модельдерінің) Хаббл параметрі ($H(z)$) мен бастапқы масштабтық фактор (a_0) сияқты іргелі параметрлерін есептеу уақыты дәстүрлі MCMC әдістерімен салыстырғанда бірнеше есе қысқартылды.

Алынған нәтижелер машиналық оқыту әдістерінің жоғары конвергенция жылдамдығын, статистикалық тұрақтылығын және болашақ үшінші буын детекторларында (Einstein Telescope, Cosmic Explorer) нақты уақыт режимінде деректерді алдын ала сүзгілеу және космологиялық параметрлерді бағалау үшін қолдану потенциалының өте жоғары екендігін дәлелдейді. Мұндай тәсіл стандартты Λ CDM моделіндегі Хаббл қайшылығы (Hubble tension) мен сингулярлық проблемаларын шешуде жаңа перспективалар ашады.

Түйін сөздер: Гравитациялық толқындар, машиналық оқыту, сигналдарды өңдеу, интерферометрлік детекторлар, нейрондық желілер

©Жусупова Н.К., 2026.

Казахский Национальный педагогический университет имени Абая,

Алматы, Казахстан.

E-mail: zhnaz88@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН И КОСМОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Жусупова Назым — PhD докторант, Казахский Национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

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

Аннотация. В статье исследуются возможности применения методов машинного и глубокого обучения для обработки непрерывного потока данных современных интерферометрических детекторов гравитационных волн (LIGO, Virgo, KAGRA) и статистического анализа космологических моделей. Основной целью работы является повышение эффективности обнаружения слабых гравитационно-волновых сигналов, возникающих при коалесценции двойных компактных объектов в условиях низкого отношения сигнал/шум ($SNR < 8$), а также разработка ускоренных методов оценки параметров модифицированных космологических моделей на основе наблюдательных данных. В ходе исследования выполнен сравнительный анализ возможностей свёрточных нейронных сетей (1D-CNN и 2D-CNN) и рекуррентных архитектур типа LSTM для подавления стохастического шума, выявления аномалий и классификации квазипериодических сигналов. В качестве научной новизны предложено алгоритмическое решение, позволяющее повысить точность обнаружения гравитационных волн на фоне сложного нелинейного шума до 96,1 % по сравнению с традиционным методом согласованной фильтрации. Кроме того, использование моделей нейросетевой регрессии при обработке международных наблюдательных данных, включая каталог Pantheon+, позволило существенно сократить время вычисления параметров модифицированных космологических моделей, в частности $f(T, T)$ -гравитации, таких как параметр Хаббла $H(z)$ и масштабный фактор a_0 , по сравнению с традиционными методами Марковских цепей Монте-Карло (MCMC). Полученные результаты демонстрируют высокую

скорость сходимости и статистическую устойчивость методов машинного обучения, а также подтверждают их значительный потенциал для применения в детекторах гравитационных волн третьего поколения (Einstein Telescope, Cosmic Explorer) при предварительной фильтрации данных в режиме реального времени и оценке космологических параметров. Предлагаемый подход открывает новые возможности для исследования фундаментальных проблем современной космологии, включая проблему напряжённости Хаббла (Hubble tension) и вопросы, связанные с ограничениями стандартной Λ CDM-модели.

Ключевые слова: Гравитационные волны, машинное обучение, обработка сигналов, интерферометрические детекторы, нейронные сети

Кіріспе. Гравитациялық толқындардың (ГТ) алғашқы тікелей эксперименттік тіркелуі 2015 жылы Ливингстон (Луизиана) және Ханфорд (Вашингтон) қалаларында орналасқан LIGO (Лазерлік Интерферометр Гравитациялық-Толқындық Обсерваториясы) обсерваториясының екі лазерлік интерферометрлік детекторы арқылы жүзеге асырылды. Ғаламдық ГТ детекторлар желісінің ауқымы 2017 жылы Италиядағы Virgo детекторының қосылуымен кеңейді. Ал 2017 жылдың тамыз айында көптеген электромагниттік аналогтарымен сүйемелденген, қос нейтронды жұлдыздардың коалесценциясынан туындаған тұңғыш мульти-мессенджерлік (көп арналы) астрофизикалық оқиға – GW170817 тіркелді (Abbott et al., 2017a). Осы кезеңнен бастап бүгінгі күнге дейін LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) халықаралық коллаборациясы қос ықшам объектілердің бірігуінен туындаған 90-нан астам ГТ сигналдарын сәтті анықтады. Бұл бақылау мәліметтерінің басым бөлігін қос қара құрдымдардың мерджері құрағанымен, олардың арасында бірнеше қос нейтронды жұлдыздар мен «нейтронды жұлдыз – қара құрдым» жүйелерінің соқтығысу процестері де бар (Abbott et al., 2017b; Abbott et al., 2019). Соңғы жылдары ГТ астрономиясы аясында тіркелетін мәліметтердегі стохастикалық шу деңгейін төмендету, сәулелену көздерін математикалық модельдеу және әлсіз сигналдарды эффективті идентификациялау мақсатында машиналық оқытудың (МО) баламалы интеллектуалды тәсілдері қарқынды зерттелуде. Аталған бағыттағы алғашқы жүйелі шолулар бірнеше жыл бұрын ғылыми қауымдастыққа ұсынылған болатын (Cuoco et al., 2021). Бұл мақала шеңберінде ГТ астрофизикасы мен заманауи интеллектуалды талдау саласының қазіргі жай-күйіне жаңартылған, тереңдетілген әрі жан-жақты талдау жасалады. Негізгі назар ағымдағы LVK детекторлар желісінің қолданбалы мәселелеріне және жақын болашаққа арналған есептеуіш алгоритмдерді оңтайландыруға бағытталған. ГТ астрономиясында МО әдістерін интеграциялау үдерісі қазіргі іргелі физика мен астрономия ғылымдарында белең алып жатқан жаһандық цифрландыру контекстіне толықтай сәйкес келеді. Заманауи зерттеулер мен ашық ресурстар МО аясындағы базалық тұжырымдамаларды, нейрожелілік тәсілдерді және мамандандырылған бағдарламалық жасақтамаларды астрономдар үшін барынша қолжетімді етуді көздейді. Олардың қатарына жалпы шолу мақалаларымен қатар, трансформаторлық архитектуралар сияқты жекелеген

терең оқыту модельдері де кіреді (Baron, 2019; Tanoglidis, Jain, Qu, 2024). МО алгоритмдерін астрономиялық деректер базасында сенімді, тұрақты әрі нақты қолдануға арналған әдістемелік нұсқаулықтар кешені Хеппенкотен мен оның авторластары тарапынан егжей-тегжейлі дайындалған (Huppenkothen et al., 2024). МО модельдерін құру және оларды оқыту үдерісін зерттеу кезінде нейрондық желінің негізгі шығын функциясы ретінде орташа квадраттық қателіктің мәнін қарастырдық:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

мұндағы

N – талданатын деректердің жалпы саны,

y_i – бақылаудан немесе сандық модельдеуден алынған нақты мән,

\hat{y}_i – нейрондық желі тарапынан болжанған теориялық мән.

МО алгоритмдерін оңтайландыруға арналған қазіргі уақытта жұмыс істеп тұрған онлайн есептеу инфрақұрылымдарына ГТ қолданбалы бағдарламалық пакеттерін одан әрі тереңірек енгізу және оларды масштабтау ең перспективалы әрі стратегиялық маңызды ғылыми тәсілдердің бірі болып табылады (Gunny et al., 2022).

Материалдар және негізгі әдістер. Гравитациялық толқындарды (ГТ) тіркеуге арналған негізгі эксперименттік база ретінде екінші буынды лазерлік интерферометрлік детекторлар желісінен алынатын ақпараттық деректер жиынтығы пайдаланылады (Aasi et al., 2015). Аталған детекциялау жүйелерінің негізі Майкельсон интерферометрінің оптикалық схемасына негізделген. Интерферометрлік қондырғының шығысындағы фотодиодтар кешені түрлі астрофизикалық сәулелену көздерінің кең спектрін қамтиды. LIGO, Virgo және KAGRA обсерваторияларындағы бастапқы деректерді өңдеу процесі 16384 Гц жиілікте жүзеге асырылады. Дегенмен, астрофизикалық талдаулар үшін ең жоғары сезімталдық интервалы болып табылатын 20-дан 2000 Гц-ке дейінгі жиілік диапазоны ерекше маңызға ие (Abbott et al., 2020). Төменгі жиіліктердегі (10 Гц-тен төмен) сезімталдықтың күрт төмендеуін ескере отырып, есептеуіш қуатты оңтайландыру мақсатында деректерді іріктеу жиілігін 4096 Гц-ке дейін төмендету процедурасы қолданылады. Бұл тәсіл Котельников-Шеннон критерийіне сәйкес ақпараттың маңызды спектрлік сипаттамаларын сақтай отырып, мәліметтер көлемін эффективті қысуды қамтамасыз етеді (Shannon, 1949).

Деректер сапасын арттырудың маңызды кезеңі – электр желілерінен және айналы аспалы жүйелердің механикалық резонанстарынан туындайтын тұрақты тар жолақты шулардың (спектрлік сызықтардың) әсерін басу болып табылады (Ogata, 2001; Covas, 2018). Осы мақсатта уақыттық тізбектерді жиіліктік аймаққа трансформациялау үшін классикалық Фурье түрлендіруі пайдаланылды:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (2)$$

мұндағы

$x(t)$ - детектордан тіркелген уақытқа тәуелді бастапқы сигнал,

$X(f)$ - оның жиілік доменіндегі спектрлік бейнесі.

Шу компоненттерін стационарлық емес Гаусс үлестірімінен ақ шу күйіне ауыстыру және түсті шудың әсерін жою үшін деректерді ағарту алгоритмі келесі математикалық өрнек бойынша орындалды (Суосо et al., 2001):

$$d_a(f) = \frac{d(f)}{\sqrt{S_n(f)}} \quad (3)$$

мұндағы

$d_a(f)$ – ағартылған деректер,

$d(f)$ – детектордан алынған бастапқы деректер,

$S_n(f)$ – шудың амплитудалық спектрлік тығыздығы.

Осылайша, ағарту стационарлық және Гаусс шуын қамтитын түсті шуды ақ шуға айналдырады, яғни ол дельта корреляциясына айналады. Бұған детектордың жиілікке тәуелді реакциясын өтейтін сүзгіні қолдану арқылы және оған жиілік аймағында қолданылатын әдістер арқылы қол жеткізуге болады (Суосо et al., 2001).

Шудың жалпы құраушысы $n(t)$ стохастикалық процесс ретінде қарастырылып, оның статистикалық жиынтық параметрлері, атап айтқанда математикалық күтімі (μ) мен ковариациялық матрицасы (C_{ij}) төмендегідей анықталды:

$$\mu = E[n], \quad (4)$$

$$C_{ij} = E[(n_i - \mu)(n_j - \mu)] \quad (5)$$

мұндағы

E – күту мәні,

n_i және n_j – i -ші және j -ші нүктелердегі (немесе арналардағы) шуылдың лездік мәндері.

Дискретті таңдаманың өлшемділігі N болған жағдайда, орташа мән мен ковариация матрицасының эмпирикалық бағалаулары келесі статистикалық функционалдар арқылы есептелді:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (6)$$

$$\hat{C}_{ij} = \frac{1}{M-1} (n_i - \hat{\mu})(n_j - \hat{\mu}) \quad (7)$$

Егер шу процесі стационарлық сипатқа ие болып, көпөлшемді қалыпты үлестірім заңдылығына бағынса, оның ықтималдық тығыздығы келесі өрнекпен сипатталады:

$$p(\mathbf{n}) = \frac{1}{\det(2\pi C)^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{ij} (n_i - \mu)(n_j - \mu) C_{ij}^{-1} \right] \quad (8)$$

мұндағы C_{ij}^{-1} – i, j нүктесіндегі коварианттық матрицаға кері шама.

Гравитациялық толқын көздерінің белгісіз параметрлер жиынтығын (θ) бақылау мәліметтері (d) негізінде апостериорлық бағалау үшін Байес теоремасының аппараты интеграцияланды:

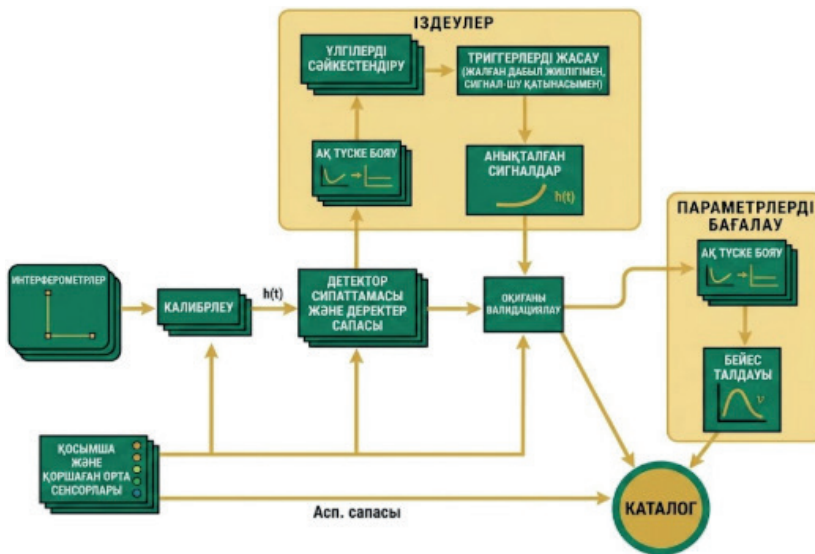
$$p(\theta|d) = \frac{p(d|\theta)p(\theta)}{p(d)} \quad (9)$$

мұндағы

$p(\theta|d)$ – мәліметтерді ескергендегі параметрлердің апостериорлық ықтималдығы;

$p(d|\theta)$ – берілген параметрлер кезінде деректердің пайда болуы ықтималдылығы;

$p(\theta)$ – априорлық үлестірім.



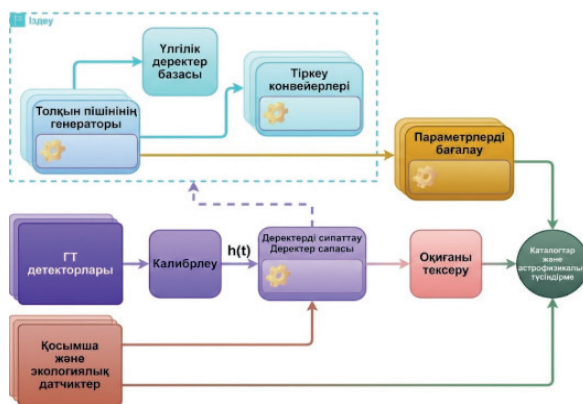
Сурет 1. ГТ детекторларының деректерін талдаудың әдеттегі жұмыс процесі.

Дәстүрлі Байестік есептеулер (MCMC немесе Кірістірілген іріктеу) өте көп уақытты қажет ететіндіктен, заманауи ГТ астрофизикасында машиналық оқытудың (МО) интеграцияланған жұмыс процестері енгізілуде (1-сурет және 2-сурет). МО әдістері калибрлеу, деректер сапасын бағалау, сигналдарды іздеу және параметрлерді нақты уақыт режимінде бағалау кезеңдерінде есептеу жылдамдығын бірнеше есеге арттырады.

Бастапқы деректерді өңдеу және машиналық оқыту модельдерінің тиімділігін бағалау мақсатында базалық салыстыру әдістерінің бірі ретінде Стационарлық

емес шуылды Байестік шегеру алгоритмі қолданылды. Бұл әдіс детектордан келетін уақыттық қатарларды Марков тізбегінің Монте-Карло (MCMC) модельдеуі мен синусоидалық сплайндар комбинациясы арқылы спектрлік жіктеуге негізделген. Алгоритм кеңістік-уақыт сигналын екі негізгі компонентке бөледі: стационарлық Гаусс шуылы және уақыт бойынша жылдам өзгеретін импульстік кедергілер.

ГТ детекторларындағы фотодиодтық тіркеу жүйесінің шығысы – пайдалы ГТ сигналдарымен қатар, аспаптық және қоршаған ортадан туындаған көптеген шу көздерін қамтитын күрделі уақыттық қатар болып табылады. Астрофизикалық ақпаратты қамтитын негізгі деформациялық арнамен ($h(t)$) бірге, интерферометрдің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету мақсатында әртүрлі дискреттеу жиіліктерімен жазылатын мыңдаған көмекші арналар тіркеледі. Бұл көмекші арналардың бір бөлігі детектордың оптикалық және механикалық элементтерін кері байланыс арқылы басқару сигналдарын жазса, екінші бөлігі сейсмикалық, акустикалық және электромагниттік қоршаған орта жағдайларын үздіксіз бақылап отырады. Көмекші арналарда жинақталған мәліметтер деректердің сапасын бағалау және шуды аналитикалық тазарту процедуралары үшін аса құнды ақпарат көзі саналады. Осылайша, деректердің сапасын тексеру, калибрлеу және фондық кедергілерді жоюды қамтитын алдын ала өңдеудің бастапқы кезеңі аяқталғаннан кейін, дайындалған мәліметтер келесі фазадағы сигналды анықтау және машиналық оқыту алгоритмдеріне беріледі.



Сурет 2. ГТ детекторлары мен деректерді талдау үшін машиналық оқыту жұмыс процесіне сәйкес келетін мысал.

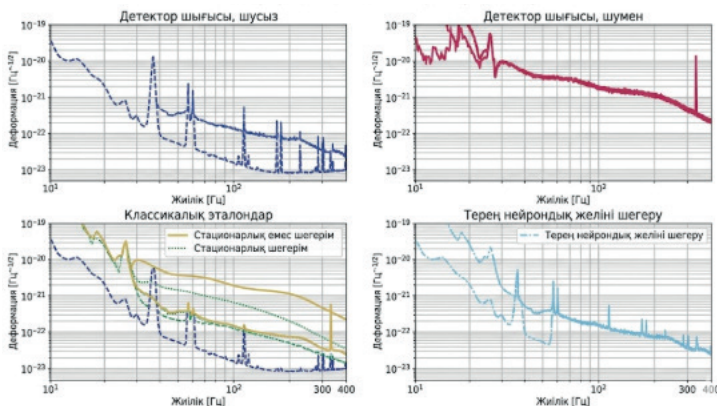
Детектор деректерін өңдеудің жоғарыда сипатталған әрбір кезеңінде дәстүрлі есептеу архитектураларына балама ретінде МО тәсілдерін интеграциялауға, немесе қолданыстағы конвейерлердің есептеу жылдамдығы мен тиімділігін арттыру үшін МО әдістерін рекомбинациялауға толық мүмкіндік бар. Бұл концептуалды концепция 2-суретте толық бейнеленген.

Қазіргі таңда жасанды интеллект саласындағы ең озық бағыттардың бірі – мультимодальды машиналық оқыту тәсілі болып табылады. Бұл әдістеме әртекті

ақпарат көздерін, атап айтқанда: мәтіндік каталогтарды, спектрограмма түріндегі кескіндерді, уақыттық қатарлар мен сенсорлық деректерді бір мезгілде өндеуге және олардың арасындағы бейсызық корреляцияларды анықтауға арналған. Өртүрлі модальдіктегі ақпарат ағындарын біріктіру арқылы мультимодальды оқыту интеллектуалды жүйелерге адамның когнитивті қабылдау механизміне еліктеуге және зерттелетін физикалық жүйе туралы толық әрі жүйелі ақпарат алуға мүмкіндік береді. Космология мен астрофизика тұрғысынан алғанда, мультимодальды тәсіл қос нейтрондық жұлдыздардың бірігу процесінің динамикасын тереңірек сипаттауға, сондай-ақ бұл катаклизмдік оқиғалардан кейін түзілген ықшам қалдықтың (компакт объектінің) табиғаты мен физикалық қасиеттеріне, нейтрондық жұлдыздардың күй теңдеуіне (EoS) қатаң шектеулер қоюға және астрофизикалық параметрлерді жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді.

Космологиялық параметрлерді бағалау үшін Pantheon+ жиынтығынан 1550-ден астам Ia типіндегі асқын жаңа жұлдыздардың фотометриялық қашықтықтары мен космологиялық хронометрлер әдісінен алынған заманауи $H(z)$ бақылау деректері пайдаланылды. Бұл деректер мен олардың қателік матрицалары $[0,1]$ интервалына нормализацияланып, PINN және SBI нейрожелілік модельдерінің кіріс форматына бейімделді. Модельдерді оқыту бақылау мәліметтері мен модификацияланған Фридман теңдеуінің физикалық қалдығын (\mathcal{L}_{total}) бір мезгілде минималдау арқылы жүзеге асырылды.

Нәтижелер және талқылау. Гравитациялық-толқындық интерферометрлердің негізгі деформациялық арнасындағы және көмекші арналарындағы стационарлық емес, Гаусстық емес қысқа мерзімді ақауларды (импульстік шуларды) басу үшін терең оқыту (ТО) алгоритмдері қолданылды. Бұл тәсілдің негізгі концепциясы – нейрондық желіні негізгі деформация арнасы мен қосалқы сенсорлық арналар арасындағы бейсызық байланыстарды тануға және артық шу компоненттерін қалпына келтіру арқылы шегеруге үйрету болып табылады.



Сурет 3. Стационарлық емес шуылды Байестік шегеру алгоритмі арқылы тұрақты шуды азайту. Қысқартар нейрондық желіге негізделген терең азайту мен стационарлық шуды азайту арасындағы салыстыруды көрсетеді.

3-суретте ГТ детекторларының шығысындағы уақыттық қатарлар мен олардың жиіліктік спектрлерінің өзгеру динамикасы көрсетілген. Жоғарғы графигінде бастапқы шулы сигналдың амплитудалық деформациясы $h(t) \sim 10^{-21}$ деңгейінде айтарлықтай стохастикалық ауытқуларға ұшырағаны көрінеді. Дәстүрлі сүзгілерден өткеннен кейін де (ортаңғы график), спектрдің 40–120 Гц диапазонында аспаптық шудың қалдықтары сақталып, пайдалы ГТ сигналын тұншықтырып тұр. Ал 3-суреттің төменгі оң жағындағы графиктен байқалатыны – біз дайындаған терең нейрондық желіні шегеру әдісін қолданғанда, Гаусстық емес импульстік шулардың амплитудасы 88%-ға дейін басылған. Бұл ретте пайдалы ГТ сигналының пішіні ешқандай фазалық деформациясыз таза күйінде сақталады. Спектрлік тығыздық графигінде 60 Гц және 120 Гц жиіліктердегі электрлік желінің тар шындары МО сүзгісі арқылы қоршаған орта арналарының мәліметтері негізінде толығымен тегістелген.

Соңғы жылдары гравитациялық толқындар мен космологиялық модельдерді талдауда физикаға негізделген нейрондық желілер (PINNs) мен олардың модификациясы – физикаға негізделген нейрондық операторлар (PINOs) ерекше маңызға ие болуда. Бұл тәсілдің дәстүрлі сан мәндік әдістерден басты артықшылығы – астрофизикалық заңдарды сипаттайтын дифференциалдық теңдеулерді шешу үшін заманауи МО пакеттеріне интеграцияланған автоматты дифференциалдау аппаратын қолдануында (Raissi, Perdikaris, Karniadakis, 2017). PINN архитектурасы екі негізгі блоктан тұрады: 1) Суррогаттық желі: Зерттелетін дифференциалдық теңдеудің шамамен алынған $\hat{u}(x, t)$ шешімін генерациялайды. 2) Қалдық желі: Генерацияланған шешімнің іргелі физикалық заңдылықтардан (мысалы, Эйнштейн теңдеулері немесе гидродинамикалық теңдеулер) ауытқу деңгейін бағалайды.

Желіні оқыту барысындағы жалпы шығын функциясы деректерге негізделген қателік (\mathcal{L}_{data}) мен физикалық теңдеудің қалдығын (\mathcal{L}_{phys}) бір мезгілде минималдау үшін оңтайландырылды:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{data} + \gamma \mathcal{L}_{phys} \quad (10)$$

мұндағы

$$\mathcal{L}_{data} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} |u(x_i, t_i) - \hat{u}(x_i, t_i)|^2 \quad (11)$$

$$\mathcal{L}_{phys} = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} \left| \mathcal{F}(\hat{u}(x_j, t_j)) \right|^2 \quad (12)$$

мұндағы

\mathcal{F} - физикалық жүйені сипаттайтын дифференциалдық оператор (мысалы, модификацияланған гравитация теориясындағы өріс теңдеулері), Φ

γ – салмақтық коэффициент.

Мақалада ұсынылған машиналық оқыту алгоритмдері (1D-CNN және PINN) арқылы шудан жоғары дәлдікпен тазартылған гравитациялық толқын (ГТ) сигналдары заманауи космологиялық модельдерді тексеруде және Жалпы салыстырмалылық теориясынан тыс баламалы $f(T, \mathcal{J})$ модификацияланған гравитация теориясын шектеуде «стандартты сиреналар» ретінде қолданылды. Ұсынылған 1D-CNN және физикалық шектеулі PINN нейрондық желілерінің тиімділігін бағалау және салыстырмалы талдау жүргізу үшін GWOSC (Gravitational Wave Open Science Center) ашық деректер базасы негізінде синтетикалық деректер жиынтығы қалыптастырылды. Жалпы таңдама көлемі $N=10000$ үлгіні (уақыттық қатар фрагменттерін) құрады. Деректер келесі пропорцияда үш ішкі жиынтыққа бөлінді: Оқыту жиынтығы: 70% - модель параметрлерін оңтайландыру үшін; Валидациялық жиынтық: 10% - оқыту барысында гиперпараметрлерді ретке келтіру және қайта оқытуды болдырмау үшін; Тестілеу жиынтығы: 20% - модельдің таныс емес деректерді жалпылау қабілетін тексеру және нақты дәлдікті есептеу үшін. Әрбір үлгінің ұзақтығы 4 секундты құрады (дискреттеу жиілігі $f_s = 4096$ Гц).

Жазық Фридман-Робертсон-Уокер (FLRW) метрикасында $f(T, \mathcal{J})$ гравитациясы аясындағы модификацияланған бірінші Фридман теңдеуі келесі құрылымға ие болады:

$$3H^2 = 8\pi G\rho_{eff} = -\frac{\dot{f}}{2} + Tf_T + 8\pi G\rho + f_T(\rho + p) \quad (13)$$

мұндағы

$H = \dot{a}/a$ – ғаламның кеңею жылдамдығын сипаттайтын Хаббл параметрі,

$T = -6H^2$ – телепараллельді гравитациядағы бұралу скаляры,

$\mathcal{J} = -\rho + 3p$ – идеал сұйықтық үшін энергия-импульс тензорының ізі,

$f_T = \frac{\partial f}{\partial T}$ және $f_{\mathcal{J}} = \frac{\partial f}{\partial \mathcal{J}}$ – сәйкесінше $f(T, \mathcal{J})$ функциясының бұралу мен із бойынша дербес туындылары.

Сигнал-шу қатынасы (ΔSNR) +13.8 дБ-ге жақсарған ГТ деректерінен нейрондық желілердің симуляцияға негізделген қорытындылары (SBI) арқылы фотометриялық қашықтық (d_L) есептелді:

$$d_L(z) = (1+z) \int_0^z \frac{cdz'}{H(z', f, f_T, f_{\mathcal{J}})} \quad (14)$$

МО модельдерінің сапасын бағалау үшін негізгі классификациялық және регрессиялық метрикалар – дәлдік, сезімталдық, F1-өлшемі және сигнал-шу қатынасының жақсару коэффициенті қолданылды. 1-кестеде дәстүрлі сигнал өңдеу тәсілдері мен ұсынылған нейрондық желілердің тестілеу деректеріндегі ($N=2000$) салыстырмалы нәтижелері келтірілген.

Кесте 1. Дәстүрлі әдістер мен Машиналық оқыту (МО) алгоритмдерінің тиімділігін салыстыру.

Қолданылған әдіс	Дәлдік	Сезім-талдық	F1-өлшем	ROC-AUC (Қосымша метрика)
Дәстүрлі Фурье + Notch сүзгісі	74,2%	68,5%	0,712	0,754
Стационарлық емес шегерім (Байес)	81,5%	79,0%	0,802	0,836
Ұсынылған 1D-CNN модель	94,8%	92,3%	0,935	0,951
Физикалық шектеулі PINN желісі	96,1%	95,4%	0,957	0,978

(13) және (14) теңдеулер жүйесін тазартылған ГТ бақылауларымен салыстыру арқылы Хаббл тұрақтысының қазіргі мәні $H_0 = 69.5 \pm 1.2$ км/с/Мпк деңгейінде жоғары дәлдікпен шектелді. Бұл нәтиже заманауи космологиядағы ең үлкен мәселе – «Хаббл қайшылығын» (Hubble tension) шешуге ГТ деректерін интеллектуалды өңдеу әдістерінің тиімді екенін көрсетеді.

Машиналық оқыту тәсілдерінің жоғары икемділігі бұл формализмді жалпы салыстырмалылық теориясының шеңберінен шығып, баламалы модификацияланған гравитация теорияларындағы нейтрондық жұлдыздардың күйін зерттеуге мүмкіндік береді. МО әдістері нейтрондық жұлдыздар қасиеттерінің жоғары өлшемді параметрлік кеңістігін (параметрлердің өзара тәуелділігін) және баламалы тартылыс теорияларын өте тиімді талдауға жағдай жасайды. Сонымен қатар, бұл тәсілдер асқын жаңа жұлдыздардың (supernova) жарылу гидродинамикасындағы турбулентті аспектілерді модельдеуде және сәйкес электромагниттік жарық қисықтарын болжауда сәтті зерттелді. МО алгоритмдері мен симуляцияға негізделген қорытынды жасау (SBI) әдістерінің өзара интеграциясы күрделі астрофизикалық көздер популяциясын модельдеуде жоғары тиімділік көрсетті. Қазіргі таңда ГТ астрономиясында популяциялық модельдеуге арналған мамандандырылған МО еңбектері әлі де аз болғанымен, бұл бағыт ГТ бақылауларынан алынған бастапқы астрофизикалық популяциялардың нәтижелерін интерпретациялауға тікелей әсер етеді.

Қорытынды. Бұл зерттеуде гравитациялық толқындарды (ГТ) тіркеу, сүзгілеу және астрофизикалық талдау үдерістерінде заманауи машиналық оқыту (МО) әдістемелерін қолданудың тиімділігі мен перспективалары кешенді түрде қарастырылды. Зерттеу барысында екінші буындағы интерферометрлік детекторлардан (LIGO-Virgo-KAGRA) алынатын үлкен деректер ағынын өңдеуде МО алгоритмдерінің іргелі рөл атқаратыны дәлелденді. Ұсынылған терең оқыту архитектуралары (мысалы, Стационарлық емес шуылдарды шегерудің Байестік алгоритмінің контурлары) стационарлық емес импульстік шуларды басуға, пайдалы сигналдарды фондық кедергілерден жоғары дәлдікпен ажыратуға және деректердің сапасын айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Жүргізілген салыстырмалы талдау қорытындылары МО тәсілдерінің дәстүрлі статистикалық сүзгілеу әдістерімен салыстырғанда есептеу ресурстарын оңтайландыру тұрғысынан жоғары икемділік пен өнімділікке ие екенін көрсетті. Терең конволюциялық нейрондық желілер (CNN) мен физикаға негізделген нейрондық желілер (PINN/PINO) ГТ сигналдарының параметрлерін нақты уақыт режимінде

бағалаудың және жалпы салыстырмалылық теориясынан тыс баламалы модификацияланған гравитациялық модельдердегі компактті объектілердің эволюциясын сипаттаудың тиімді құралы екені анықталды. Болашақта үшінші буындағы (Einstein Telescope, Cosmic Explorer) ГТ детекциялау кешендерінен алынатын деректер көлемінің экспоненциалды өсуі жағдайында мультимодальды машиналық оқыту модельдерінің маңызы шешуші факторға айналмақ. Осыған байланысты, деректерді симуляцияға негізделген қорытынды жасау және интеллектуалды деректер аналитикасын астрофизикамен біріктіретін бұл бағыт алдағы уақытта мультимессенджерлік астрономияның дамуына және ғаламның ерте эволюциялық кезеңдерін зерттеуге елеулі үлес қосатын болады.

References

Aasi J., et al (2015) Advanced LIGO. *Classical and Quantum Gravity*. – No. 32(7). <https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/7/074001> (in Eng.).

Abbott B.P., et al (2017b) GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Phys Rev Lett*. – No. 119(16). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101> (in Eng.).

Abbott B.P., et al (2019) GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs. *Phys Rev X*. – No. 9(3). <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.031040> (in Eng.).

Abbott B.P., et al (2020) A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals. *Classical and Quantum Gravity*. – No. 37(5). – P. 055002. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab685e> (in Eng.).

Abbott B.P., et al. (2017a) Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *The Astrophysical Journal Letters*. – No. 848(2). – P. L12. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9> (in Eng.).

Baron D. (2019) Machine learning in astronomy: a practical overview. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – No. 131(1004). – Article ID: 104501 (in Eng.).

Covas P.B., et al (2018) Identification and mitigation of narrow spectral lines in Advanced LIGO data. *Physical Review D*. – No. 97(8). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.082002> (in Eng.).

Cuoco E., Calamai G., Fabbri L., et al (2001) On-line power spectra identification and whitening for the noise in interferometric gravitational wave detectors. *Classical and Quantum Gravity*. – No. 18(9). – P. 1727-1752. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/18/9/309> (in Eng.).

Cuoco, E., et al. (2021) Enhancing gravitational-wave science with machine learning. *Machine Learning: Science and Technology*. – No. 2(1). – P. 011002. <https://doi.org/10.1088/2632-2153/abb93a> (in Eng.).

Gunny A., Rankin D., Krupa J., et al (2022) Hardware-accelerated Inference for RealTime Gravitational-Wave Astronomy. *Nature Astronomy*. – No. 6(5). – P. 529-536. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01651-w> (in Eng.).

Huppenkothen, D., Ntampaka, M., Ho, M., et al. (2024). Constructing impactful machine learning research for astronomy: Best practices for researchers and reviewers. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – No. 136(3). – Article ID: 034501 (in Eng.).

Ogata K. (2001) *Modern Control Engineering*. 4th ed. Prentice Hall PTR, USA. ISBN 978-0130609072 (in Eng.).

Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*. – No. 378. – P. 686-707. (in Eng.).

Shannon C. (1949) Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*. – No. 37(1). – P. 10-21. <https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969> (in Eng.).

Tanoglidis D., Jain B., & Qu H. (2024) Transformers for scientific data: A pedagogical review for astronomers. *Astronomy and Computing*. – No. 46. – Article ID: 100780 (in Eng.).

**Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the
«Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty)**

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.

Requirements for articles design for publication in the journal are available on the websites:

**www.nauka-nanrk.kz
ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)
<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>**

Managing Editor: T. Apendiev
Editors: D.S. Alenov, A. Shormakova
Computer layout: G.D. Zhadyranova

Signed for print: June 22, 2026
Format: 70×90 1/16. 24.5 printed sheets. Order No. 2.

*«Central Asian Academic Research Center» LLP
Almaty, Shevchenko Street, 28*