

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 (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), 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), (Дэжон, 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 Жабағәевич, 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., Курмангалиева 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., Сейсенев 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
Баешова А.К., Баешов 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), 228–243

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.449>

UDC: 621.355.9:661.666.3
IRSTI: 61.31.59; 61.01.91; 61.31.47

©Kapizov O.S.^{1,3}, Mukhanov D.K.^{1,3}, Dzheldybaeva I.M.², Seisenov E.B.^{1,3},
Akimbayeva A.B.^{1,3*}, 2026.

¹Scientific Center for New Technologies, Almaty, Kazakhstan;

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

³AlAkSan, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: akzhunis.akimbayeva@bk.ru

SUSTAINABLE RECYCLING OF FERROSILICON MACHINING CHIPS FROM METALLURGICAL PLANTS INTO HIGH-PERFORMANCE SILICON–CARBON ANODES

Kapizov Omirzak — PhD, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: ok-sir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1979-7625>;

Mukhanov Dauren — PhD, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: dd_511@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1645-8625>;

Dzheldybaeva Indira — PhD, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: Jeldybaeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1524-4046>;

Seisenov Yerzhan — Master's student, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: erzhan_seisenov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8336-3121>;

Akimbayeva Akzhunis — Junior Researcher, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: akzhunis.akimbayeva@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6554-8181>.

Abstract. Particular attention is paid to modern battery technologies, including lithium-ion, sodium-ion, and magnesium-ion systems, whose development is related to the growing demand for efficient, safe, and economically accessible energy storage. In this context, sodium-ion and magnesium-ion batteries are considered as promising alternatives to lithium-ion technologies owing to the wider availability of raw materials and potential safety advantages. A significant part of the work is devoted to silicon–carbon (Si/C) composites, which are regarded as one of the most promising directions in the design of next-generation anode materials. Silicon has an extremely high theoretical capacity, exceeding that of graphite; however, its practical application is limited by volume changes during lithiation, mechanical degradation of the electrode structure, and instability of the solid electrolyte interphase (SEI). The introduction of a carbon

phase can improve electronic conductivity, mitigate silicon volume expansion, and stabilize interfacial processes during cycling. The relevance of the study is determined by the need to solve two interrelated problems: reducing the amount of metallurgical silicon-containing waste and developing high-capacity, stable, and cost-effective anode materials for lithium-ion batteries. The scientific problem is that the direct use of ferrosilicon shavings is complicated by iron-containing phases, surface impurities, and the electrochemical instability of silicon during lithiation. The aim of this work is to develop an approach for obtaining a silicon–carbon composite anode from ferrosilicon shavings through preliminary purification, high-energy mechanochemical milling, selective acid treatment, carbon compositing, and electrochemical testing. The novelty of the study lies in using large-tonnage ferrosilicon waste as a silicon source without producing high-purity primary silicon. The practical significance is associated with increasing the added value of metallurgical waste, reducing raw material costs, and supporting circular economy principles in energy storage technologies.

Keywords: ferrosilicon, metallurgical waste, nanosilicon, Si/C composites, lithium-ion batteries

Financing: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR28713383).

For citations: 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. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.2. Pp. 228–243. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.449>

©Капизов О.С.^{1,3}, Муханов Д.К.^{1,3}, Джелдыбаева И.М.², Сейсенов Е.Б.^{1,3},
Акимбаева А.Б.^{1,3*}, 2026.

¹«Scientific Center for New Technologies» ЖШС, Алматы, Қазақстан;

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

³AlAkSan, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: akzhunis.akimbayeva@bk.ru

МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ЗАУЫТТАРДЫҢ ФЕРРОСИЛИЦИЙ ЖОҢҚАЛАРЫН ЖОҒАРЫ ӨНІМДІ КРЕМНИЙ-КӨМІРТЕКТІ АНОДТАРҒА ТҰРАҚТЫ ҚАЙТА ӨНДЕУ

Капизов Өмірзақ — PhD, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан,
E-mail: ok-sir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1979-7625>;

Муханов Даурен — PhD, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан,
E-mail: dd_511@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1645-8625>;

Джелдыбаева Индира — PhD, ассоциированный профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: Jeldybayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1524-4046>;

Сейсенов Ержан — магистрант, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан, E-mail: erzhan_seysenov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8336-3121>;

Акимбаева Ақжүніс — кіші ғылыми қызметкер, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Қазақстан,

E-mail: akzhunis.akimbayeva@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6554-8181>.

Аннотация. Қазіргі аккумуляторлық технологияларға, соның ішінде литий-ионды, натрий-ионды және магний-ионды жүйелерге ерекше назар аударылды. Осыған байланысты натрий-ионды және магний-ионды аккумуляторлардың литий-ионды технологияларға қарағанда қолжетімді әрі қауіпсіз балама ретінде даму перспективалары қарастырылды. Жұмыстың едәуір бөлігі жаңа буын анодтық материалдарын дамытудың ең перспективалы бағыттарының бірі ретінде қарастырылатын кремний-көміртекті (Si/C) композиттерге арналған. Кремнийдің теориялық сыйымдылығы өте жоғары және ол графит көрсеткіштерінен едәуір асып түседі, алайда оны практикалық қолдану литийлену кезіндегі айтарлықтай көлемдік өзгерістермен, құрылымның механикалық бұзылуымен және қатты электролиттік интерфейстің (SEI) тұрақсыздығымен шектеледі. Көміртекті фазаны енгізу электрондық өткізгіштікті арттыруға, кремнийдің көлемдік деформацияларын өтеуге және фазааралық процестерді тұрақтандыруға мүмкіндік береді. Зерттеудің өзектілігі өзара байланысты екі міндетті қатар шешу қажеттілігімен айқындалады: металлургиялық кремнийқұрамды қалдықтардың көлемін азайту және литий-ионды аккумуляторлар үшін сыйымдылығы жоғары, тұрақты әрі экономикалық тұрғыдан қолжетімді анодтық материалдарды әзірлеу. Ғылыми мәселе мұндай шикізатты тікелей пайдаланудың темірқұрамды фазалардың, беттік ластанулардың болуына және литийлену кезіндегі кремнийдің тұрақсыздығына байланысты күрделенуімен сипатталады. Жұмыстың мақсаты — ферросилиций жоңқасынан кремний-көміртекті композитті анод алу тәсілін әзірлеу, ол алдын ала тазарту, жоғары энергиялы механохимиялық ұнтақтау, селективті қышқылдық өңдеу, көміртекті композиттеу және электрохимиялық сынақ жүргізу кезеңдерін біріктіру арқылы жүзеге асырылады. Зерттеудің жаңалығы жоғары таза бастапқы кремний алу сатысынсыз, кремний көзі ретінде ірі тоннажды ферросилиций қалдығын пайдаланумен, сондай-ақ көміртекті фаза мен FeSi_x-компоненттері өткізгіш және буферлік функцияларды атқаратын композит қалыптастырумен байланысты. Жұмыстың практикалық маңызы металлургиялық қалдықтардың қосылған құнын арттырумен, анодтық материалдарға арналған шикізат шығындарын төмендетумен және энергия сақтау жүйелері саласында циркулярлық экономиканы дамытуға үлес қосумен айқындалады.

Түйін сөздер: ферросилиций, металлургиялық қалдықтар, нанокремний, Si/C композиттері, литий-ионды аккумуляторлар

©Капизов О.С.^{1,3}, Муханов Д.К.^{1,3}, Желдыбаева И.М.², Сейсенов Е.Б.^{1,3},
Акимбаева А.Б.^{1,3*}, 2026.

¹ТОО «Scientific Center for New Technologies», Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

³AlAkSan, Алматы, Казахстан.

*E-mail: akzhunis.akimbayeva@bk.ru

УСТОЙЧИВАЯ ПЕРЕРАБОТКА СТРУЖКИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ В ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫЕ АНОДЫ

Капизов Омирзак — PhD, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Казахстан,
E-mail: ok-sir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1979-7625>;

Муханов Даурен — PhD, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Казахстан,
E-mail: dd_511@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1645-8625>;

Желдыбаева Индира — PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет
имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: Jeldybayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1524-4046>;

Сейсенов Ержан — магистрант, Scientific Center for New Technologies; AlAkSan, Алматы, Казахстан,
E-mail: erzhan_seysenov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8336-3121>;

Акимбаева Акжунис — младший научный сотрудник, Scientific Center for New Technologies;
AlAkSan, Алматы, Казахстан, E-mail: akzhunis.akimbayeva@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6554-8181>.

Аннотация. В статье рассматриваются возможности устойчивой переработки ферросилициевой стружки металлургических предприятий в высокоэффективные кремний-углеродные (Si/C) анодные материалы для литий-ионных аккумуляторов. Особое внимание уделено современным аккумуляторным технологиям, включая литий-ионные, натрий-ионные и магний-ионные системы, а также перспективам разработки более доступных, безопасных и ресурсосберегающих материалов для систем накопления энергии. Значительная часть исследования посвящена Si/C-композитам, рассматриваемым как одно из наиболее перспективных направлений развития анодных материалов нового поколения. Кремний обладает чрезвычайно высокой теоретической ёмкостью, значительно превышающей показатели графита, однако его практическое применение ограничено существенными объёмными изменениями при литировании, механической деградацией структуры и нестабильностью твёрдого электролитного интерфейса (SEI). Введение углеродной фазы позволяет повысить электронную проводимость, компенсировать объёмные деформации кремния и стабилизировать межфазные процессы. Актуальность исследования обусловлена необходимостью одновременного решения двух взаимосвязанных задач: сокращения объёмов металлургических кремнийсодержащих отходов и разработки более ёмких, стабильных и экономически доступных анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов. Научная проблема заключается в том, что прямое использование ферросилициевой стружки осложняется присутствием железосодержащих фаз, поверхностных загрязнений

и нестабильностью кремния при литировании. Целью работы является разработка подхода к получению кремний-углеродного композитного анода из ферросилициевой стружки путём сочетания предварительной очистки, высокоэнергетического механохимического измельчения, селективной кислотной обработки, углеродного композитирования и электрохимического тестирования. Новизна исследования состоит в использовании крупнотоннажного ферросилициевого отхода в качестве исходного источника кремния без стадии получения высокочистого первичного кремния, а также в формировании композита, в котором углеродная фаза и FeSi_x -компоненты выполняют проводящую и буферную функции. Практическая значимость работы связана с повышением добавленной стоимости металлургических отходов, снижением сырьевых затрат на производство анодных материалов и развитием принципов циркулярной экономики в области систем накопления энергии.

Ключевые слова: Ферросилиций, металлургические отходы, нанокремний, Si/C композиты, литий-ионные аккумуляторы

Введение. Горно-металлургическая промышленность является одним из крупнейших источников техногенных отходов в мире. По оценкам, операции по добыче и переработке металлических руд ежегодно генерируют десятки миллиардов тонн отходов, включая хвосты обогащения, шлаки, пыли и металлическую стружку (Seisenova et al., 2025).

В России объём промышленных и производственных отходов в последние годы превышает 9 млрд тонн в год, при этом значительная доля приходится на предприятия горнодобывающей отрасли и чёрной/цветной металлургии. В Республике Казахстан, где активно развивается ферросплавное производство, также накапливаются многотоннажные отходы. Крупные предприятия в Павлодарской, Карагандинской и Восточно-Казахстанской областях производят сотни тысяч тонн ферросилиция в год, генерируя при этом стружку, лом и другие кремнийсодержащие отходы механической обработки (Jin et al., 2025).

Особую проблему представляет утилизация стружки металлургических заводов, образующейся при производстве и механической обработке ферросилиция (FeSi с содержанием кремния 45–75 %). Традиционные методы переработки - возврат в плавку, использование в строительных материалах или захоронение - не обеспечивают полной экологической безопасности и не создают высокой добавленной стоимости. Стружка часто загрязнена маслами, окалиной и примесями железа, что затрудняет её повторное использование и приводит к накоплению в отвалах, загрязнению почв и водных ресурсов. В условиях глобального перехода к циркулярной экономике и ужесточения экологического законодательства такие отходы требуют инновационных, высокотехнологичных решений по переработке (Fafure et al., 2024).

Параллельно с ростом объёмов промышленных отходов стремительно развивается рынок систем накопления энергии. Литий-ионные аккумуляторы играют ключевую роль в электромобилях, возобновляемой энергетике и стационарных

хранилищах. Однако традиционные графитовые аноды достигли своего практического предела удельной ёмкости - около 372 мА·ч/г. Кремний выступает одной из наиболее перспективных альтернатив благодаря чрезвычайно высокой теоретической ёмкости - до 4200 мА·ч/г (для фазы $\text{Li} \square \cdot \square \text{Si}$), что более чем в 10 раз превышает показатели графита. Кроме того, кремний характеризуется низким рабочим потенциалом, высокой распространённостью в земной коре (второй по распространённости элемент после кислорода) и относительно низкой (Jin et al., 2017; U.S. Geological Survey, 2026).

Несмотря на очевидные преимущества, широкому коммерческому внедрению кремниевых анодов препятствуют серьёзные технические вызовы. Основной из них - значительное объёмное расширение (до 300–400 %) при литировании, приводящее к растрескиванию частиц активного материала, разрушению структуры электрода, непрерывному росту слоя SEI (solid electrolyte interphase) и быстрой деградации ёмкости при циклировании. Дополнительные проблемы включают низкую собственную электропроводность кремния и нестабильность интерфейса с электролитом (Meng et al., 2025).

Для преодоления указанных ограничений широко используются стратегии наноструктурирования кремния и создания композитных материалов, в частности углеродно-кремниевых (Si/C) композитов. Наноразмерные частицы Si уменьшают внутренние механические напряжения, а углеродное покрытие или матрица выполняет роль буферного слоя, повышает электронную проводимость и стабилизирует формирование SEI-слоя. Такие композиты в лабораторных условиях демонстрируют высокую удельную ёмкость (часто >1500 мА·ч/г) и приемлемую циклическую стабильность.

Дополнительно следует отметить, что переработка металлургических отходов в функциональные материалы для систем накопления энергии соответствует современным направлениям устойчивого развития и циркулярной экономики. В отличие от традиционных способов утилизации, при которых отходы используются в низкотехнологичных областях или направляются на повторную плавку, получение Si/C-композитов позволяет значительно повысить добавленную стоимость вторичного сырья. Такой подход особенно актуален для стран с развитой горно-металлургической промышленностью, где накопление техногенных отходов создаёт экологическую нагрузку и требует внедрения новых технологических решений. Использование стружки ферросилиция в качестве источника кремния позволяет не только сократить объёмы промышленных отходов, но и снизить зависимость от дорогостоящего высокочистого кремния, применяемого в производстве анодных материалов. Существующие подходы к получению нано-кремния в основном опираются на переработку отходов фотоэлектрической промышленности (PV-kerf waste - шлам от резки кремниевых слитков для солнечных панелей). Эти технологии включают кислотное выщелачивание, механохимическое измельчение и последующее углеродное покрытие. Однако объём PV-отходов относительно ограничен, их логистика дорогостояща, а процесс часто требует дополнительных стадий глубокой очистки (Heintz et al., 2023).

В отличие от них, стружка ферросилиция металлургических заводов представляет собой более доступное, крупнотоннажное и локально сосредоточенное сырьё, особенно в регионах с развитой ферросплавной промышленностью (Казахстан, Россия, Китай). Прямая переработка такой стружки позволяет избежать энергоёмких стадий переплавки и получения первичного кремния, существенно снижая себестоимость конечного продукта и его углеродный след.

Целью настоящей работы является разработка и масштабирование технологии переработки стружки металлургического завода (отходов ферросилиция) в высокоэффективные углеродно-кремниевые композитные материалы для анодов систем накопления энергии.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- исследовать состав и свойства стружки FeSi как вторичного сырья;
- разработать технологическую схему, включающую механохимическое измельчение, селективную нанопурификацию и углеродное покрытие;
- оценить электрохимические характеристики полученных Si/C-композитов;
- проанализировать возможности масштабирования процесса от лабораторного до промышленного уровня с проведением технико-экономической и экологической оценки.

Новизна работы заключается в предложении прямой переработки промышленной стружки ферросилиция без дополнительных стадий плавки или получения первичного кремния. Такой подход одновременно решает экологические проблемы горно-металлургической отрасли и создаёт конкурентоспособные материалы для «зелёной» энергетики, способствуя развитию циркулярной экономики в регионах Центральной Азии (Mutushev et al., 2025; Seisenova et al., 2025).

Переработка кремниевых отходов фотоэлектрической промышленности (PV silicon scrap) активно изучается в последние годы как перспективный источник сырья для производства анодных материалов литий-ионных аккумуляторов. Основным видом таких отходов является kerf loss (шлам или порошок кремния, образующийся при алмазной резке кремниевых слитков для солнечных панелей). Ежегодно в мире генерируется более 200 000 тонн такого отхода, что составляет до 30–40 % от массы кремниевых слитков (Søiland et al., 2024; Yu et al., 2023).

Исследователи предлагают различные способы утилизации PV-kerf waste: кислотное выщелачивание для удаления примесей, механохимическое измельчение и последующее создание Si/C-композитов. Получили Si@C-композит с использованием полипиррола в качестве углеродного прекурсора, достигнув обратимой ёмкости 1436 мА·ч/г при 0,1 А/г и улучшенной циклической стабильности по сравнению с чистым кремнием (Ji et al., 2023). Другие работы демонстрируют получение yolk-shell структур Si@void@C или пористых композитов с ёмкостью 800–1100 мА·ч/г после 100–200 циклов (Ji et al., 2023; Huang et al., 2023).

Несмотря на хорошие электрохимические характеристики, объём PV-отходов ограничен, их логистика дорогостояща, а материал часто требует глубокой очистки от SiC, металлов и органических загрязнений (Jin et al., 2017).

Значительный интерес представляет метод nanopurification низкосортного ферросилиция для получения высокочистого nano-Si. Классическая работа продемонстрировала простой и масштабируемый процесс: высокоскоростное планетарное измельчение (high-energy ball milling) ферросилиция (84 % Si) с последующим селективным кислотным травлением ($\text{HF} + \text{HNO}_3$ или HCl). В результате чистота кремния повышалась с 84 % до 99,999 % при размере частиц менее 100 нм. Примеси (Fe, Al, Ca) концентрируются на поверхности наночастиц из-за механической слабости impurity-rich зон и эффективно удаляются кислотами. Полученный nano-Si показал высокую обратимую ёмкость (1755 $\text{mA} \cdot \text{ч/г}$) и сохранение ёмкости 73 % после 500 циклов в литий-ионных ячейках. Этот подход позже был адаптирован для Fe-Si сплавов с содержанием Si 73–84 %, подтвердив его потенциал для низкосортного сырья (Zong et al., 2015; Zhu et al., 2015).

Способы создания углеродно-кремниевых (Si/C) композитов на основе переработанного кремния включают несколько распространённых методов:

- Пиролиз органических прекурсоров (глюкоза, полипиррол (PPy), полиакрилонитрил (PAN), поливинилпирролидон) - простой и относительно недорогой способ формирования аморфного или графеноподобного углеродного покрытия.

- Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) - позволяет получать тонкое (5–10 нм) графеноподобное или многослойное углеродное покрытие с высокой проводимостью, но отличается высокой стоимостью и сложностью масштабирования.

- Spray drying (распылительная сушка) с последующим пиролизом - обеспечивает получение сферических частиц с равномерным распределением Si в углеродной матрице, хорошую масштабируемость и контроль морфологии (Fafure et al., 2024; Jin et al., 2025).

- Другие методы: hydrothermal carbonization, electrospinning и aerosol-assisted процессы.

Эти подходы позволяют буферизовать объёмное расширение кремния, повысить электронную проводимость и стабилизировать SEI-слой, достигая ёмкости 1000–2000 $\text{mA} \cdot \text{ч/г}$ и улучшенной циклической стабильности.

Несмотря на прогресс, большинство исследований сосредоточено на переработке PV-kerf waste или полупроводникового кремниевого лома высокой чистоты. Примеры масштабируемых технологий существуют (spray drying + пиролиз, упрощённые кислотные процессы), однако они сталкиваются с ограничениями: высокая стоимость логистики PV-отходов относительно небольшой объём доступного сырья и высокие энергозатраты на некоторых этапах (Yu et al., 2023; Mottaghi et al., 2025).

Пробелы в исследованиях остаются значительными. Недостаточное внимание уделяется прямой переработке стружки и отходов именно металлургических заводов, в частности ферросилиция FeSi с содержанием кремния 45–75 %. Такой материал является крупнотоннажным, локально доступным (особенно в Казахстане, России и Китае), но содержит больше металлических примесей (Fe, Al,

Ca, Mn), что требует адаптации процессов нанопурификации и композитирования. Практически отсутствуют работы по комплексному масштабированию технологии от лабораторного уровня до промышленного с использованием именно металлургической стружки, включая технико-экономический анализ, регенерацию кислот и интеграцию с действующими ферросплавными производствами. Предлагаемая работа направлена на заполнение этого пробела.

Материалы и основные методы. Выбор ферросилициевой стружки в качестве исходного сырья обусловлен её доступностью, высоким содержанием кремния и возможностью вовлечения металлургических отходов во вторичный оборот. Железосодержащие фазы в составе отхода рассматривались не только как примеси, но и как потенциальные компоненты, способные после механохимической обработки и углеродного композитирования улучшать электронную проводимость материала. Предварительная очистка сырья для удаления масел, окалины и поверхностных загрязнений, которые могут снижать воспроизводимость измельчения, эффективность кислотной обработки и электрохимические характеристики конечного Si/C-композита. В качестве исходного сырья использовали стружку ферросилиция, полученную от металлургического предприятия. Стружка представляла собой отходы механической обработки ферросилиция марки FeSi45–FeSi75.

Типичный химический состав стружки (по данным рентгенофлуоресцентного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии):

Si: 45–75 мас. % (основной компонент);

Fe: 20–50 мас. %;

● Примеси: Al 0,5–2,0 %, Ca 0,1–1,5 %, Mn 0,1–0,8 %, C ≤ 0,1 %, P и S - следовые количества.

Размер стружки варьировался от 5 до 50 мм в длину при толщине 0,1–2 мм. Материал был загрязнён технологическими примесями: минеральными маслами (от механической обработки), окалиной (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) и поверхностными оксидами кремния (SiO_2). Удельная поверхность исходной стружки составляла менее $1 \text{ м}^2/\text{г}$. Перед использованием стружку хранили в сухом помещении для предотвращения дополнительного окисления (Mutushev et al., 2025). Процесс реализован по принципу «upcycling» и ориентирован на максимальное использование отходов с минимальными энергозатратами и возможностью регенерации реагентов. Все операции, кроме сушки и пиролиза, проводили в инертной атмосфере аргона или азота для минимизации окисления (Wang et al., 2020).

Стружку очищали от масла и окалины путём магнитной сепарации и промывки в органических растворителях при ультразвуковом воздействии частота 40 кГц, 30–60 мин. Далее материал промывали деионизированной водой до нейтрального pH и сушили в вакуумном сушильном шкафу при 120–150 °C в течение 8–12 часов. После подготовки содержание влаги не превышало 0,5 мас. %.

Высокоскоростное механохимическое измельчение проводили в планетарной шаровой мельнице. Параметры процесса:

● Соотношение шары: материал - 10:1–20:1 (шары из циркония, диаметр 5–10 мм);

- Скорость вращения - 800 об/мин;

В результате получали порошок FeSi с размером частиц 100–500 нм и значительно увеличенной удельной поверхностью. Высокая энергия механического воздействия способствовала разрушению кристаллической решётки и концентрации примесей на поверхности частиц, что облегчало последующую нанопурификацию (Pillai et al., 2022).

Нанопурификация проводили для селективного удаления железа и других металлических примесей. Измельчённый порошок (5–10 г) диспергировали в деионизированной воде или этаноле с помощью ультразвука (30–60 мин).

Основной состав травильного раствора:

- 0,5–2 М HF + 3–6 М HCl;
- Альтернативный вариант: 4–6 М HCl + 5–10 % H₂O₂.

Условия процесса:

- Температура - 50–80 °C (оптимально 60–70 °C);
- 1–4 часа при интенсивном перемешивании (300–500 об/мин) и периодическом ультразвуковом воздействии;

После суспензию фильтровали, осадок многократно промывали деионизированной водой до нейтрального pH и этанолом, затем сушили в вакууме при 80–110 °C. Ожидаемая чистота кремния после этапа - 98–99,9 %, размер пористых наночастиц Si - 50–200 нм, выход Si - 85–92 %.

Углеродное покрытие и композитирование. Для получения Si/C-композита использовали два основных подхода:

1. Пиролиз органических прекурсоров (основной метод): Пористый nano-Si смешивали с углеродным прекурсором в массовом соотношении Si : C-прекурсор = 70:30 – 90:10. Смесь сушили и подвергали пиролизу в трубчатой печи в атмосфере аргона или азота при 700–900 °C в течение 2–4 часов (скорость нагрева 5 °C/мин).

2. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD): использовали метан или ацетилен в качестве углеродного источника при 800–1000 °C, толщина покрытия - 5–10 нм.

Полученный композит содержал 70–90 мас. % Si и обладал улучшенной электронной проводимостью и буферными свойствами.

В настоящей работе термин «углеродное покрытие» используется для обозначения углеродсодержащей фазы, сформированной в результате пиролиза органического прекурсора на поверхности и в межчастичном пространстве Si/FeSi_x-частиц. С учётом данных ПЭМ корректнее рассматривать эту фазу не как идеально сплошную оболочку вокруг каждой частицы, а как углеродную матрицу/покрывающий слой, на котором частицы кремнийсодержащей фазы распределены и частично сорбированы. Именно такая углеродная фаза повышает электронную проводимость, ограничивает прямой контакт активного кремния с электролитом и частично компенсирует механические напряжения при литировании и делитировании (Pillai et al., 2022).

Изготовление электродов и сборка тестовых ячеек. Активный материал (Si/C-композит) смешивали со связующим (карбоксиметилцеллюлоза + полиакриловая

кислота (PAA), 1:1) и проводящей добавкой (Super P или углеродные нанотрубки) в массовом соотношении 80 : 10 : 10. Суспензию наносили на медную фольгу (толщина слоя 100 мкм) и сушили в вакууме при 80–120 °C.

Тестовые ячейки типа CR2032 собирали в перчаточном боксе с инертной атмосферой (H_2O и $\text{O}_2 < 0,1 \text{ ppm}$). В качестве контрэлектрода использовали литиевую фольгу, сепаратора - Celgard 2400, электролита - 1 M LiPF_6 в смеси EC:DEC:EMC (1:1:1) с добавкой 5–10 % FEC.

Результаты. Морфологию и структуру материалов исследовали с помощью:

- Сканирующей электронной микроскопии марка Quattro FESEM (SEM) и просвечивающей электронной микроскопии Quattro FESEM (TEM);

- Рентгеновской дифракции (XRD) - для фазового состава;

- Методом БЭТ (BET) - для определения удельной поверхности и пористости.

Электрохимические характеристики оценивали на автоматическом потенциостате/гальваностате:

- Циклическая вольтамперометрия (CV);

- Гальваностатический заряд-разряд (GCD) в диапазоне потенциалов 0,01–1,5 В (vs. Li/Li^+);

- Электрохимическая импедансная спектроскопия (EIS) в диапазоне частот 0,01 Гц – 100 кГц.

Все измерения проводили при комнатной температуре. Ёмкость рассчитывали относительно массы активного материала Si/C.

Технологический процесс состоял из пяти основных последовательных этапов: подготовка сырья → высокоскоростное механохимическое измельчение → селективная нанопурификация (acid etching) → углеродное покрытие и композитирование → изготовление электродов и электрохимическое тестирование. Схематическое изображение последовательности синтеза FSC-композита приведено на рисунке 1.

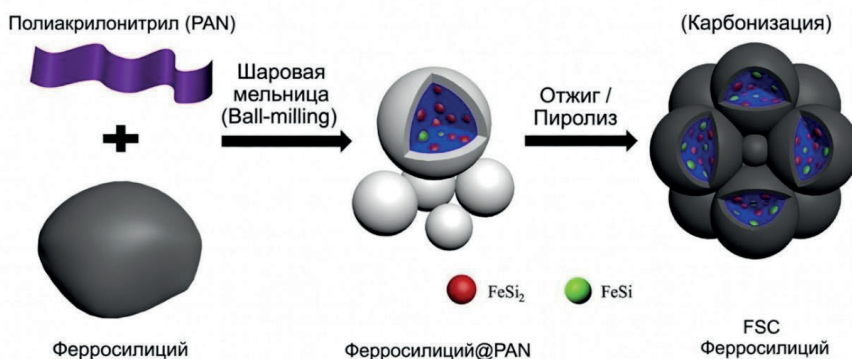


Рисунок 1. Схематическое изображение процесса синтеза FSC-композита.

Рентгенофазовый и Raman-анализ (рисунок 2) подтверждают многокомпонентную природу FSC-композита. На рентгенограммах должны

быть сопоставлены пики кристаллического Si и железосодержащих силицидных фаз FeSi_x с исходным ферросилицием; это для подтверждения фазового состава продукта после механохимической обработки и карбонизации. Raman-спектры используются для подтверждения углеродной фазы: наличие D- и G-полос свидетельствует о формировании дефектной/аморфной углеродной структуры, которая участвует в повышении электронной проводимости композита.

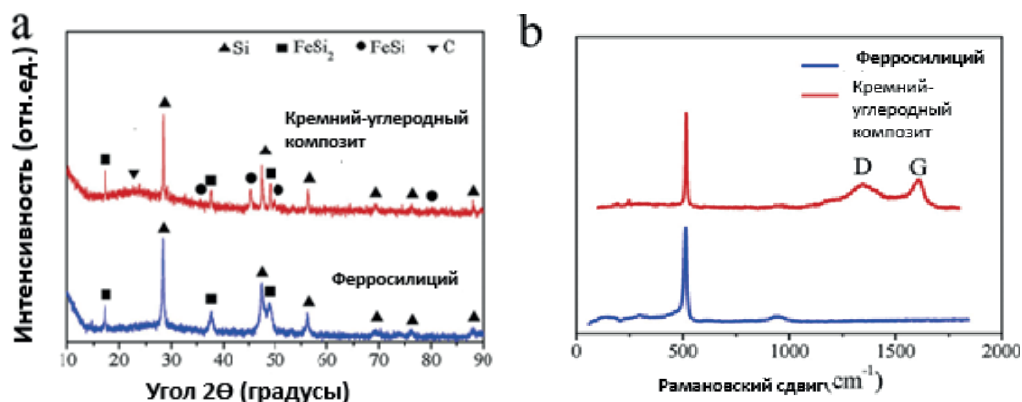


Рисунок 2. (а) Рентгенограммы дифракции FSC и ферросилиция, и (б) спектры Рамана FSC и ферросилиция полученные на портативном Raman-спектрометре Bruker BRAVO (785/852 нм, Duo LASER™, диапазон 300–3200 см⁻¹).

Термогравиметрические данные рисунок 3 следует использовать как количественное подтверждение содержания углеродной фазы. Потеря массы в области окисления углерода отражает долю углеродного компонента, а остаточная масса после нагрева связана с образованием оксидных продуктов кремний- и железосодержащих фаз. Поэтому TGA вместе с XRD, Raman и EDS, чтобы подтвердить не только морфологию, но и состав полученного FSC-композита.

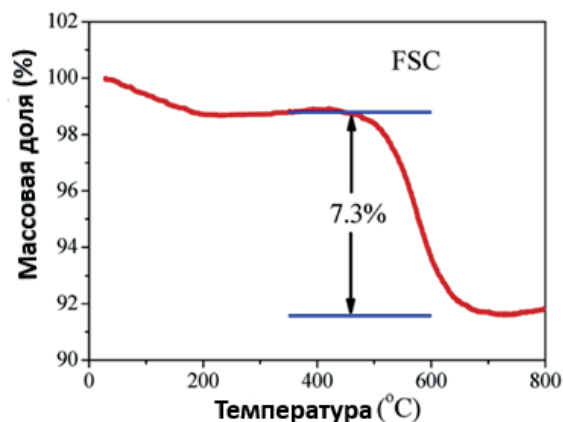


Рисунок 3. Результаты TGA материалов FSC в воздушной атмосфере при скорости нагрева 10 °C/мин.

Электрохимические характеристики FSC-анода представлены на рисунке 4. Циклическая вольтамперометрия (рисунок 4а) демонстрирует типичные процессы литирования и делитирования кремнийсодержащего анода. В первом катодном цикле широкий сигнал в области около 0,6–0,8 В связан с формированием твёрдого электролитного интерфейса (SEI), а процессы при потенциалах ниже 0,1 В соответствуют образованию литий-силицидных фаз Li_xSi . В последующих циклах частичное наложение кривых указывает на стабилизацию межфазного слоя и повышение обратимости электрохимических процессов. Профили заряда-разряда (рисунок 4б) показывают характерные плато кремниевого анода, а циклические испытания (рисунок 4с, d) подтверждают более устойчивое сохранение ёмкости FSC по сравнению с исходным ферросилицием и коммерческим Si. Улучшение связано не с одной структурной особенностью, а с совместным действием активной кремнийсодержащей фазы, FeSi_x -компонентов и углеродной матрицы/покрывающего слоя. Углеродная фаза повышает электронную проводимость и стабилизирует SEI, тогда как FeSi_x -фазы могут способствовать сохранению механического контакта и снижению деградации частиц при циклировании.

Скоростные характеристики (рисунок 4е) демонстрируют закономерное снижение удельной ёмкости при увеличении плотности тока и восстановление ёмкости при возврате к малым токам, что указывает на сохранение проводящей сети в композите. Диаграммы Найквиста (рисунок 4ф) имеют полуокружность в высоко- и среднечастотной области и наклонный участок в низкочастотной области. При моделировании использована эквивалентная схема, включающая R_s - сопротивление электролита и контактов, R_{SEI}/C_{PESEI} - сопротивление и ёмкостно-дисперсионное поведение межфазного SEI-слоя, R_{ct}/C_{PEdl} - сопротивление переноса заряда и двойнослойную ёмкость на границе электрод/электролит, а также элемент Варбурга Z_w , характеризующий диффузионное ограничение переноса Li^+ внутри пористой электродной структуры. Меньший радиус полуокружности для FSC указывает на более низкое сопротивление переноса заряда по сравнению с исходным ферросилицием, что согласуется с ролью углеродной фазы как проводящей матрицы. При увеличении массовой нагрузки активного материала (рисунок 4г) ёмкость снижается умеренно, что подтверждает пригодность FSC для электродов с различной загрузкой активного вещества. По сравнению с литературными аналогами FSC-композит демонстрирует ёмкость, сопоставимую с Si/C-материалами из переработанного кремниевого сырья: для Si/C-материалов из кремниевого шлама резки фотоэлектрических пластин сообщались значения около 1436 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$, для пористых Si@C-архитектур - 800–1100 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$ после 100–200 циклов, а для нанопурифицированного ферросилиция — высокая обратимая ёмкость до 1755 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$ при сохранении 73 % после 500 циклов. На этом фоне преимущество настоящего подхода состоит не только в абсолютной ёмкости, но и в прямом использовании более доступной ферросилициевой стружки без стадии получения первичного высокочистого кремния.

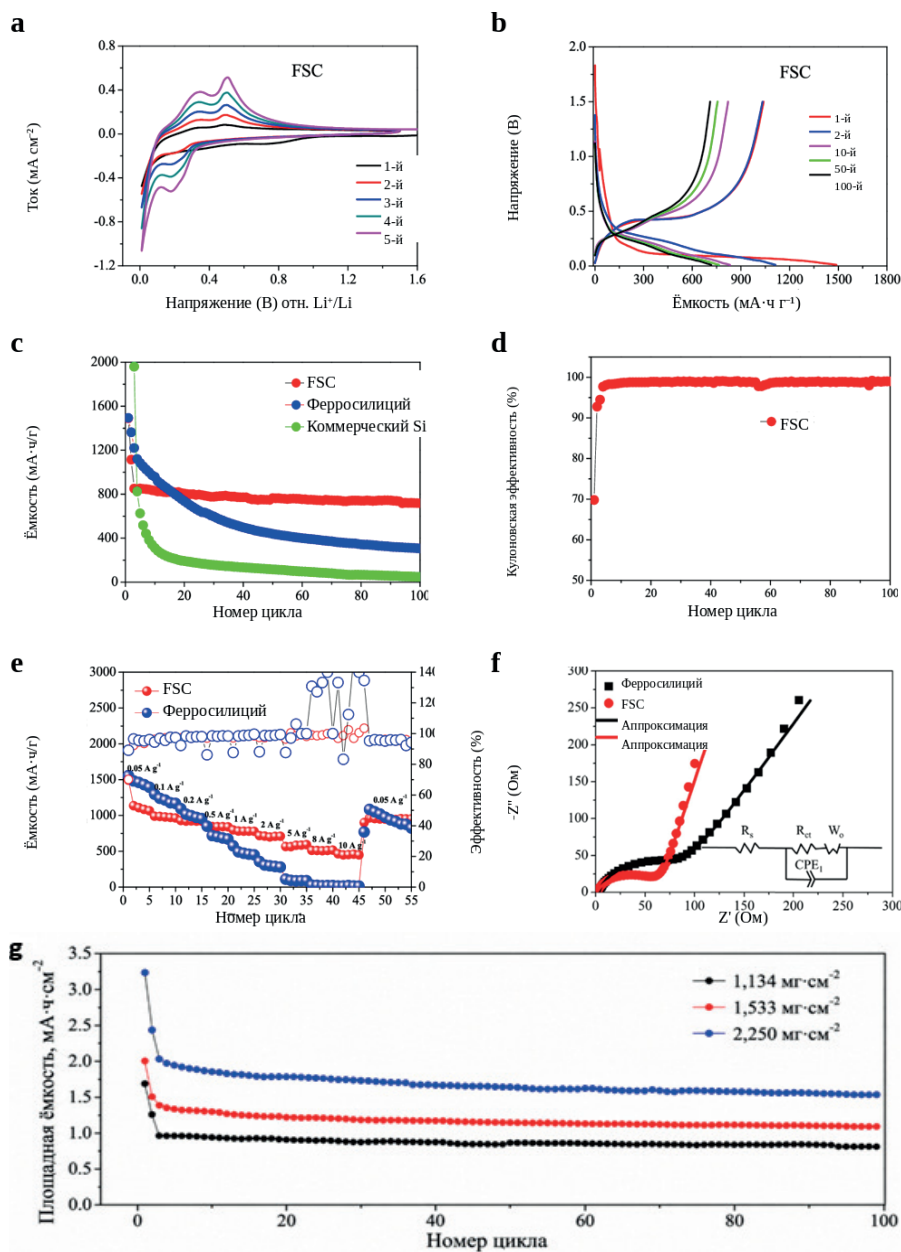


Рисунок 4. Электрохимические характеристики анода FSC. (а) Циклическая вольтамперометрия первых 5 циклов при скорости сканирования 0,1 мВ/с в диапазоне 0,01–1,5 В. (б) Профили заряда/разряда на 1-м, 2-м, 10-м, 50-м и 100-м циклах. (с) Циклическая стабильность FSC, исходного ферросилиция и коммерческого Si при 50 мА/г в первых двух циклах и 500 мА/г в последующих циклах. (д) Кулоновская эффективность анода FSC. (е) Скоростные характеристики FSC и исходного ферросилиция при токовых нагрузках 0,05–10 А/г. (ф) Диаграммы Найквиста электродов FSC и исходного ферросилиция при 1,5 В; на вставке приведена эквивалентная схема моделирования спектров импеданса. (г) Циклические характеристики при различной массовой нагрузке активного материала: 1,134; 1,533 и 2,250 мг·см⁻².

Заключение. В настоящей работе разработан подход к получению FSC-композита с использованием ферросилициевой стружки металлургического происхождения в качестве исходного сырья. Предложенная схема включает предварительную очистку материала, механохимическое измельчение, селективную кислотную обработку, формирование углеродной фазы из органического прекурсора, а также последующую электрохимическую оценку полученного материала в литий-ионных полужульментах. На основании морфологических данных FSC-композит следует рассматривать как систему, состоящую из Si/FeSi_x-содержащих частиц, распределённых на углеродной матрице или частично покрытых углеродной фазой. При этом материал не может быть описан как полностью инкапсулированные частицы, поскольку данные микроскопии указывают на более сложный характер взаимодействия активной фазы с углеродной основой. Электрохимические исследования подтвердили перспективность полученного FSC-композита в качестве анодного материала для литий-ионных аккумуляторов. Начальная разрядная ёмкость материала достигала 1488 мА·ч/г, при этом после 100 циклов сохранялось до 86 % ёмкости. Кроме того, наблюдалось восстановление ёмкости при возврате к меньшим плотностям тока, а также снижение сопротивления переноса заряда по сравнению с исходным ферросилицием. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наличие углеродной матрицы или частичного углеродного покрытия способствует повышению электронной проводимости, а Si/FeSi_x-фазы оказывают положительное влияние на структурную устойчивость электрода в процессе циклирования.

Сопоставление полученных электрохимических характеристик с литературными данными показывает, что FSC-композит демонстрирует показатели, сопоставимые с рядом Si/C-анодов, полученных из вторичного кремнийсодержащего сырья. Важным преимуществом предложенного подхода является использование доступной крупнотоннажной ферросилициевой стружки, что позволяет снизить зависимость от дорогостоящего высокочистого кремния и одновременно повысить добавленную стоимость металлургических отходов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности вовлечения ферросилициевой стружки в технологическую цепочку получения анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов. Такой подход способствует сокращению объёмов техногенных отходов, снижению затрат на сырьевые компоненты и развитию принципов циркулярной экономики. Дальнейшие исследования целесообразно направить на количественное уточнение фазового и элементного состава композита, оптимизацию условий кислотной обработки, оценку возможности регенерации используемых реагентов, повышение начальной кулоновской эффективности, а также испытание материала в полноразмерных конфигурациях для подтверждения его практического потенциала.

References

Fafure A.V., Bem D.B., Kahuthu S.W., Adediran A.A., Bodunrin M.O., Fabuyide A.A., and Ajanaku C. (2024). Advances in silicon–carbon composites anodes derived from agro wastes for applications in

lithium-ion battery: A review. *Heliyon*. – No. 10(11). – P. e31482. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31482> (in English).

Heintz M.C., Grins J., Jaworski A., Svensson G., Thersleff T., Brant W.R., Lindblad R., Naylor A.J., Edström K., and Hernández G. (2023). Photovoltaic wafering silicon kerf loss as raw material: Example of negative electrode for lithium-ion battery. *ChemElectroChem*. – No. 10(19). – P. e202300331. <https://doi.org/10.1002/celec.202300331> (in English).

Huang J., Li J., Ye L., Wu M., Liu H., Cui Y., Lian J., and Wang C. (2023). Synthesis of Si/C composites by silicon waste recycling and carbon coating for high-capacity lithium-ion storage. *Nanomaterials*. – No. 13(14). – P. 2142. <https://doi.org/10.3390/nano13142142> (in English).

Ji H., Liu Z., Li X., Li J., Yan Z., and Tang K. (2023). Recycling silicon waste from the photovoltaic industry to prepare yolk-shell Si@void@C anode materials for lithium-ion batteries. *Processes*. – No. 11(6). – P. 1764. <https://doi.org/10.3390/pr11061764> (in English).

Jin B., Liao L., Shen X., Mei Z., Du Q., Liang L., Lei B., and Du J. (2025). Advancement in Research on Silicon/Carbon Composite Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Metals*. – No. 15(4). – P. 386. <https://doi.org/10.3390/met15040386> (in English).

Jin Y., Zhu B., Lu Z., Liu N., and Zhu J. (2017). Challenges and recent progress in the development of Si anodes for lithium-ion batteries. *Advanced Energy Materials*. – No. 7(23). – P. 1700715. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700715> (in English).

Meng Z., Xu Z., Li H., Xiong H., Liu X., Qin C., and Wang Z. (2025). Silicon/Biomass Carbon Composite as a Low-Cost Anode for Lithium-Ion Batteries. *Energies*. – No. 18(4). – P. 972. <https://doi.org/10.3390/en18040972> (in English).

Mottaghi M., Kulkarni A., and Pearce J.M. (2025). Recycling silicon photovoltaic cells into silicon anodes for Li-ion batteries using 3D printing. *RSC Sustainability*. – No. 3. – P. 1859–1869. <https://doi.org/10.1039/D4SU00808A> (in English).

Mutusev A.Zh., Seisenova A.B., Kapizov O.S., Nuraly A.M., and Mukhanov D.K. (2025). Integrated process for the synthesis of carbon-silicon nanocomposites from biowaste and metallurgical sludge. *Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. – No. 3. – P. 258–273. <https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.378> (in English).

Pillai M.M., Kalidas N., Zhao X., and Lehto V.-P. (2022). Biomass-Based Silicon and Carbon for Lithium-Ion Battery Anodes: A Review. *Frontiers in Chemistry*. – No. 10. – P. 882081. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.882081> (in English).

Seisenova A., Nuraly A., Baiseitov D., Kapizov O., Oryngaliyeva S., Alimkulova Z., and Mutusev A. (2025). Comprehensive Assessment of Ash and Slag Waste for the Synthesis of Silicon-Based Functional Materials. *Processes*. – No. 13(9). – P. 2722. <https://doi.org/10.3390/pr13092722> (in English).

Søiland A.K., de Meatza I., Muguruza A., Xu Y., and Bellmann M. (2024). Silicon kerf loss as a potential anode material for lithium-ion batteries. *Frontiers in Photonics*. – No. 5. – P. 1332830. <https://doi.org/10.3389/fphot.2024.1332830> (in English).

U.S. Geological Survey. (2026). Mineral commodity summaries 2026. U.S. Geological Survey. – 222 p. <https://doi.org/10.3113/mcs2026> (in English).

Wang H., Fan S., Cao Y., Yang H., Ai X., and Zhong F. (2020). Building a Cycle-Stable Fe-Si Alloy/Carbon Nanocomposite Anode for Li-Ion Batteries through a Covalent-Bonding Method. *ACS Applied Materials and Interfaces*. – No. 12(27). – P. 30503–30509. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c08456> (in English).

Yu Y., Bai X., Li S., Shi J., Wang L., Xi F., Ma W., and Deng R. (2023). Review of silicon recovery in the photovoltaic industry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – No. 44. – P. 100870. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100870> (in English).

Zhu B., Jin Y., Tan Y., Zong L., Hu Y., Chen L., Chen Y., Zhang Q., and Zhu J. (2015). Scalable production of Si nanoparticles directly from low-grade sources for lithium-ion battery anode. *Nano Letters*. – No. 15(9). – P. 5750–5754. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01698> (in English).

Zong L., Zhu B., Lu Z., Tan Y., Jin Y., Liu N., Hu Y., Gu S., Zhu J., and Cui Y. (2015). Nanopurification of silicon from 84% to 99.999% purity with a simple and scalable process. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – No. 112(44). – P. 13473–13477. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513012112> (in English).

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*