

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№3
2026**

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

2026 • 3



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%2638>; <https://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), (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

Aliuly A., Kaltayev A.

Aliuly A., Kaltayev A. Assessment of the Applicability of Similarity Laws for Centrifugal Pump Scaling Based on Hydrodynamic Modeling.....14

Baratov A.G., Sailaubek A., Serik A.S.

Synthesis and Investigation of a Narrow-Bandgap SrTaO₂N-Based Photocatalyst.....33

Nurbayev B., Dmitriyeva E., Kemelbekova A.

Modern Methods of Selective Lithium Leaching from Spent Lithium-Ion Batteries.....45

Seitov A., Amanzholov T.

Comparative Analysis of One-Dimensional Physical-Hydrodynamic Models of Centrifugal Flow in an Impeller for Mineralized Media.....60

Syzdykova A.M., Serikbayev N.S., Kutum B.B.

Local Kodama-Type Transformations and Integrability Limits of the Extended Fifth-Order Korteweg-de Vries Equation.....83

Ualikhanova U.A., Ussipkyzy T., Altayeva G.S., Razina O.V.

Calculation of the Screened $f(T)$ Gravity Model.....101

Zhadyranova A.A., Tsyba P.Yu., Ismail U.K., Yerzhan B.

Divergence-Free Deceleration Parameter, Kinematic Constraints from DESI DR2 and Cosmic Chronometers.....123

Zhenishan K., Bekov S.S., Syzdykova A.M.

The Influence of Gaussian Process Parameters on Reconstructing the Hubble Constant.....146

CHEMISTRY

Amangeldi B., Zhanikulov N., Taimasov B., Aitureev M., Dauletiyarov M.

Research of the Firing Processes and Whiteness of White Cement Clinkers.....155

Baisalova G.Zh., Bauyrzhanova G.B., Niyaz G.A., Taltenov A.A., Ainabayev A.A.

Study of the Chemical Composition of Ethanol Extracts of Lady's Mantle by Gas Chromatography-Mass Spectrometry.....169

Bishimbaev V.K., Kapsalyamov B.A.

Hydrogeochemical Indicators of Sulfuric-Acid Uranium Leaching Impact on Groundwater in Shieli and Zhanakorgan Districts.....183

Darmenbayeva A.S., Aubakirova R.A., Nurgaliyeva D.A., Abylkassova G.E., Abilmazhinova G.A.

Structural and Morphological Features of Polymer-Metal Functional Materials.....205

Dyusebaeva M.A., Berganayeva A.E., Ibragimova N.A., Utaraliev D.M., Berganayeva G.E.

Green synthesis of silver nanoparticles using the n-butanol fraction of Galega officinalis L.....223

Dyussembekova S.B., Utarova D.A., Kuspanov Zh.B., Daulbayev Ch.B., Abdikarimova U.A. Investigation of the Effect of SrTiO ₃ Heat Treatment on the Photocatalytic Efficiency of the \	
Decomposition of an Amphoteric Antibiotic.....	239
Issayeva U.B., Akhmetova G.S., Praliyev K.D., Malmakova A.E., Seilkhanov T.M. 1-Benzyl-4-(p-Fluorobenzoyloxyimino)Piperidine Hydrochloride as a Candidate for	
an Anti-Infective Agent.....	252
Kamunur K., Yskak M., Mussapyrova L. Effect of Chemical Modification of Sodium Lignosulfonate on Flotation Properties in the	
Barite – Calcite System.....	264
Kononov A., Kamunur K., Mussapyrova L., Assylkhanova D., Batkal A. Obtaining and Studying the Inorganic Flocculant Al–Fe–Mn Based on Modified Bentonite.....	276
Kurmangaliyeva A.1, Akhmetova F.2, Kareshova Zh.1, Iskakov R. PDMA-Modified Tagan Bentonite for Hydrogen Production in Catalytic Conversion	
of Hydrocarbons.....	292
Kurtebayeva A.A., Silvia Álvarez-Torrellas., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Kalmakhanova M.S. Corn-Cob-Derived Fe-Modified Activated Carbons for Paracetamol and Sulfamethoxazole	
Removal by Adsorption and Oxidative Treatment.....	307
Nadirov R.K., Nurtazina N.D., Ryskaliyeva R.G. Response Surface Modelling and Optimisation of Ilmenite Flotation Using a Modified	
Lignosulphonate Reagent.....	334
Nefedov A.N., Taikenova A.T., Imashev B.K., Nurislamov R.M., Leontyeva X. Quantum Computing in the Modeling of Corrosion Processes.....	350
Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Kabiyeva S.K., Zhaslan R.K. Synthesis and Structural Study of 3,5-Dimethylisoxazole Sulfone Derivatives with Secondary	
Amines.....	365
Orazbekova R.S., Tungatarova S.A., Baizhumanova T.S., Kaumenova G.B., Zhumabek M. Influence of Reaction Mixture Composition in Steam Reforming of Bioethanol on a High-Entropy	
Oxide Catalyst.....	382
Ryskaliyeva R.G., L.K. Beisembayeva, Osserov T.B. Hydrocyclone Classification of Balkhash Processing Plant Tailings.....	398
Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Kenzin E.N., Zhurinov M. Formation and Maturation of Phosphate Coatings on Steel from an Alcohol-Based	
Phosphating Solution.....	418
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Balkembay A.S., Sarova N.B., Zhaltyrbayeva N.K. Effect of Electrolyte Formulation on the Characteristics of Zinc-Based	
Electroplated Coatings.....	435
Seitkaliyeva N., Kussainova G., Zhursumbayeva M., Mohamad Ibrahim M.N., Abdiyev K. Study of the Flocculation Properties of Itaconic Acid-Based Copolymers.....	448

Sergazina S.M., Nurmukhanbetova N.N., Ostretsova I.B., Kamze A.R., Kassenova N.B. Comprehensive Assessment of Natural Drinking Water Quality and Statistical Analysis of Physicochemical Parameters.....	460
Talgatkyzy A., Nazhipkyzy M., Otenov A., Seitkazinova A., Issanbekova A. Wood Waste-Derived Organosolv Lignin-Based Carbon Nanofibers For Energy Storage Applications.....	475
Toktabayeva A.K., Makhayeva D.N., Rakhmetullayeva R.K., Rvaidarova G.O., Issenova G.D. Synthesis, Structure, and Physicochemical Properties of Sulfur-Containing Composites Based on Aniline, p-Phenylenediamine, Phenol, and Formaldehyde.....	498
Yeshmanova G.B., Smagulov D.U. Effect of Silicon-Based Particles on the Formation and Composition of PEO Coatings.....	517
Zhortarova A.A., Kubicek V., Ibrayev M.K., Panshina S.Y., Seidakhmetova R.B. N-Phosphorylation of Amino-thiazoles and Amino-Thiadiazoles with P(III)- and P(V)-Reagents: Synthesis, Structure, and Biological Activity.....	538
Zhussupova A., Tyumentseva O., Antonyuk V. Comparative Study of the Kinetics and Energy Characteristics of Planetary Milling of Copper Smelting Dump Slag and Granulated Lead-Smelting Slag.....	552

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Гидродинамикалық модельдеу негізінде ортадан тепкіш сорғыларды масштабтауда ұқсастық заңдарының қолданылуын бағалау.....14

Баратов А.Ғ., Сайлаубек А., Серік А.С.

SnTaO₂N негізіндегі тар тыйым салынған аймақты фотокатализаторды алу және зерттеу.....33

Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.

Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторлардан литийді селективті шаймалаудың заманауи әдістері.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Минералданған орталарға арналған жұмыс дөңгелегіндегі ортадан тепкіш ағыстың бірөлшемді физикалық-гидродинамикалық модельдерін салыстырмалы талдау.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Кенетейлген бесінші ретті Кортевег-де Фриз тендеуінің локалды кодам типті түрлендіруі мен интегралдану шектері.....83

Уалиханова У.А., Үсіпқызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.

Экрандалған f(T)– гравитация моделінің есебі.....101

Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил Ү.Қ., Ержан Б.

Дивергенциясыз бәсеңдеу параметрі, DESI DR2 және космикалық хронометрлер деректері бойынша кинематикалық шектеулер.....123

Жеңіскан Қ., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Хаббл тұрақтысын реконструкциялауға Гаусстық процестер параметрлерінің әсері.....146

ХИМИЯ

Амангелді Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтүреев М., Даулетияров М.

Ақ цемент клинкерлерінің күйдіру процестерін және ақтығын зерттеу.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Газ хроматография-масс-спектрометрия әдісімен кәдімгі теңгежапырақ өсімдігінің этанолды сығындыларының химиялық құрамын зерттеу.....169

Бишимбаев В.К., Капсаямов Б.А.

Шиелі және Жаңақорған аудандарындағы уранды күкірт қышқылымен шаймалаудың жер асты суларына әсерінің гидрогеохимиялық көрсеткіштері.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нурғалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абильмажинова Г.А.

Полимер-металл функционалдық материалдардың құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктері.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е.

Galega Officinalis L. өсімдігінің N-бутанолдық фракциясы арқылы күміс нанобөлшектерін жасыл синтездеу.....223



Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Құспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Әбдікәрімова Ұ.Ә. Термиялық өңделген SrTiO ₃ фотокатализаторларының екідайлы антибиотикті тиімді ыдыратуын зерттеу.....	239
Исаева Ұ.Б., Ахметова Г.С., Пірәлиев Қ.Ж., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Жұқпалы ауруларға қарсы кандидат ретінде 1-бензил-4-(П-фторбензоилоксиимино) пиперидин гидрохлориді.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мусапирова Л. Барит–кальцит жүйесіндегі натрий лигносульфонатының флотациялық қасиеттеріне химиялық модификацияның әсері.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мусапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Модификацияланған бентонит негізіндегі Al–Fe–Mn бейорганикалық флокулянт алу және зерттеу.....	276
Қурманғалиева А.1, Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. Көмірсутектердің каталитикалық конверсиясы арқылы сутек алуға арналған ПДМА-модификацияланған таған бентониті.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Калмаханова М.С. Жүгері собықтарынан алынған темірмен модификацияланған белсендірілген көмірлермен парацетамол мен сульфаметоксазолды адсорбциялық-тотығу жолымен жою.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Модификацияланған лигносульфонатты реагентті қолдану арқылы ильменит флотациясының жауап бетін модельдеу және оңтайландыру.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Коррозиялық процестерді модельдеудегі кванттық есептеулер.....	350
Нүркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Қабиева С.Қ., Жаслан Р.К. Екіншілік аминдермен 3,5-диметилизоксазолдың сульфотуындыларын синтездеу және құрылымдық зерттеу.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Жоғары энтропиялық оксид катализаторы қатысында биоэтанолдың бу риформингісіне реакциялық қоспа құрамының әсері.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Балқаш байыту фабрикасының байыту қалдықтарын гидроциклондық классификациялау.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Жұрынов М. Спирт негізіндегі фосфаттау ерітіндісінен болат бетінде фосфатты жабындардың қалыптасуы және жетілуі.....	418
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Мырыш негізіндегі гальваникалық қаптамалардың қасиеттеріне электролит құрамының әсері.....	435

Сейтқалиева Н., Құсаинова Г., Жүрсімбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Әбдиев Қ. Итакон қышылы негізіндегі сополимерлердің флокуляциялық қасиеттерін зерттеу.....	448
Сергазина С.М., Нұрмұханбетова Н.Н., Острцова И.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Табиғи ауыз су сапасын кешенді бағалау және физика-химиялық көрсеткіштерге статистикалық талдау.....	460
Талгатқызы Ә., Нажиқызы М., Өтенов Ә., Сейтқазинаева Ә., Исанбекова А. Ағаш қалдықтарынан алынған органосольв лигнин негізіндегі көміртеккі талшықтарды энергия сақтау жүйелерінде қолдану.....	475
Тоқтабаева Ә.Қ., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.Қ., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Анилин, п-фенилендиамин, фенол және формальдегид негізіндегі күкіртқұрамды композиттердің синтезі, құрылымы және физика-химиялық қасиеттері.....	498
Ешманова Г.Б., Смағұлов Д.У. Кремний негізіндегі бөлшектердің ПЭО жабындарының қалыптасуы мен құрамына әсері.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.Қ., Паньшина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. P(III) және P(V) реагенттерімен аминотиазолдар мен аминок-тиадиазолдарды N-фосфорлирлеу: синтезі, құрылымы және биологиялық белсенділігі.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Үйінді мыс балқыту шлагы мен қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлагын планетарлық ұнтақтау кинетикасы мен энергетикасын салыстырмалы зерттеу.....	552

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Оценка применимости законов подобия при масштабировании центробежных насосов на основе гидродинамического моделирования.....14

Баратов А.Г., Сайлаубек А., Серік А.С.Получение и исследование узкозонного фотокатализатора на основе SrTaO_2N33**Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.**

Современные методы селективного выщелачивания лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Сравнительный анализ одномерных физико-гидродинамических моделей центробежного течения в рабочем колесе для минерализованных сред.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Локальные преобразование типа кодамы и пределы интегрируемости расширенного уравнения Кортевега-де Фриза пятого порядка.....83

Уалиханова У.А., Усипкызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.Расчёт экранированной модели $f(T)$ – гравитации.....101**Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил У.Қ., Ержан Б.**

Дивергентно-свободный параметр замедления, кинематические ограничения по данным DESI DR2 и космических хронометров.....123

Женискан К., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Влияние параметров Гауссового процесса на реконструкцию постоянной Хаббла.....146

ХИМИЯ

Амангелди Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтурсев М., Даулетияров М.

Исследование процессов обжига и белизны клинкеров белых цементов.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Изучение химического состава этанольных экстрактов манжетки обыкновенной методом газ хроматографии-масс-спектрометрии.....169

Бишимбаев В.К., Капсалямов Б.А.

Гидрогеохимические индикаторы воздействия сернокислотного выщелачивания урана на подземные воды районов Шиели и Жанакоргана.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нургалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абилямажинова Г.А.

Структурно-морфологические особенности полимер-металлических функциональных материалов.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е. Зеленый синтез серебряных наночастиц с использованием N-бутанольной фракции Galega Officinalis L.....	223
Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Куспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Абдикаримова У.А. Исследование влияния термической обработки SrTiO ₃ на фотокаталитической эффективности разложения амфотерного антибиотика.....	239
Исаева У.Б., Ахметова Г.С., Пралиев К.Д., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Гидрохлорид 1-бензил-4-(п-фторбензоилоксиимино) пиперидина в качестве кандидата в противомикробное средство.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мұсапирова Л. Влияние химической модификации лигносульфоната натрия на его флотационные свойства в системе барит–кальцит.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мұсапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Получение и исследование неорганического флокулянта Al–Fe–Mn на основе модифицированного бентонита.....	276
Курмангалиева А., Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. ПДМА-модифицированный таганский бентонит для получения водорода при каталитической конверсии углеводородов.....	292
Куртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Калмаханова М.С. Модифицированные железом активированные угли из кукурузных початков для адсорбционно-окислительного удаления парацетамола и сульфаметоксазола.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Моделирование поверхности отклика и оптимизация флотации ильменита с использованием модифицированного лигносульфонатного реагента.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Квантовые вычисления в моделировании коррозионных процессов.....	350
Нуркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Кабиева С.К., Жаслан Р.К. Синтез и структурное исследование сульфопроизводных 3,5-диметилизоксазола совторичными аминами.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жумабек М. Влияние состава реакционной смеси в паровом риформинге биоэтанола на высокоэнтропийном оксидном катализаторе.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Гидроциклонная классификация хвостов обогащения Балхашской обогажительной фабрики.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Журинов М. Формирование и созревание фосфатных покрытий на стали из фосфатирующего раствора на основе спирта.....	418

Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Влияние состава электролита на свойства гальванических покрытий на основе цинка.....	435
Сейткалиева Н., Кусаинова Г., Журсумбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Абдиев К. Исследование флокулирующих свойств сополимеров на основе итаконовой кислоты.....	448
Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Острцова Н.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Комплексная оценка качества природной питьевой воды и статистический анализ физико-химических показателей.....	460
Талгаткызы А., Нажипкызы М., Отенов А., Сейтказинова А., Исанбекова А. Углеродные волокна на основе органосольв лигнина, полученного из древесных отходов, для применения в системах хранения энергии.....	475
Токтабаева А.К., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.К., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Синтез, структура и физико-химические свойства серосодержащих композитов на основе анилина, п-фенилендиамина, фенола и формальдегида.....	498
Ешманова Г.Б., Смагулов Д.У. Влияние частиц на основе кремния на формирование и состав ПЭО покрытий.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.К., Панышина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. N-фосфорилирование аминотиазолов и аминок-тиадиазолов с помощью реагентов Р(III) и Р(V): синтез, структура и биологическая активность.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Сравнительное исследование кинетики и энергетики планетарного измельчения отвального медеплавильного шлака и гранулированного шлака свинцовой плавки.....	553

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 3.
Number 359 (2026), 45–59

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.462>

UDC: 621.355.2; 628.4
IRSTI: 31.15.23; 31.29.00

©Nurbayev B., Dmitriyeva E., Kemelbekova A.*, 2026.

Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university

MODERN METHODS OF SELECTIVE LITHIUM LEACHING FROM SPENT LITHIUM-ION BATTERIES

Nurbayev Bedelbek — PhD student, Engineer, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: bedel.armia.99@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3059-6349>;

Dmitriyeva Elena — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Leading Researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: dmitriyeva2017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1280-2559>;

Kemelbekova Ainagul — PhD, Senior Researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>.

Abstract. The rapid growth of lithium-ion battery (LIB) production and the expansion of the electric vehicle market are leading to an increasing volume of spent batteries containing valuable metals, including lithium, cobalt, nickel, and manganese. Their uncontrolled accumulation poses a threat to the environment and human health. The strategic importance of lithium, its limited natural reserves, and growing demand highlight the urgent need for recycling spent LIBs.

This work presents a systematic review of modern methods for the selective recovery of lithium from spent LIBs, primarily containing LiFePO_4 and NCM cathode materials. Pretreatment stages, including discharging, dismantling, crushing, and thermal activation, are considered, along with selective leaching methods using mineral and organic acids, oxidizing agents, and deep eutectic solvents (DES). Compared with pyrometallurgical processes, hydrometallurgical methods can reduce lithium losses and improve selectivity. The lithium-first recovery strategy simplifies subsequent metal separation and improves the purity of intermediate products.

The analysis showed that acid and oxidative leaching can achieve lithium recovery rates exceeding 95–99% while minimizing the dissolution of accompanying metals. Citric, malic, and ascorbic acids are promising environmentally friendly reagents due to their reducing properties and biodegradability. However, high reagent consumption,

wastewater generation, and the need for subsequent solution purification to recover lithium as Li_2CO_3 or LiOH limit industrial application.

Further development of recycling technologies should focus on reducing environmental impacts, simplifying component separation schemes, increasing the degree of material-flow closure, reducing chemical reagent consumption, and implementing circular-economy principles to develop efficient, resource-saving, and environmentally sustainable processes for recycling spent batteries.

Keywords: lithium-ion batteries, lithium, selective leaching, hydrometallurgy, oxidative leaching, deep eutectic solvents, battery recycling

Funding: *The work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the program BR28712683 "Development of technology to reduce energy consumption and waste without compromising efficiency in the processing of lithium-ion batteries".*

For citations: Nurbayev B., Dmitriyeva E., Kemelbekova A. Modern Methods of Selective Lithium Leaching from Spent Lithium-Ion Batteries. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.3. Pp. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.462>

©Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А. *, 2026.

Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЛИТИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАРДАН ЛИТИЙДІ СЕЛЕКТИВТІ ШАЙМАЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІ

Нұрбаев Беделбек — PhD докторант, инженер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

E-mail: bedel.armia.99@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3059-6349>;

Дмитриева Елена — физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, жетекші ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

E-mail: dmitriyeva2017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1280-2559>;

Кемелбекова Айнагуль — PhD, аға ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>.

Аннотация. Литий-ионды аккумуляторлар (ЛИА) өндірісінің қарқынды өсуі және электр көлігі нарығының кеңеюі құрамында литий, кобальт, никель және марганец сияқты құнды металдар бар пайдаланылған батареялар көлемінің артуына әкелуде. Олардың бақылаусыз жиналуы қоршаған орта мен адам денсаулығына қауіп төндіреді. Литийдің стратегиялық маңыздылығы, табиғи қорларының шектеулілігі және оған сұраныстың артуы пайдаланылған ЛИА-ны қайта өңдеудің өзектілігін айқындайды.

Жұмыста негізінен LiFePO_4 және NCM катодты материалдары бар



пайдаланылған ЛИА-дан литийді селективті алудың заманауи әдістеріне жүйелі шолу жасалды. Разрядтау, бөлшектеу, ұсақтау және термиялық белсендіруді қамтитын алдын ала өңдеу сатылары, сондай-ақ минералды және органикалық қышқылдарды, тотықтырғыш реагенттерді және терең эвтектикалық еріткіштерді (DES) қолдану арқылы селективті шаймалау әдістері қарастырылды. Пирометаллургиялық процестермен салыстырғанда гидрометаллургиялық әдістер литий шығынын азайтуға және селективтілікті арттыруға мүмкіндік береді. Литийді бірінші кезекте бөліп алу (lithium-first) тәсілі металдарды кейінгі бөлу үдерісін жеңілдетіп, аралық өнімдердің тазалығын арттырады.

Талдау нәтижелері қышқылдық және тотықтырғыш шаймалау кезінде ілеспе металдардың еруін барынша азайта отырып, литийді 95–99%-дан жоғары дәрежеде бөліп алуға болатынын көрсетті. Лимон, алма және аскорбин қышқылдары тотықсыздандырғыш қасиеттері мен биологиялық ыдырағыштығына байланысты перспективалы экологиялық реагенттер болып табылады. Алайда реагенттердің жоғары шығыны, ағынды сулардың түзілуі және Li_2CO_3 немесе LiOH алу үшін ерітінділерді кейінгі тазарту қажеттілігі бұл әдістердің өнеркәсіптік қолданылуын шектейді.

Технологияларды одан әрі дамыту экологиялық жүктемені төмендетуге, компоненттерді бөлу схемаларын жеңілдетуге, материалдық ағындардың тұйықталу дәрежесін арттыруға, химиялық реагенттерді тұтынуды азайтуға және пайдаланылған аккумуляторларды қайта өңдеудің тиімді, ресурс үнемдейтін әрі экологиялық қауіпсіз процестерін қалыптастыру үшін айналмалы экономика қағидаттарын енгізуге бағытталуы тиіс.

Түйін сөздер: литий-ионды аккумуляторлар, литий, селективті шаймалау, гидрометаллургия, тотығу шаймалау, терең эвтектикалық еріткіштер, батареяларды қайта өңдеу

©Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А. *, 2026.

Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан.

*E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СЕЛЕКТИВНОГО ВЫЩЕЛИЧЕВАНИЯ ЛИТИЯ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ЛИТИЙ- ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Нұрбаев Беделбек — PhD докторант, инженер, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: bedel.armia.99@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3059-6349>;

Дмитриева Елена — кандидат физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: dmitriyeva2017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1280-2559>;

Кемелбекова Айнагуль — PhD, старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>.

Аннотация. Интенсивный рост производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) и расширение рынка электротранспорта приводят к увеличению объёма отработанных батарей, содержащих ценные металлы, включая литий, кобальт, никель и марганец. Их бесконтрольное накопление представляет угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Стратегическая значимость лития, ограниченность природных запасов и растущий спрос определяют актуальность переработки отработанных ЛИА.

В работе представлен систематический обзор современных методов селективного извлечения лития из отработанных ЛИА, преимущественно содержащих катодные материалы LiFePO_4 и NCM. Рассмотрены стадии предварительной обработки, включая разрядку, разборку, измельчение и термическую активацию, а также методы селективного выщелачивания с использованием минеральных и органических кислот, окислительных реагентов и глубоких эвтектических растворителей (DES). По сравнению с пирометаллургическими процессами гидрометаллургические методы позволяют снизить потери лития и повысить селективность. Подход первоочередного извлечения лития (lithium-first) упрощает последующее разделение металлов и повышает чистоту промежуточных продуктов.

Анализ показал, что кислотное и окислительное выщелачивание обеспечивает извлечение лития свыше 95–99% при минимальном растворении сопутствующих металлов. Лимонная, яблочная и аскорбиновая кислоты благодаря восстановительным свойствам и биоразлагаемости являются перспективными экологичными реагентами. Однако высокий расход реагентов, образование сточных вод и необходимость последующей очистки растворов для получения Li_2CO_3 или LiOH ограничивают промышленное применение.

Дальнейшее развитие технологий должно быть направлено на снижение экологической нагрузки, упрощение схем разделения компонентов, повышение степени замкнутости материальных потоков, сокращение потребления химических реагентов и внедрение принципов циркулярной экономики для создания эффективных, ресурсосберегающих и экологически безопасных процессов переработки отработанных аккумуляторов.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, литий, селективное выщелачивание, гидрометаллургия, окислительное выщелачивание, глубокие эвтектические растворители, переработка аккумуляторов

Введение. Глобальный переход к электрификации, в основном обусловленный быстрым распространением аккумуляторов для электромобилей, породил беспрецедентный спрос на литий (Li), превратив его в критически важный стратегический ресурс. Хотя глобальные эксплуатируемые запасы лития оцениваются в 15–30 миллионов тонн, в сочетании с ограниченными производственными мощностями и неравномерного пространственного распределения этих ресурсов создает значительное узкое место (Zhai et al., 2025). между доступностью сырья и промышленным спросом, способствуя геополитической уязвимости. На рисунке 1 представлено распределение запасов лития содержащих минералов.

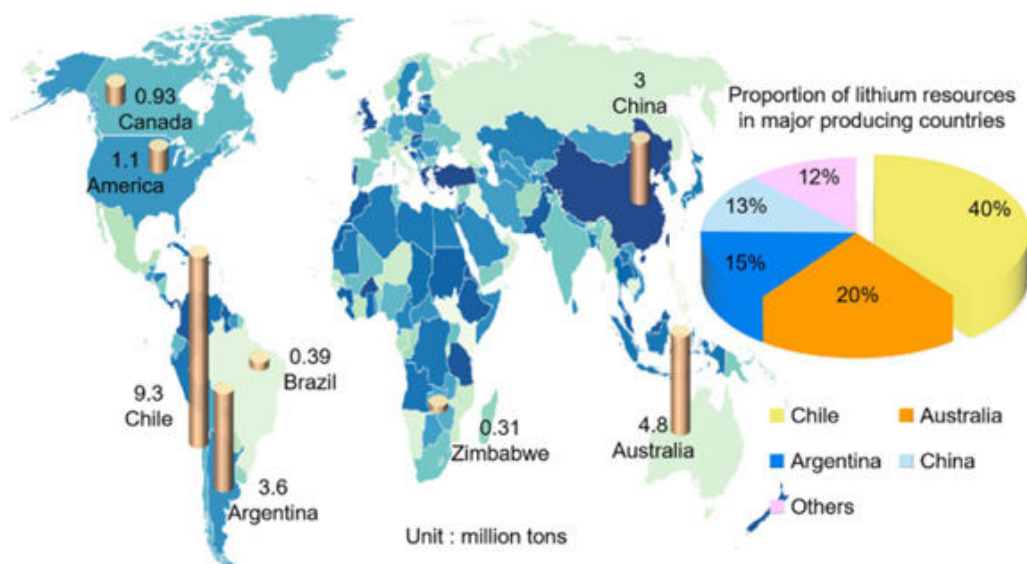
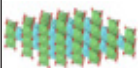
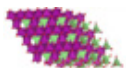
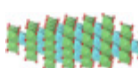
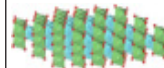
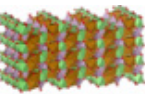


Рисунок 1. Глобальное распределение ресурсов лития (Zhai et al., 2025).

Как видно из рисунка 1 основные запасы лития находятся на территории Чили - 40%, Австралии - 20%, Аргентине – 15% и Китая – 13%.

Однако, отработанные литий-ионные аккумуляторы содержат множество стратегических ресурсов и, следовательно, рассматриваются как критически важные источники сырья. Основным источником лития являются катодные элементы. В таблице 1 приведены наиболее распространенные материалы, использующиеся в качестве катодных элементов.

Таблица 1. Наиболее распространенные материалы, использующиеся в качестве катодных элементов.

Тип катодного материала	LCO	LMO	NCM	NCA	LFP
Химическая формула	LiCoO_2	LiMn_2O_4	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$	LiFePO_4
Структура					
Кристаллическая структура	$\alpha\text{-NaFeO}_2$	кристалл шпинели	$\alpha\text{-NaFeO}_2$	$\alpha\text{-NaFeO}_2$	оливин
Используется	портативные электронные устройства	Электроинструменты и электровелосипеды	портативные электронные устройства и электротранспорт	Батареи Panasonic для электро-транспорта Tesla	электро-велосипеды, большой электро-транспорт, электроинструменты

Например, типичный отработанный катод NCM содержит приблизительно 6,15% Li, 18,65 % Co и 18,32% Ni по весу (Gao et al., 2017). Для извлечения ценных металлов используют пирометаллургический и гидрометаллургический метод. Однако, пирометаллургический метод страдает от высокого энергопотребления, вредных выбросов газов и, что наиболее важно, от необратимой потери лития в шлаковые и пылевые фазы из-за его низкой температуры плавления. Гидрометаллургические процессы обычно используют подход «полного растворения», при котором все катодные металлы полностью выщелачиваются в раствор, образуя сложный многометаллический выщелачивающий раствор, известный как «металлический суп». Последующее отделение лития от этой смеси чрезвычайно сложно и дорого, часто не достигая полного разделения.

В связи с этим, данный обзор посвящен методам селективного извлечения лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов.

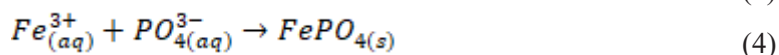
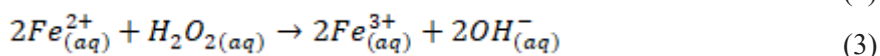
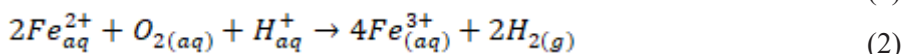
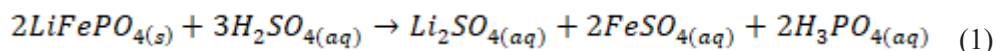
Материалы и методы. Материалами исследования послужили опубликованные научные работы, посвященные переработке отработанных литий-ионных аккумуляторов и селективному извлечению лития из катодных материалов LiFePO_4 (LFP) и NCM. Для сравнительного анализа использованы данные о кислотном, окислительном выщелачивании и выщелачивании с применением глубоких эвтектических растворителей (DES), включая сведения об эффективности извлечения Li, сопутствующем растворении Fe, P, Ni, Co и Mn, составе выщелачивающих систем, температуре, соотношении твердой и жидкой фаз, продолжительности процесса и способах последующего получения Li_2CO_3 или LiOH. Особое внимание уделено исследованиям lithium-first подхода, при котором литий преимущественно переводится в раствор, а переходные металлы сохраняются в твердой фазе.

Работа выполнена в формате систематического аналитического обзора. Проведен сравнительный анализ опубликованных данных по механизмам и условиям селективного выщелачивания лития. Сопоставлялись степень извлечения лития, селективность по отношению к сопутствующим металлам, расход и тип реагентов, температурно-временные параметры, экологические ограничения и перспективы масштабирования. Отдельно рассмотрены термодинамические закономерности системы Li-Fe-P- H_2O на основе E-pH диаграмм, а также роль окислительно-восстановительных условий в стабилизации Fe в твердой фазе.

Результаты и обсуждение. *Кислотное выщелачивание.* Принцип селективного извлечения лития с помощью кислотного выщелачивания основан на различном поведении ионов металлов при растворении в различных выщелачивающих агентах. В ходе процесса ионы металлов с низкой растворимостью осаждаются в виде нерастворимых соединений, что позволяет отделить литий от переходных металлов (ПМ), таких как никель, кобальт и марганец.

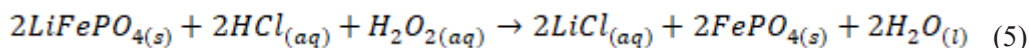
Серная кислота (H_2SO_4) является одним из наиболее широко используемых выщелачивающих агентов и доказала свою особую эффективность для извлечения металлов из материалов LFP. В присутствии H_2SO_4 Li и Fe высвобождаются из решетки LFP с образованием растворимых сульфатных соединений (Реакция (1)).

Одновременно Fe^{2+} может подвергаться окислению растворенным кислородом или перекисью водорода с образованием Fe^{3+} , который затем реагирует с фосфатными ионами с образованием нерастворимого FePO_4 (Реакции (2)–(4) (Du et al., 2024).



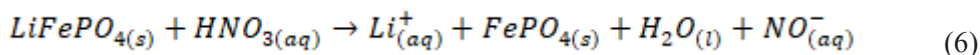
Температура оказывает сложное влияние на химические процессы. Повышенные температуры (80 °C) ускоряют как кислотное растворение, так и окислительно-восстановительную кинетику, улучшая общую экстракцию лития. Однако в условиях сильного окисления более высокая температура незначительно снижает селективность из-за увеличения подвижности железа до осаждения FePO_4 . Это наблюдение помогает разрешить противоречия в литературе, где сообщалось о влиянии температуры на выщелачивание железа, варьирующемся от положительного до незначительного или даже обратного (Cong et al., 2025, Liu et al., 2025). Эксперименты по извлечению при показали среднюю степень извлечения 94% лития, 4% железа и 3% фосфора, что подтверждает превосходную селективность и воспроизводимость.

Соляная кислота (HCl) — это сильная, недорогая минеральная кислота, широко используемая в гидрометаллургической переработке благодаря высокой растворимости солей металлов и совместимости с распространенными окислителями. Она может эффективно растворять компоненты LiFePO_4 (LFP), образуя растворимые хлориды при соответствующих окислительно-восстановительных условиях (Yang et al., 2025). В отсутствие внешнего окислителя железо преимущественно остается в двухвалентном состоянии (Fe^{2+}), с ограниченным окислением до Fe^{3+} , возникающим из растворенного кислорода или следовых количеств окисляющих веществ в черной массе (Li et al., 2024). Поскольку хлорид является сильным комплексообразующим лигандом, Fe может образовывать множество координационных соединений (например, FeCl^+ , FeCl_2 , FeCl_4^-) в зависимости от концентрации кислоты, потенциала окисления и температуры. При низких концентрациях хлорида преобладают комплексы Fe^{3+} , тогда как в сильно восстановительных условиях более стабильными являются соединения Fe^{2+} . В присутствии перекиси водорода Fe^{2+} легко окисляется до Fe^{3+} , который затем реагирует с фосфатом, образуя FePO_4 , что позволяет осуществлять селективное выщелачивание лития. Сообщалось, что в присутствии окислителя Fe останется в виде FePO_4 , а Li образует LiCl . Упрощенная общая реакция для селективного извлечения лития в системах $\text{HCl-H}_2\text{O}_2$ выглядит следующим образом:



Азотная кислота (HNO_3) является сильным донором протонов с присущей ей окислительной способностью, что делает ее потенциальной однокомпонентной системой для извлечения лития из LFP без необходимости использования внешнего окислителя. Ее окислительная сила обусловлена окислительно-восстановительной парой $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2$, которая может окислять Fe^{2+} до Fe^{3+} , тем самым способствуя образованию FePO_4 и облегчая высвобождение лития.

Упрощенная реакция селективного извлечения лития азотной кислотой может быть представлена следующим образом:



Однако, окислительно-восстановительная способность азотной кислоты сильно зависит как от температуры, так и от концентрации кислоты, при этом равновесие $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2$ обеспечивает лишь слабую окислительную способность при комнатной температуре, демонстрируя ограниченное превращение LiFePO_4 в FePO_4 , что ограничивает эффективность выщелачивания лития.

Добавление перекиси водорода (H_2O_2) в систему увеличило извлечение лития с ~30% (без окислителя) до 99%, демонстрируя сильный синергетический эффект между азотной кислотой и перекисью водорода. Что указывает на эффективное ускорение превращения $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$. Этот этап окисления имеет решающее значение, поскольку стабилизация Fe^{2+} в растворе ингибирует разложение LiFePO_4 и ограничивает выщелачивание лития; после окисления Fe^{3+} образует нерастворимый FePO_4 , высвобождая Li^+ в раствор.

Фосфорная кислота (H_3PO_4) использовалась в качестве селективного выщелачивающего агента (Yang et al., 2022). для извлечения лития из смешанных катодных материалов NCM. Сообщалось, что остатки после выщелачивания состоят в основном из нерастворимых фосфатов никеля, кобальта, марганца и FePO_4 .

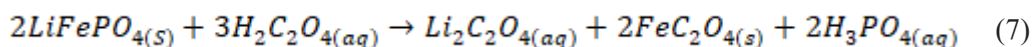
Воздействие селективного выщелачивания лития из литий-железо-фосфатных батарей на окружающую среду было дополнительно оценено с использованием неорганических кислот низкой концентрации (H_3PO_4 и H_2SO_4) (Gerold et al., 2023). Результаты их исследований показали, что этот процесс приводит к образованию кислых сточных вод и значительному сорастворению железа, что осложняет последующие процессы очистки. Кроме того, высокий углеродный след, связанный с производством неорганических кислот, снижает общую экологическую устойчивость этого подхода.

Органические кислоты. Благодаря своей экологической совместимости, низкой токсичности и биоразлагаемости, органические кислоты привлекают все больше внимания как устойчивые альтернативы минеральным кислотам при переработке литий-ионных батарей. Эти кислоты могут одновременно

выступать в качестве доноров протонов и комплексообразующих агентов, снижая потребность в дополнительных окислителях или восстановителях во время выщелачивания (Meshram et al., 2020).

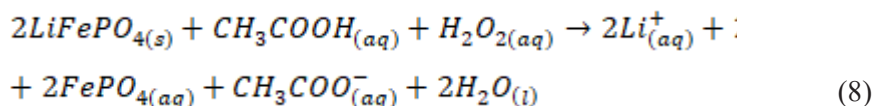
Щавелевая кислота ($H_2C_2O_4$) слабая дипротонная кислота ($pK_{a1} \approx 1,25$, $pK_{a2} \approx 4,27$), имеет относительно высокую первую константу диссоциации по сравнению с другими органическими кислотами, что обеспечивает умеренную протонную активность в водном растворе. Его сопряженное основание, оксалат-анион ($C_2O_4^{2-}$), образует прочные координационные комплексы с катионами металлов, такими как Li^+ , Fe^{2+} и Fe^{3+} , что напрямую влияет как на эффективность растворения, так и на селективность.

Упрощенная реакция выщелачивания LFP в щавелевой кислоте может быть выражена следующим образом:



Щавелевая кислота обеспечивает высокую эффективность извлечения лития (84–100%) (Henderson et al., 2025) подтверждая ее сильную комплексообразующую способность с Li^+ . Однако селективность оставалась низкой, поскольку Fe и P одновременно растворялись в значительных количествах (Fe: 25–50%; P: 27–55%). Такое поведение согласуется с образованием нерастворимого оксалата железа(II) (FeC_2O_4) и, в окислительных условиях, растворимых комплексов оксалата железа(II), таких как $[Fe(C_2O_4)_3]^{3-}$, которые дестабилизируют $FePO_4$ и способствуют со-экстракции Fe. Следовательно, несмотря на высокую эффективность извлечения лития, система не может обеспечить селективное выщелачивание.

Уксусная кислота (CH_3COOH) с pK_a 4,76 образует только слабые комплексы Fe–ацетата. Эта характеристика ограничивает растворимость Fe и способствует осаждению $FePO_4$, повышая селективность Li. Упрощенное представление механизма выщелачивания уксусной кислотой приведено в реакции:



Эффективность выщелачивания органическими кислотами сильно зависит от их способности отдавать протоны и прочности комплексообразования с переходными металлами (Jiang et al., 2023). Карбоновые кислоты, такие как муравьиная и уксусная кислоты, в сочетании с окислителями (например, O_2 или H_2O_2) могут обеспечивать селективное выщелачивание лития посредством окисления Fe^{2+} до Fe^{3+} in situ с последующим образованием $FePO_4$ (Li et al., 2023.). Лимонный сок и яблочная кислота ($C_4H_6O_5$) – литий в виде карбоната лития (Li_2CO_3), а $FePO_4$ оставался в твердом остатке (Kumar et al., 2020)

Окислительное выщелачивание. Селективное извлечение лития

посредством окислительного выщелачивания исследовалось многочисленными учеными с использованием принципов, выведенных из диаграммы E-pH (окислительно-восстановительный потенциал-pH) системы металл- H_2O . Регулируя окислительный потенциал, этот метод позволяет осуществлять преимущественное растворение лития, сохраняя при этом другие металлы в твердой фазе. Термодинамическая основа селективного извлечения лития путем окислительного выщелачивания была систематически установлена с помощью анализа диаграммы E-pH в диапазоне температур 298,15–473,15 K, представленной на рисунке 2 (Jing et al., 2019).

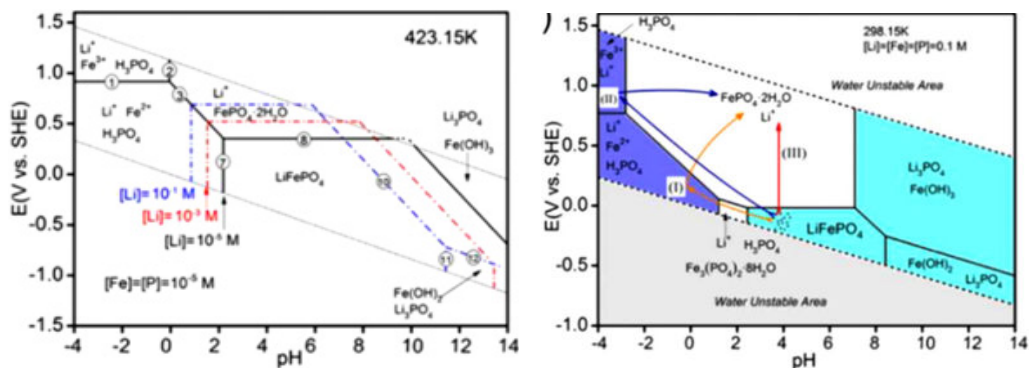


Рисунок 2. (а) Диаграмма E-pH для системы Li-Fe-P- H_2O при 423 K с различными концентрациями растворимого лития: 10^{-1} , 10^{-3} и 10^{-5} M, (б) Диаграмма E-pH для системы Li-Fe-P- H_2O при 298,15 K и пути гидрометаллургического извлечения отработанного LFP.

Рисунок 2 (а) показывает, что увеличение концентрации растворимого Li^+ значительно расширило область преобладающей стабильности LiFePO_4 в нейтральном диапазоне pH при 423 K. Диаграмма E-pH (рис. 2(б)) определяет специфическую область (маршрут III), где окислительные условия при нейтральном pH избирательно растворяют Li^+ из LiFePO_4 , одновременно стабилизируя Fe в виде нерастворимого $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в остатке. Экспериментальные результаты выщелачивания подтвердили эффективность H_2O_2 в качестве окислителя в мягких условиях (298 K, pH 7,0) для избирательного растворения Li^+ . На рис. 3 представлены результаты выщелачивания металлов из отработанного LFP с использованием различных окислителей.

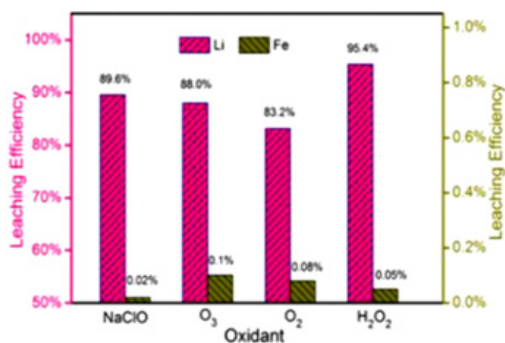


Рисунок 3. Выщелачивание металлов из отработанного LFP с использованием различных окислителей.

Экстракция показала, что было извлечено 95,4% лития с минимальным сопутствующим растворением железа (0,05%). Стоит отметить, что NaClO, O₃ и O₂ так же показывают высокую селективность по литию. Вместе с тем, в работе (Liu et al., 2023) отмечается, что окислительное извлечение с использованием NaClO значительно снижает углеродный след на 2,88 кг CO_{2e} на кг переработанных отработанных литий-железо-фосфатных батарей, одновременно обеспечивая экономию ископаемого топлива на 4,32 МДж за счет извлечения алюминиевой фольги, медной фольги и Li₂CO₃. По сравнению с традиционными методами, метод окислительного выщелачивания исключает использование сильных кислот, обеспечивая при этом селективное извлечение лития (в форме LiCl) с эффективностью извлечения до 99,8 %.

Персульфат натрия (Na₂S₂O₈) использовался в качестве окислителя для селективного извлечения лития из отработанных литий-железо фосфатных батарей. В оптимизированных условиях, а именно при 1,05 кратном превышении теоретического количества Na₂S₂O₈, соотношении твердой и жидкой фаз 300 г/л, температуре 25 °C и времени реакции 20 мин, эффективность выщелачивания лития превысила 99 %, в то время как эффективность выщелачивания железа составила всего 0,048 %. На рисунке 4 показано механистическое понимание процессов выщелачивания на основе персульфата натрия.

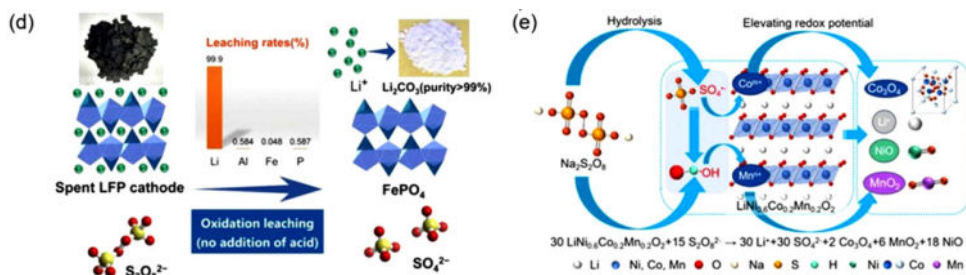


Рисунок 4. Механизм селективного выщелачивания лития из (а) отработанного LFP (Zhang, et al., 2023) (б) отработанного NCM622 (Zheng et al., 2024).

В системе LiFePO_4 персульфат окислял LiFePO_4 до FePO_4 в мягких условиях, не разрушая твердый каркас, что обеспечивало быстрое и эффективное высвобождение Li^+ . В системе NCM персульфат разлагался с образованием окислительных радикалов SO_4^{2-} и OH^- , что повысило Редокс-потенциал среды выщелачивания. Эти радикалы, наряду с H^+ и Na^+ , способствовали окислению переходных металлов (Co, Mn) и вызывали структурный коллапс материала NCM, тем самым облегчая селективное извлечение Li^+ . Ионы лития осаждали в виде Li_2CO_3 . Полученный Li_2CO_3 затем объединяли с остатком селективного выщелачивания для синтеза электродных материалов методом высокотемпературного твердофазного синтеза, обеспечивая замкнутый цикл и полное восстановление отработанных материалов NCM.

Выщелачивание глубокими эвтектическими растворителями (Deep eutectic solvent DES). С момента первого синтеза эвтектических смесей (DES) командой Abbott в 2003 году (Abbott et al., 2003) эти новые экологически чистые растворители привлекли широкое внимание благодаря своим уникальным преимуществам. DES представляют собой эвтектические смеси, образующиеся за счет водородных связей между акцепторами водородных связей (HBA) и донорами водородных связей (HBD). Классификация DES по составу представлена в таблице 2.

Таблица 2. Классификация DES по составу.

	Акцептор водородной связи	Донор водородной связи
Тип 1 (I)	Органическая катионная соль	Металлическая соль
Тип 2 (II)	Органическая катионная соль	Гидрат соли металла
Тип 3 (III)	Органическая катионная соль	Органический HBD
Тип 4 (IV)	Металлическая соль	Органический HBD

Эта классификация является расширением традиционной схемы, в которой «органический катион» ограничивался четвертичным аммонием, а «соль металла» — хлоридами.

Тип 1 (I): К эвтектикам первого типа относится широкий спектр хлорометаллических ионных растворителей, которые активно изучались в 1980-х годах, например, хлоралюминаты имидазолия на основе смесей AlCl_3 + хлорид 1-этил-3-метилимидазолия. Также могут быть использованы хлориды следующих металлов: цинк, олово, железо, алюминий или галлий.

Тип 2 (II): Эвтектики второго типа аналогичны эвтектикам первого типа, за исключением того, что в них используется гидратированная форма галогенида металла. При использовании хлоридов в качестве металла могут выступать Cr, Co, Cu, Ni или Fe.

Тип 3 (III): Эвтектики типа 3 состоят из акцепторов водородной связи, таких как четвертичные аммониевые соли (например, хлорид холина), и доноров водородной связи (например, мочевины, этиленгликоль). Многие из них являются глубокими эвтектическими растворителями, не содержащими металлов. Эвтектики типа 3 успешно применяются в таких процессах обработки металлов, как электроосаждение, электрополировка и извлечение металлов.

Тип 4 (IV): В эвтектиках типа 4 в качестве НВА используется соль металла, а в качестве HBD — органическое соединение. Изначально считалось, что это гибрид между типом 1 и типом 3, но затем выяснилось, что у него есть и собственные свойства: например, мочевины может образовывать DES типа 4 с хлоридами цинка, олова и железа (III), но не с хлоридом алюминия. Эвтектики типа 4 представляют интерес для электроосаждения, поскольку они образуют катионные комплексы металлов, благодаря чему в двойном слое вблизи поверхности электрода концентрация ионов металлов высока.

Вывод. В вышеупомянутых технологиях селективного выщелачивания и повторного извлечения лития как кислотное, так и окислительное выщелачивание обеспечивают высокоэффективное и селективное извлечение лития, в то время как Fe, P, Ni, Co, Mn и другие элементы остаются практически полностью в твердой фазе. Это позволяет выщелачивать литий и отделять его от других элементов за один этап. В отличие от традиционных процессов переработки, которые включают полное растворение всех металлов с последующим последовательным разделением, эти подходы не только повышают эффективность извлечения лития и чистоту продукта, но и способствуют синергетическому извлечению других металлических элементов. В результате общая процедура переработки значительно упрощается. Хотя эффективность выщелачивания, сообщаемая во многих исследованиях, впечатляюще высока, критический анализ выявляет существенный «парадокс эффективности выщелачивания»: условия, обеспечивающие наибольшее извлечение металла, часто коррелируют с наиболее сложной, дорогостоящей и экологически обременительной последующей обработкой. Это создает разрыв между показателями успеха в лабораторных условиях и возможностью применения в промышленных масштабах.

Основной компромисс заключается в выборе выщелачивающего агента. Сильные минеральные кислоты, включая H_2SO_4 , очень эффективны и относительно недороги, но они коррозионны, опасны в обращении и образуют большие объемы кислых сточных вод, требующих обширной нейтрализации и очистки, что значительно увеличивает эксплуатационные расходы и нагрузку на окружающую среду. В свою очередь, органические кислоты, такие как лимонная и щавелевая кислоты, часто представляются как более «экологичные» альтернативы. Однако они могут быть значительно дороже, а их сильные хелатирующие свойства, способствуя первоначальному растворению, создают в выщелачиваемой жидкости высокостабильные металлоорганические комплексы. Между тем, разрушение этих стабильных комплексов для селективного осаждения или извлечения отдельных переходных металлов является сложной химической задачей, часто требующей многократных этапов регулирования pH и дополнительных реагентов. Эта сложность не только увеличивает затраты, но и может привести к соосаждению и потере лития, снижая общую эффективность процесса. Исследования по оценке жизненного цикла (LCA) подтверждают, что этапы выщелачивания и последующего извлечения материала являются основными экологическими проблемными зонами в

цепочке гидрометаллургической переработки, внося значительный вклад в общий углеродный след, потребление воды и потенциальную токсичность. Воздействие на окружающую среду в значительной степени зависит от процесса производства самих химических реагентов. Поэтому процесс, демонстрирующий 99% эффективность выщелачивания при использовании большого количества энергоемкой органической кислоты, может иметь худший общий экологический профиль, чем процесс с несколько меньшей эффективностью, использующий более безопасный или пригодный для вторичной переработки реагент. Кроме того, в лабораторных отчетах часто недооценивается практическая проблема, связанная с образованием осадка в процессе самого выщелачивания. При растворении переходных металлов и их взаимодействии с такими реагентами, как оксалат, они могут образовывать нерастворимые соли, которые прилипают к поверхности непрореагировавших частиц катода. Это явление блокирует активные центры и диффузионные каналы, препятствуя полному контакту между выщелачивающим раствором и материалом катода, что может преждевременно остановить реакцию и снизить общую эффективность извлечения лития. Это подчеркивает необходимость выйти за рамки простых показателей эффективности и принять целостный подход к оценке на системном уровне, учитывающий стоимость реагентов, токсичность, сложность последующих этапов обработки и воздействие на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла, чтобы определить действительно передовые и устойчивые стратегии выщелачивания. С точки зрения масштабируемости в промышленности, кислотное выщелачивание сталкивается с проблемами расширения мощностей очистки сточных вод и систем регенерации реагентов, в то время как окислительное выщелачивание требует стабильной поставки окислителей в больших масштабах для поддержания селективности. Выщелачивание с использованием DES, несмотря на свои экологические преимущества, затруднено высокой вязкостью в реакторах большого объема и контролем потерь растворителя во время непрерывной работы, что требует оптимизации инженерных решений для промышленного внедрения.

References

- Abbott A.P., Capper G., Davies D.L., Rasheed R.K., Tambyrajah V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*. – Vol. 1. – P. 70–71. <https://doi.org/10.1039/B210714G> (in Eng.).
- Cong J., Luo S.H., Sun Q., Liu X., Wang Y.K., Yan S.X., Li P.W. (2025). Study on deep synergistic leaching mechanism of spent lithium iron phosphate under the H₂SO₄-H₂O₂ system and precise chemical precipitation recovery strategy of lithium carbonate. *Separation and Purification Technology*. – Vol. 363. – P. 132326. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132326> (in Eng.).
- Du J., Qing J., Fang K., Zhang G., Cao Z., Li Q., Wu S. (2024). The priority leaching of lithium from spent LiFePO₄ cathode without the oxidization. *Resources, Conservation and Recycling*. – Vol. 202. – P. 107374. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107374> (in Eng.).
- Gao W., Zhang X., Zheng X., Lin X., Cao H., Zhang Y., Sun Z.H.I. (2017). Lithium carbonate recovery from cathode scrap of spent lithium-ion battery: a closed-loop process. *Environmental Science & Technology*. – Vol. 51(3). – P. 1662-1669. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03320> (in Eng.).
- Gerold E., Lerchhammer R., Strnad C., Antrekowitsch H. (2023). Towards a sustainable approach using mineral or carboxylic acid to recover lithium from lithium iron phosphate batteries. *Hydrometallurgy*. – Vol. 222. – P. 106187. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106187> (in Eng.).



Henderson M.S., Beh C.C., Oraby E., Eksteen J. (2025). Organic acid leaching of black mass with an LFP and NMC mixed chemistry. Recycling. – Vol. 10(4). – P. 145. <https://doi.org/10.3390/recycling10040145> (in Eng.).

Jiang Z., Zhu P., Yang Y., Jin W., Zou G., Hou H., Ji X. (2023). Sustainable recovery of lithium from spent LiFePO₄ via proton circulation. Chemical Engineering Journal. – Vol. 466. – P. 143186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143186> (in Eng.).

Jing Q., Zhang J., Liu Y., Yang C., Ma B., Chen Y., Wang C. (2019). E-pH diagrams for the Li-Fe-P-H₂O system from 298 to 473 K: thermodynamic analysis and application to the wet chemical processes of the LiFePO₄ cathode material. The Journal of Physical Chemistry C. – Vol. 123(23). – P. 14207-14215. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02074> (in Eng.).

Kumar J., Shen X., Li B., Liu H., Zhao J. (2020). Selective recovery of Li and FePO₄ from spent LiFePO₄ cathode scraps by organic acids and the properties of the regenerated LiFePO₄. Waste Management. – Vol. 113. – P. 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.046> (in Eng.).

Li B., Luo X., Tian S., Wu Y., Yuan H., Zhai M., Zuo T. (2025). A circular economy approach for the global lithium-ion battery supply chain. Nature. – Vol. 646. – P. 1114-1121. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09617-4> (in Eng.).

Li X., Benstead M., Peeters N., Binnemans K. (2024). Recycling of metals from LiFePO₄ battery cathode material by using ionic liquid based-aqueous biphasic systems. RSC Advances. – Vol. 14(13). – P. 9262-9272. <https://doi.org/10.1039/D4RA00655K> (in Eng.).

Liu K., Wang M., Zhang Q., Xu Z., Labianca C., Komárek M., Tsang D.C. (2023). A perspective on the recovery mechanisms of spent lithium iron phosphate cathode materials in different oxidation environments. Journal of Hazardous Materials. – Vol. 445. – P. 130502. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130502> (in Eng.).

Liu R., Liu Y., Li J., Chen Y., Zhu Y., Zhang K., Zhang L. (2025). A closed-loop process for rapid and selective lithium extraction and resynthesis from spent LiFePO₄ batteries. Molecules. – Vol. 30(12). – P. 2587. <https://doi.org/10.3390/molecules30122587> (in Eng.).

Meshram P., Mishra A., Sahu R. (2020). Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids—A review. Chemosphere. – Vol. 242. – P. 125291. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125291> (in Eng.).

Yang H., Zheng N., Dong L., Song Y., Li W., Zhou X., Zhou Z. (2025). Recovery and preparation of battery-grade iron phosphate from leaching slag of spent lithium iron phosphate battery cathode materials. Separation and Purification Technology. – Vol. 379. – P. 135023. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135023> (in Eng.).

Yang L., Feng Y., Wang C., Fang D., Yi G., Gao Z., Luo S. (2022). Closed-loop regeneration of battery-grade FePO₄ from lithium extraction slag of spent Li-ion batteries via phosphoric acid mixture selective leaching. Chemical Engineering Journal. – Vol. 431. – P. 133232. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133232> (in Eng.).

Zhang J., Hu J., Liu Y., Jing Q., Yang C., Chen Y., Wang C. (2019). Sustainable and facile method for the selective recovery of lithium from cathode scrap of spent LiFePO₄ batteries. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – Vol. 7(6). – P. 5626-5631. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00404> (in Eng.).

Zheng Y., Yang Z., Li Z., Hu G., Liang S., Yu W., Yang J. (2024). Environmentally friendly recovery of Li₂CO₃ from spent lithium-ion batteries by oxidation and selective leaching process. ACS ES&T Engineering. – Vol. 4(8). – P. 1927-1936. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.4c00134> (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: September 29, 2026
Format: 70×90 1/16. 34.5 printed sheets. Order No. 3.

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