

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 Tlekkaul 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 Жұрыңұлы, 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%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділұлы, 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 Мыңжасарұлы, 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>

ТИГІНЯНУ 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 Биология және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIIBV), 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), нанотехнология материалдары зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, 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 Жабағұлы, 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 Зайнуталлайұлы, 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 МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://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), (Джэон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендинович, 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/authid/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>

АБИЛМАТЖАНОВ 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>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

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., Zhaltirbayeva 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 охраның эпоксидті композиттердің кинетикалық сипаттамаларына ықпалын зерттеу.....	92
Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А. Ұшқыш 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., Ташмухамбетова 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., Түлешова Э.Ж.

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

Фазылов С.Д., Сыздықов А.Қ., 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 қосылыстары.....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: биомассада 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 тотығуы арқылы бензол алу.....302

Сдикова 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 көміртекті 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., Kubicek 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.

Мёссбауэровские 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., Желдыбаева 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., Жантурина 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</i> L. 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), 103–118

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.440>

UDC: 543.429.3:622.276.66

IRSTI: 29.19.31; 29.05.45

©Shokanov A.K., Khamrayev Sh.I., Smikhhan Y.A.*, 2026.

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: erkebulan1@mail.ru

MÖSSBAUER STUDIES OF FLY ASH-BASED TRACERS

Shokanov Adilkhan — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: adilhan.shokanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0479-6707>;

Khamrayev Sheripidin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,

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

Smikhhan Yerkebulan — Master's degree, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: erkebulan1@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0751-6585>.

Abstract. In oil and gas industry, monitoring of multistage hydraulic fracturing (MHF) operations in horizontal wells is a critical task that enables an objective evaluation of the contribution of each fracturing stage to total well productivity. Conventional chemical and radioactive tracers face limitations associated with environmental impact, regulatory restrictions, and signal overlap with reservoir fluids. The present study addresses the development of new generation of microtracers based on industrial fly ash, in which the unique combinations of iron-bearing phases (hematite α -Fe₂O₃, magnetite Fe₃O₄, maghemite γ -Fe₂O₃, fayalite Fe₂SiO₄, hercynite FeAl₂O₄, and Fe-substituted aluminosilicates) act as a fingerprint detectable by ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy. Samples of fly ash collected from thermal power plants in Almaty (HPP, TPP-2), originating from combustion of Ekibastuz, Shubarkol and Karazhyralin coals, were investigated. Mössbauer measurements were carried out at room temperature in the transmission geometry on a specialized experimental rig protected by a Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model. The hyperfine parameters of the spectra — isomer shift, quadrupole splitting, hyperfine magnetic field and component areas — were extracted by least-squares decomposition. It was established that each ash sample possesses a distinct hyperfine fingerprint that allows reliable identification of the corresponding stage in MHF flowback fluid. The results demonstrate the principal applicability of fly ash microtracers and the developed Mössbauer-based identification protocol for industrial control of fracturing operations.

Keywords: Mössbauer spectroscopy, fly ash, microtracers, multistage hydraulic fracturing, hyperfine structure, iron-bearing phases, hematite

Funding. *This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors. The work was carried out within the framework of the Memorandum and the Agreement on Scientific Cooperation between Abai Kazakh National Pedagogical University (Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan) and the Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan for 2020–2023.*

For citations: Shokanov A.K., Khamrayev Sh.I., Smikhan Y.A. Mössbauer Studies of Fly Ash-Based Tracers. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.2. Pp. 103–118. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.440>

©Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А.*, 2026.

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

*E-mail: erkebulan1@mail.ru

ҰШҚЫШ КҮЛ НЕГІЗІНДЕГІ ТРАССЕРЛЕРДІҢ МӨССБАУЭРЛІК ЗЕРТТЕУЛЕРІ

Шоканов Адилхан — физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: adilhan.shokanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0479-6707>;

Хамраев Шерипидин — техника ғылымдарының кандидаты, доцент, профессор, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: hamraev_sh@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8171-4360>;

Смихан Еркебұлан — магистр, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: erkebulan1@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0751-6585>.

Аннотация. Мұнай-газ саласында көлденең ұңғымалардағы көп сатылы гидрожарылыс (КСГЖ) операцияларын бақылау маңызды міндет болып табылады, өйткені ол әр жарылыс сатысының ұңғыма өнімділігіне қосатын үлесін объективті бағалауға мүмкіндік береді. Дәстүрлі химиялық және радиоактивті трассерлер экологиялық әсер, нормативтік шектеулер және ұңғыма сұйықтығымен сигналдың қабаттасуы сияқты бірқатар шектеулерге ие. Берілген жұмыс өнеркәсіптік ұшқыш күл негізінде жаңа буын микротрассерлерді әзірлеуге арналған. Мұнда темірдің құрамында болатын фазалардың (гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, магнетит Fe_3O_4 , магемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, фаялит Fe_2SiO_4 , герцинит FeAl_2O_4 , темір алюмосиликаттары) ерекше комбинациялары ^{57}Fe ядроларында мөссбауэрлік спектроскопия арқылы тіркелетін «таңба» рөлін атқарады. Алматы қаласындағы жылу электр станцияларының (МАЭС, ЖЭО-2) Екібастұз, Шұбаркөл және Қаражыра кен орындарының көмірлерін жаққанда түзілген ұшқыш күлдің үлгілері зерттелді. Өлшемдер ҚР-ның пайдалы модельге патентімен қорғалған арнайы

тәжірибелік стендте бөлме температурасында өткізу геометриясында орындалды. Спектрлердің ультражұқа құрылымының параметрлері — изомерлік ығысу, квадруполдік ыдырау, эффективті магнит өрісі және компоненттер үлестері — ең кіші квадраттар әдісімен анықталып, спектр контуры квадруполдік дублеттер мен Зееман секстеттеріне бөлінді. Әр күл үлгісінің жеке ультражұқа «таңбасы» бар екендігі және бұл ұңғыма өнімінде сәйкес сатыны 10^{-4} – 10^{-6} масс. %-ға дейінгі концентрацияларда сенімді анықтауға мүмкіндік беретіндігі дәлелденді. Нәтижелер ұшқыш күл негізіндегі трассерлер мен әзірленген мессбауэрлік сәйкестендіру әдістемесін гидрожарылыс операцияларын өнеркәсіптік бақылау үшін қолдану принципті мүмкіндігін растайды және сонымен қатар көмір энергетикасының күл қалдықтарын қайта пайдалану мәселесін шешуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: мессбауэрлік спектроскопия, ұшқыш күл, микротрассерлер, көп сатылы гидрожарылыс, ультражұқа құрылым, темір құрамды фазалар, гематит

©Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А.*, 2026.

¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан.

*E-mail: erkebulan1@mail.ru

МЁССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАССЕРОВ НА ОСНОВЕ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ

Шоканов Адилхан — кандидат физико-математических наук, профессор, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: adilhan.shokanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0479-6707>;

Хамраев Шерипидин — кандидат технических наук, доцент, профессор, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

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

Смихан Еркебұлан — магистр, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: erkebulan1@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0751-6585>.

Аннотация. В нефтегазовой отрасли мониторинг операций многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) в горизонтальных скважинах является критически важной задачей, позволяющей объективно оценивать вклад каждой стадии в общую продуктивность скважины. Традиционные химические и радиоактивные трассеры имеют ряд ограничений, связанных с экологическими рисками, нормативными требованиями и возможным перекрытием сигнала с компонентами пластовых флюидов. Настоящая работа посвящена разработке нового поколения микротрассеров на основе промышленной летучей золы, в которых уникальные комбинации железосодержащих фаз - гематита (α -Fe₂O₃), магнетита (Fe₃O₄), маггемита (γ -Fe₂O₃), фаялита (Fe₂SiO₄), герцинита (FeAl₂O₄) и железосодержащих алюмосиликатов - выступают в качестве индивидуального «отпечатка», регистрируемого методом мессбауэровской спектроскопии на

ядрах ^{57}Fe . В исследовании использованы образцы летучей золы тепловых электростанций города Алматы (ГРЭС, ТЭЦ-2), образованные при сжигании углей Экибастузского и Каражыралинского месторождений Республики Казахстан, а также образцы золы местного американского угля. Измерения выполнены при комнатной температуре в геометрии пропускания на специализированном экспериментальном стенде, защищённом патентом Республики Казахстан на полезную модель. Параметры сверхтонкой структуры, включая изомерный сдвиг, квадрупольное расщепление, эффективное магнитное поле и доли компонент, определены методом наименьших квадратов с разложением спектрального контура на квадрупольные дублеты и зеемановские секстеты. Установлено, что каждый образец летучей золы обладает индивидуальным сверхтонким спектральным «отпечатком», обеспечивающим надёжную идентификацию соответствующей стадии в продукции скважины при концентрациях вплоть до 10^{-4} – 10^{-6} масс. %. Полученные результаты подтверждают принципиальную применимость трассеров на основе летучей золы и разработанной методики мёссбауэровской идентификации для промышленного контроля операций ГРП. Кроме того, предложенный подход одновременно способствует решению задачи рациональной утилизации зольных отвалов угольной энергетики.

Ключевые слова: мёссбауэровская спектроскопия, летучая зола, микротрассеры, многостадийный гидроразрыв пласта, сверхтонкая структура, железосодержащие фазы, гематит

Введение. Развитие технологий разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов в горизонтальных скважинах, в первую очередь технологии многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП), требует наличия надёжных средств диагностики результативности каждой стадии стимуляции. Объективная оценка вклада отдельных интервалов перфорации в общий приток продукции скважины, выявление зон обводнения и установление эффективности применённых проппантов и жидкостей разрыва - задачи, решение которых напрямую определяет рентабельность месторождений с низкой проницаемостью (Yang et al., 2024).

Среди существующих методов промысловой диагностики (микросейсмический мониторинг, оптоволоконные системы DTS/DAS, наклонометры, диагностические инъекционные тесты DFIT) трассерные технологии занимают особое место благодаря относительной простоте применения, экономической эффективности и возможности получения количественных данных о приросте от каждой стадии (Lu et al., 2023; Xu et al., 2024). Принцип трассерного метода заключается в закачке вместе с жидкостью разрыва индикаторного вещества с уникальной идентификационной меткой в каждой стадии, последующей регистрации этих меток в продукции скважины и расчёте долевых вкладов стадий по соотношению их концентраций.

Однако традиционные химические трассеры (флуоресцентные, водорастворимые, нефтерастворимые) обладают рядом существенных недостатков: они

подвержены адсорбции на минералах коллектора, разлагаются в пластовых условиях, могут давать ложноположительные сигналы при наличии в пласте органических соединений, спектрально перекрывающихся с трассером (Lu et al., 2023). Радиоактивные трассеры, обладающие высокой чувствительностью обнаружения, в свою очередь, ограничены жёсткими нормативными требованиями к транспортировке, хранению и утилизации, а также экологическими рисками (Yang et al., 2024).

В последнее десятилетие активно ведётся поиск нерадиоактивных, экологически безопасных и одновременно высокочувствительных систем трассирования. Перспективным направлением стало использование наночастиц различной природы - оксидов железа, апконвертирующих наночастиц, магнитных наноэмульсий - в качестве «умных» меток (Boul et al., 2020; Kanj et al., 2022). Одновременно с этим получил развитие альтернативный подход, основанный на применении не специально синтезированных, а уже существующих в промышленности материалов, обладающих уникальной фазовой структурой, — летучей золы тепловых электростанций (Vereshchak et al., 2021; Waanders et al., 2003).

Летучая зола образуется в процессе пылевидного сжигания угля и представляет собой сложный многокомпонентный материал, содержащий стеклофазу, муллит $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, кварц SiO_2 , оксиды железа в различных степенях окисления, а также железосодержащие алюмосиликаты типа герцинита FeAl_2O_4 и фаялита Fe_2SiO_4 (Shokanov et al., 2020; Cardarelli et al., 2015). Соотношение этих фаз и параметры их сверхтонкой структуры зависят от сорта исходного угля, температуры сжигания, режима охлаждения и условий конкретной тепловой энергоустановки. Это означает, что зола разных ТЭС/ГРЭС, полученная из углей разных месторождений, обладает индивидуальным «фазовым отпечатком», который может быть зафиксирован методами ядерно-физического анализа.

Среди ядерно-физических методов наиболее информативной для исследования железосодержащих систем является мёссбауэровская (ядерная гамма-резонансная) спектроскопия на ядрах ^{57}Fe . Метод обеспечивает разрешение по изомерному сдвигу δ , квадрупольному расщеплению Δ и эффективному магнитному полю $H_{\text{эфф}}$, что позволяет однозначно идентифицировать валентное состояние железа ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$), его координационное окружение и магнитное состояние при концентрациях вплоть до 10^{-4} – 10^{-6} масс. % (Goldanskii et al., 1970; De Grave et al., 2005; Mashlan et al., 2022).

Цель настоящей работы - экспериментально подтвердить возможность использования образцов летучей золы тепловых электростанций различного происхождения в качестве микротрассеров для контроля эффективности отдельных стадий МГРП на основе уникальности параметров сверхтонкой структуры мёссбауэровских спектров каждого образца. В качестве экспериментальной базы был использован специализированный стенд, разработанный авторами и защищённый патентом Республики Казахстан на полезную модель.

Литературный обзор. Применение мёссбауэровской спектроскопии для

исследования летучих зол имеет более чем сорокалетнюю историю и ведётся в большинстве стран, эксплуатирующих угольную энергетику. Одной из ранних систематических работ стала публикация Williamson и др. (1984), в которой было показано, что в золе бурого угля австралийского месторождения Hazelwood железо присутствует преимущественно в виде кальциевого алюмоферрита $\text{Ca}_2\text{Fe}_{2-x}\text{Al}_x\text{O}_5$ с минорными примесями гематита и магнетита, причём фазовый состав определяется не только составом исходного угля, но и температурой осаждения золы в электрофильтрах.

Cardarelli и др. (2015) при исследовании летучих зол колумбийских ТЭС методом мёссбауэровской спектроскопии в сочетании со стандартом ASTM D3174 обнаружили в исходном угле пирит и ярозит, а в золах - пара- и ферритмагнитные фазы $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, гематит и магнетит, в том числе суперпарамагнитный. Этот результат продемонстрировал возможность отслеживать минералогические трансформации железа на всех стадиях технологической цепочки, начиная от добычи угля и заканчивая улавливанием золы. Аналогичные подходы были развиты в работах Nishida и др. (2005), посвящённых анализу зол японских ТЭС, в исследованиях Bajukova и др. (2009) для зол сибирских углей, а также Waanders и др. (2003), сопоставивших результаты сканирующей электронной микроскопии и мёссбауэровских измерений на углях, продуктах их выветривания и зольных остатках.

Особый интерес представляет цикл работ, выполненных коллективом авторов из Казахстана, по детальному исследованию фазового состава зол экибастузских углей. В частности, в публикации Shokanov и др. (2020) методами мёссбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифракции для зол ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Алматы установлено, что узкие фракции золы содержат железо преимущественно в виде магнетита Fe_3O_4 и гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, причём в золе ТЭЦ-3 дополнительно присутствует маггемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ как продукт медленного окисления магнетита. Авторами также было показано, что доля магнетита в золе является температурным индикатором условий формирования: при $T \geq 1400^\circ\text{C}$ она возрастает за счёт распада гематита, маггемита, герцинита и снижения содержания железа в муллите.

В последующих работах того же коллектива (Vereshchak et al., 2021) была проведена гранулометрическая и магнитная сепарация золы экибастузского угля и показано, что с увеличением размера гранул доля магнитоупорядоченных компонент в мёссбауэровском спектре уменьшается; во фракции более 100 мкм доминируют парамагнитные минералы. После магнитной сепарации железо в ферросферах сосредоточено преимущественно в структуре $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, с долей Fe_3O_4 от 60 до 77 %.

Параллельно международные группы продолжают работы по применению мёссбауэровской спектроскопии для оценки воздействия зольных частиц на окружающую среду. Так, Magiera и др. (2020) использовали метод для идентификации железосодержащих фаз в почвах Верхнесилезского промышленного района Польши и показали, что характерные мёссбауэровские параметры магнетита и

гематита позволяют связать загрязнение почв с эмиссиями конкретных тепловых электростанций. В работе Joshi и др. (2009) аналогичный подход был применён для зол индийской ТЭС Kolaghat, где было установлено доминирование магнетита и гематита с примесью алюмосиликатной стеклофазы.

Применение трассеров в МГРП - относительно молодое, но интенсивно развивающееся направление. Lu и др. (2023) разработали методику интерпретации кривых обратного притока многостадийных трассеров для плотных коллекторов и показали, что для скважины HD4-3H в плотном коллекторе вклад первой стадии в нефтедобычу составил 18,65 %, что согласуется с данными микросейсмических измерений. Xu и др. (2024) применили химические трассеры на горизонтальной скважине индонезийской свиты Telisa и подтвердили возможность дифференцированной оценки эффективности интервалов МГРП. Boul и др. (2020) в обзоре нанотехнологий для нефтегазовой промышленности продемонстрировали перспективность функционализированных наночастиц оксидов железа в качестве суперпарамагнитных трассеров. Kanj и др. (2022) предложили использовать магнитные нановискеры на основе Fe_3O_4 в виде Pickering-наноземлюльсий для оптимизации проектирования сети трещин в плотных коллекторах.

Несмотря на большой объём накопленных данных, использование промышленных летучих зол с их природной фазовой неоднородностью в качестве недорогих микротрассеров для МГРП с идентификацией методом мёссбауэровской спектроскопии до настоящего времени систематически не исследовалось. Именно эту нишу и заполняет настоящая работа, основанная на ранее выполненных авторами публикациях (Shokanov, 2020; Vereshchak et al., 2021) и патентном решении в области конструкции экспериментального стенда (Shokanov, 2023).

Материалы и основные методы. В качестве объектов исследования были выбраны три образца летучей золы, образовавшейся при пылевидном сжигании углей различных месторождений на тепловых энергоустановках:

- образец а - летучая зола с электрофильтров ГРЭС г. Алматы, исходный уголь - Экибастузское месторождение (Республика Казахстан);
- образец б - летучая зола ТЭС США, исходный уголь - местный американский уголь;
- образец с - летучая зола ТЭЦ-2 г. Алматы, исходный уголь - Каражыралинского месторождения.

Образцы были получены отбором узких фракций по гранулометрической методике с последующим контролем гранулометрического состава методом ситового анализа в соответствии с ранее разработанной процедурой (Vereshchak et al., 2021). Подготовка образцов для мёссбауэровских измерений выполнялась в соответствии с методикой, изложенной в монографии Шоканова (2020): навески летучей золы из расчёта 100 мг/см^2 смешивались с парафином и прессовались в таблетки.

Лабораторные испытания на экспериментальном стенде. Лабораторные испытания моделирования технологии многостадийного гидроразрыва пласта

(МГРП) с использованием трассеров на основе летучей золы проводились на специализированном экспериментальном стенде, разработанном авторами и защищённом патентом Республики Казахстан на полезную модель № 6987 от 27.01.2023 г. (Shokanov, 2023). Стенд смонтирован в лаборатории Казахского национального педагогического университета имени Абая (г. Алматы) и оборудован системой подачи воды.

Принципиальная схема стенда включает следующие основные узлы: ёмкость с водой объёмом 1000 л; ёмкость для отсепарированной воды; самовсасывающий насос радиального действия с максимальным давлением наработки 5 атм и производительностью 65 л/мин; регулирующие запорные вентили (латунные шаровые краны, рассчитанные на условное давление до 4–5 атм); магистральные фильтры грубой и тонкой очистки с металлической сеткой пропускной способностью 1, 5, 15, 25, 50, 70 и 100 мкм; имитационная скважина; имитационная трещина; шаровой кран бака; манометр; пластиковый трубопровод диаметром 20 мм; группа защиты с расходомером. Стенд работает при давлениях от 1 до 4 атм, что позволяет моделировать реальные условия скважин при добыче трудноизвлекаемых запасов нефти и газа (Shokanov, 2020).

Технология эксперимента, основанная на использовании субмикронных частиц летучей золы в качестве трассеров, реализуется в следующей последовательности операций. На первом этапе трассирующие индикаторы - порошки летучей золы с заданным гранулометрическим составом - добавляются в воду в первом баке, после чего полученная смесь самовсасывающим насосом, расположенным ниже водяных коммуникаций и экспериментальных участков, подаётся через имитационную скважину или имитационную трещину и регулирующие вентили в магистральный трубопровод. На втором этапе жидкость с трассерами проходит через экспериментальный участок с магистральными фильтрами: продавленная вода протекает через фильтр, а микрочастицы остаются во внешнем контуре (колбе) фильтра. На третьем этапе из экспериментального участка отсепарированная вода через подпорные вентили возвращается во второй приёмный бак, а избыточное давление сбрасывается через группу защиты в атмосферу. На четвёртом этапе после завершения цикла «закачка - извлечение» картриджи фильтров с осевшими микрочастицами трассеров извлекаются, отфильтрованный порошок снимается с сетки, высушивается и подготавливается к ядерно-физическому анализу. По итогам цикла фиксируются показания манометров, расходомеров и других контрольных датчиков (Shokanov, 2020; Shokanov, 2023).

Стенд позволяет в лабораторных условиях имитировать процессы закачки трассерного материала в продуктивный пласт и его последующего извлечения с обратным потоком, что обеспечивает воспроизводимость результатов и возможность сопоставления различных партий микротрассеров между собой. По итогам отработки технологии на стенде в 2019 г. были подготовлены образцы трассеров, испытания которых отражены в Акте испытаний, выданном Институтом ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, от 25.06.2019 г. (Shokanov, 2020).

Мёссбауэровские измерения. Высушенные образцы летучей золы и микрочастиц, отделённых от воды на фильтрах стенда, направлялись на анализ методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС) в Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан (ИЯФ МЭ РК, г. Алматы). Работы выполнялись в рамках Меморандума и Договора о научном сотрудничестве, заключённых между НАО «Казахский национальный педагогический университет имени Абая» МОН РК и ИЯФ МЭ РК на 2020–2023 гг.

Регистрация мёссбауэровских спектров проводилась на спектрометре MS-1104Em в режиме постоянных ускорений с источником гамма-квантов ^{57}Co в матрице хрома при комнатной температуре ($T = 295 \pm 2 \text{ K}$) в геометрии пропускания. Спектры регистрировались на 1024 канала. Калибровка шкалы скоростей осуществлялась по эталонному образцу $\alpha\text{-Fe}$, относительно которого приводятся значения изомерных сдвигов δ . Скоростной диапазон сканирования обеспечивал регистрацию как парамагнитных компонент с малыми квадрупольными расщеплениями, так и магнитоупорядоченных секстетов с эффективными полями до 530 кЭ (Shokanov, 2020).

Математическая обработка экспериментальных мёссбауэровских спектров выполнялась с применением программы SpectrRelax методами модельной расшифровки и восстановления функций распределения сверхтонких параметров. В качестве критерия наилучшего разложения мёссбауэровского спектра использовался χ^2 -параметр, оценивающий приближение суммы расчётных компонент к экспериментальным данным. Сложный спектральный контур разлагался на индивидуальные компоненты - квадрупольные дублеты (для парамагнитных фаз) и зеэмановские секстеты (для магнитоупорядоченных фаз) в приближении лоренцевых форм линий (Shokanov, 2020; Goldanskii et al., 1970; Wertheim, 1996).

Идентификация фазовых состояний железа в исследуемых образцах осуществлялась путём сопоставления полученных параметров сверхтонкой структуры - изомерного сдвига δ , квадрупольного расщепления Δ , эффективного магнитного поля $H_{\text{эфф}}$ и относительной площади S - с эталонными значениями, известными для соединений железа (Shokanov, 2020; De Grave et al., 2005; Murad, 2010). Дополнительно для контроля минералогического состава была применена методика, использовавшаяся ранее в работах международных коллективов (Cardarelli et al., 2015; Joshi et al., 2009), включающая сопоставление мёссбауэровских данных с результатами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии.

Результаты. На рисунке 1 представлены мёссбауэровские спектры всех трёх исследованных образцов летучей золы, измеренные при комнатной температуре. Спектры отражают различия в состоянии катионов железа, наличие катионных и анионных вакансий, а также связанные с ними искажения кристаллической решётки шпинельной структуры и алюмосиликатной матрицы (Magiera et al., 2020).

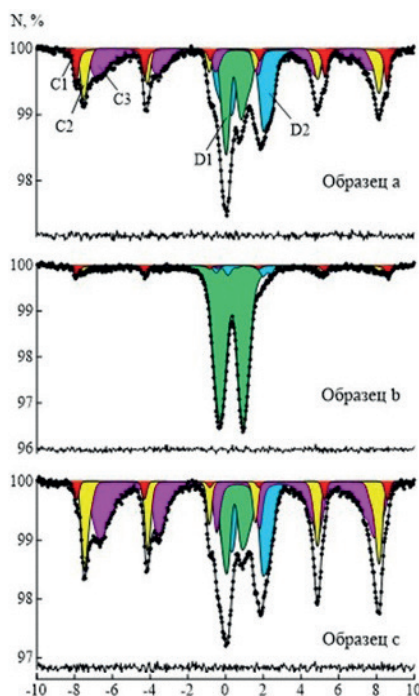


Рисунок 1. Мёссбауэровские спектры летучих зол: а — ГРЭС, b — ТЭС США, с — ТЭЦ-2.

На рисунке 2 представлен спектр образца №1 (ГРЭС, экибастузский уголь). Мёссбауэровский спектр характеризуется расширенным асимметричным квадрупольным дублетом без признаков магнитной структуры. Результаты компьютерной обработки показали, что данный сигнал фактически состоит из четырёх квадрупольных дублетов с близкими, но различными параметрами, отвечающих железу в различных диамагнитных позициях.

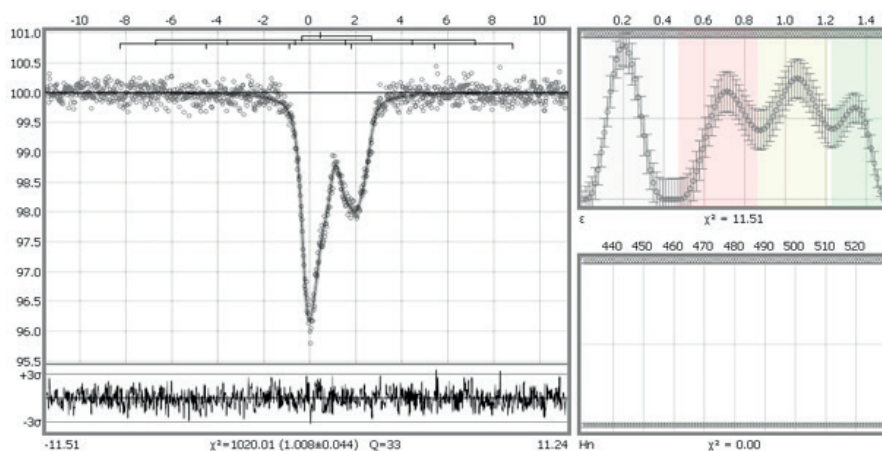


Рисунок 2. Мёссбауэровский спектр образца №1 (ГРЭС, Экибастуз).

Таблица 1. Сверхтонкая структура мёссбауэровского спектра образца №1.

№ п/п	Изомерный сдвиг, δ , мм/с	Квадрупольное расщепление, ϵ , мм/с	Магнитное расщепление, $H_{\text{эфф}}$, кЭ	Полуширина линии, Г, мм/с	Доля Fe, % в спектре	Формулы оксидов
1.	0,532 $\pm$ 0,016	0,230 $\pm$ 0,018	—	0,638 $\pm$ 0,031	22,7 $\pm$ 4,0	SiO ₂
2.	0,786 $\pm$ 0,050	0,778 $\pm$ 0,60	—	0,638 $\pm$ 0,031	36,5 $\pm$ 5,0	Al ₂ O ₃
3.	0,953 $\pm$ 0,040	1,117	—	0,638 $\pm$ 0,031	27,0 $\pm$ 4,0	CaO
4.	1,272 $\pm$ 0,170	1,263 $\pm$ 0,160	—	0,638 $\pm$ 0,031	13,9 $\pm$ 4,0	SO ₃

Из данных таблицы 1 следует, что мёссбауэровский спектр образца №1 не содержит магнитной структуры. Он представлен четырьмя диамагнитными компонентами, находящимися в различных фазовых состояниях. Каждая из этих составляющих характеризуется собственной сверхтонкой структурой. Предположительно, данные компоненты соответствуют оксидам SiO₂, Al₂O₃, CaO и SO₃, в составе которых железо присутствует в двух- и трёхвалентном состоянии в различных концентрациях (Shokanov, 2020; Cardarelli et al., 2015).

Спектр следующей партии - образца №2 (ТЭС США, местный американский уголь) - имеет принципиально иные характеристики (рисунок 3). Параметры мёссбауэровского спектра этого образца существенно отличаются от спектра образца №1: помимо парамагнитной части, в нём отчётливо проявляется магнитоупорядоченная структура. Результаты компьютерной обработки показали, что спектр состоит из трёх квадрупольных дублетов и двух секстетов. При этом квадрупольные дублеты характеризуются различными параметрами изомерного сдвига и квадрупольного расщепления, что свидетельствует о сосуществовании ионов Fe²⁺ и Fe³⁺ в различных кристаллографических позициях.

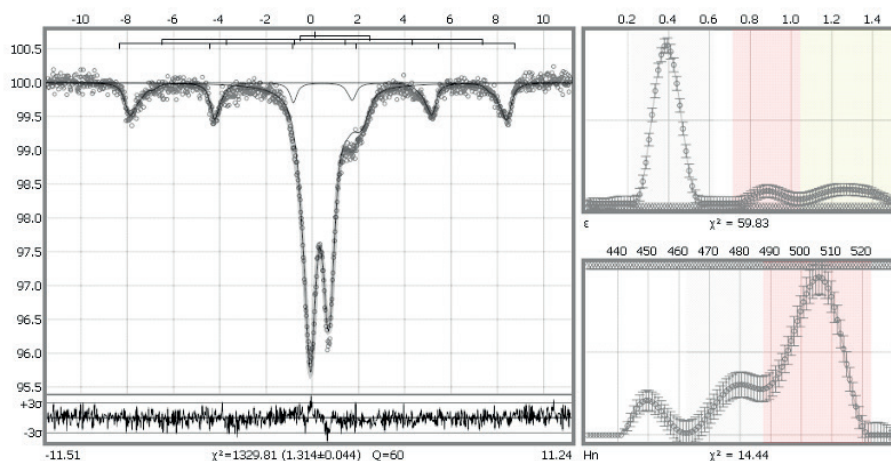


Рисунок 3. Мёссбауэровский спектр образца №2 (ТЭС США, местный американский уголь).

Мёссбауэровские параметры сверхтонкой структуры образца №2 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Мёсбауэровские параметры сверхтонкой структуры образца №2.

№ п/п	Изомерный сдвиг, δ , мм/с	Квадрупольное расщепление, ϵ , мм/с	Магнитное расщепление, $H_{\text{эф}}$, кЭ	Полуширина линии, Γ , мм/с	Доля Fe, %
1.	$0,3221 \pm 0,023$	$0,390 \pm 0,004$	—	$0,541 \pm 0,009$	$61,5 \pm 1,3$
2.	$0,621 \pm 0,022$	$0,902 \pm 0,040$	—	$0,541 \pm 0,009$	$5,5 \pm 1,0$
3.	$0,835 \pm 0,014$	$1,271 \pm 0,017$	—	$0,541 \pm 0,009$	$11,1 \pm 0,8$
4.	$0,366 \pm 0,007$	$-0,076 \pm 0,008$	$494,20 \pm 0,70$	$0,351 \pm 0,040$	$22,0 \pm 0,7$
5.	$0,366 \pm 0,007$	$-0,096 \pm 0,006$	$503,79 \pm 0,50$	$0,351 \pm 0,040$	$15,9 \pm 0,9$

В спектре образца №3 (ТЭЦ-2, каражыралинский уголь) наблюдается один квадрупольный дублет и два секстета (рисунок 4). По сравнению с образцом №2 здесь существенно выше доля магнитоупорядоченной фазы и значительно меньше число парамагнитных компонент, что свидетельствует о ином соотношении кристаллических железосодержащих фаз.

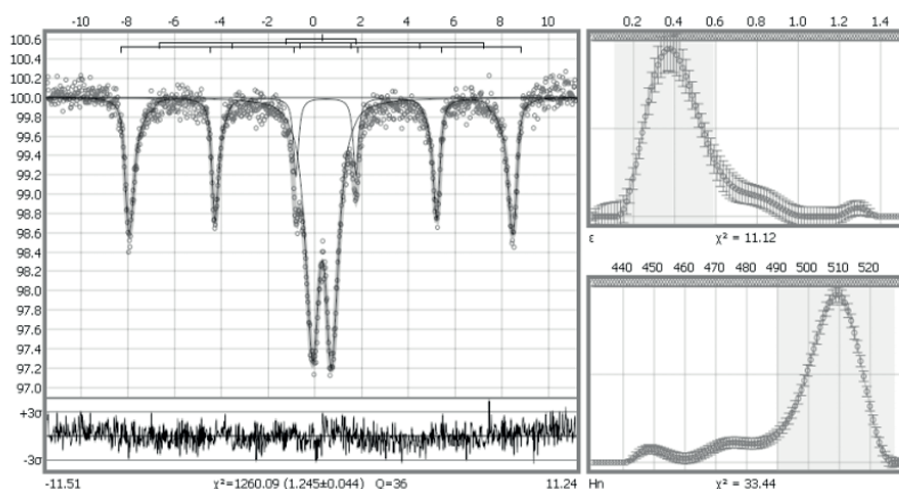


Рисунок 4. Мёсбауэровский спектр образца №3 (ТЭЦ-2, Каражыра).

Мёсбауэровские параметры сверхтонкой структуры образца №3 приведены в таблице 3.

Таблица 3. Мёсбауэровские параметры сверхтонкой структуры образца №3.

№ п/п	Изомерный сдвиг, δ , мм/с	Квадрупольное расщепление, ϵ , мм/с	Магнитное расщепление, $H_{\text{эф}}$, кЭ	Полуширина линии, Γ , мм/с	Доля Fe, %	Фазовое состояние Fe
1.	$0,311 \pm 0,0025$	$0,3890 \pm 0,006$	—	$0,469 \pm 0,070$	$46,2 \pm 2,5$	$(3\text{Al}_{2-x}\text{Fe}_{x/3})\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
2.	$0,370 \pm 0,0021$	$0,370 \pm 0,0021$	430,00	$0,240 \pm 0,016$	$16,0 \pm 0,5$	Fe_2SiO_4
3.	$0,3684 \pm 0,00022$	$0,1040 \pm 0,0022$	489,60	$0,240 \pm 0,016$	$38,0 \pm 0,7$	Fe_2O_3

Из данных таблицы 3 следует, что мёссбауэровский спектр образца №3 содержит одну диамагнитную и две магнитоупорядоченные компоненты. Дублет с изомерным сдвигом $\delta = 0,311$ мм/с и квадрупольным расщеплением $\varepsilon = 0,389$ мм/с (~46 % площади спектра) соответствует ионам железа в составе алюмосиликатной фазы со структурой типа муллита; секстет с $H_{\text{эфф}} = 430,0$ кЭ относится к фаялиту Fe_2SiO_4 , а секстет с $H_{\text{эфф}} = 489,6$ кЭ - гематиту $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Полученные параметры сверхтонкой структуры согласуются с эталонными значениями для соединений железа (Shokanov, 2020; Murad, 2010).

Обсуждение. Сопоставление полученных данных по трём образцам летучей золы выявляет принципиальные различия их сверхтонких структур, что и составляет физическую основу их применимости в качестве микротрассеров. Образец №1 характеризуется чисто парамагнитной структурой из четырёх дублетов, образец №2 - комбинированной структурой из трёх дублетов и двух секстетов, образец №3 - структурой из одного дублета и двух секстетов. Эта спектральная индивидуальность обусловлена различным фазовым составом железосодержащих минералов и валентным состоянием Fe в каждом из образцов.

Полученные результаты согласуются с общими тенденциями, описанными в литературе. Так, в работе Shokanov и др. (2020) для зол ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Алматы было показано доминирование магнетита Fe_3O_4 и гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с долей магнетита 60–77 % в магнитной фракции; в нашем образце №3 (ТЭЦ-2) также наблюдается значительная магнитоупорядоченная фаза (54 % суммарной площади секстетов), однако в неё доминирующий вклад вносит гематит (38 %), а не магнетит. Это различие может быть связано с тем, что в исследованном нами образце был использован каражыралинский, а не экибастузский уголь, а также с различиями в режимах сжигания и охлаждения золы.

Параметры секстета с $H_{\text{эфф}} = 489,6$ кЭ практически совпадают с эталонными значениями для гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ при комнатной температуре (Murad, 2010): $\delta \approx 0,37$ мм/с, $\varepsilon \approx -0,21$ мм/с, $B_{\text{hf}} \approx 51,7$ Тл (517 кЭ). Меньшее значение поля $H_{\text{эфф}} = 489,6$ кЭ в нашем эксперименте может указывать на изоморфное замещение части ионов Fe^{3+} алюминием с образованием алюмогематита $\text{Al-}\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что является широко известным эффектом для природных и техногенных гематитсодержащих систем (De Grave et al., 2005; Murad, 2010).

Секстет с $H_{\text{эфф}} = 430,0$ кЭ и $\delta \approx 0,37$ мм/с отнесён к фаялиту Fe_2SiO_4 . Хотя для чистого синтетического фаялита характерно поле порядка 320 кЭ при комнатной температуре, в высокотемпературной алюмосиликатной матрице золы возможны кооперативные эффекты, повышающие эффективное поле. Альтернативно, данный секстет может быть отнесён к одной из подрешёток магнетита Fe_3O_4 , для которого характерны два магнитных подспектра с полями около 491 кЭ (тетраэдрические позиции Fe^{3+}) и 460 кЭ (октаэдрические позиции $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) при комнатной температуре (De Grave et al., 2005). Окончательное разделение этих двух интерпретаций возможно при низкотемпературных мёссбауэровских измерениях с регистрацией перехода Морина.

Дублет с $\delta = 0,311$ мм/с и $\varepsilon = 0,389$ мм/с в образце №3 соответствует ионам Fe^{3+}

в искажённой октаэдрической координации. Подобные параметры характерны для железосодержащего муллита $(3\text{Al}_{2-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, в котором изоморфное замещение $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ происходит в алюминий-кислородных октаэдрах. Этот вывод подтверждается данными рентгеновской дифракции для аналогичных зол экибастузских углей (Shokanov et al., 2020), где муллит $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ выступает доминирующей кристаллической фазой алюмосиликатной матрицы.

Важным методическим аспектом является воспроизводимость идентификации образца на низких концентрациях, характерных для трассерных применений (10^{-4} – 10^{-6} масс. %). Для оценки чувствительности необходимо учитывать, что мёссбауэровский эффект пропорционален произведению содержания ^{57}Fe (природное изобилие 2,17 %) на коэффициент Лэмба-Мёссбауэра f . При типичных значениях $f \approx 0,7$ для оксидов железа и эффективной поверхностной плотности образца порядка 10 мг/см^2 по железу нижняя граница регистрации сверхтонкой структуры составляет 10^{-4} масс. %, что соответствует требованиям к индивидуальной идентификации стадий МГРП по результатам обратного притока (Lu et al., 2023). Для повышения чувствительности возможно изотопное обогащение материала ^{57}Fe .

Полученные индивидуальные сверхтонкие «отпечатки» каждого образца составляют физическую основу для практического применения летучих зол в качестве микротрассеров для МГРП. Закачка различных видов золы в разные ствола скважины с последующей мёссбауэровской регистрацией железосодержащих соединений из извлечённых проб позволит установить расположение трассерного материала в трещинах и оценить эффективность каждой стадии. По сравнению с традиционными химическими и радиоактивными трассерами предлагаемые микротрассеры на основе летучей золы обладают существенными преимуществами: они являются вторичным сырьём (продукт промышленных отходов ТЭС), экологически безопасны, химически стабильны в пластовых условиях и не подвержены адсорбции на минералах коллектора.

Сравнение современных нанотрассеров на основе функционализированных Fe_3O_4 -наночастиц (Boul et al., 2020; Kanj et al., 2022) показывает, что оба подхода имеют сравнимую чувствительность регистрации, однако трассеры на основе зол выигрывают в стоимости и доступности - особенно в условиях Казахстана с его развитой угольной энергетикой и большими накопленными объёмами золоотвалов. С другой стороны, наночастицы превосходят зольные трассеры по гомогенности и контролируемости размера, что важно для тонкого моделирования транспорта в плотных коллекторах. Возможной перспективой является разработка гибридных трассерных систем, сочетающих преимущества обоих подходов.

Заключение. Мёссбауэровские исследования трёх образцов летучей золы тепловых электростанций различного происхождения показали, что все исследованные образцы обладают уникальными сверхтонкими структурами, обусловленными различным фазовым составом и валентными состояниями железа. Это позволяет надёжно идентифицировать их методом мёссбауэровской

спектроскопии в качестве микротрассеров. Применение таких материалов при многостадийном гидроразрыве пласта обеспечивает контроль эффективности каждой стадии стимуляции, поскольку соединения железа хорошо идентифицируются с помощью эффекта Мёссбауэра (et al., 2020; Vereshchak et al., 2021; Cardarelli et al., 2015; Shokanov et al., 2023).

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом. Во-первых, экспериментально подтверждена индивидуальность сверхтонких структур мёссбауэровских спектров летучих зол трёх различных тепловых электростанций. Во-вторых, для образца №3 определены параметры сверхтонкой структуры - изомерный сдвиг, квадрупольное расщепление, эффективное магнитное поле и относительные доли компонент - для трёх железосодержащих фаз (алюмосиликат типа муллита, фаялит/магнетит и гематит/алюмогематит). В-третьих, продемонстрирована принципиальная возможность использования летучих зол в качестве микротрассеров для МГРП с идентификацией методом мёссбауэровской спектроскопии.

Практическое значение работы определяется тем, что предлагаемая технология позволяет использовать вторичное сырьё промышленных отходов угольной энергетики в высокотехнологичных нефтесервисных приложениях, что одновременно решает задачи мониторинга МГРП и утилизации зольных отвалов. Разработанный авторами экспериментальный стенд (Shokanov et al., 2023) обеспечивает необходимую методическую и метрологическую базу для дальнейших исследований по практическому внедрению технологии. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение поведения зольных микротрассеров в условиях, моделирующих пластовое давление и температуру, а также количественная оценка чувствительности регистрации по концентрации в продукции скважины.

References

- Bajukova O.A., Anshits N.N., Petrova M.I., Balaev A.D., Anshits A.G. (2009) Composition and magnetic properties of ferrospheres from coal fly ash. *Materials Chemistry and Physics*. – No. 114(1). – P. 495-503. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.001> (in Eng.).
- Boul P.J., Reddy B.R., Zhang J., Thaemlitz C. (2020) Nanotechnology research and development in upstream oil and gas. *Energy Technology*. – No. 8(1). – P. 1901216. <https://doi.org/10.1002/ente.201901216> (in Eng.).
- Cardarelli J.M., Camayo M.P., Pérez-Alcázar G.A. (2015) Mössbauer characterization of feed coal, ash and fly ash from a thermal power plant. *Hyperfine Interactions*. – No. 232(1-3). – P. 33-40. <https://doi.org/10.1007/s10751-015-1140-1> (in Eng.).
- De Grave E., Vandenbergh R.E. (2005) Mössbauer characterization of iron oxides and (oxy) hydroxides: the present state of the art. *Hyperfine Interactions*. – No. 161(1-4). – P. 81-98. <https://doi.org/10.1023/A:1012603603203> (in Eng.).
- Goldanskii V.I., Krizhanskii L.M., Khrapov V.V. (Eds.) (1970) *Khimicheskie primeneniya messbauerovskoj spektroskopii* [Chemical applications of Mössbauer spectroscopy]. – Moscow: Mir. – 504 p. (in Russian).
- Joshi S.K., Bajpai A., Thakur P., Mathur R. (2009) Microstructural and magnetic characterization of fly ash from Kolaghat Thermal Power Plant in West Bengal, India. *Hyperfine Interactions*. – No. 187(1-3). – P. 7-14. <https://doi.org/10.1007/s10751-008-9858-7> (in Eng.).
- Kanj M.Y., Rashid H., Giannelis E.P. (2022) Magnetic Pickering nanoemulsions for fluid conductivity

analysis in subsurface reservoirs. SPE Canadian Energy Technology Conference, SPE-208980-MS. <https://doi.org/10.2118/208980-MS> (in Eng.).

Lu X., Wang Z., Liu Y., Sun Y., Yang J., Wang J. (2024) Study on interpretation method of multistage fracture tracer flowback curve in tight oil reservoirs. *ACS Omega*. – No. 9(11). – P. 12647-12659. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08923> (in Eng.).

Magiera T., Mendakiewicz M., Szuszkiewicz M., Jabłońska M., Chróst L. (2020) Application of Mössbauer spectroscopy for identification of iron-containing components in Upper Silesian topsoil being under industrial anthropopressure. – *Materials*. – No. 13(22). – P. 5266. <https://doi.org/10.3390/ma13225266> (in Eng.).

Mashlan M., Kholmetskii A., Yevdokimov V., Pechousek J., Verich O., Zboril R., Tsonchev R. (2006) Mössbauer spectrometer with resonant detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. – No. 243(1). – P. 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.07.198> (in Eng.).

Murad E. (2010) Mössbauer spectroscopy of clays, soils and their mineral constituents. *Clay Minerals*. – No. 45(4). – P. 413-430. <https://doi.org/10.1180/claymin.2010.045.4.413> (in Eng.).

Nishida T., Tokunaga M., Sugata Y., Kubuki S. (2005) Iron speciation in coal fly ash by Mössbauer spectroscopy. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – No. 266(1). – P. 171-177. <https://doi.org/10.1007/s10967-005-0890-7> (in Eng.).

Shokanov A.K., Smikhhan Y.A. (2023) Stend dlya issledovaniya tekhnologii mnogostadiynogo gidrorazryva plasta s ispolzovaniem trasserov [Bench for studying multistage hydraulic fracturing technology with tracers]: Patent of the Republic of Kazakhstan for utility model. – No. 6987. Registered 27.01.2023. (in Russian).

Shokanov A.K., Vereshchak M.F., Manakova I.A. (2020) Mössbauer and X-ray studies of phase composition of fly ashes formed after combustion of Ekibastuz coal (Kazakhstan). *Metals*. – No. 10(7). – P. 929. <https://doi.org/10.3390/met10070929> (in Eng.).

Vereshchak M.F., Manakova I.A., Shokanov A.K., Sakhiev S.K. (2021) Mössbauer studies of narrow fractions of fly ash formed after combustion of Ekibastuz coal. *Materials*. – No. 14(23). – P. 7473. <https://doi.org/10.3390/ma14237473> (in Eng.).

Waanders F.B., Vinken E., Mans, A., Mulaba-Bafubiandi A.F. (2003) Iron minerals in coal, weathered coal and coal ash — SEM and Mössbauer results. *Hyperfine Interactions*. – No. 148/149(1-4). – P. 21-29. <https://doi.org/10.1023/B:HYPE.0000003760.89706.f6> (in Eng.).

Wertheim G.K. (1996) Эффект Мессбауера. Принципы и применения [Mössbauer effect: Principles and applications]. – Moscow: Mir. (in Russian).

Williamson J., Nelson P.F., Fyfe W.S. (1984) Mössbauer analysis of iron phases in brown coal ash and fireside deposits. *Fuel*. – No. 63(8). – P. 1145-1150. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(84\)90436-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(84)90436-8) (in Eng.).

Xu Y., Pratama A., Lee J., Park S., Wijaya M., Iskandar R. (2023) Chemical tracer evaluation of first horizontal multistage fracturing treatment well in the Telisa formation, Indonesia. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, SPE-216769-MS. <https://doi.org/10.2118/216769-MS> (in Eng.).

Yang B., Zhao J., Mao J., Tan H., Zhang Y., Song Z. (2024) Recent advances in monitoring multistage hydraulic fracturing in unconventional reservoirs: Diagnostic techniques and applications. *Energy Reports*. – No. 11. – P. 2541–2562. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.02.016> (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*