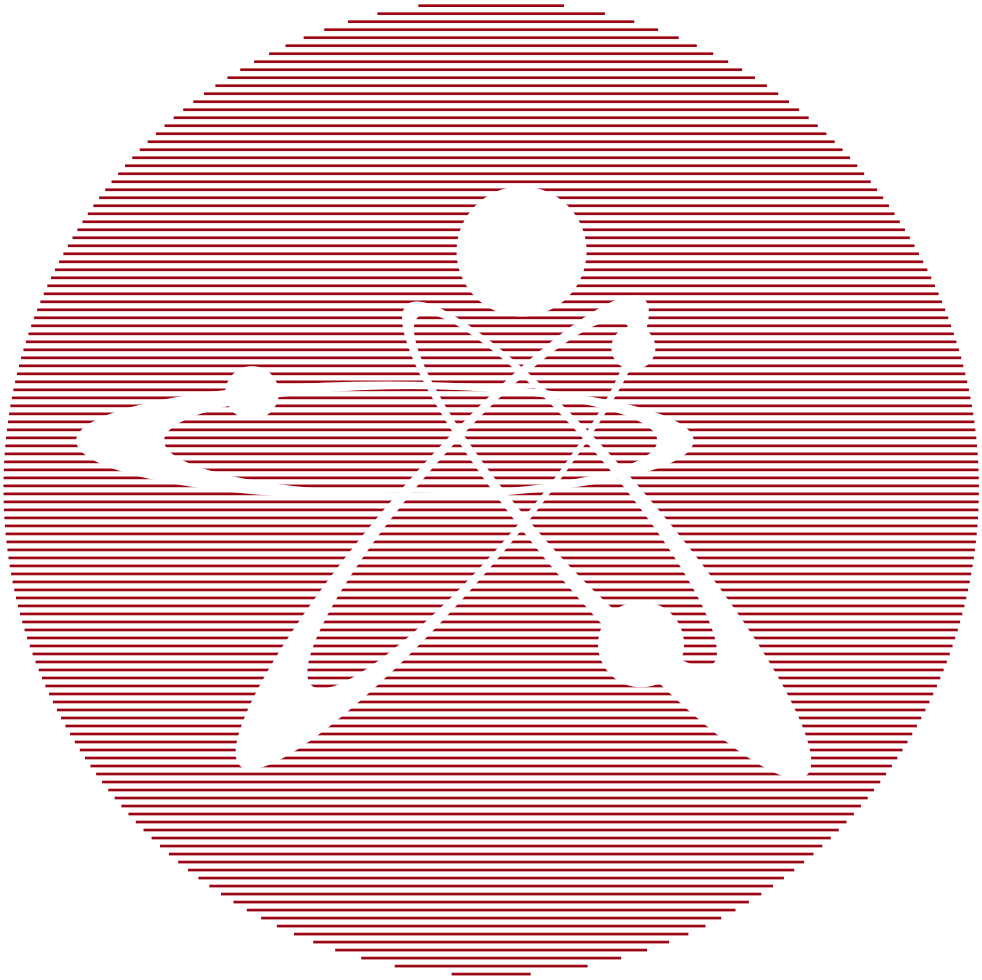
2026
ВЫПУСК 3
ISSN 1729-7516

ВЕСТНИК НЦЯБ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ВЫПУСК 3 (107), СЕНТЯБРЬ 2026

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н., профессор БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,
к.б.н. АЙДАРХАНОВ А.О., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., д.т.н. ВИЕЛЕБА В. (Польша),
к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия),
д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф. (Россия), д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.ф.-м.н. СОКОЛОВА И.Н.,
д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., PhD Takahiro HAYASHI (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3 (107) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРКҮЙЕК, 2026 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 3 (107), SEPTEMBER 2026

Журнал «Вестник НЯЦ РК» входит в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности.

«ҚР ҰЯО жаршысы» журналы ғылыми қызметтің негізгі нәтижелерін жариялау үшін Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдар тізбесіне кіреді.

The Journal "NNC RK Bulletin" is included in the list of scientific publications recommended by the Committee for Quality Assurance in the Field of Science and Higher Education of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for the publication of the main results of scientific research.

СОДЕРЖАНИЕ

REVIEW: ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE-BASED COMPOSITE MATERIALS
S. N. Hamidova, V. U. Mammadov 5

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)
М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова, Н.В. Ларионова, С.Е. Сальменбаев, С.Д. Смирнов, Н.К. Нургайсинова 15

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА
М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова, С.Е. Сальменбаев, С.Д. Смирнов, Н. К. Нургайсинова 28

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ Kr, Xe, He НА УСКОРИТЕЛЕ ДЦ-60
А.М. Темір, И.А. Иванов, А.Д. Сапар, Е.О. Унгарбаев, Е.В. Бихерт, Б.С. Аманжулов, А.С. Сейтбаев, И.К. Тлеубай 40

AISI 321 БОЛАТ НЕГІЗДЕРІНДЕГІ Al65Cu20Fe15 ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА HVOF ПРОЦЕСІ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ
Д. Э. Балтабаева, Ш. Курбанбеков, Л. Баятанова, A. Coruh, Ю. Амангельдиева 46

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ АМПУЛ НА ПАРАМЕТРЫ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТОПЛИВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РЕАКТОРЕ ИГР
Г.Г. Какимова, О.М. Жанболатов, Р.А. Иркимбеков, А.С. Сураев, Н.Е. Мухамедов 56

NEUTRON ACTIVATION AND GAS PRODUCTION IN TITANIUM AND CHROMIUM BERYLLIDES IN FISSION AND FUSION NEUTRON FIELDS
D. Sairanbayev, A. Shaimerdenov, M. Aitkulov, T. Kulsartov, M. Podoinikov 63

A BRIEF OVERVIEW OF THE PFAS POLLUTION PROBLEM IN THE ENVIRONMENT
A. Kamal, A. Satayeva, A. Baimenov, Y. Mekebayeva, D. Nurakhmet, Z. Shadiyar, E. Arkhangelsky 71

КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА БН-350 В ГЛУБОКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ
Д.И. Абулгазинова, К.С. Садыков, Л.П. Дерябина, В.А. Поспелов, А.Г. Коровиков 81

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЙОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ ШУЛЬБИНСКОЙ ГЭС
Ә.А. Исағали, Н.Н. Михайлова, М.В. Шульга. 90

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ РЕАКТОРА ИГР
Д.М. Секен, А.С. Сураев, О.М. Жанболатов, Р.А. Иркимбеков, Н.Е. Мухамедов 103

RESULTS OF THE FIRST EXPERIMENTAL TESTS OF THE RF PLASMA HEATING SYSTEM OF THE KTM TOKAMAK WITH AN EQUIVALENT PLASMA LOAD
K. Zhenis, B.Zh. Chektybayev, A.V. Gulkin, A.T. Kusainov, V.I. Savkin, S.V. Kotov, D.A. Olkhovik, Ye.A. Kashikbayev, S.A. Mukeneva, A.M. Gubin, D.V. Getman, V.M. Bayev 113

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КЕРАМИКЕ ZrO_2
К.М.Тынышбаев, А.Л.Козловский, И.З.Жуматаева 122

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БОРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ТОКАМАКА КТМ
А.Ж. Дүйсен, Б.Ж. Чектыбаев, А.Г. Коровиков, Е.А. Кашикбаев, В.С. Полковников, Д.А. Ольховик, А.Т. Кусаинов, Қ. Жеңіс 134

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ СОСТАВЛЯЮЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ ИГР
Д.Т. Жеңіс, О.М. Жанболатов, Н.Е. Мухамедов, Р.А. Иркимбеков, Г.А. Витюк 142

STUDY OF THE STRUCTURAL EVOLUTION AND STRENGTHENING OF Li_2TiO_3-BASED CERAMICS DOPED WITH $LiNbO_3$
A.A. Khametova, D. I. Shlimas 151

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ
С. З. Наурызова, А. Қ. Қаржаубаева, Н. Н Сагиева, Ж. Е Ибраева, А. К Батталова, Е.Шаймардан, М. А.Бейсебеков, А. К.Кабдрахманова, К. Ақатан, С. К.Кабдрахманова 158

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ АРИДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА
Н.В. Ларионова, А.В. Топорова, А.Е. Кундузбаева, А.М. Кабдыракова 168

ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ
В.В. Яковлев, Ю.Ю. Бакланова, О.С. Букина, В.В. Бакланов, А.Г. Коровиков 176

35 ЛЕТ ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА: РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
Э.Г. Батырбеков, А.О. Айдарханов, Н.В. Ларионова, А.В. Паницкий, А.К. Айдарханова, Л.В. Тимонова, А.Е. Кундузбаева, А.М. Кабдыракова, Д.В. Турченко, С.Б. Субботин 186

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК АНАЛИЗА МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ СОСТАВНОГО ЯДРА ^{241}Am, ПОЛУЧЕННОГО В РЕАКЦИИ ^{240}Pu(p,f) ПРИ ЭНЕРГИИ НАЛЕТАЮЩИХ ПРОТОНОВ 10 МэВ
Д.К.Алимов, А.Н. Пан, К.В.Ковальчук, Н.Буртебаев, Д.М.Джансеитов, Р.К.Кошербаева 196

ЭКОНОМИКО-ПРАВОВАЯ МОДЕЛЬ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС
А.О. Сиябеков, А.Т. Торгаев 204

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБЪЕМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СОПРЯЖЕНИЯ CFD- И MCNP-РАСЧЕТОВ
Д.М. Секен, О.М. Жанболатов, А.С. Сураев, Р.А. Иркимбеков, Н.Е. Мухамедов 210

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ И УДЕРЖАНИЯ D+ В БЕРИЛЛИДЕ ТИТАНА $Be_{12}Ti$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
А.С. Диков, Е.А. Максимкина, Т.В. Кульсартов 220

СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ МНОГОКРАТНО ИОНИЗОВАННЫХ АТОМОВ МИШЕНИ И ВЫХОД РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ИОНАМИ КОБАЛЬТА
И. Д. Горлачев, А. В. Киреев, А. В. Платов, К. Е. Попов 226

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-5-14
UDC 537.311.33

REVIEW: ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICON CARBIDE-BASED COMPOSITE MATERIALS

S. N. Hamidova*, V. U. Mammadov

Baku State University, Baku, Azerbaijan

** E-mail for contacts: hamidova.sevinc.natiq@bsu.edu.az*

Silicon carbide (SiC) is a wide-bandgap semiconductor that is widely used in power electronics, automotive industries, and aerospace applications due to its high thermal conductivity and breakdown field. This review examines both the fundamental physics and the practical applications of SiC. We analyze its major crystal structures (polytypes), specifically 4H-SiC, 6H-SiC, and 3C-SiC, and discuss how these structures affect electrical performance. The paper also covers new developments in SiC functional ceramics, metal-matrix nanocomposites, and quantum defects used for quantum information science. By analyzing research literature from 2006 to 2026, we show how the industry transitioned from basic crystal growth to 8-inch wafer manufacturing and automated defect classification using neural networks. Finally, this review discusses the main technical problems that still limit SiC devices, such as high interface trap density (Dit), high contact resistance in p-type doping, and bias temperature instability (BTI). By comparing theoretical material properties with real device performance, this paper identifies key research priorities for the next generation of semiconductor technology.

Keywords: *SiC, wide bandgap semiconductors, electronic transport, interface traps, electrical properties, nanocomposites, quantum defect engineering, dielectric loss mechanisms, high-temperature electronics*

Introduction

Silicon carbide (SiC) is one of the most important wide-bandgap (WBG) semiconductors today, driving electrification across automotive, renewable energy, and aerospace industries. Its key strengths include a high critical breakdown field (~3.0 MV/cm), strong thermal conductivity (3.7…4.9 W/cm·K), and stable operation up to 500°C [1-5]. Modern growth techniques like Physical Vapor Transport (PVT) and High-Temperature Chemical Vapor Deposition (HT-CVD) now enable 8-inch (200 mm) wafers, making SiC cost-competitive with GaN and Ga_2O_3 for power devices in the 1.2…10 kV range [5-8]. A defining feature of SiC is its polytypism over 250 crystal forms exist depending on atomic layer stacking, which directly affects band structure, carrier mobility, and polarization [1, 4, 5, 9]. Among these, 4H-SiC is preferred for vertical power MOSFETs due to its uniform electron mobility of ~900 $cm^2/V{\cdot}s$ [1, 5]. By contrast, 6H-SiC exhibits problematic mobility anisotropy [9, 10], while 3C-SiC suffers from stacking faults caused by a ~20% lattice mismatch on silicon substrates [11-14]. Beyond bulk devices, SiC research spans a wide range of forms. Porous and sintered SiC ceramics are explored for thermoelectric conversion, filtration, and EMI shielding [15-17]. Cu-SiC nanocomposites balance conductivity and low thermal expansion for contacts and heat sinks [18, 19]. SiC nanowires and nanotubes are studied for miniature transistors and gas sensors [20, 21]. Point defects such as silicon vacancies (V_{Si}) and divacancies ($V_C V_{Si}$) serve as room-temperature qubits and single-photon sources for quantum computing [11, 22]. SiC-boron nitride nanosheet (SiC-BNNS) composites and core-shell nanofibers are also embedded in polymers for microwave absorption and radar cross-section reduction [23-25]. Research from 2006 to 2026 shows clear growth in the field. Early work focused on crystal growth and defect reduction; between 2012–2020, the focus moved to process optimization, contact engineering, and 150 mm substrates [26-28]. Since 2020, new directions have emerged including high-k gate dielectrics [29, 30], post-oxidation annealing [31-33], AI-based defect classification [34-38], and the commercial shift to 8-inch wafers [8]. Despite this progress, key challenges remain: high interface trap density D_{it} at the SiC/SiO_2 interface, poor p-type contact resistance, and bias temperature instability (BTI) under prolonged stress [39-42]. This review critically examines transport mechanisms, doping dynamics, and radiation hardness data to identify priorities for future research [39-42].

To support practical device design comparisons, the key physical and transport parameters of the most relevant SiC polytypes are summarized in Table 1.

Table 1. Physical and electronic properties of major SiC polytypes compared to Silicon.

Property	3C-SiC (Cubic)	4H-SiC (Hexagonal)	6H-SiC (Hexagonal)	Si (Reference)
Stacking Sequence	ABC...	ABCB...	ABCACB...	Diamond
Hexagonality (h, %)	0	50	33.3	0
Energy Bandgap (Eg, eV at 300 K)	2.36	3.23	3.05	1.12

Property	3C-SiC (Cubic)	4H-SiC (Hexagonal)	6H-SiC (Hexagonal)	Si (Reference)
Critical Breakdown Field (Ec, MV/cm)	1.2	3.0	2.4	0.3
Electron Mobility	900	900 (∥to c), 900 (⊥ to c)	60 (∥to c), 400 (⊥ to c)	1450
Saturated Electron Velocity	2.5	2.0	2.0	1.0
Thermal Conductivity	4.9	4.9	4.9	1.5

Measurements and Influencing Factors

1. Electronic Transport in SiC Polytypes: From Intrinsic Properties to Device-Relevant Parameters

Band Structure Limits and Polytype-Dependent Mobility

Electron movement in SiC is fundamentally governed by its polytypism changes in atomic layer stacking directly affect the band structure, carrier effective mass, and scattering behavior [1, 7, 9]. Of more than 250 known crystal forms, three matter most for power electronics: 4H-SiC, 6H-SiC, and 3C-SiC [1, 4, 11].

4H-SiC dominates high-voltage vertical devices thanks to its symmetric conduction band minima and low directional variation in electron effective mass [1, 7, 9], giving it a bulk electron mobility (μn) of ~900…1000 cm²/V·s at room temperature [1, 9]. 6H-SiC, by contrast, suffers from strong carrier scattering due to its ABCACB stacking sequence, weakening its transport performance [9]. While 3C-SiC theoretically offers the highest bulk mobility of the three, its growth on silicon substrates produces thermal mismatch-induced stacking faults and microtwins that block transport paths and reduce device yields in practice [11, 43].

Scattering Mechanisms and High-Temperature Transport Stability

SiC's wide bandgap suppresses intrinsic carrier generation, enabling reliable device operation above 500 °C – a major advantage over silicon [1, 27]. At such temperatures, transport remains controlled by intentional dopants rather than thermally generated carriers, underpinning SiC's high-temperature stability [2, 27, 44].

In real devices, carrier drift is shaped by competing scattering mechanisms: acoustic and optical phonon interactions, ionized impurity scattering, and defect trapping [7, 39, 45]. At low fields, impurity scattering limits mobility; at high fields, optical phonon emission saturates carrier velocity. Balancing these effects through careful doping profile optimization is essential to minimize conduction losses while maintaining breakdown voltage.

Crystallographic Defects, Anisotropy, and Bipolar Reliability

The main reason SiC layers fall short of theoretical transport limits is the presence of extended crystallographic defects – basal plane dislocations (BPDs), threading screw dislocations (TSDs), threading edge dislocations (TEDs), and micropipes [41, 45, 46]. While PVT process improvements have eliminated micropipes from modern 200 mm wafers [4], smaller dislocations remain problematic. They act as non-radiative recombination centers, shortening carrier lifetimes and increasing leakage current. In bipolar devices under sustained forward current, BPDs migrate and decompose into Shockley stacking faults, causing forward voltage drop (ΔVf) drift and long-term reliability loss [41, 47-49]. This has shifted modern SiC research increasingly toward defect-driven degradation management rather than fundamental transport physics [39, 42]. Transport anisotropy adds further complexity. In 4H-SiC, electron mobility differs

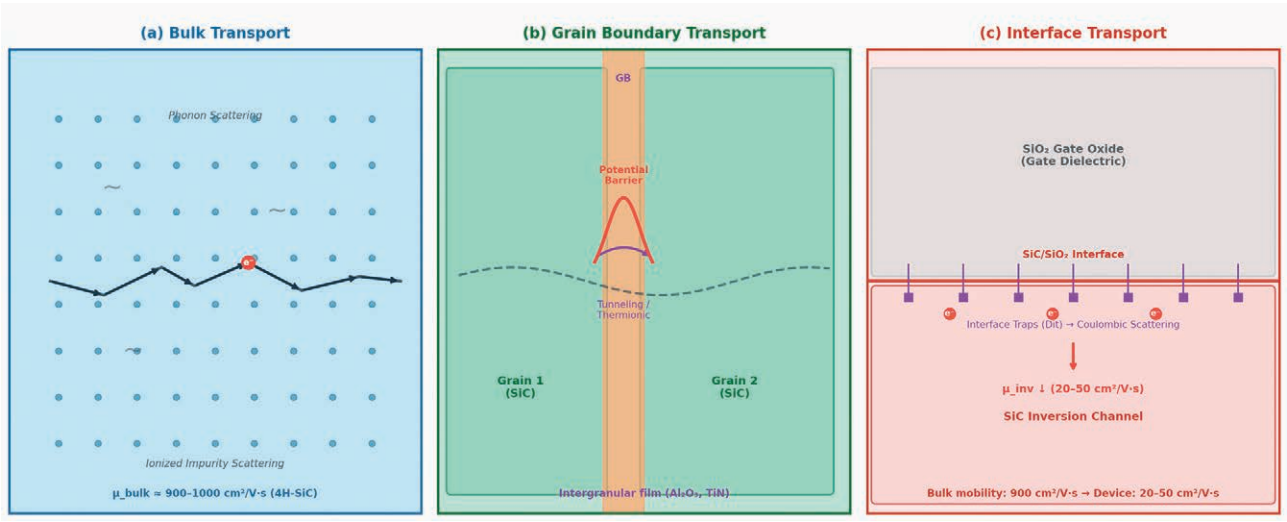


Figure 1. Electronic transport mechanisms in SiC: (a) bulk phonon and impurity scattering, (b) grain-boundary potential barriers and tunneling, (c) interface trap density (Dit) Coulombic scattering reducing inversion-channel mobility.

between directions parallel and perpendicular to the c-axis (0001) [1, 9], which becomes critical in trench-gate MOSFETs where current flows through non-standard planes such as the (1120) a-plane or (1100) m-plane [50]. Mobility varies across these surfaces due to roughness, atomic packing, and dangling bond differences, making precise crystallographic alignment during wafer cutting and etching essential [41, 50].

Interfacial Bottlenecks and Device Translation

Bulk transport parameters only set the theoretical performance ceiling. In practice, actual device efficiency is limited by near-surface transport, surface roughness scattering, and contact resistance [7, 39, 40]. A large gap exists between bulk mobility and the inversion layer channel mobility (μinv) measured in real devices, primarily because high interface trap density (Dit) near the conduction band edge immobilizes carriers and causes strong Coulombic scattering [39, 42].

Reliability under repeated thermal and electrical stress is equally challenging. Microscopic defect propagation and interface degradation under high-field conditions directly cause threshold voltage shifts and bias temperature instability (BTI) [51]. Bulk transport analysis alone is therefore insufficient to predict real device behavior. Fully realizing SiC's efficiency advantages requires combining bulk defect reduction with advanced passivation at both the interface and contact level [39, 41, 51].

2. Porosity, Doping, and Sintering Effects

Porosity and Structural Regulation of Resistivity

Controlling the electrical resistivity of SiC-based ceramics is critical for designing heating elements, power hardware, and electromagnetic shielding components. By adjusting the doping profile and the microstructure of the material, resistivity can be tuned across a very wide range from fully insulating to highly conductive behavior [15]. Nitrogen is the main donor impurity, occupying carbon lattice sites to create n-type conductivity. However, in porous SiC matrices, the overall transport efficiency is significantly reduced by grain boundary scattering and the presence of secondary phases [15, 16, 52].

This reduction in conductivity is not a simple linear effect. As the volume fraction of pores increases, conductivity drops exponentially. This behavior follows percolation theory rather than a straightforward volumetric relationship [17]. The reason for this steep drop is a combination of two factors: the effective cross-sectional area available for conduction shrinks dramatically, and the path that current must follow becomes increasingly tortuous [17]. Importantly, detailed comparative analysis shows that the total amount of porosity is often less important than the shape and connectivity of the pores. The degree to which the SiC skeleton remains interconnected, and the ratio of open pores to closed pores, have a much greater influence on the final resistivity than the total pore volume percentage alone [15, 17].

Table 2. Processing and microstructural factors influencing the electrical properties of SiC ceramics

Processing Parameter / Feature	Applied Range / Condition	Impact on Electrical Conductivity / Resistivity	Underlying Physical Mechanism
Porosity Scaling	32% to 54% volume fraction	Exponential non-linear drop in conductivity	Restriction of effective conduction cross-section; increased path tortuosity matching percolation limits.
Liquid-Phase Sintering (LPS)	Oxide additives (Al2O3)	Elevated bulk resistivity	Formation of an amorphous, insulating intergranular film establishing an electrostatic potential barrier.
Conductive Phase Additives	Transition metal nitrides/ carbides (TiN, ZrN)	Suppression of resistivity down to ~10^{-2} Ω cm	Formation of conductive pathways/bridges across adjacent SiC grain junctions.
P-type Doping (Aluminum)	Acceptor activation (~ 90…250 meV)	High, non-linear temperature dependence of resistance	Incomplete carrier ionization at room temperature; requires heavy near-interface doping > 10^{19} cm^{-3}
Thermal Budget (Ceramic Composites)	Annealing at ~ 1600ºC	Irreversible surge in macro-resistivity	Thermal degradation of conductive secondary phases segregated at the grain boundaries.

Sintering Dynamics and Phase Engineering

The high-temperature process used to consolidate SiC powders into dense ceramics introduces important changes in electrical behavior. When Liquid-Phase Sintering (LPS) is performed using oxide additives such as Al_2O_3, an amorphous and electrically insulating secondary layer forms at the boundaries between grains [15, 16]. This intergranular film creates an electrostatic energy barrier that blocks electron tunneling between grains and raises the overall bulk resistivity compared to solid-state sintering alternatives. To overcome this barrier, recent research has introduced conductive transition metal nitrides or carbides – such as TiN or ZrN – as secondary additives [16]. These materials form conductive bridges between neighboring SiC grains, and can bring resistivity down to around 10^{-2} Ω·cm even in highly porous structures [16].

P-type Doping Challenges and Ohmic Junctions

Achieving efficient p-type conductivity in SiC through aluminum (Al) substitution remains one of the most difficult problems in the field. This challenge directly limits the current-carrying capability and forward voltage stability of kilovolt-class junction barrier Schottky (JBS) diodes [53]. During crystal growth, this requires careful control of the carbon-to-silicon transport ratio in top-seeded solution growth processes, in order to suppress the formation of defects [54]. The core problem is a fundamental physical one: aluminum acceptors in SiC have a high activation energy of approximately 190 to 250 meV, which means they cannot fully ionize at room temperature [40]. As a result, while n-type SiC devices show stable

and predictable carrier behavior, p-type devices exhibit a strong and non-linear dependence on temperature. To overcome this ionization barrier and form high-quality Ohmic contacts, very heavy doping near the interface (above 10^{19} cm^{-3}) is required, along with high-temperature annealing to enable field-emission tunneling. Using this approach, researchers have achieved a low specific contact resistance (R_c) in the range of 10^{-5} Ω·cm^2 [40].

Thermal Stability and Application Priorities

The research literature reveals two very different approaches to thermal treatment, depending on the type of SiC material being used. For single-crystal materials such as 6H-SiC, high-temperature annealing at 1600 °C is commonly applied to remove compensating point defects and stabilize the semi-insulating baseline behavior [50]. However, applying the same thermal conditions to SiC ceramic composites causes the opposite effect – it degrades the conductive secondary phases located at the grain boundaries, leading to an irreversible and large increase in bulk resistivity [15, 16]. This contrast points to a clear division in engineering goals. Single-crystal power electronics require uniform spatial distribution of dopants throughout the material. Functional ceramic structures, such as heatable filters or EMI absorbers, instead require precise control of grain boundary chemistry and pore geometry in order to maintain a stable balance between electrical performance and thermal processing limits [15, 16, 50].

3. Interface States and SiC/SiO_2 Properties (MOSFET Structures)

Interfacial Traps and Chemical Passivation Trade-offs

The performance of commercial SiC power MOSFETs is heavily limited by the electronic quality of the thermal SiC/SiO_2 interface, which acts as a critical bottleneck for carrier transport [5, 55]. Near the conduction band edge, the interface trap density (Dit) in SiC devices regularly exceeds the equivalent value at the classic Si/SiO_2 interface by roughly two orders of magnitude [39]. These interface traps arise primarily from localized carbon clusters, defects in the oxide near the interface, and stress introduced during thermal processing. They cause intense Coulombic scattering that pulls the inversion layer channel mobility (μinv) far below the theoretical bulk mobility values [7, 39, 56].

Reducing this problem requires targeted interface engineering strategies. Examples include CO_2 post-deposition annealing of sputtered oxides, or replacing the traditional gate dielectric with alternative materials such as Si_3N_4. However, each of these approaches involves trade-offs between improving mobility, maintaining threshold voltage (Vth) stability, and controlling defect density [57, 58]. The specific effects of different passivation methods on near-surface transport properties are summarized in Table 3.

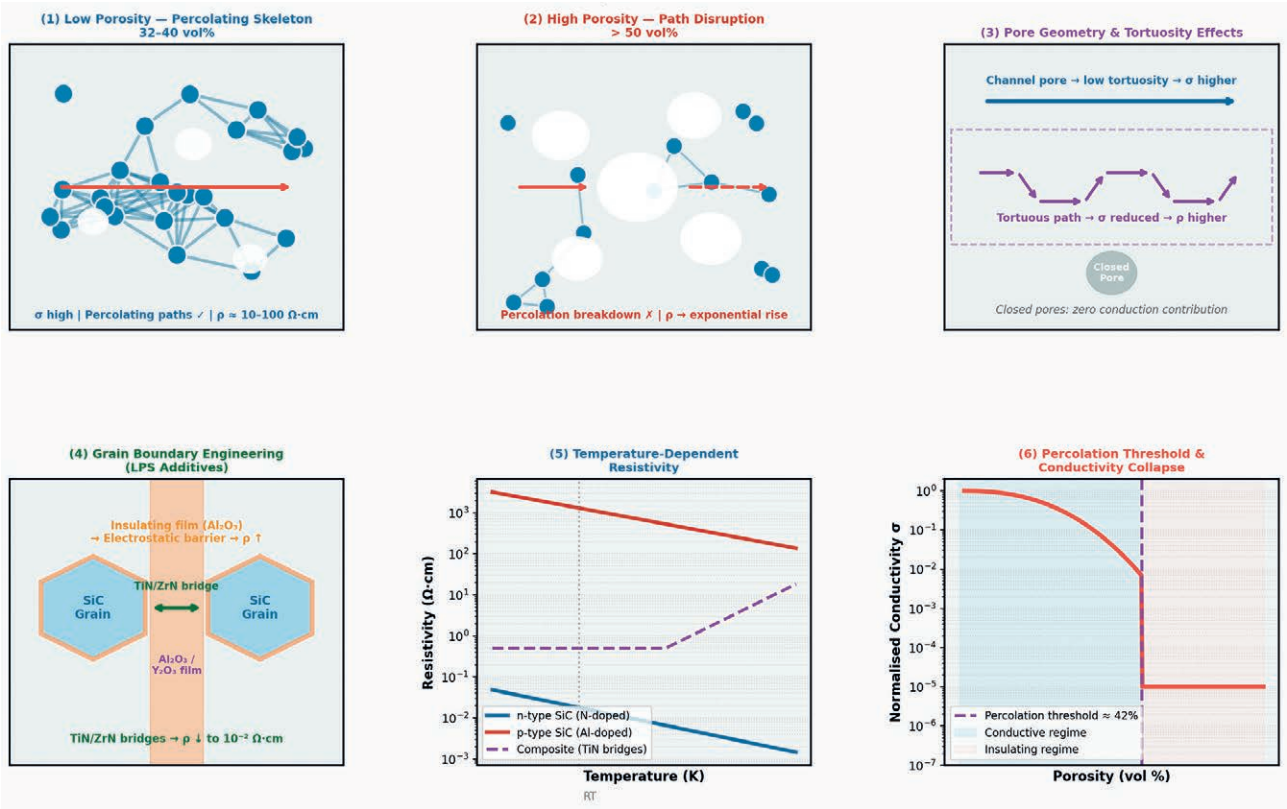


Figure 2. Microstructural and electrical effects in porous SiC ceramics: (1-2) percolation regimes, (3) pore geometry and tortuosity, (4) grain-boundary engineering, (5) temperature-dependent resistivity, (6) percolation threshold and conductivity collapse

Table 3. Comparative evaluation of interface passivation techniques on 4H-SiC MOSFET performance

Passivation Strategy / Condition	Interface Trap Density Dit ($cm^{-2}·eV^{-1}$)	Inversion Layer Channel Mobility μinv ($cm^2/V·s$)	Threshold Voltage (Vth) Stability	Dominant Reliability Limitation
Unpassivated Baseline	1012…1013	20…30	Poor	Severe Coulombic scattering; high near-interface trap capture.
Standard Nitrogen (NO Annealing)	Moderate reduction	35…40	Stable	Insufficient trap screening near the conduction band edge.
Phosphorus / Boron Passivation	Significant reduction	80…100	Unstable	Accelerated Vth drift; high vulnerability to bias temperature instability (BTI).
Advanced High-k Dielectrics	Variable	Highly structural dependent	Device specific	

Electrostatic Scaling, Strain, and Reliability Barriers

Apart from chemical approaches, near-surface carrier transport is also strongly affected by mechanical and structural design choices. For example, applying a uniaxial tensile strain to the material changes the curvature of the conduction band and reduces the electron effective mass. This results in a measurable boost in drain current of more than 10% [50].

From an architectural standpoint, vertical trench MOSFET layouts (UMOSFETs) can achieve higher current densities than planar designs (DMOSFETs). However, they also create intense localized electric field crowding at the trench corners, which reduces the net breakdown voltage by approximately 20% [50].

Long-term device reliability is also compromised by dynamic charge trapping effects. Defects located very close to the interface – often called «border traps» – along with slow-moving carbon defects, act as charge-trapping centers. Under sustained high-temperature operation at 175°C, these traps cause significant threshold voltage (Vth) shifts exceeding 0.5V [7, 42]. At the nanoscale level, switching to gate-all-around (GAA) nanowire MOSFET geometries (NW-FETs) offers excellent electrostatic control over the channel. This effectively eliminates short-channel effects and produces a high current switching ratio (I_{on}/I_{off}) greater than 10^6, which is useful for specialized high-temperature sensor applications [20]. However, these nanostructures are inherently limited by very small absolute current levels in the microampere range. This stands in sharp contrast to the kiloampere-level currents required by heavy-duty power modules [20, 39].

4. Electrical Properties of SiC-Based Nanocomposites and Films

Metal-Matrix Nanocomposites and Interfacial Transport

Designing SiC-reinforced metal-matrix composites (MMCs) requires finding the right balance between structural and thermal stability on one hand, and electrical conductivity on the other. When semi-insulating SiC particles are added to a highly conductive copper (Cu) matrix, the overall electrical conductivity of the composite decreases. This happens because the SiC-metal junctions scatter charge carriers, and because small residual pores remain in the microstructure [18]. However, research data shows that the shape and size of the SiC filler particles can help reduce this conductivity loss. Using nano-scale SiC particles instead of micro-scale particles helps maintain higher electrical conductivity at the same filler volume fraction. This is because smaller particles distribute more uniformly throughout the copper matrix, preventing the formation of large insulating clusters and keeping the overall resistivity within a narrow and manageable range [19]. Performance data for typical functional SiC-reinforced composites and films are organized in Table 4.

Table 4. Electrical performance parameters of various SiC-reinforced composites and thin films

Composite / Film System	Composition / Matrix	Key Electrical Metric Range	Primary Transport Modulation Mechanism
Metal-Matrix Composites (MMC)	Cu+SiC (2.5 to 7.5 vol.%)	Conductivity: 58 MS/m down to 46 MS/m	Structural carrier scattering at metal-filler junctions and residual micro-porosity.
Nano-filler Reinforced Matrix	Cu+50 nm SiC particles (10 wt.%)	Resistivity: 3.2 to 4.8 μΩ·cm	Uniform phase distribution suppressing macro-insulating aggregates (15% higher conductivity vs. micro-fillers).
Polymer Nanocomposites	PVA / PS matrix + SiC filler	Dielectric Constant (ε'): 5.4 up to 18.2 at 100 Hz	Formation of localized micro-capacitor networks triggering intense interfacial Maxwell-Wagner polarization.
Thin-Film Gas Sensors	Thin-film SiC (50 nm vs. 200 nm)	Response time: Drops from 45 sec down to 12 sec under H2	Surface-to-volume scaling ratios; accelerated gas adsorption and rapid surface charge exchange kinetics.
Al-Matrix Composites	Al+SiC (Over-sintered)	Severe spike in net electrical resistivity	Parasitic chemical reactions forming the highly non-conductive aluminum carbide (Al4C3) phase.

Dielectric Modulation, Thin-Film Sensors, and Consolidation Effects

In polymer-matrix systems designed for flexible shielding and high-frequency applications, the semi-

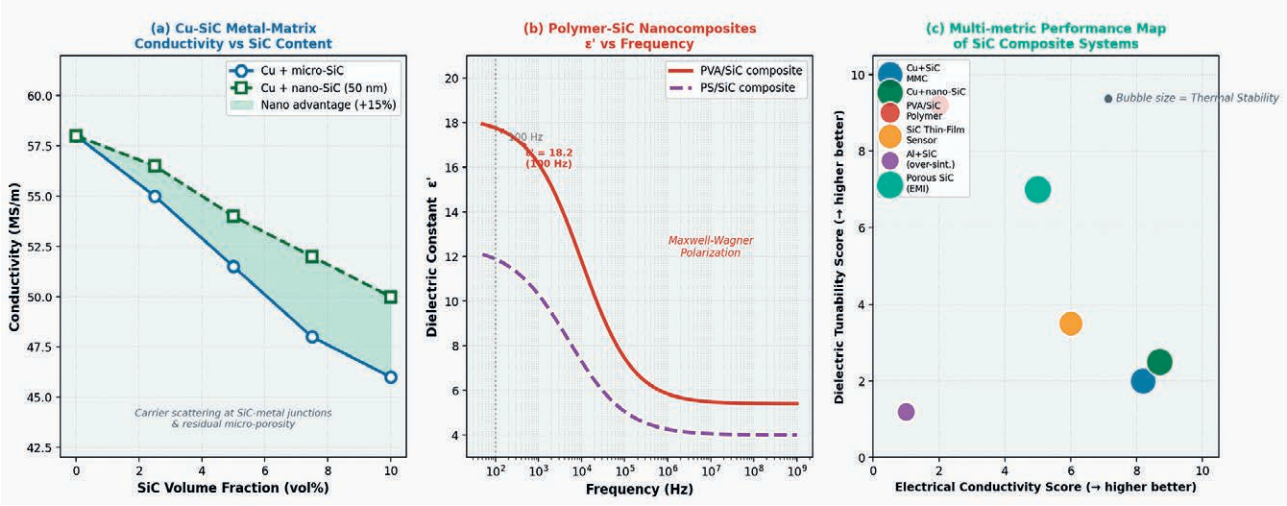


Figure 3. Electrical performance comparison of SiC-based composite systems: (a) Cu-SiC conductivity vs. filler content, (b) dielectric constant vs. frequency for polymer-SiC composites, (c) multi-metric performance map of SiC composite systems

insulating nature of SiC is used directly to tune dielectric properties. When SiC particles are added to polyvinyl alcohol (PVA) or polystyrene (PS) matrices, they create localized micro-capacitor networks that trigger strong interfacial polarization. Through this percolation mechanism, the baseline dielectric constant increases by more than 200%, rising from 5.4 up to 18.2 at 100 Hz, while also helping to map the thermo-kinetic boundaries of the compound [23, 59, 60].

For thin-film sensor applications, electrical transport is controlled primarily by the surface-to-volume ratio of the film rather than its bulk properties. In hydrogen (H_2) sensing films that show a 40% resistance change under 1000 ppm H_2 at 200 °C, reducing the film thickness from 200 nm down to 50 nm cuts the response time from 45 seconds to just 12 seconds. This improvement happens because thinner films allow faster gas adsorption and quicker surface charge exchange [21]. The overall transport efficiency of these composite structures also depends strongly on how the material is consolidated. Spark Plasma Sintering (SPS) produces electrical conductivity about 10% higher than standard powder metallurgy methods, because it creates better bonding between grains and reduces local contact resistance barriers [61].

5. Electronic Transport in Low-Dimensional SiC Nanostructures

In low-dimensional SiC structures, quantum confinement enables transport behaviors beyond bulk limits. Top-gated nanowire FETs (NW-FETs) deliver an exceptional switching ratio (I_{on}/I_{off}) of ~10^7 and subthreshold swing of 150 mV/dec at 300 °C – far exceeding planar MOSFETs [20]. Hollow nanotube geometries reduce the field-emission threshold further to 1.8 V/μm via tip-enhanced local fields [39], though surface oxygen functionalization can reduce conductivity tenfold by creating trap states [39].

This surface sensitivity becomes an asset in core-shell architectures. A graphitic shell of 2–10 nm grown around a SiC core boosts conductivity ~50-fold, reaching 2.4 S/cm [24]. In heteroepitaxial 3C-SiC nanolayers on silicon, keeping film thickness below 100 nm suppresses defect density and stabilizes electron mobility at 150…200 $cm^2/V \cdot s$ – unachievable in thick bulk films [11]. Confined silicon vacancies (VSi) achieve room-temperature spin-coherence times of ~1.1 ms, making them strong candidates for integrated quantum circuits [11, 22].

6. Electromagnetic Wave Absorption and Dielectric Loss Mechanisms

Microwave absorption in SiC materials requires careful permittivity optimization. Moderate resistivity of 10–100 Ω·cm is essential in porous SiC ceramics: too conductive causes metallic reflection; too resistive allows wave transmission [23]. Under optimized conditions, a 2.1 mm porous SiC layer achieves a reflection loss (RL) of −55.6 dB, corresponding to > 99.999% absorption efficiency [23].

To enhance dissipation without increasing surface reflection, carbon-shell coating of SiC nanofibers raises the imaginary permittivity (ε″) from 1.5 to 5.8, intensifying Maxwell-Wagner polarization loss [24]. Arranging these fibers into periodic nanochains broadens absorption bandwidth to 4.2 GHz in the X-band [62]. Adding just 5 wt% silver nanoparticles raises the real permittivity (ε′) to 12.8, enabling a 40% reduction in matching thickness while maintaining RL of −42 dB [63]. Aligning SiC nanofibers to match free-space impedance (377Ω) creates an LC-R metamaterial network achieving −62.4 dB reflection loss across the full Ku-band (12.4…18 GHz), outperforming all randomly oriented configurations [16, 17, 24, 26].

7. Radiation Hardness, High-Temperature Stability, and Defect Engineering

Under combined radiation and thermal stress, 4H-SiC significantly outperforms silicon. Where silicon fails under high neutron doses, 4H-SiC's wide bandgap stabilizes the lattice, keeping carrier concentration decay minimal [64]. In JBS diodes, radiation damage appears mainly as increased leakage current and higher forward voltage drop from vacancy-type defects in the drift layer [65]. Thermally, SiC maintains stable nanoampere-range leakage up to 250°C, while silicon junctions fail above 150 °C [42, 64].

Gate-oxide reliability remains a key weakness. At 175°C, 4H-SiC MOSFETs exhibit severe Bias Temperature Instability (BTI), producing threshold voltage (Vth) shifts larger than in silicon – evidence of dense near-interface border traps [42]. Controlling minority carrier lifetimes requires suppressing non-radiative recombination at carbon vacancies (VC) [66]. High-temperature annealing deactivates deep-level traps Z1/2 and EH6/7, improving carrier lifetime in bipolar devices [47]. Carbon-cap annealing and SF-KHII ion implantation further suppress stacking fault expansion, pushing PiN diode breakdown voltage beyond 20 kV [41, 51, 67]. Even porous SiC remains structurally stable at 1000 °C through spontaneous self-healing SiO_2 surface layer formation [17].

8. Advanced Processing and Contact Engineering

Realizing SiC's power potential requires precise control of contacts and consolidation. A fundamental asymmetry exists: nickel metallization forms low-resistance contacts on n-type SiC readily, but produces high resistivity on p-type SiC due to a large Schottky barrier – requiring high-temperature rapid thermal annealing to form conductive silicide phases [40]. Spark Plasma Sintering (SPS) surpasses conventional hot-pressing by using localized micro-plasma discharges to clean surface oxides and reduce inter-grain resistance [68], with extended milling times further improving phase homogeneity [18]. In aluminum-SiC systems, exceeding the optimal sintering temperature triggers formation of non-conductive Al_4C_3, sharply raising resistivity [19]. At the water level, chemical-mechanical polishing (CMP) to sub-nanometer roughness on 200 mm substrates is essential to prevent field crowding and maximize epitaxial layer breakdown performance [4].

9. Machine Learning Integration in SiC Crystal Growth and Defect Characterization

SiC manufacturing is shifting from manual inspection toward data-driven approaches, with machine learning (ML) applied in two complementary ways: downstream defect classification and upstream growth process control.

For post-growth quality control, Shi et al. [36] developed a CNN-based detection system that rapidly and accurately localizes crystallographic defects. However, Taha [35] highlighted a practical limitation: real-world performance drops when lighting conditions vary, surface backgrounds differ, or training datasets are imbalanced.

On the process control side, Petkovic et al. [37] showed that ML algorithms could replace computationally expensive multi-physics simulations by accurately predicting thermal fields and stress distributions during crystal growth. Azam et al. [38] extended this specifically to SiC, demonstrating real-time defect control during Physical Vapor Transport (PVT) by dynamically modeling temperature gradients and transport kinetics. Together, CNN-based inspection [35, 36] protects wafer quality at the screening stage, while ML-guided process control [37, 38] addresses defect prevention at the source – offering the most direct path to reducing dislocations and stacking faults before they form.

Conclusions

This review synthesizes cross-scale electronic transport and dielectric loss mechanisms in SiC-based systems, spanning bulk polytypes, porous ceramics, metal-matrix and polymer composites, and low-dimensional nanostructures. The analysis connects fundamental quantum confinement and morphological engineering effects to practical device performance, while documenting the field's industrial maturation toward 200 mm wafer production and renewed interest in 3C-SiC heteroepitaxy for MEMS and quantum applications.

Despite strong intrinsic material properties, several critical challenges continue to limit SiC device performance:

- high interface trap density (Dit) at the SiC/SiO_2 boundary reduces inversion-layer channel mobility to just 20…50 $cm^2/V \cdot s$;
- Bias Temperature Instability (BTI) causes threshold voltage shifts under combined thermal and electrical stress;
- p-type Ohmic contact resistance remains unacceptably high for bipolar power devices;
- Lifetime-limiting defects carbon vacancies (VC), deep-level traps (Z1/2, EH6/7), and Shockley stacking faults constrain high-voltage reliability.

Future work should prioritize three directions. First, atomic-level gate dielectric passivation using CO_2, NO, or phosphoryl chloride annealing – to push (Dit) below 10^{11} $cm^{-2}eV^{-1}$. Second, structural defect suppression via high-energy ion implantation (SF-KHII) prior to epitaxial growth. Third, integration of convolutional neural networks for automated wafer defect classification to maximize manufacturing yields. Expanding mesoscale composite engineering in polystyrene-based SiC nanocomposites also offers promising routes toward customizable dielectric and EMI shielding performance in extreme-environment systems.

The authors express their sincere gratitude to their research supervisor, Lala Gahramanli, for her invaluable guidance, continuous support, and leadership throughout the preparation and revision of this review.

References:

1. Matsunami, H. Progress in wide bandgap semiconductor SiC for power devices // Proceedings of the Japan Academy, Series B. – 2020. – Vol. 96, № 7. – P. 235–254.
2. Papanasam, S. et al. Radiation hardness of 4H-SiC power devices under neutron irradiation // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2022. – Vol. 69, № 3. – P. 345–352.
3. Pimpale, N. et al. Silicon carbide power electronics for electric vehicle applications // Journal of Power Electronics. – 2024. – Vol. 24. – P. 112–125.
4. Dong, A. et al. Advances in synthesis strategies and multifunctional applications of silicon carbide materials // AIMS Materials Science. – 2025. – Vol. 12, № 5. – P. 1069–1091.
5. Kimoto, T. et al. Fundamentals and Future Challenges of SiC Power Devices // 2025 9th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). – 2025. – P. 1–3.
6. Chen, J. et al. Progress and challenges in the manufacturing of 200 mm SiC wafers // Journal of Semiconductors. – 2023. – Vol. 44, № 6. – Art. 061801.
7. Langpoklakpam, C. et al. Review of Silicon Carbide Processing for Power MOSFET // Crystals. – 2022. – Vol. 12, № 2. – Art. 245.
8. Xiong, X. et al. Fabrication of 8-inch N-type 4H-SiC single crystal substrate with low dislocation density // Journal of Inorganic Materials. – 2023. – Vol. 38, № 11. – P. 1371–1372.
9. Harris, G. L. Properties of Silicon Carbide. – London : INSPEC; IEE, 1995. – 298 p.
10. Falk, A. L. et al. Polytype control of spin defects in silicon carbide // Nature Communications. – 2013. – Vol. 4. – Art. 1819.
11. La Via, F. et al. 3C-SiC Heteroepitaxy on Silicon: Progress and Challenges // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 3. – Art. 1123.
12. Via, F. L. et al. New approaches and understandings in the growth of cubic silicon carbide // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 18. – P. 5348.
13. Xu, J. et al. Recent Progress on Preparation of 3C-SiC Single Crystal // Journal of Inorganic Materials. – 2026. – Vol. 41, № 1. – P. 1–11.
14. Garofalo, A. et al. Heteroepitaxial 3C-SiC for MEMS Applications // Micromachines. – 2026. – Vol. 17, № 4. – P. 502.
15. Anwar, S. et al. Controlling the electrical conductivity of SiC ceramics: A review // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol. 42, № 13. – P. 5215–5232.
16. Kim, Y.-W. et al. Electrical properties of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics: a review // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2020. – Vol. 45, № 1. – P. 66–84.
17. Kultayeva, S. et al. Electrical and thermal properties of porous silicon carbide ceramics // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, № 11. – P. 18234–18241.
18. Akbarpour, M. R. et al. Microstructure and electrical conductivity of Cu–SiC nanocomposites // Materials Today Communications. – 2023. – Vol. 35. – Art. 105654.
19. Moustafa, E. B., Taha, M. A. Electrical and mechanical properties of Cu–SiC nanocomposites // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 3412–3425.
20. Zekentes, K. et al. SiC Nanowires: A Review on Synthesis, Properties, and Applications // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12, № 11. – Art. 1845.
21. Kumar, M. et al. Hydrogen sensing properties of SiC thin films at high temperatures // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2020. – Vol. 312. – Art. 127985.
22. Castelletto, S., Boretti, A. Silicon carbide color centers for quantum applications // Journal of Physics: Photonics. – 2020. – Vol. 2, № 2. – Art. 022001.
23. Zhang, Y. et al. Microwave absorption properties of porous SiC ceramics // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – Vol. 970. – Art. 172567.
24. Shen, Y. et al. SiC–C core-shell nanofibers for electromagnetic wave absorption // Carbon. – 2020. – Vol. 162. – P. 445–455.
25. Jin, H. et al. Metamaterial-based SiC composites for superior EMI shielding // Advanced Functional Materials. – 2025. – Vol. 35. – Art. 2400123.
26. Tsunenobu, K. Silicon carbide power devices // Japanese Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 54, № 4. – Art. 040103.
27. Saggio, M. et al. SiC power devices: market and technology trends // IEEE Nanotechnology Magazine. – 2020. – Vol. 14. – P. 12–21.
28. Millán, J. et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27. – P. 396–409.
29. Bai, Z. et al. Advances and Perspectives in Gate Dielectric Thin Films for 4H-SiC MOSFETs // Materials. – 2026. – Vol. 19, № 4. – P. 766.
30. Siddiqui, A., Khosa, R. Y., Usman, M. High-k dielectrics for 4H-silicon carbide: present status and future perspectives // Journal of Materials Chemistry C. – 2021. – Vol. 9, № 15. – P. 5055–5081.
31. Das, S. et al. Trap passivation of 4H-SiC/SiO2 interfaces by nitrogen annealing // Journal of Applied Physics. – 2023. – Vol. 133, № 21. – Art. 215302.
32. Brzozowski, E. et al. Carrier trap density reduction at SiO2/4H-silicon carbide interface with annealing processes in phosphoryl chloride and nitride oxide atmospheres // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 12. – P. 4381.
33. Fang, M. et al. Characterization of Interface Properties of 4H-SiC (0001) MOS Structures Grown by Dry Oxygen Oxidation and NO Annealing // 2025 IEEE 32nd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA). – 2025. – P. 1–5.
34. Huang, C. Y., Hong-Ru, S., Min-Yan, X. Attention-Enhanced YOLOv8-Seg with WGAN-GP-Based Generative Data Augmentation for High-Precision Surface Defect Detection on Coarsely Ground SiC Wafers // Computers, Materials, & Continua. – 2026. – Vol. 87, № 2. – P. 115–130.
35. Taha, K. Observational and experimental insights into machine learning-based defect classification in wafers // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2026. – Vol. 37, № 1. – P. 45–95.

36. Shi, H. et al. High-performance one-stage detector for SiC crystal defects based on convolutional neural network // Knowledge-Based Systems. – 2023. – Vol. 280. – P. 110994.
37. Petkovic, M., Vieira, L., Dropka, N. Machine learning in crystal growth: A review of methods, data, and applications // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. – 2025. – Vol. 71, № 4. – P. 100689.
38. Azam, M., Wang, J., Su, W. Advances in SiC Growth Mechanisms and Defects Control Strategies Enhanced by Machine Learning Perspective // Materials Today Communications. – 2025. – Art. 113995.
39. Pande, P. et al. A review of 4H-SiC MOSFET interface traps and mobility degradation // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 13245–13258.
40. Huang, M. et al. Ohmic contacts to p-type 4H-SiC: A review // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2020. – Vol. 115. – Art. 105123.
41. Kimoto, T., Watanabe, H. Defect engineering in SiC for high-voltage power devices // Applied Physics Express. – 2020. – Vol. 13, № 12. – Art. 120101.
42. Waltl, M. Reliability and instability of SiC MOSFETs: From defects to devices // Microelectronics Reliability. – 2020. – Vol. 114. – Art. 113745.
43. Bozhko, S. et al. High-resolution electron microscopy of SiC grain boundaries // Philosophical Magazine. – 2021. – Vol. 101. – P. 456–472.
44. Kim, J. et al. High-temperature performance of SiC Schottky barrier diodes // Solid-State Electronics. – 2021. – Vol. 175. – Art. 107932.
45. Lebedev, A. A. Deep level centers in silicon carbide: A review // Semiconductors. – 1999. – Vol. 33, № 2. – P. 107–130.
46. Nishio, J., Ota, C., Iijima, R. Effect of basal plane dislocation structures on single Shockley-type stacking fault expansion rate in 4H-SiC // Japanese Journal of Applied Physics. – 2024. – Vol. 63, № 2. – P. 020802.
47. Xu, Z. et al. Evaluation of deep levels in 4H-SiC epi-layers and their impact on device performance // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, № 16. – Art. 165702.
48. Hou, P. et al. An electronic energy model for multi-stacking faults in reducing carrier lifetime in 4H-SiC epitaxial layers // Journal of Crystal Growth. – 2025. – Vol. 650. – P. 128005.
49. Wang, P. et al. Stacking faults in 4H–SiC epilayers and IGBTs // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2024. – Vol. 177. – P. 108369.
50. Wu, J. et al. Impact of mechanical stress on the electrical characteristics of SiC MOSFETs // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, № 8. – P. 9412–9421.
51. Kato, M., Harada, S., Sakane, H. Stacking Fault Knocking-Down by High-Energy Ion Implantation (SF-KHII) Method to Fabricate Reliable SiC Devices // 2025 22nd International Workshop on Junction Technology (IWJT). – 2025. – P. 1–2.
52. Kawanishi, S. et al. Quantification of nitrogen in heavily doped silicon carbide by soft X-ray emission spectroscopy // Journal of Crystal Growth. – 2023. – Vol. 619. – P. 127345.
53. Kong, L. et al. Fabrication and Characterization of Kilovolt p-Type SiC JBS Diodes With Enhanced Current Capability and Electroluminescence Phenomenon // IEEE Electron Device Letters. – 2024. – Vol. 45, № 9. – P. 1566–1569.
54. Tong, Z. et al. Optimization of carbon transport and growth rates in top-seeded solution growth of Al-doped SiC // CrystEngComm. – 2025. – Vol. 27, № 1. – P. 90–101.
55. Chi, X. et al. Modeling of SiC(0001) n-Channel MOSFETs Based on Comprehensive Understanding of Electron Scattering Mechanism // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2025. – Vol. 72, № 12. – P. 6494–6502.
56. Kumar, P. et al. Electrically active defects induced by thermal oxidation and post-oxidation annealing of n-type 4H-SiC // Journal of Applied Physics. – 2024. – Vol. 135, № 18. – Art. 185701.
57. Kil, T. H. et al. Design of SiO2/4H–SiC MOS interfaces by sputter deposition of SiO2 followed by high-temperature CO2-post deposition annealing // AIP Advances. – 2023. – Vol. 13, № 11. – Art. 113902.
58. Mim, N. F. et al. Performance Analysis of Silicon Carbide MOSFETs Using Silicon Dioxide and Silicon Nitride Gate Dielectrics // 2025 4th International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). – 2025. – P. 377–381.
59. Tene, T. et al. Correlating Structure, Optical, and Dielectric Properties in SiC/PS Nanocomposites With Varying SiC Filler Concentrations // Advances in Materials Science and Engineering. – 2026. – Vol. 2026, № 1. – Art. 2255405.
60. Gahramanli, L. et al. Dielectric and thermo-kinetic properties of SiC/PS composite: Depending on the filler concentration // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2026.
61. Shaikh, M. B. N. et al. Spark plasma sintering of Al–SiC composites: Processing and properties // Surfaces and Interfaces. – 2020. – Vol. 20. – Art. 100598.
62. Zhang, H. et al. Electromagnetic wave absorption of SiC nanochains // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 415. – Art. 129035.
63. Wei, B. et al. The effect of Ag nanoparticles on dielectric properties of SiC // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, № 5. – P. 5788–5798.
64.Zhang, L. et al. Neutron radiation effect on 4H-SiC MESFETs and SBDs // Journal of Semiconductors. – 2010. – Vol. 31, № 11. – P. 114006.
65. Li, H. et al. Mechanism of electrical performance degradation of 4H-SiC junction barrier Schottky diodes induced by neutron irradiation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2024. – Vol. 554. – P. 165452.
66. Jiang, X. et al. Carrier lifetime killer in 4H-SiC: carrier capture path via carbon vacancies // Journal of Materials Chemistry C. – 2025. – Vol. 13, № 11. – P. 5575–5581.
67. Lee, T.-H. et al. Analysis of Electrical Characteristics due to Deep Level Defects in 4H-SiC PiN Diodes // Korean Journal of Materials Research. – 2024. – Vol. 34, № 2. – P. 111–115.
68. Mousavi, S. M. et al. Comparison of SPS and hot-pressing for SiC composites // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 68. – P. 1254–1262.

ОБЗОР: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

С.Н. Гамидова*, В.У. Мамедов

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

** E-mail для контактов: hamidova.sevinc.natiq@bsu.edu.az*

Данный обзор посвящён кросс-масштабному анализу электронного транспорта и диэлектрических потерь в системах на основе карбида кремния; также рассмотрены три основные формы кристалла: 4H-SiC, 6H-SiC и 3C-SiC. Лучшим для мощных устройств считается 4H-SiC. Главная проблема – это дефекты на границе SiC и оксида кремния (SiO_2), которые снижают проводимость транзисторов. Также сложно создавать качественные контакты для p-типа и обеспечивать стабильность при длительной работе. На наноуровне SiC используется в квантовых вычислениях и датчиках. В композитах с металлами и полимерами SiC используется для поглощения электромагнитных волн и теплоотвода. Нейросети помогают автоматически выявлять дефекты на пластинах диаметром 200 мм. Главный вывод: будущее SiC-технологий не в улучшении самого кристалла, а в точном контроле его поверхностей и границ.

Ключевые слова: *SiC, электрические свойства, широкий запрещённый промежуток, перенос заряда, интерфейсные ловушки, нанокомпозиты, омические контакты, силовая электроника, высокотемпературные устройства.*

ШОЛУ: КРЕМНИЙ КАРБИДІ (SIC)НЕГІЗІНДЕГІ КОМПОЗИТТІК МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЭЛЕКТРЛІК ҚАСИЕТТЕРІ

С.Н. Гамидова*, В.У. Мамедов

Баку мемлекеттік университеті, Баку, Әзербайжан

** Байланыс үшін e-mail: hamidova.sevinc.natiq@bsu.edu.az*

Бұл шолу кремний карбиді негізіндегі жүйелердегі электрондық тасымал мен диэлектрлік шығындарды әртүрлі масштабтар деңгейінде кешенді талдауға арналған. Сонымен қатар үш негізгі кристалл түрі қарастырылды: 4H-SiC, 6H-SiC және 3C-SiC. Қуатты құрылғылар үшін ең жақсысы 4H-SiC. Басты мәселе SiC пен SiO_2 арасындағы шекарадағы ақаулар, олар транзисторлардың өткізгіштігін төмендетеді. Сонымен қатар p-типті контактілер жасау және ұзақ жұмыс кезіндегі тұрақтылықты қамтамасыз ету қиын болып қалып отыр. Наноденгейде SiC кванттық есептеулерде және сенсорларда қолданылады. Металл және полимер композиттерінде электромагниттік толқындарды жұту және жылуды бөлу үшін пайдаланылады. Жасанды нейрондық желілер 200 мм пластиналардағы ақауларды автоматты түрде анықтауға көмектеседі.

Түйін сөздер: *SiC, электрлік қасиеттер, кең тыйым салынған аймақ, заряд тасымалы, интерфейс тұзақтары, нанокомпозиттер, омикалық контактілер, қуатты электроника, жоғары температуралық құрылғылар.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-15-27
УДК 504.064.36:550.424:556.531

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШАГАН (ОТ АТОМНОГО ОЗЕРА ДО РЕКИ ИРТЫШ)

М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова*, Н.В. Ларионова, С.Е. Сальменбаев, С.Д. Смирнов, Н.К. Нургайсинова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: zhymanova.13@mail.ru*

В работе представлены результаты исследования валового содержания микроэлементов и распределения их по формам нахождения в донных отложениях нижнего течения реки Шаган. Проанализировано 20 проб, отобранных в десяти створах на участке от выхода реки из Атомного озера до впадения в реку Иртыш. Распределение валового содержания элементов вдоль русла характеризуется выраженной неоднородностью. Для Li, Al, Cr, La, Ce и Mn локальные максимумы преимущественно отмечены на участке 66–96 км. Для Ga и Ba повышенные содержания характерны для начальной части обследованного отрезка, тогда как U и Mo характеризуются несколькими разобщёнными максимумами. Установлено распределение микроэлементов между шестью операционно определяемыми фракциями: водорастворимой, обменной, слабоспецифически сорбированной, связанной с органическим веществом, связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца и остаточной. Валовое содержание большинства элементов, за исключением Ga, ниже их кларковых значений в верхней части континентальной коры. Суммарная доля элементов, извлекаемых H_2O, $Ca(NO_3)_2$ и NaOH, составляет менее 20%. Для многих исследуемых элементов более 70% валового содержания сосредоточено в труднорастворимых формах.

Ключевые слова: *донные отложения, формы нахождения элементов, микроэлементы, Атомное озеро, нижнее течение, река Шаган.*

Введение

Река Шаган является левобережным притоком Иртыша и пересекает восточную часть территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Сама река не образует отдельную речную систему площадки «Балапан»; с этой площадкой связан лишь участок её течения в районе проведения подземных ядерных испытаний. В результате промышленного ядерного взрыва с выбросом грунта, проведённого 15 января 1965 г. в месте слияния рек Шаган и Ащису, был образован искусственный водоём Атомное озеро [1–3].

Площадь водосборного бассейна реки Шаган составляет около 10 000 км². Общая протяжённость основного русла достигает 275 км, тогда как длина одного из её крупнейших притоков – реки Ащису – составляет приблизительно 115 км. Река берёт начало на склонах хребта Канчингиз (система Чингизтау). В пределах территории СИП длина русла реки составляет около 50 км. Питание реки Шаган и её притоков преимущественно снеговое, при этом в верхних участках водосбора заметную роль играют грунтовые воды, что определяет выраженную сезонность водного режима. В верхнем течении вода характеризуется пресным составом, однако после впадения притока Ащису отмечается увеличение минерализации, вследствие чего вода приобретает солоноватый характер. Русло реки отличается сравнительно небольшой скоростью течения и наличием многочисленных разветвлений, тупиковых заводей и участков с заболачиванием берегов. Особенностью рассматриваемого водотока является периодическое исчезновение поверхностного стока на отдельных участках. Так, на расстоянии примерно от 12–15 до 30–40 км ниже Атомного озера русло реки Шаган местами пересыхает, после чего вновь появляется ниже по течению [2].

В настоящее время в долине реки Шаган осуществляется круглогодичный выпас отар овец и табунов лошадей, а также заготовка сена. Вода реки Шаган из-за высокого солесодержания не используется местным населением для питьевых целей, но река является местом водопоя сельскохозяйственных животных. В верховьях реки находится около 30 зимовок для скота. Следует отметить, что в 20 километрах от русла реки Шаган функционирует угольный разрез «Каражыра», продукция которого поставляется на электростанции и предприятия России, Казахстана и Киргизии.

Донные отложения (ДО) являются объектом депонирования химических элементов и отражают накопленное за длительный период загрязнение. Изучение химического состава ДО позволяет оценить геохимическую картину содержания, распределения и переноса элементов в водной среде, исследовать вариативность форм нахождения элементов в различных соединениях, определить способность химических элементов к миграции, осаждению и биоаккумуляции. Скопление химических элементов, особенно тяжёлых металлов и токсичных соединений, в донных осадках

может негативно влиять на качество воды за счёт возможного вторичного загрязнения, обусловленного высвобождением микроэлементов из осадков в воду.

Цель работы – определить валовое содержание микроэлементов, установить их формы нахождения и выявить особенности изменения содержания вдоль русла в донных отложениях нижнего течения реки Шаган на участке от Атомного озера до реки Иртыш.

Материалы и методы

Объекты исследования

В нижнем течении реки Шаган отобрано 20 проб донных отложений в десяти створах на участке от выхода русла из Атомного озера до места впадения в реку Иртыш (рисунок 1). Отсчёт расстояний по руслу в настоящей работе ведётся от выхода реки из Атомного озера, а не от географического истока реки.

Точки отбора выбраны по маршрутно-систематическому принципу, который заключался в последовательном размещении створов вдоль всей обследуемой протяжённости русла с учётом доступности участков устойчивого накопления тонкодисперсного донного материала. В каждом из десяти створов отбирали по две пробы. Такая схема позволила сопоставить верхнюю часть обследуемого отрезка, среднюю зону с повышенной извилистостью русла и нижнюю приустьевую часть. Участки выше Атомного озера и русло в пределах площадки «Балапан» в данное исследование не включались; поэтому работа характеризует современное состояние нижнего течения, но не претендует на оценку трансформации всей геосистемы реки вследствие ядерных испытаний.

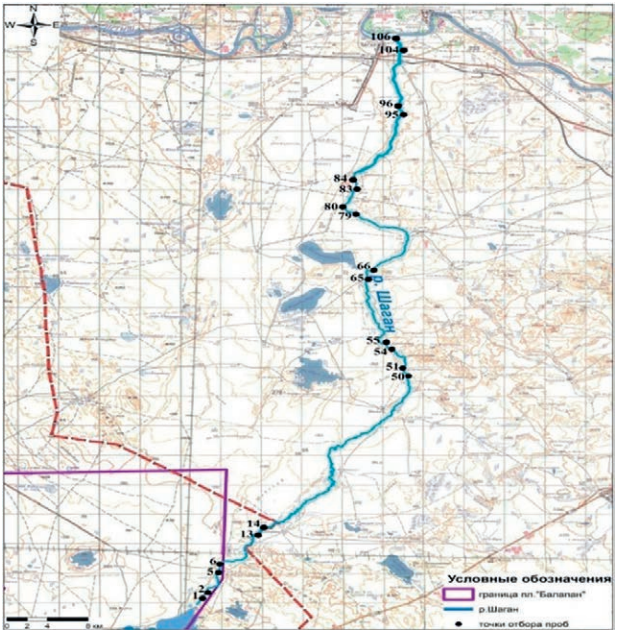


Рисунок 1. Расположение точек отбора проб донных отложений в нижнем течении реки Шаган. Фиолетовой линией показана граница площадки «Балапан»

Отбор проб

Пробы отбирали методом укола из поверхностного слоя донных отложений 0–5 см на площади 100 см² согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость». Пробы высушивали естественным путём при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, затем просеивали через полиамидное сито с диаметром отверстий 1 мм. Из гомогенизированного материала методом многократного квартования отбирали навеску массой 5 г для последовательного экстрагирования.

Подготовка проб

В настоящее время для определения форм нахождения химических элементов в донных осадках применяется широкий спектр схем последовательного экстрагирования. Данный метод основан на поэтапном выделении различных форм элементов из одной навески пробы с использованием серии экстрагентов возрастающей химической активности от наиболее мягких реагентов к более сильным.

В соответствии с применённой схемой последовательного экстрагирования содержание элементов определяли в шести операционно выделяемых фракциях: водорастворимой, обменной, слабоспецифически сорбированной, связанной с органическим веществом, ассоциированной с оксидами и гидроксидами железа и марганца, а также остаточной [4–7].

В ходе последовательного экстрагирования образцы подвергаются обработке различными селективными растворителями, обеспечивающими постепенное извлечение элементов из всё более устойчивых фаз, вплоть до их высвобождения из кристаллической решётки минералов. В качестве селективных экстрагентов использовались реактивы, предложенные рядом исследователей [4, 5], перечень которых приведён в таблице 1.

Таблица 1. Формы нахождения элементов в донных осадках и соответствующие условия их выделения

№ п/п	Название формы соединений	Экстрагент	Условное обозначение	Время
1	Водорастворимая	H_2O	ХЭводн.	1 час
2	Обменная	0,1М $Ca(NO_3)_2$	ХЭобмен.	1 час
3	Слабо специфически сорбированная	3% CH_3COOH	ХЭсп.сорб.	1 час
4	Связанная с органическим веществом	0,1М NaOH	ХЭорг.	1 час
5	Связанная с оксидами/ гидроксидами железа и марганца (осадочная форма)	Тамма (0,2М $(NH_4)2(C_2O_4)$+ $0,2MC_2H_2O_4$)	ХЭокс/ гидрокс Fe и Mn	1 час в темноте
6	Остаточная	HF (конц.)+ 7М HNO_3	ХЭост.	-

Соотношение «донные осадки / экстрагент» составляло 1:10 при времени воздействия 1 час с перемешиванием на ротаторе. После экстракции жидкую фазу отделяли центрифугированием в течение 10 минут при скорости 4000–6000 об/мин, после чего остаток промывали дистиллированной водой.

Количественное определение химических элементов в выделенных фракциях выполняли методом ICP-MS на квадрупольных масс-спектрометрах Agilent 7700x и Elan 9000, а также методом ICP-AES на спектрометре iCAP 6300 Duo. Анализ проб донных отложений проводили в соответствии с методикой ISO 17294-2:2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные сопоставляли с кларками элементов в верхней части континентальной коры по Григорьеву [8], а также с их предельно допустимыми концентрациями в почве [9]. Валовое содержание и содержание элементов в выделенных формах в донных отложениях реки Шаган представлены в таблице 2.

Таблица 2. Распределение элементов по формам в донных осадках реки Шаган (последовательное экстрагирование), мг/кг

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [9]	Кларк [8]
	МеХЭводн. min-max	МеХЭобм. min-max	МеХЭсп.сорб. min-max	МеХЭорг. min-max	МеХЭокс/гидрокс Fe и Mn. min-max	МеХЭост. min-max			
Li	0,030 0,01–0,31	0,08 0,02–0,25	0,10 0,03–0,83	0,03 0,01–0,09	0,26 0,10–1,6	4,8 4,3–11,2	5,3	–	30
Be	<0,0001	<0,0001	0,03 0,02–0,11	0,0006	0,05 0,02–0,13	0,97 0,87–1,17	1,06	–	2,1
Mg	87 30–380	105 88–540	210 9,7–1300	29 22–230	134 46–437	1040 600–2100	1600	–	17700
Al	1,20 0,15–6,25	1,4 0,3–3,2	45,0 4,5–134,0	3,6 1,3–26,0	220 84–1030	13070 10700–18300	13300	–	76000
Sc	0,0010 0,0004–0,0020	0,005 0,004–0,008	0,020 0,006–0,090	0,009	0,25 0,08–0,73	0,99 0,70–1,80	1,27	–	15
V	0,020 0,008–0,040	0,006 0,002–0,010	0,19 0,05–2,30	0,49 0,03–0,73	7 1–19	48 33–79	55	150	120
Cr	<0,001	0,017 0,016–0,019	0,15 0,03–0,81	<0,001	1,6 0,3–4,5	19 13–57	21	200	150
Mn	0,7 0,1–5,4	3,6 0,6–29,0	79 16–1750	0,4 0,1–88,0	60 13–280	144 86–260	288	1500	670
Fe	0,8 0,1–3,9	0,8 0,3–1,5	94 9–820	3,5 0,9–31,0	2500 345–6560	15600 10600–27200	18200	–	40600
Co	0,0023 0,0005–0,0280	0,0050 0,0003–0,0220	0,50 0,05–2,60	0,019 0,003–0,080	1,1 0,4–3,1	2,8 1,7–5,6	4,4	100	17
Ni	0,019 0,003–0,080	0,020 0,003–0,073	0,6 0,3–3,1	0,025 0,007–0,090	1,3 0,5–4,3	7,4 4,6–21,0	9,3	100	62
Cu	0,030 0,015–0,210	0,011 0,001–0,060	0,59 0,15–1,1	0,15 0,04–0,43	1,6 0,6–6,3	12 8–15	14	100	39
Zn	0,040 0,009–0,120	0,10 0,03–0,34	0,54 0,25–2,1	<0,001	1,8 0,6–7,2	14 9–20	16	300	78
Ga	0,005 0,002–0,020	<0,0001	1,6 0,9–4,0	0,03 0,01–0,48	0,7 0,4–1,5	33 22–42	35	–	19
Ge	0,0007 0,0002–0,0020	0,0010 0,0002–0,0030	0,02 0,01–0,14	<0,0001	0,16 0,04–0,40	1,1 0,7–2,4	1,3	–	1,4
As	0,02 0,01–0,05	0,004 0,001–0,010	0,10 0,06–0,60	0,20 0,01–0,80	1,6 0,5–5,1	2,9 1,9–5,8	4,8	20	6,5
Rb	0,006 0,003–0,013	0,003 0,001–0,014	0,013 0,010–0,026	0,010 0,005–0,026	0,04 0,03–0,40	6,3 2,6–10,8	6,3	–	110
Sr	3,6 1,0–23,3	8 3–41	28 7–232	0,9 0,3–12,0	0,5 0,3–0,6	112 43–174	153	–	270
Mo	0,045 0,006–0,370	0,015 0,003–0,100	0,003 0,002–0,012	0,07 0,01–0,48	0,25 0,10–2,60	0,46 0,35–0,70	0,84	50,0	1,5
Cd	0,0003 0,00020– 0,00060	0,0007 0,0004–0,0027	0,02 0,01–0,11	0,0004 0,0002–0,0031	0,008 0,004–0,081	0,07 0,05–0,13	0,10	3,0	0,3

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [9]	Кларк [8]
	МеХЭводн. min-max	МеХЭобм. min-max	МеХЭсп.сорб. min-max	МеХЭорг. min-max	МеХЭокс/гидрокс Fe и Mn. min-max	МеХЭост. min-max			
Cs	0,0003 0,0002–0,0007	<0,0001	<0,0001	0,0003 0,0002–0,0017	0,002 0,001–0,010	0,14 0,09–0,45	0,14	–	4
Ba	0,14 0,06–0,65	<0,01	22 2–61	0,9 0,4–14,0	15 10–39	542 274–691	580	–	510
La	0,0004 0,0002–0,0012	<0,0001	0,3 0,1–2,1	0,0030 0,0002–0,0120	0,12 0,05–0,30	1,2 0,9–2,7	1,6	–	32
Ce	0,0008 0,0002–0,0027	<0,0001	0,8 0,3–4,6	0,0095 0,0005–0,034	0,25 0,08–0,70	3,5 2,5–6,6	4,6	–	63
Pr	<0,0001	<0,0001	0,07 0,04–0,40	0,0007 0,0002–0,0030	0,03 0,01–0,06	0,37 0,30–0,70	0,47	–	8,7
Nd	0,0005 0,0002–0,0012	<0,0001	0,4 0,2–2,3	0,003 0,001–0,015	0,12 0,05–0,30	2,0 1,5–3,5	2,5	–	29
Sm	0,0003 0,0001–0,0004	<0,0001	0,09 0,04–0,50	0,0007 0,0002–0,0030	0,03 0,01–0,07	0,44 0,34–0,77	0,56	–	5,7
Eu	<0,0001	<0,0001	0,02 0,01–0,10	0,0005 0,0002–0,0016	0,008 0,004–0,022	0,18 0,13–0,22	0,20	–	1,3
Gd	0,0002 0,0002–0,0003	<0,0001	0,10 0,05–0,50	0,0008 0,0003–0,0032	0,040 0,020–0,120	0,47 0,36–0,76	0,60	–	6,2
Dy	0,0002 0,0002–0,0003	<0,0001	0,07 0,04–0,40	0,0006 0,0003–0,0020	0,05 0,03–0,17	0,38 0,32–0,60	0,50	–	4,8
Ho	<0,001	<0,0001	0,01 0,01–0,05	0,0003 0,0002–0,0004	0,009 0,006–0,035	0,08 0,06–0,10	0,10	–	1,6
Pb	0,003 0,001–0,010	<0,001	0,30 0,03–0,90	0,005 0,004–0,006	0,5 0,2–2,4	3,5 2,4–6,5	4,3	32	17
Bi	<0,001	<0,001	0,002 0,0003–0,0100	<0,001	0,014 0,004–0,030	0,04 0,02–0,07	0,05	–	0,33
Th	<0,0001	0,00030 0,0002–0,0030	0,0060 0,0004–0,1100	0,0030 0,0002–0,0040	0,5 0,3–1,5	0,20 0,12–0,34	0,70	–	9,3
U	0,007 0,001–0,100	0,004 0,001–0,070	0,20 0,03–2,40	0,030 0,001–0,260	0,12 0,03–1,70	0,28 0,21–0,53	0,65	–	2,5

Примечание. Приведены медиана (Me), минимальное (min) и максимальное (max) значения для обследованного участка; «–» – литературные данные отсутствуют.

Анализ представленных данных показал, что валовое содержание большинства исследуемых элементов, за исключением Ga, ниже их кларковых значений в верхней части континентальной коры. При этом содержание Ga характеризуется двухкратным превышением кларка для данного элемента, тогда как концентрации Ge и Ba в донных отложениях находятся на уровне их кларковых значений.

Распределение валового содержания элементов вдоль русла по 20 точкам отбора представлено на рисунках 2 и 3.

Профили построены по валовому содержанию элементов в зависимости от расстояния по руслу; началом отсчёта принято место выхода реки из Атомного озера. Квадратами показаны отдельные пробы, линией – общая пространственная тенденция.

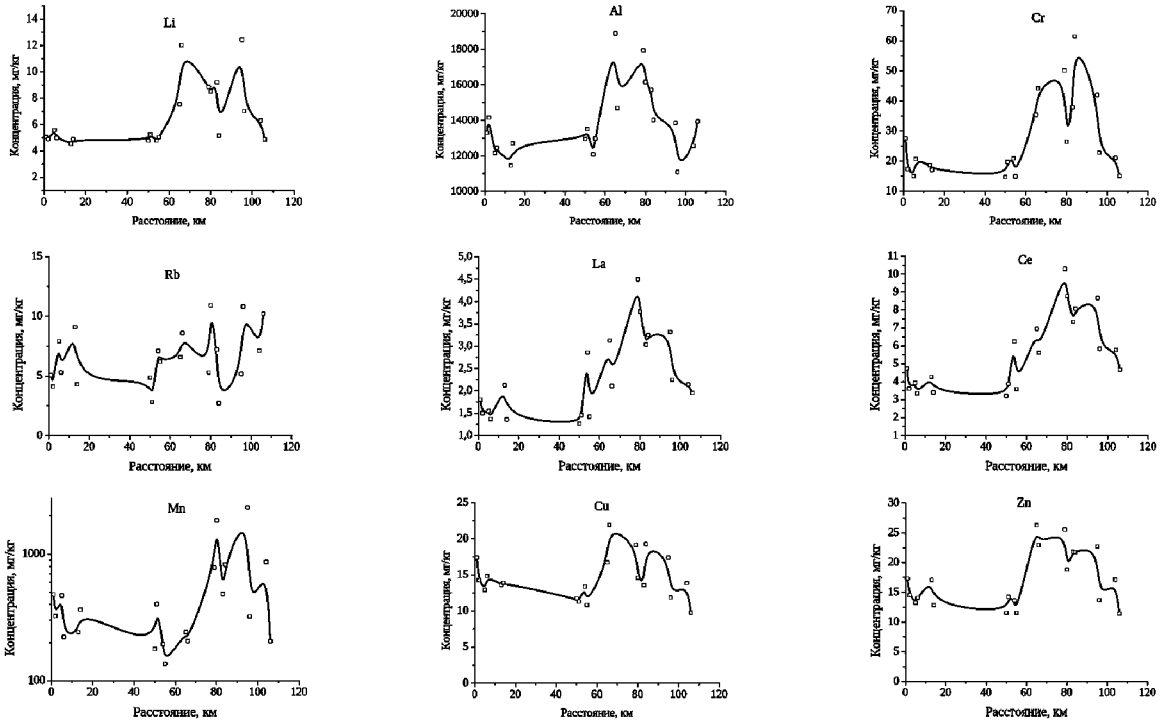


Рисунок 2. Пространственное распределение валового содержания Li, Al, Cr, Rb, La, Ce, Mn, Cu и Zn в донных отложениях реки Шаган

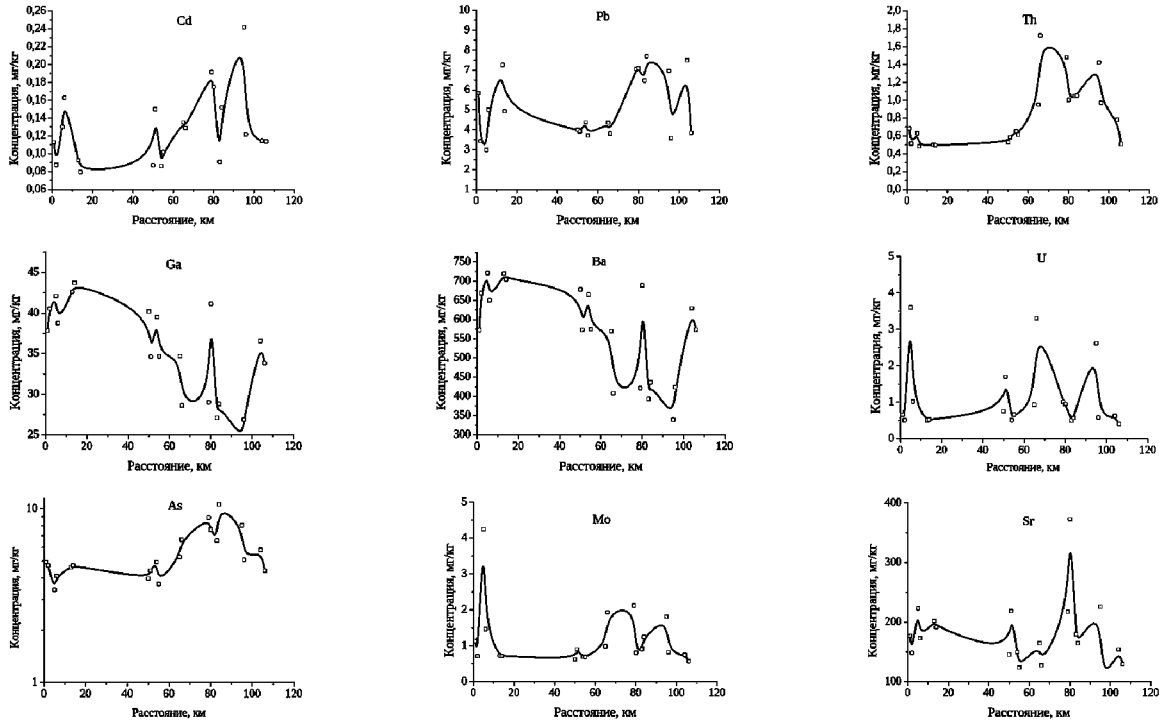
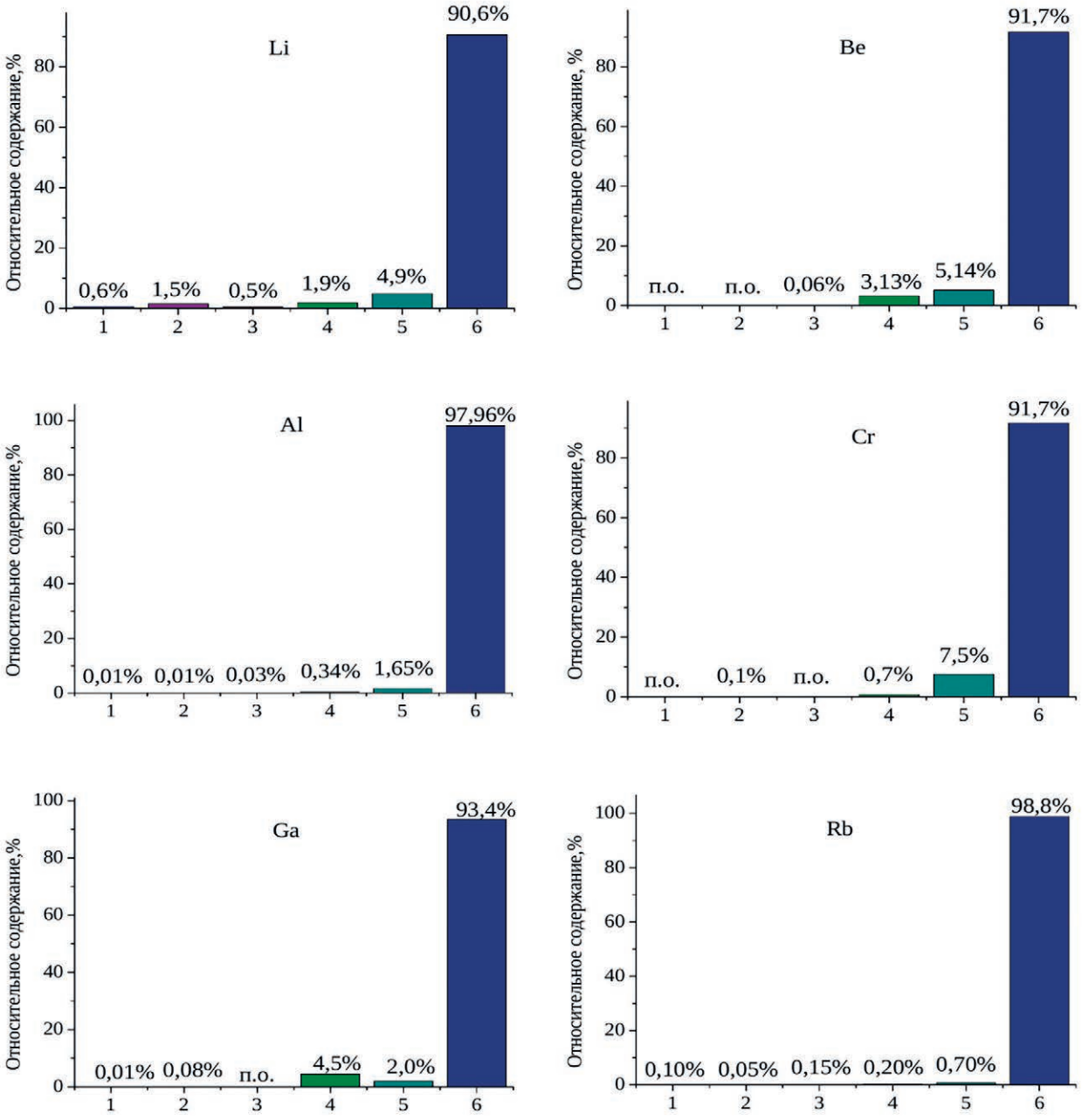


Рисунок 3. Пространственное распределение валового содержания Cd, Pb, Th, Ga, Ba, U, As, Mo и Sr в донных отложениях реки Шаган

Профили показывают отсутствие единого интервала максимального накопления для всех элементов. Повышенные содержания Li, Al, Cr, La, Ce, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, Th и As преимущественно отмечены на расстоянии 66–96 км от выхода реки из Атомного озера. Это может быть связано с сочетанием извилистости русла, локальных расширений и участков пониженной скорости течения, способствующих осаждению мелкодисперсного материала. Для Ga и Ba характерны более высокие значения в начальной части профиля, для Mo и U – отдельные максимумы в верхнем и нижнем течении; поэтому их распределение нельзя описывать только общим интервалом 66–96 км. Такая интерпретация является предположительной и требует проверки, поскольку скорость течения, гранулометрический состав и физико-химические свойства осадков в каждой точке не определялись.

Исследование распределения элементов по формам нахождения показало, что в донных отложениях изученных участков реки Шаган выделяется группа элементов, преимущественно связанная с труднорастворимыми фракциями, что указывает на их относительно низкую миграционную способность (рисунок 4).



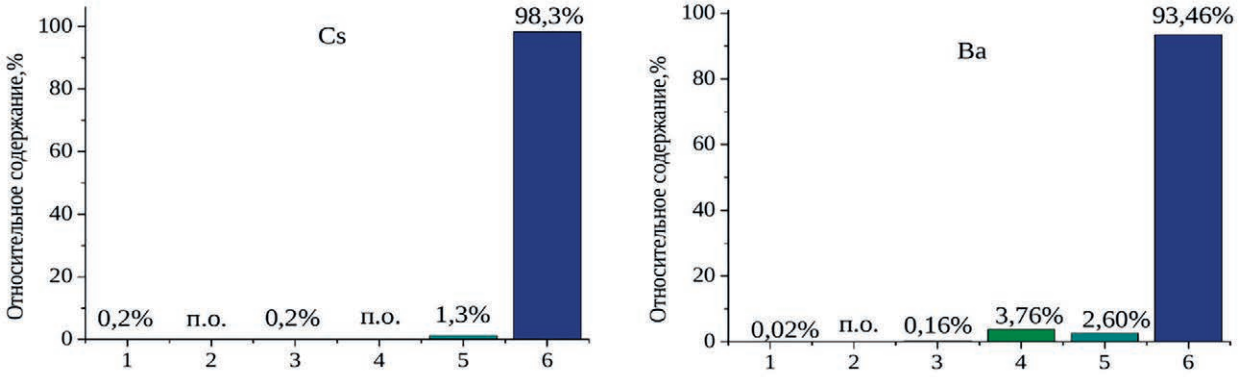
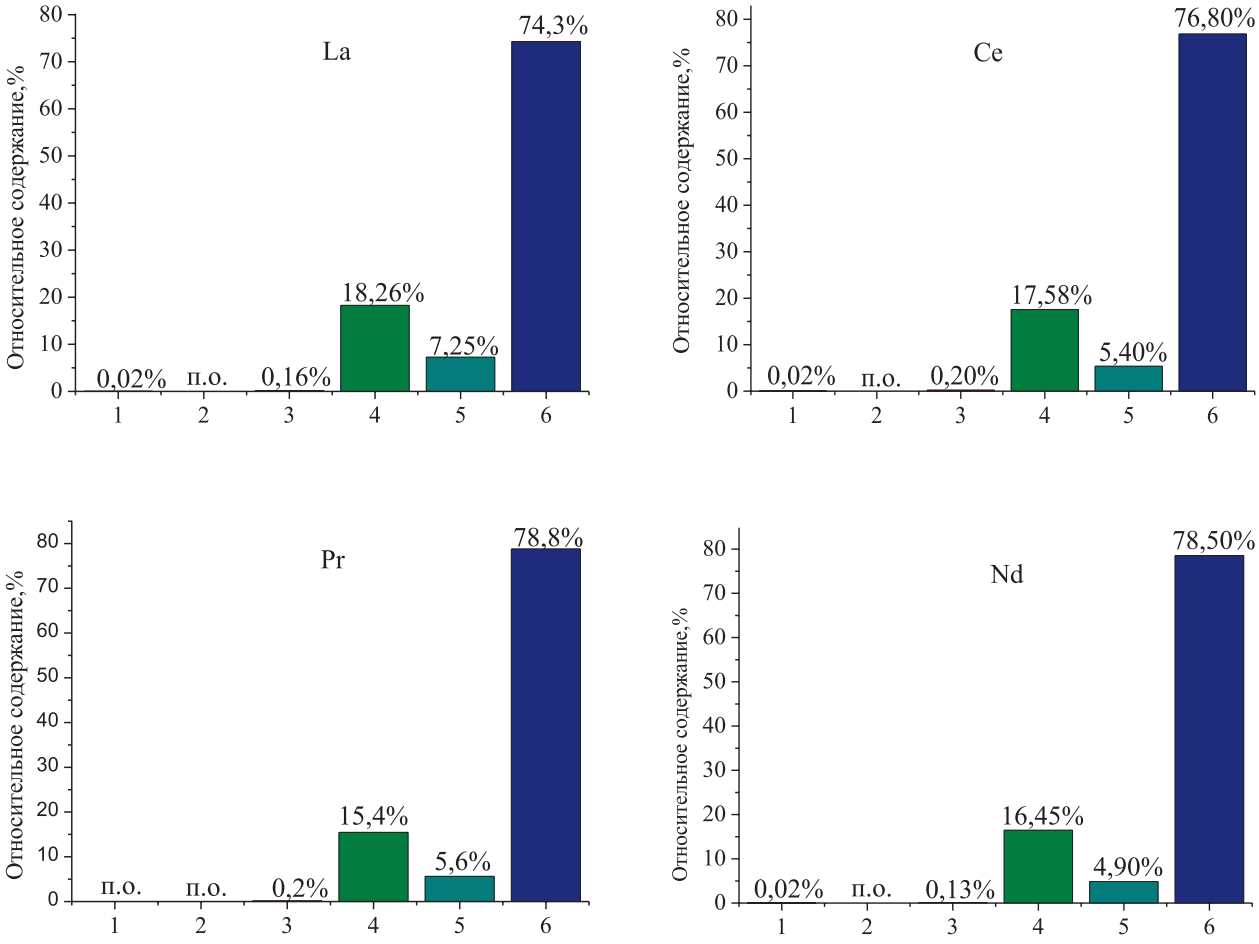


Рисунок 4. Формы нахождения Li, Be, Al, Cr, Ga, Rb, Cs и Ba в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

Примечание: здесь и далее (рис. 4–13) 1 – водорастворимая, 2 – обменная, 3 – связанная с органическим веществом, 4 – слабоспецифически сорбированная, 5 – связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца, 6 – остаточная.

Для Li, Be, Al, Cr, Ga, Rb, Cs и Ba более 90% валового содержания сосредоточено в труднорастворимой фракции. У РЗЭ и Cd доля слабоспецифически сорбированной и оксидно-гидроксидной фракций суммарно составляет 20…30%, однако преобладает остаточная форма (рисунок 5), что указывает на их преимущественную связь с устойчивыми минеральными фазами.

Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) и Cd по формам нахождения представлено на рисунке 5.



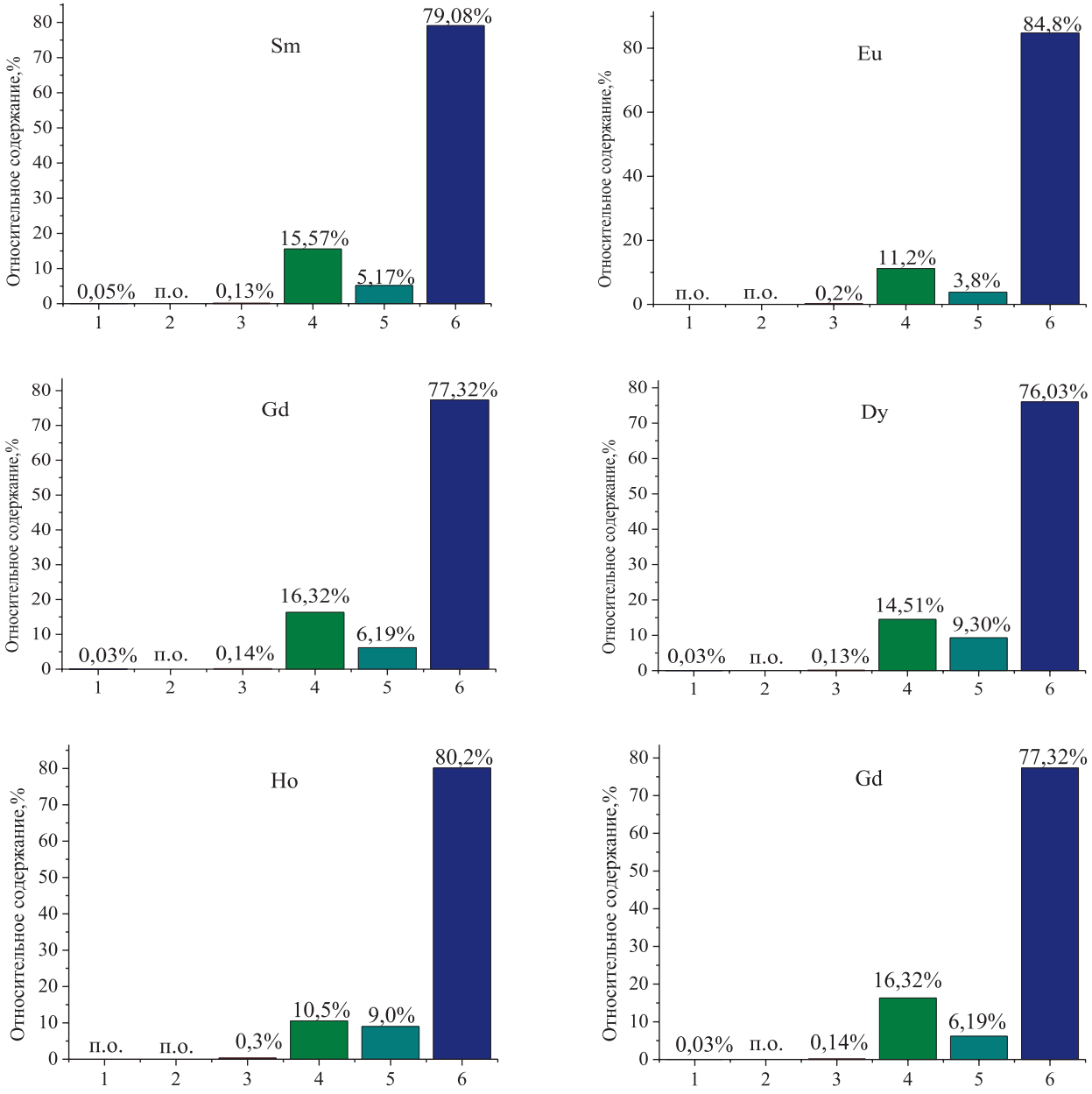


Рисунок 5. Распределение РЗЭ и Cd по формам присутствия в донных осадках реки Шаган (% от валового содержания)

Марганец распределён главным образом между слабоспецифически сорбированной формой (около 30%), оксидами и гидроксидами Fe и Mn (около 40%) и остаточной фракцией (около 28%). Для урана соответствующие доли составляют 32, 20 и 43%, ещё около 5% связано с органическим веществом (рисунок 6). Следовательно, заметная часть Mn и U потенциально подвижна при изменении окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий.

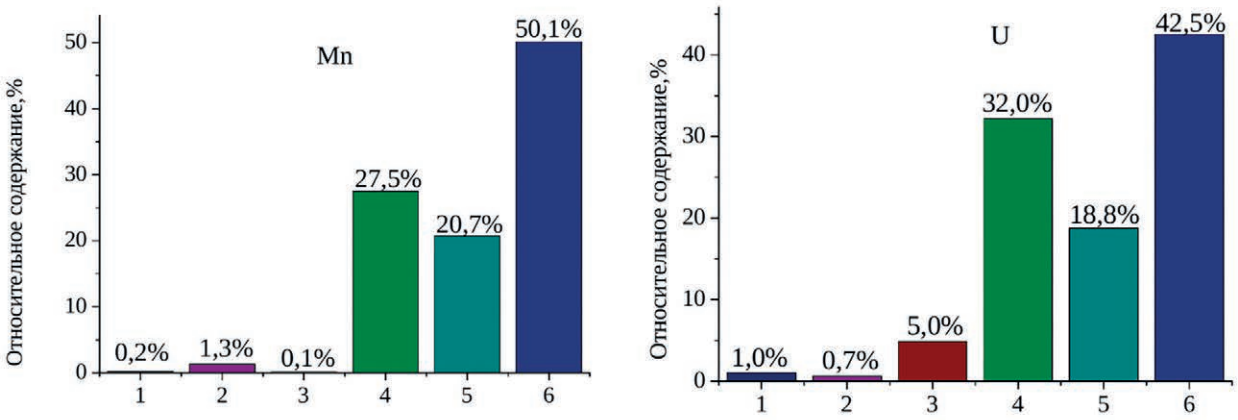


Рисунок 6. Распределение Mn и U по формам присутствия в донных осадках реки Шаган (% от валового содержания)

Ванадий и железо преимущественно сосредоточены в остаточной фракции: более 10% связано с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, а доля слабоспецифически сорбированной формы не превышает 0,30 и 0,52% соответственно (рисунок 7).

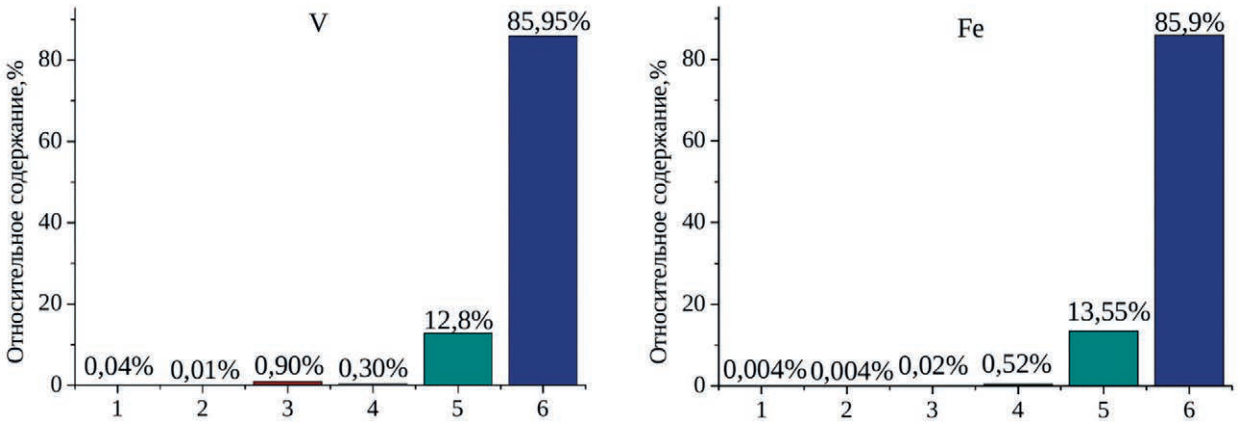
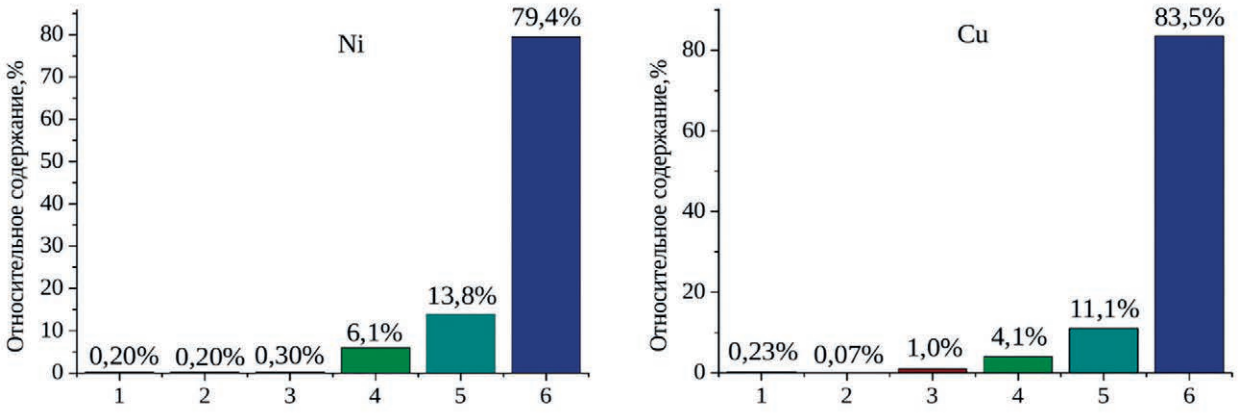


Рисунок 7. Формы нахождения V и Fe в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

На рисунке 8 приведено распределение тяжёлых металлов (Ni, Cu, Zn, Pb) по фракциям (% от валового содержания).



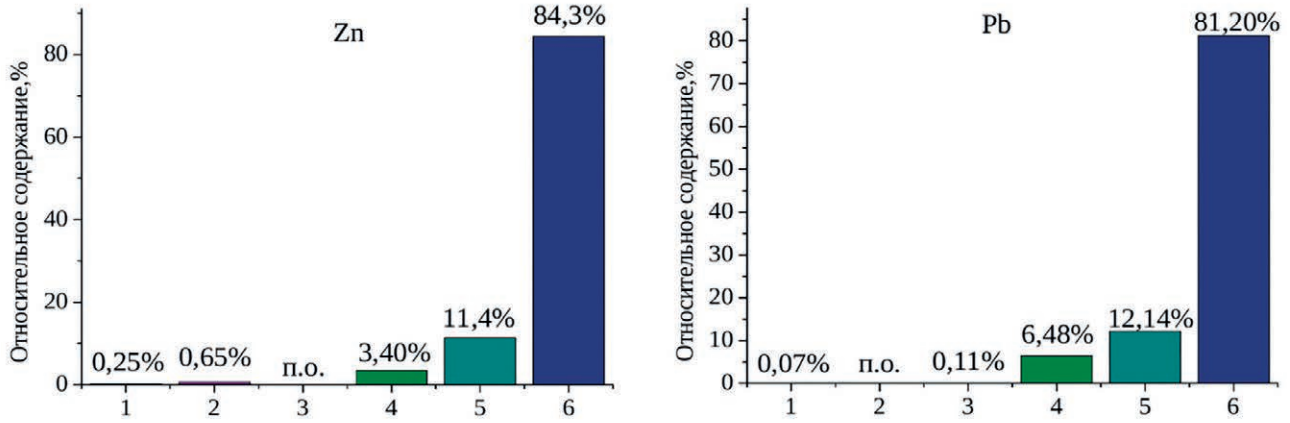


Рисунок 8. Формы соединений Ni, Cu, Zn и Pb в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

Для Ni, Cu, Zn и Pb доля водорастворимой и обменной фракций составляет менее 1%, слабоспецифически сорбированной – 3…6,5%, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn – 11…14% (рисунок 8). Не менее 80% этих металлов приходится на прочно связанные формы. Органически связанный Zn не обнаружен. Распределение может зависеть от минерального и гранулометрического состава, органического вещества, железомарганцевых оксидов и pH. Отсутствие измерений этих параметров ограничивает причинную интерпретацию.

Стронций и магний преимущественно связаны с остаточной фракцией. Для Sr её доля превышает 70%. Около 20% приходится на слабоспецифически сорбированную форму и 0,3% – на оксиды и гидроксиды Fe и Mn (рисунок 9). Для Mg раствором Тамма извлекается 8,4%, а с органическим веществом связано около 2% (рисунок 10).

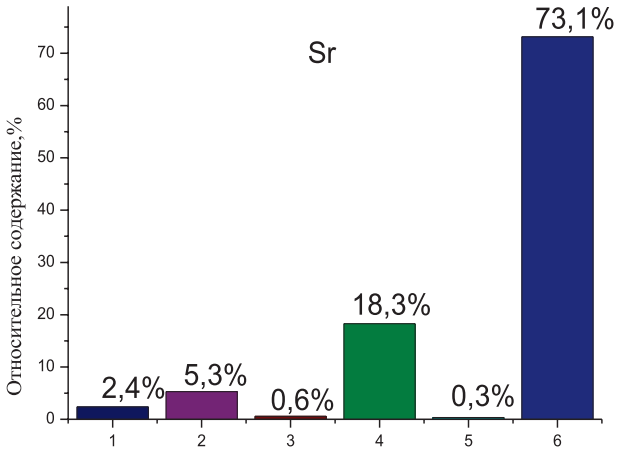


Рисунок 9. Формы соединений Sr в донных отложениях реки Шаган (в % от валового содержания)

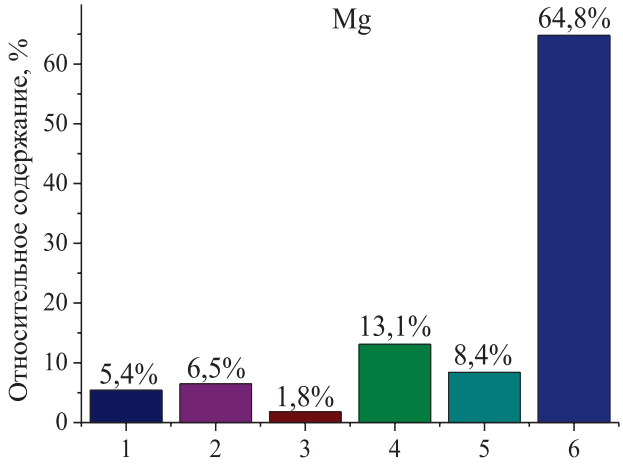


Рисунок 10. Формы соединений Mg в донных отложениях реки Шаган (в % от валового содержания)

У As и Mo около 60% валового содержания приходится на остаточную фракцию, 25…30% – на оксиды и гидроксиды Fe и Mn. Органически связанная доля составляет до 5% для As и более 8% для Mo. Молибден более подвижен: в водорастворимой и обменной формах извлекается около 5,3 и 2% соответственно (рисунок 11). У Co и Bi более 60% связано с остаточной фракцией и около 30% – с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (рисунок 12). Торий преимущественно приурочен к оксидно-гидроксидной фракции (около 70%), а его остаточная доля составляет около 30% (рисунок 13).

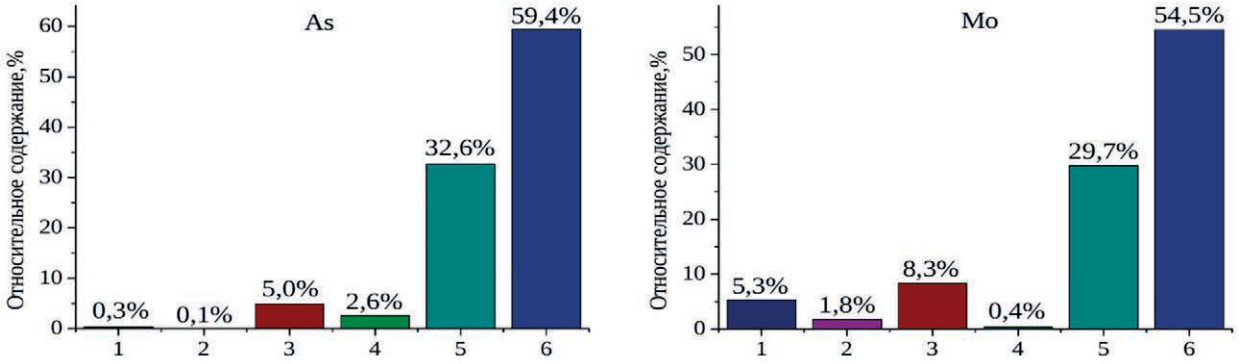


Рисунок 11. Формы соединений As и Mo в донных осадках реки Шаган (в % от валового содержания)

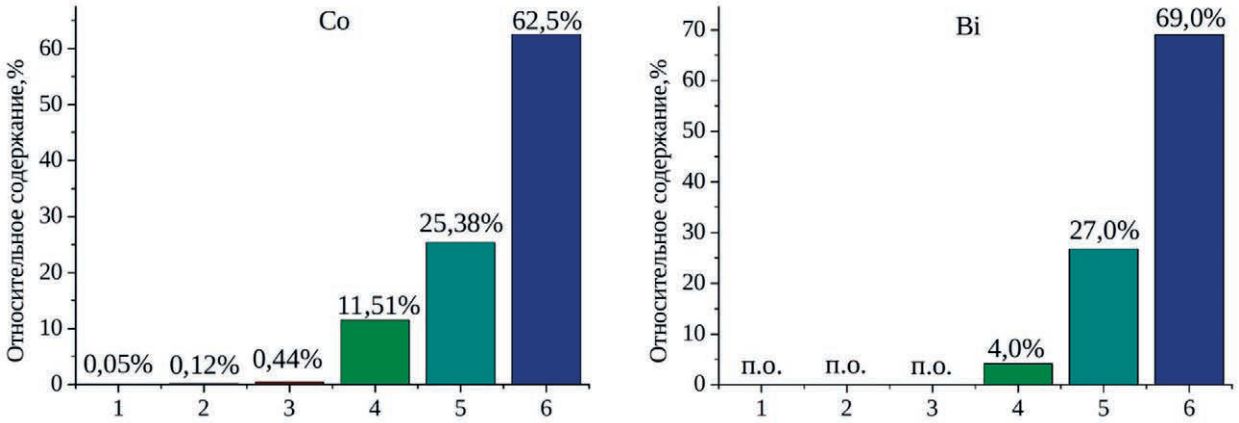


Рисунок 12. Формы соединений Co и Bi в донных осадках реки Шаган (% от валового содержания)

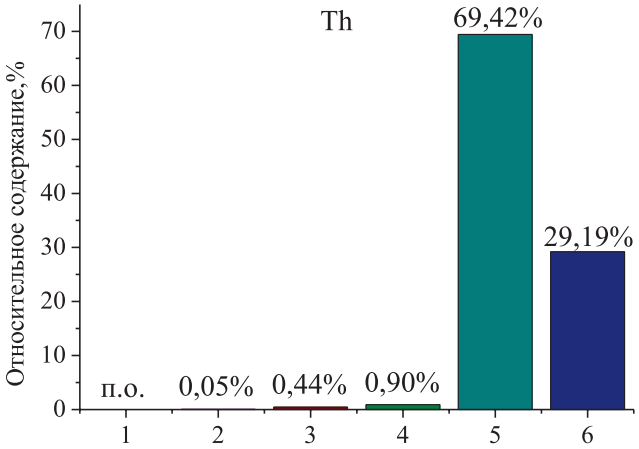


Рисунок 13. Формы нахождения Th в донных отложениях реки Шаган (% от валового содержания)

В донных отложениях нижнего течения реки Шаган большинство исследованных элементов связано главным образом с остаточной фракцией, а также с оксидами и гидроксидами железа и марганца. Визуализация валового содержания по точкам отбора показала неоднородное и элемент-специфичное пространственное распределение. Локальные максимумы Li, Al, Cr, La, Ce и Mn преимущественно приурочены к интервалу 66–96 км от выхода реки из Атомного озера. Для Ga и Ba более высокие значения характерны для начальной части обследованного участка, а распределение U и Mo включает несколько разобщённых максимумов. Следовательно, выделение единой зоны максимального накопления для всей совокупности элементов некорректно. Распределение водорастворимой и обменной форм большинства элементов по обследованному участку сходно, тогда как остаточная фракция и форма, связанная с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, часто изменяются разнонаправленно. Работа ограничена участком от Атомного озера до Иртыша. Отсутствие контрольных проб выше территории СИП, данных по участку русла в пределах площадки «Балапан», скорости течения, гранулометрическому составу, pH, Eh и содержанию органического вещества не позволяет использовать результаты для количественной оценки трансформации всей геосистемы реки.

Данные исследования финансировались Агентством Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713), а также грантового финансирования AP19576259 «Экологическая оценка малых рек как показатель трансформации геосистем горнодобывающих районов Восточного Казахстана»

Литература:

1. Березин С.А. и др. Мирные ядерные взрывы на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – №7(3). – С. 57–62.
2. Дюсембаева М.Т. Эколого-геохимические особенности некоторых водных объектов Семипалатинского испытательного полигона / М.Т. Дюсембаева, Н.Ж. Мухамедияров, Г.М. Есильканов, А.Ж. Ташекова, А.О. Айдарханов. – Курчатов: ИД «Интеллект», 2023. – 268 с.
3. Батырбеков Э.Г., Айдарханов А.О., Витюк В.А. и др. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография. – Курчатов, 2021. – 340 с.
4. Tessier A, Rapin F., Garignan R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides // Gechim.et Cosmochim. Acta. – 1985. –Vol. 49, No. 1.
5. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 682–692.
6. Ю.С. Восель, В.Д. Страховенко, И.В. Макарова «Формы нахождения урана в озерных донных отложениях разного типа. Байкальский регион» // Материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4–8 июня 2013 г. – С. 130–134.
7. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. Диссертация на соискание ученной степени доктора биологических наук. Москва – 2016.
8. Н.А. Григорьев – Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
9. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы (ГН 2.1.7.2041-06). – М.: Информ.-издат. Центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006.
10. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 288 с.
11. Bauer M., Blodau C. Arsenic distribution in the dissolved, colloidal and particulatesize fraction of experimental solution srich in dissolved organic matterasndferriciron // Geochim. Cosmochim.Acta. – 2009. –Vol .73. – No. 3.– P. 529–542.
12. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

References

1. Berezin S.A., et al. Peaceful nuclear explosions on the territory of Kazakhstan. Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2001; 7(3): 57–62.
2. Dyussembayeva M.T., Mukhamediyarov N.Zh., Yesilkanov G.M., Tashekova A.Zh., Aidarkhanov A.O. Ecological and geochemical features of some water bodies of the Semipalatinsk Test Site. Kurchatov: Intellectual Publishing House; 2023. 268 p.
3. Batyrbekov E.G., Aidarkhanov A.O., Vityuk V.A., et al. Comprehensive radioecological survey of the Semipalatinsk Test Site: monograph. Kurchatov; 2021. 340 p.
4. Tessier A., Rapin F., Garignan R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1985; 49(1).
5. Ladonin D.V. Heavy metal compounds in soils: problems and methods of study. Eurasian Soil Science. 2002; (6): 682–692.
6. Vosel Yu.S., Strakhovenko V.D., Makarova I.V. Forms of uranium occurrence in lake bottom sediments of different types: Baikal region. In: Proceedings of the IV International Conference. Tomsk; 4–8 June 2013. p. 130–134.
7. Ladonin D.V. Forms of heavy metal compounds in technogenically contaminated soils. Doctoral Dissertation in Biological Sciences. Moscow; 2016.
8. Grigoriev N.A. Average content of chemical elements in rocks composing the upper continental crust. Geochemistry International. 2003; (7): 785–792.
9. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soils: hygienic standards GN 2.1.7.2041-06. Moscow: Informational Publishing Center of the State Committee for Sanitary and Epidemiological Supervision of Russia; 2006.

10. Moore J., Ramamoorthy S. Heavy metals in natural waters: applied monitoring and impact assessment. Moscow: Mir Publishers; 1987. 288 p.
11. Bauer M., Blodau C. Arsenic distribution in the dissolved, colloidal and particulate size fractions of experimental solutions rich in dissolved organic matter and ferric iron. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009; 73(3): 529–542.
12. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moscow: Mir Publishers; 1989. 439 p.

ШАҒАН ӨЗЕНІНІҢ ТӨМЕНГІ АҒЫСЫНДАҒЫ ТҰПТІК ШӨГІНДІЛЕРДЕГІ МИКРОЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ КЕЗДЕСУ ФОРМАЛАРЫ (АТОМ КӨЛІНЕН ЕРТІС ӨЗЕНІНЕ ДЕЙІН)

М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова*, Н.В. Ларионова, С.Е. Салменбаев, С.Д. Смирнов, Н.К. Нургайсинова

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: zhymanova.13@mail.ru*

Бұл мақалада Шаған өзені арнасы түбіндегі шөгінділердегі микроэлементтердің жалпы мөлшері мен пайда болу формаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Атом көлінен өзеннің шығатын жерінен бастап Ертіс өзеніне құятын жеріне дейінгі су торабындағы он тұстамадан алынған 20 сынамаға талдау жүргізілді. Өзендегі бөліктер анықталды. Зерттелген элементтердің ең көп мөлшері Шаған өзенінің өзен бастауынан 66–96 км аралығындағы учаскесінде жинақталған. Микроэлементтердің алты түрі анықталды: суда еритін, алмасатын, әлсіз сорбцияланған, органикалық заттармен байланысқан, темір және марганец оксидтері/гидроксидтерімен байланысқан (шөгінді түрі) және қалдық. Зерттелген элементтердің көпшілігінің жалпы концентрациясы, Ga қоспағанда, жоғарғы континенттік қыртыста кларк мәндерінен төмен екені анықталды. Орташа есеппен, зерттелген элементтердің барлығы H2O, Ca(NO3)2 және NaOH сияқты «әлсіз» экстракттардың ерітінділерінде айтарлықтай аз екені анықталды. Зерттелген элементтердің барлығы үшін бұл ортадағы шаймалау жылдамдығы 20%-дан аз болды. Зерттелген химиялық элементтердің айтарлықтай мөлшері нашар еритін түрінде шоғырланғаны анықталды (шаймалау жылдамдығы >70%).

Түйін сөздер: *түбіндегі шөгінділер, жылжымалы формалар, микроэлементтер, Балапан учаскесі, Шаған өзені*

FORMS OF TRACE ELEMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE LOWER SHAGAN RIVER (FROM ATOMIC LAKE TO THE IRTYSH RIVER)

M. Dyusembayeva, A.Tashekova*, N. Larionova, S. Salmenbaeyv, S.Smirnov, N. Nurgaisinova

Branch office 'Institute of Radiation Safety and Ecology' of the RSE NNC RK, Kurchatov t., Kazakhstan

** E-mail for contacts:zhymanova.13@mail.ru*

This article presents the gross contents and chemical fractionation of trace elements in bottom sediments of the lower Shagan River. Twenty samples were collected at ten cross-sections between the outlet of Atomic Lake and the confluence with the Irtysh River. The point-by-point profiles show element-specific spatial patterns rather than one common accumulation zone. Local maxima of Li, Al, Cr, La, Ce, and Mn occur mainly 66–96 km downstream from Atomic Lake; Ga and Ba are higher in the upper part of the surveyed reach, while U and Mo show multiple separated peaks. Six fractions were identified: water-soluble, exchangeable, weakly specifically sorbed, organic-bound, Fe–Mn oxide/hydroxide-bound, and residual. Most elements, except Ga, had gross contents below upper continental crust values. Less than 20% was extracted using H_2O, $Ca(NO_3)_2$, and NaOH combined, whereas more than 70% of many elements occurred in poorly soluble forms.

Keywords: *bottom sediments, element fractionation, trace elements, Atomic Lake, lower reach, Shagan River.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-28-39
УДК: 550.424:556.531:504.064

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РУЧЬЯ КАРАБУЛАК СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

М. Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова*, С.Е. Сальменбаев, С.Д. Смирнов, Н. К. Нургайсинова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: zhymanova.13@mail.ru*

В настоящей работе приведены результаты изучения особенностей распределения микроэлементов и их форм присутствия в донных осадках ручья Карабулак, расположенного на территории горного массива Дегелен Семипалатинского испытательного полигона. Отбор образцов донных осадков осуществлялся в 19 пунктах, охватывающих основное русло водотока и четыре его притока. Для установления форм присутствия химических элементов использован метод последовательного экстрагирования, обеспечивающий разделение элементов на водорастворимую, обменную, слабоспецифически сорбированную, связанную с органическим веществом, ассоциированную с оксидами и гидроксидами железа и марганца, а также остаточную фракцию. Количественное определение элементов выполнено методами ICP-MS и ICP-AES. Установлено, что содержание микроэлементов в донных отложениях характеризуется значительной пространственной неоднородностью, обусловленной гидрологическими особенностями ручья и техногенным воздействием территории бывшего полигона. Выявлены превышения кларковых значений для ряда элементов, прежде всего для урана, бериллия, молибдена и кадмия. Наиболее высокие концентрации Be, Sr и Cd отмечены в верхнем течении ручья, тогда как содержание Mo и U возрастает в нижнем течении. Показано, что уран в донных отложениях основного русла преимущественно находится в водорастворимой форме, что свидетельствует о его высокой миграционной способности и потенциальной экологической опасности.

Ключевые слова: *донные отложения, микроэлементы, последовательное экстрагирование, пространственное распределение, тяжёлые металлы, уран, редкоземельные элементы, Семипалатинский испытательный полигон.*

Введение

Среди водных объектов, формирующих гидрографическую сеть горного массива Дегелен Семипалатинского испытательного полигона (СИП), выделяется ручей Карабулак. Ручей Карабулак имеет четыре притока и характеризуется непостоянным водотоком с частым пересыханием отдельных участков в летний период [1].

Радиоэкологическое состояние бассейна ручья Карабулак обусловлено его расположением в непосредственной близости к горному массиву Дегелен – одной из ключевых испытательных площадок СИП, где проводились подземные ядерные взрывы в горизонтальных горных выработках (штольнях). Большинство штолен пройдено в относительно сухих породах. Водоприток в подземные выработки происходит преимущественно по системам экзогенных трещин и зонам тектонических нарушений (разломов), что способствует переносу техногенных радионуклидов водными потоками [1–4]. Результаты радиационного мониторинга территории горного массива Дегелен свидетельствуют, что вынос радионуклидов из штолен с водопроявлениями и их накопление в руслах постоянных и временных водотоков продолжаются до настоящего времени [3–6]. Помимо техногенных радионуклидов, в системе «вода – донные осадки» ручья Карабулак установлены повышенные содержания редкоземельных элементов и тяжёлых металлов [7–9]. Загрязнение водотоков площадки «Дегелен» тяжёлыми металлами обусловлено сочетанием природной геохимической специфики района и техногенного воздействия подземных ядерных взрывов, активизировавших миграционные процессы и вовлечение микроэлементов в водную среду наряду с радионуклидами.

В условиях интенсивного хозяйственного освоения территории бывшего полигона особую актуальность приобретают исследования радиационной ситуации и общего химического загрязнения природных экосистем, прежде всего донных осадков тяжёлыми металлами и токсичными элементами.

Донные отложения рек являются важным компонентом водных экосистем и играют ключевую роль в формировании их экологического состояния. Они представляют собой депо различных химических элементов и соединений, включая биогенные вещества и загрязняющие компоненты антропогенного происхождения. Благодаря способности аккумулировать загрязняющие вещества донные отложения рассматриваются как интегральный индикатор длительного воздействия природных и техногенных факторов на водные объекты.

Исследование гранулометрического, минералогического и геохимического состава донных отложений позволяет выявить источники и масштабы загрязнения речных экосистем тяжёлыми металлами, нефтепродуктами и устойчивыми органическими соединениями. В условиях изменения гидрологического режима, заиления или дефицита кислорода возможно вторичное поступление загрязняющих веществ из донных отложений в водную толщу, что представляет дополнительную экологическую угрозу [4, 8].

Результаты комплексного изучения донных осадков могут быть использованы в дальнейшем для формирования методических подходов к экологической оценке и прогнозированию содержания тяжёлых металлов и токсичных элементов в природных экосистемах, расположенных в пределах Семипалатинского испытательного полигона и на прилегающих территориях.

В рамках настоящей работы рассмотрены показатели валового содержания микроэлементов и их распределения по формам в донных осадках ручья Карабулак и его приточных водотоков.

Материалы и методы

Объекты исследования

Пробы донных осадков были собраны в 19 точках, охватывающих основное русло ручья Карабулак и четыре его притока, отличающиеся по уровню накопления химических элементов. Выбор точек отбора осуществлялся с учетом следующих факторов: расположения участков относительно истоков, среднего течения и устьевых зон ручья и его притоков; особенностей гидрологического режима, включая сезонные изменения водности, образование застойных участков и периодическое пересыхание русла, а также расположения относительно штолен, зон разгрузки подземных вод и потенциальных путей миграции радионуклидов и токсичных элементов.

В летний период происходит застаивание, образование плёсов и пересыхание вод основного русла и притоков, т.к. основным источником водного питания ручья являются атмосферные осадки. Наиболее водообильными участками являются верховья притоков. Начиная от истоков основное русло и притоки хорошо сформированы, есть течение. На средних участках, вплоть до устья, вода стоячая, течения уже практически нет.

На рисунке 1 представлена карта-схема отбора проб донных отложений.

Отбор проб

Отбор образцов донных осадков осуществлялся методом точечного отбора (укола) из поверхностного слоя толщиной 0–5 см на площади 100 см² в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01–80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анали-

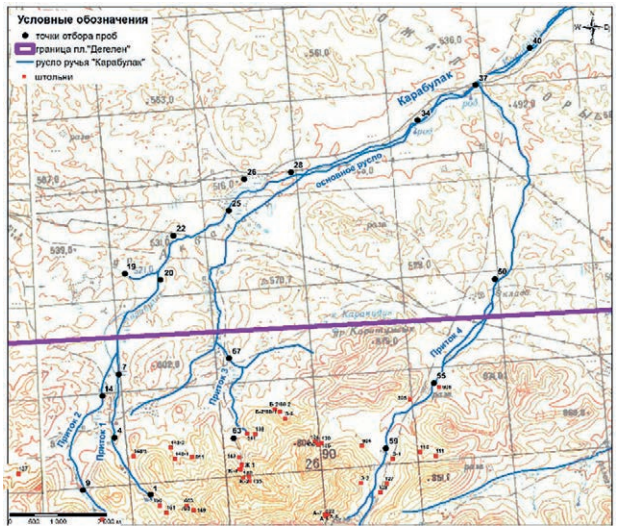


Рисунок 1. Карта-схема пунктов пробоотбора донных осадков в пределах русла ручья Карабулак и его приточных водотоков

за на загрязненность». Полученные образцы донных осадков высушивали естественным способом при комнатной температуре до достижения воздушно-сухого состояния. После высушивания пробы просеивали через полиамидное сито с размером ячеек 1 мм. Из предварительно измельчённого и гомогенизированного материала методом многократного квартования выделяли представительную навеску массой 5 г, предназначенную для последующего получения вытяжек методом последовательного экстрагирования.

Подготовка проб

В ходе исследования определялись подвижные формы химических элементов, включая водорастворимую, обменную, слабоспецифически сорбированную, связанную с органическим веществом, ассоциированную с оксидами и гидроксидами железа и марганца, а также остаточную фракцию [10–13].

Метод последовательного экстрагирования основан на поэтапном выделении различных форм элементов из одной навески образца посредством последовательного воздействия экстрагентов возрастающей химической активности. Обработка проб осуществлялась серией селективных растворителей, предложенных рядом исследователей [10–11] обеспечивающих выделение следующих фракций: водорастворимой (экстрагент – дистиллированная вода – ХЭводн.); обменной (0,1 М раствор $Ca(NO_3)_2$ – ХЭобмен); слабоспецифически сорбированной (3 % раствор CH_3COOH – ХЭсп.сорб.); связанной с органическим веществом (0,1 М раствор NaOH – ХЭорг.); связанной с оксидами и гидроксидами железа и марганца (раствор Тамма – ХЭокс/гидрокс Fe и Mn); остаточной (разложение концентрированной HF в смеси с 7 М HNO_3 – ХЭост.).

Соотношение «донные осадки: экстрагент» составляло 1:10. Продолжительность воздействия каж-

дого экстрагента составляла 1 час, при этом навеска находилась в режиме непрерывного перемешивания на ротаторе. После завершения стадии экстрагирования жидкую фазу отделяли от твёрдого остатка методом центрифугирования в течение 10 минут при скорости вращения 4000–6000 об/мин. После каждой стадии обработки остаток дополнительно промывали дистиллированной водой.

Количественное определение содержания химических элементов в полученных фракциях выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольных масс-спектрометрах Agilent 7700x и Elan 9000, а также методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре iCAP 6300 Duo. Анализ образцов донных осадков проводился в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 17294-2:2019.

Результаты и обсуждение

Результаты масс-спектрометрического анализа проб донных отложений ручья Карабулак в различных формах соединений представлены в таблице 1.

Рассчитаны медианные значения результатов анализа для каждой точки отбора проб. Полученные значения концентрации сравнивались с кларками – усреднёнными содержаниями элементов в верхней части континентальной коры по Григорьеву [14], т.к. утверждённые экологические нормативы содержания элементов в донных отложениях отсутствуют. Большинство элементов не имеют высокого разброса значений концентрации между содержаниями в различных формах, за исключением U и Mn. В то же время внутри одной формы разброс значений измеренных концентраций может отличаться на несколько порядков. В сравнении с кларком верхней части континентальной коры наблюдается превышение валового содержания Be, Mo, Cd, U.

Таблица 1. Распределение элементов по формам соединений в донных осадках ручья Карабулак (метод последовательного экстрагирования), мг/кг

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [15]	Кларк в верх. части. конт. коры [14]
	Мехэводн min-max	Мехэобм min-max	Мехэспсорб min-max	Мехэорг min-max	Мехэокс гидрокс Fe и Mn min-max	Мехэ ост min-max			
Li	0,12 0,02–0,8	0,12 0,01–0,32	0,4 0,2–6,7	0,1 0,01–0,2	0,4 0,08–7,6	10 5–29	11	–	22
Be	0,02 <0,0001–0,04	0,02 <0,0001–0,05	1,5 0,1–11	0,2 <0,0001–0,8	2,3 <0,0001–18	3,3 0,9–17	7,2	–	2,1
Mg	85 19–790	303 97–1007	240 62–17000	49 4–580	140 30–1400	1700 220–6100	2517	–	13500
Al	4,6 1–490	3,9 3,9–3,9	157,5 36–495	12 <0,1–78	805 140–2000	12000 8500–20000	12983	–	77400
Sc	0,01 <0,0001–0,5	<0,0001	0,3 0,14–0,74	<0,0001	<0,0001	1,2 0,2–3,5	1,5	–	15
V	0,07 0,01–1,4	0,02 <0,001–0,09	0,44 <0,001–6,83	0,3 <0,001–0,7	7,5 1,1–35	30 11–45	38	150	120
Cr	0,01 0,004–0,7	0,01 <0,01–0,01	0,42 <0,01–3,97	0,1 0,02–0,1	4,8 <0,001–7	22,5 7–44	28	200	150
Mn	0,36 0,05–15	1,90 0,1–130	190 4–3010	5,2 <0,01–410	38 1–3800	150 70–1600	385	1500	670
Fe	3,1 0,6–450	<0,1	43,5 4–2500	25 1–310	1850 400–9700	10150 4000–19000	12071	–	30900
Co	0,01 0,001–0,24	<0,001	0,75 0,2–10,5	0,1 <0,001–0,8	0,9 0,06–7,8	3,5 1,6–9	5,1	100	17
Ni	0,06 <0,001–0,28	<0,001	2 0,2–7,4	0,2 <0,001–0,8	4,1 0,05–8,2	14 3,2–24	20	100	62
Cu	0,05 0,01–0,3	0,02 <0,0001–0,07	0,5 <0,0001–3,5	0,5 <0,0001–0,6	4,8 0,2–18	18 4,7–35	24	100	39
Zn	0,06 0,02–1,1	0,13 <0,01–4,05	6,25 0,7–370	0,4 <0,01–7,5	6,1 <0,01–100	45,5 11–370	58	300	78
Ga	0,01 0,005–0,18	<0,0001	1,7 0,1–4,4	0,2 0,003–0,5	0,5 0,15–2,1	17 6–28	19	–	19
Ge	0,004 <0,0001–0,04	<0,0001	0,06 <0,0001–0,24	<0,0001	0,2 <0,01–0,6	0,6 0,3–1,3	0,9	–	1

Элемент	Формы соединений						Валовое содержание	ПДК в почве [15]	Кларк в верх. части. конт. коры [14]
	Мехэводн min-max	Мехэобм min-max	Мехэспсорб min-max	Мехэорг min-max	Мехэокс гидрокс Fe и Mn min-max	Мехэ ост min-max			
As	0,03 0,01–0,36	0,95 <0,001–9,7	0,355 0,04–1,32	0,04 <0,001–0,3	1,8 0,2–15	1,4 0,4–32	4,5	20	6,5
Rb	0,02 0,01–0,87	0,02 0,01–0,04	0,03 0,01–0,06	0,009 0,004–0,02	0,2 0,1–0,5	20,5 5–41	21	–	110
Sr	3,47 0,55–47	20 7–49	34,5 8–1140	4,7 0,4–100	0,4 0,1–0,9	33,5 2,8–91	97	–	270
Mo	2,06 0,08–70	0,27 0,02–47	0,044 <0,001–3,37	0,1 0,002–2,2	2 0,5–440	6,6 2,1–470	11	50	1,5
Ba	0,40 0,14–1,4	<0,1	50,5 4–110	7,3 0,2–21	7,3 1,3–48	180 60–390	245	–	510
Cd	0,004 0,001–0,12	0,01 <0,0001–0,1	0,195 0,05–2,23	0,008 <0,0001–0,09	0,1 <0,0001–0,7	0,6 0,1–1,9	0,8	3	0,3
Cs	0,001 <0,0001–0,06	0,002 <0,0001–0,003	<0,0001	0,003 <0,0001–0,003	0,01 <0,0001–0,1	0,7 0,02–2	0,7	–	4
La	0,002 <0,0001–0,03	0,005 <0,0001–0,006	0,7 0,1–3,4	0,005 <0,0001–0,07	0,6 <0,0001–2	6,7 1,4–29	7,9	–	32
Ce	0,003 <0,0001–0,06	<0,0001	1,1 0,1–6,9	0,008 <0,0001–0,16	1,0 <0,0001–3	15 4–41	17	–	63
Pr	0,002 <0,0001–0,01	<0,0001	0,15 0,01–0,65	0,001 <0,0001–0,016	0,2 <0,0001–0,5	2 0,5–8,9	2,3	–	8,7
Nd	0,002 <0,0001–0,03	0,003 <0,0001–0,004	0,75 0,1–3,1	0,004 <0,0001–0,09	0,7 <0,0001–2,5	7,7 2,3–41	9,2	–	29
Sm	0,003 <0,0001–0,01	<0,0001	0,17 0,01–0,66	0,002 <0,0001–0,02	0,2 <0,0001–0,6	1,7 0,4–8,2	2,1	–	5,7
Eu	0,001 <0,0001–0,001	<0,0001	0,05 0,01–0,15	0,002 <0,0001–0,007	0,1 <0,0001–0,1	0,3 0,1–0,9	0,4	–	1,3
Gd	0,003 <0,0001–0,01	<0,0001	0,19 0,01–0,76	0,003 <0,0001–0,023	0,4 <0,0001–1,1	1,8 0,5–9	2,3	–	6,2
Dy	0,002 <0,0001–0,04	<0,0001	0,16 <0,0001–0,62	0,002 <0,0001–0,017	0,7 <0,0001–1,7	1,6 0,5–8,8	2,5	–	4,8
Ho	0,010 <0,0001–0,01	<0,0001	0,03 <0,0001–0,11	0,0004 <0,0001–0,003	0,2 <0,0001–0,4	0,3 0,1–1,9	0,5	–	1,6
Pb	0,04 <0,001–0,8	<0,001	0,9 0,2–26	0,02 <0,001–0,1	0,4 <0,001–14	12 5,7–110	13	32	17
Bi	0,003 0,001–0,01	<0,001	0,0065 <0,001–0,62	<0,001	0,03 <0,001–0,2	0,2 0,1–3,9	0,2	–	0,33
Th	0,002 <0,0001–0,04	<0,0001	0,0245 <0,0001–0,2	<0,0001	1,0 <0,0001–1,4	1,1 0,4–3	2,1	–	9,3
U	3,9 0,01–63	0,012 <0,0001–2,2	1,5 0,01–100	0,02 0,0003–13	3,2 0,4–220	3,6 1,1–32	12	–	2,5

Примечание. Медиана (Me) валового содержания по всему ручью, минимальное (min) и максимальное (max) значения, меньше предела обнаружения (<п.о.); – отсутствие литературных данных.

В большинстве исследованных случаев фиксируется тенденция к возрастанию абсолютных концентраций форм соединений элементов по мере перехода от наиболее подвижных к наиболее прочно закреплённым фракциям: ХЭводн < ХЭобм < ХЭорг < ХЭсп. сорб < ХЭокс/гидрокс Fe и Mn < ХЭост.

Анализ донных осадков основного русла ручья и его притоков позволил выявить характерные различия в содержании отдельных элементов. В таблице 2 приведены медианные показатели концентраций элементов в донных осадках основного русла и четырёх притоков с их сравнением со средними валовыми значениями по всей исследуемой водной системе.

Таблица 2. Валовое содержание элементов в донных отложениях р. Карабулак

Элемент	Медиана (Me), мг/кг					
	Русло	Приток 1	Приток 2	Приток 3	Приток 4	Среднее по ручью
Li	12	15	18	13	11	12
Be	2,3	15	28	19	14	9,6
Mg	4000	3200	3000	1300	2700	3200
Al	11800	13000	18300	12800	14000	13000
Sc	1,7	1,5	2,8	1,1	1,5	1,5
V	31	42	51	38	45	38
Cr	18	26	38	19	27	24
Mn	380	250	300	2900	2100	400
Fe	12100	9600	14000	15000	21000	13000
Co	5,6	4,0	6,6	7,9	12	6,1
Ni	14	23	27	23	30	18
Cu	14	40	28	22	24	22
Zn	32	41	79	320	79	59
Ga	19	19	21	22	21	19
Ge	0,76	0,60	1,4	0,93	1,0	0,83
As	5,3	4,6	3,8	8,3	8,0	5,3
Rb	22	22	17	23	15	20
Sr	390	57	105	64	93	110
Mo	14	20	9	36	11	14
Ba	290	220	305	240	330	300
Cd	0,48	0,81	1,0	3,4	1,1	0,99
Cs	0,60	1,8	0,86	1,3	0,80	0,61
La	7,3	10	22	5,0	8,5	8,4
Ce	17	20	32	9,2	18	18
Pr	2,1	2,9	6,2	1,3	2,5	2,3
Nd	8,3	14	28	6,8	10	9,2
Sm	1,7	2,7	5,6	1,7	2,4	1,9
Eu	0,32	0,38	0,69	0,22	0,42	0,38
Gd	1,7	3,4	6,3	2,2	2,8	2,2
Dy	1,4	3,9	6,4	2,5	3,0	2,1
Ho	0,29	0,99	1,3	0,56	0,64	0,37
сумма REE*	40	56	110	29	48	46
Pb	14	14	24	32	17	17
Bi	0,26	0,20	0,30	0,27	0,21	0,23
Th	1,1	2,2	3,4	0,83	1,1	1,2
U	24	16	8,1	85	12	13

Примечание: сумма REE – сумма редкоземельных элементов*

По разнице между концентрацией элементов в донных отложениях притоков и русла можно оценить вклад каждого притока в загрязнение основного русла. Как видно из таблицы, в донных отложениях притоков обнаруживается высокое содержание Be, Zn, Cd, U по сравнению с основным руслом. Напротив,

в донных отложениях основного русла наблюдается повышенное содержание Sr относительно притоков.

Факторы, определяющие распределение микроэлементов. Несмотря на отсутствие прямого определения гранулометрического состава, минералогических характеристик и содержания органического вещества донных отложений, выявленные закономерности распределения элементов позволяют оценить влияние основных геохимических процессов формирования донных осадков.

Формирование донных отложений ручья Карабулак происходит в условиях периодического пересыхания русла, образования локальных застойных участков и сезонной изменчивости водности. Подобные условия способствуют изменению интенсивности процессов осаждения, сорбции и десорбции химических элементов, а также перераспределению элементов между различными геохимическими формами.

Существенную роль в закреплении микроэлементов играют оксиды и гидроксиды железа и марганца, обладающие высокой сорбционной способностью. Значительная доля элементов, связанная с данной фракцией, свидетельствует о протекании процессов вторичной фиксации загрязняющих веществ в донных осадках. Напротив, преобладание водорастворимых и обменных форм указывает на высокую потенциальную миграционную способность элементов и возможность их повторного вовлечения в водную среду при изменении гидрохимических условий.

Содержание Be в донных отложениях всех притоков значительно выше, чем в основном русле. Большой вклад в валовую концентрацию Zn, Cd и U происходит из притока 3, тогда как наибольшая концентрация Sr обнаруживается в донных отложениях основного русла. В донных отложениях притоков 3 и 4 наблюдается высокое содержание Mn, в несколько раз превышающее кларковые значения; также в притоке 4 больше железа. Для донных отложений притока 2 характерно повышенное содержание лантаноидов. По сумме редкоземельных элементов их содержание в среднем вдвое превосходит концентрации в основном русле и в остальных притоках.

Проведена оценка миграционной способности тех элементов, медианные концентрации которых в донных отложениях основного русла превышают кларковые значения: Be, Sr, Cd, Mo и U. На рисунке 2 показано изменение содержания форм Be по длине русла. Содержание бериллия во всех формах соединений изменяется неоднородно. Доля подвижных форм составляет десятые и сотые доли процента от валового содержания; в 2–3 км от истока доля водорастворимой формы возрастает примерно на порядок. Содержание слабоспецифически сорбированной и связанной с органическим веществом форм различается на 1–3 порядка: первая

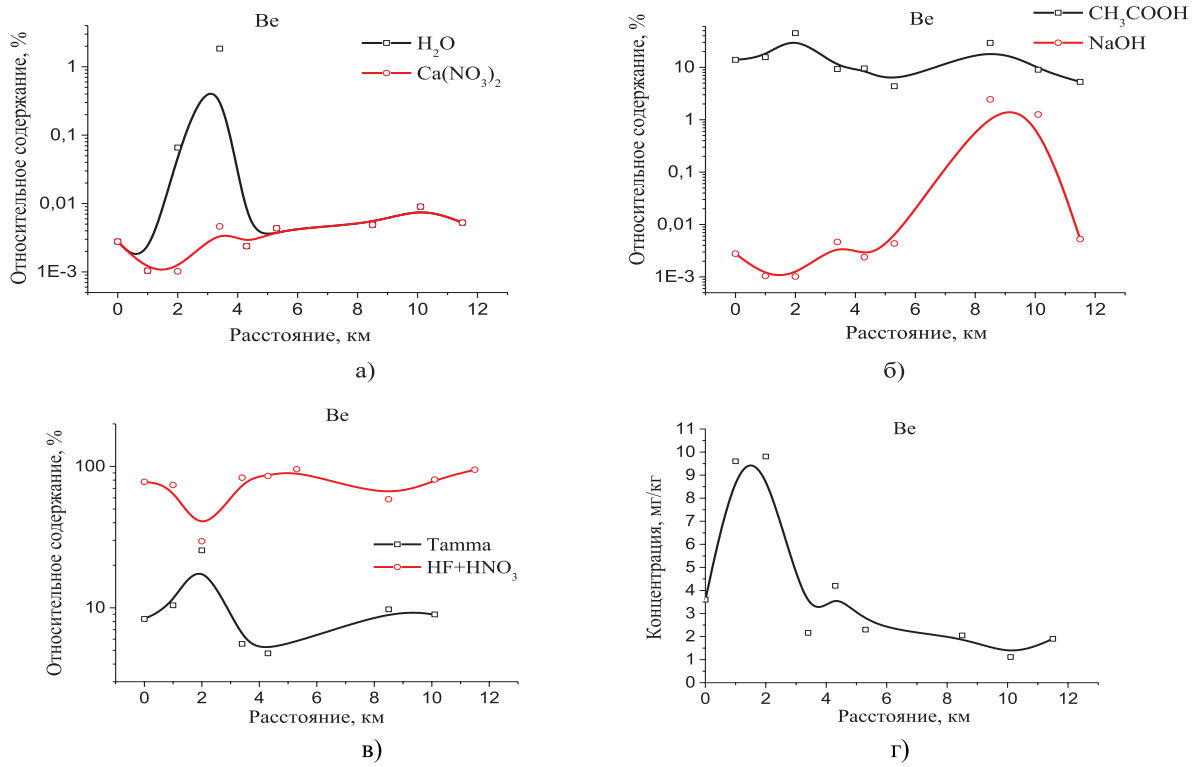


Рисунок 2. Изменение содержания форм соединений Be (а, б, в) и валового содержания Be (г) по длине русла ручья Карабулак

Примечание. Здесь и далее (рисунки 2–6): H_2O – водорастворимая форма; $Ca(NO_3)_2$ – обменная; CH_3COOH – слабоспецифически сорбированная; NaOH – связанная с органическим веществом; реактив Тамма – связанная с оксидами и гидроксидами железа и марганца; HF + HNO_3 – остаточная.

достигает 10 %, тогда как доля органической формы находится на уровне 0,01 % от валового содержания.

В интервале 8–10 км от истока ручья фиксируется выраженное возрастание концентрации бериллия в органически связанной форме, где его содержание достигает нескольких процентов. Для прочно фиксированных фракций также характерны различия порядка величины: около 10 % Be приходится на форму, связанную с оксидами и гидроксидами железа и марганца, однако наибольшая часть элемента сосредоточена в остаточной фракции. Максимальные значения содержания бериллия, превышающие кларковые уровни (до 9,8 мг/кг), выявлены в пределах 1–3 км от устья, после чего по направлению вниз по течению отмечается уменьшение его концентрации в донных осадках.

Высокая доля остаточной формы бериллия свидетельствует о преимущественно литогенном происхождении данного элемента и его включенности в структуру минералов материнских пород. Одновременно локальное увеличение содержания водорастворимой формы может быть обусловлено изменением гидрохимических условий на отдельных участках русла либо поступлением элементов с поверхностным и подземным стоком.

На рисунке 3 показано изменение содержания форм Sr по длине основного русла ручья.

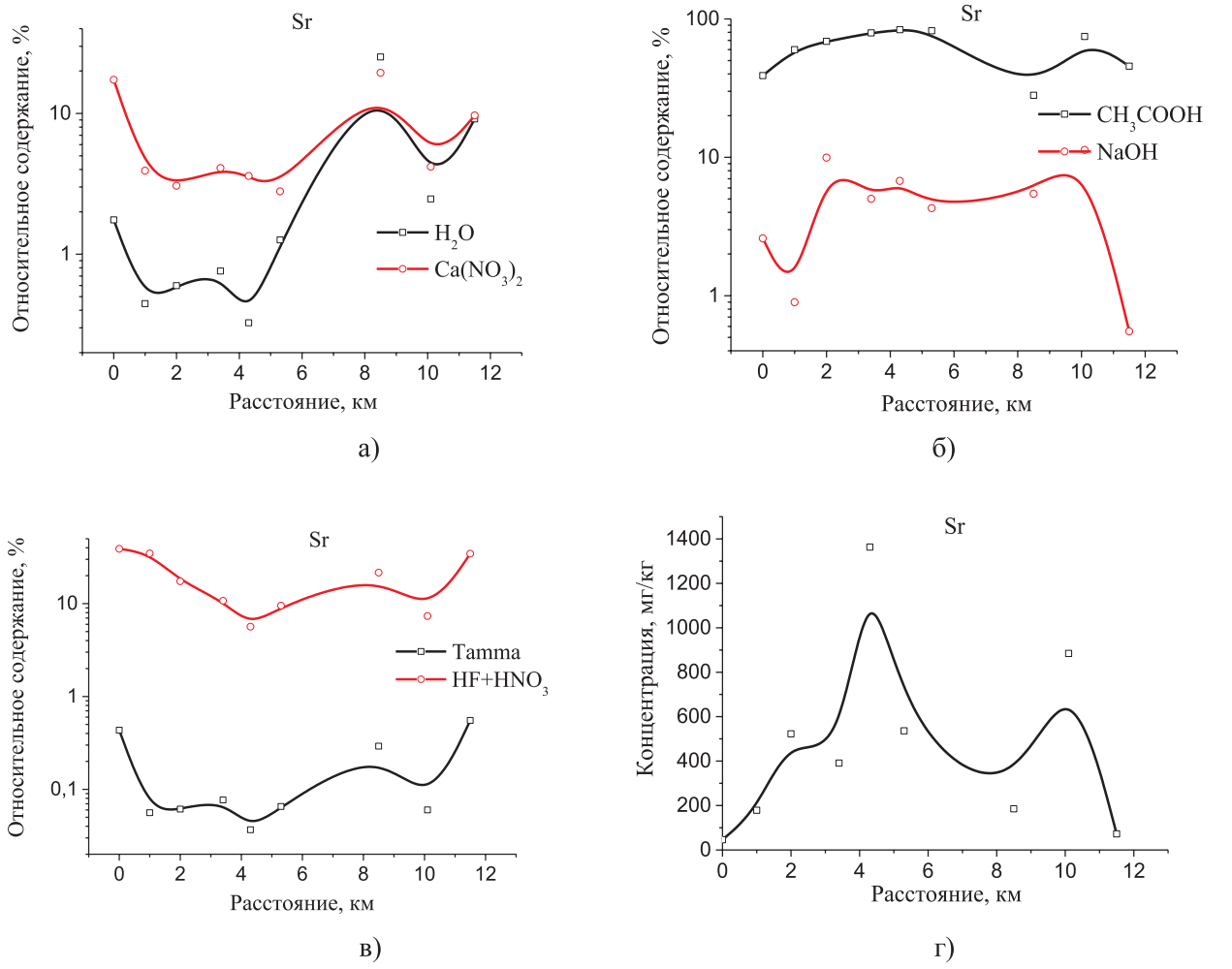


Рисунок 3. Изменение содержания форм соединений Sr (а, б, в) и валового содержания Sr (г) по длине русла ручья Карабулак

Стронций в русле р. Карабулак в значительной степени находится в подвижных и слабо специфически сорбированных формах соединений. Для водорастворимой и обменной форм наблюдается схожесть пространственного распределения с повышением доли содержания ближе к устью ручья. Подавляющий процент содержания приходится на слабо специфически сорбированную форму – в среднем ее доля составляет более 60 % от валового. При этом на органическую форму приходится около 5 % и ее показатель резко снижается к устью. Относительное распределение содержания в прочносвязанных формах по руслу ручья также демонстрирует определенное сходство – на остаточную форму приходится 20 % от валового, доля остаточной формы незначительна, менее 1 %. По валовому содержанию наблюдаются два

резких пика – до 1363 мг/кг в 4 км от истока, что в пять раз превышает кларковое значение, и до 884 мг/кг на 10-ом километре. К устью ручья содержание Sr резко снижается.

Высокая доля слабоспецифически сорбированной формы Sr обусловлена особенностями его геохимического поведения. Стронций сравнительно слабо фиксируется кристаллической решеткой вторичных минералов и способен активно участвовать в процессах ионного обмена, вследствие чего характеризуется повышенной миграционной способностью в системе «донные отложения – вода».

На рисунке 4 показано изменение содержания форм Cd по длине основного русла ручья.

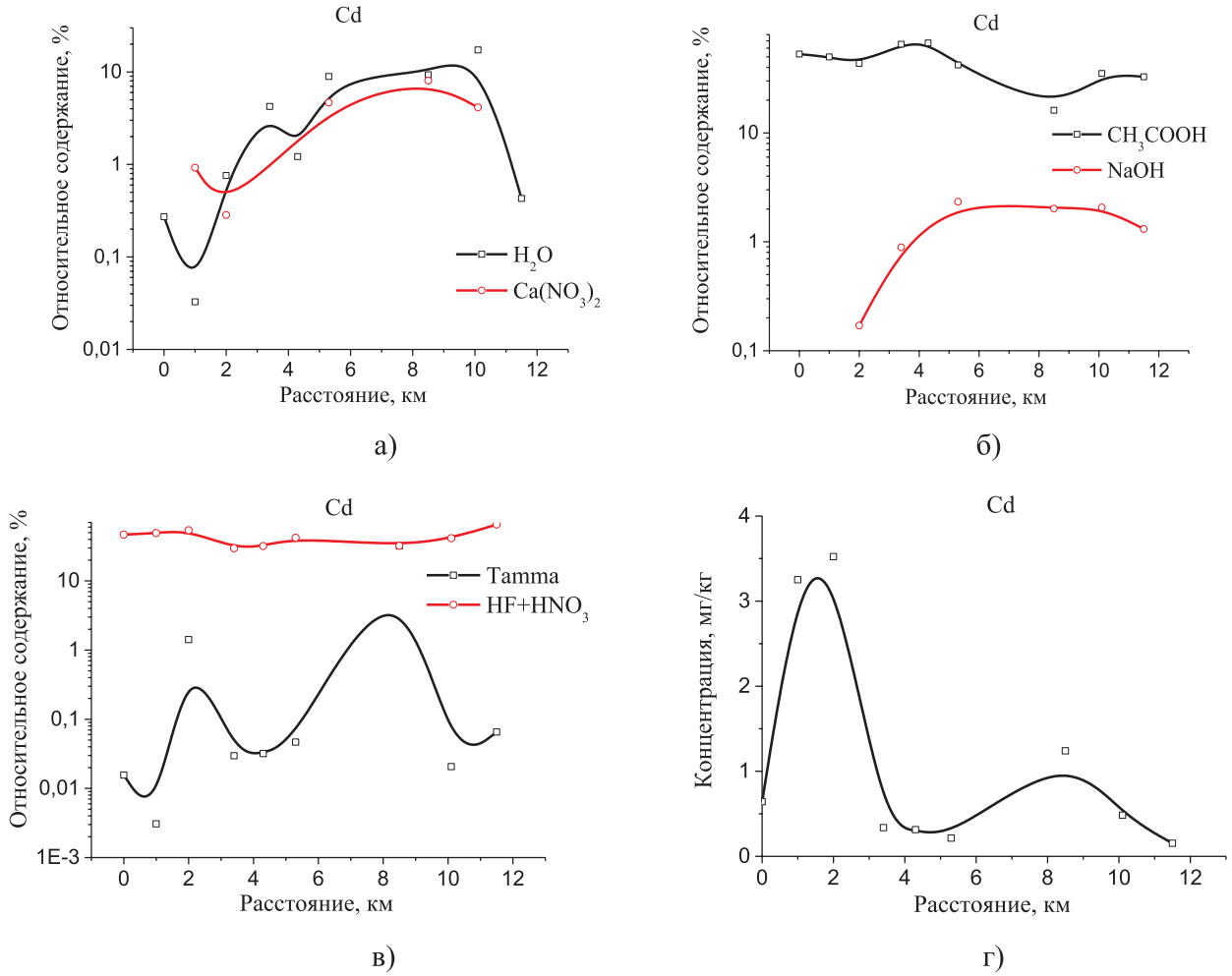


Рисунок 4. Изменение содержания форм соединений Cd (а, б, в) и валового содержания Cd (г) по длине русла ручья Карабулак

Основная часть кадмия в донных осадках представлена слабоспецифически сорбированной и остаточной формами, на долю которых приходится до 88 % от суммарного содержания элемента. Дополнительно около 8,9 % Cd ассоциировано с фракцией оксидов и гидроксидов железа и марганца. Подвижные формы характеризуются близким пространственным распределением и невысокими концентрациями, не превышающими 2 % от валового содержания. В распределении кадмия по руслу наблюдается следующая тенденция: максимальные концентрации (до 3,5 мг/кг) фиксируются на начальных участках водотока, в средней части русла на пересыхающих сегментах отмечается снижение содержания ниже кларковых уровней, тогда как на расстоянии 8–10 км от истока регистрируется умеренное повышение концентраций до 1,2 мг/кг.

Преобладание остаточной и слабоспецифически сорбированной форм кадмия свидетельствует о сочетании процессов его природного накопления и вторичной фиксации поверхностью минеральных частиц. При изменении кислотности либо окислительно-восстановительного потенциала часть кадмия может переходить в более подвижные формы.

На рисунке 5 показано изменение содержания форм Mo по длине основного русла ручья Карабулак.

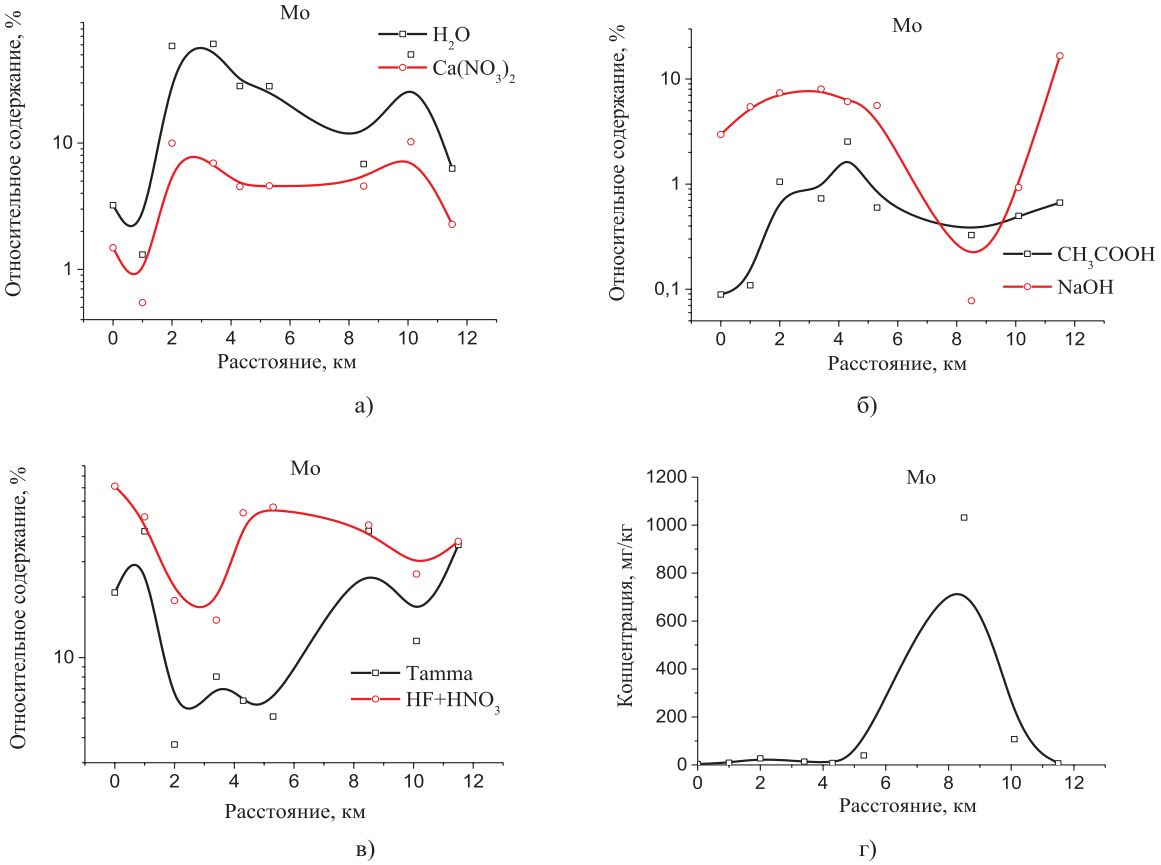
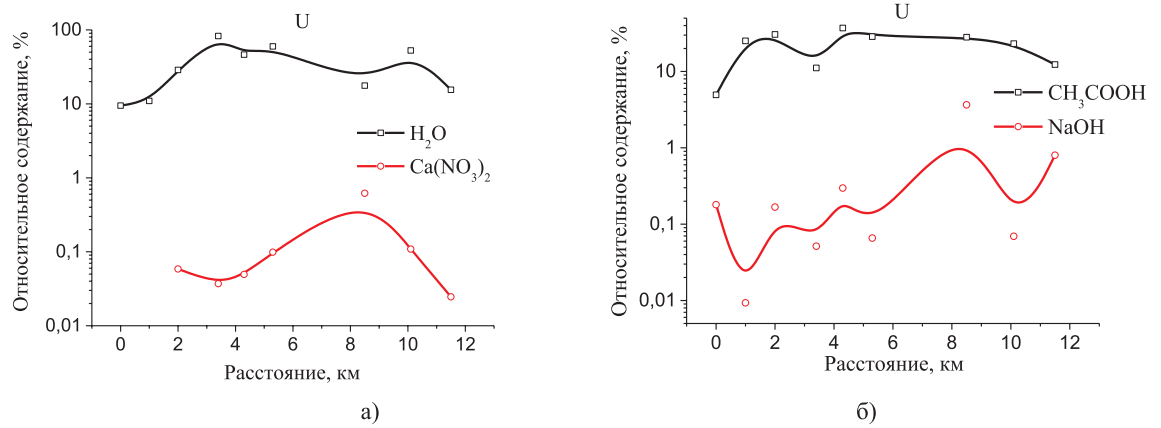


Рисунок 5. Изменение содержания форм соединений Mo (а, б, в) и валового содержания Mo (г) по длине русла ручья Карабулак

Для молибдена характерна сходная картина нахождения в легко связанных формах на всём протяжении русла, при этом среднее содержание в водорастворимой форме превышает содержание в обменной и составляет 19 %. Доля нахождения в слабо специфически сорбированной форме несущественна и в среднем не превышает 2 %. В прочносвязанных формах также прослеживается сходный характер изменения содержания по длине русла между остаточной и осадочной формами. По валовому содержанию в русле наблюдается пиковое повышение концентрации до 1030 мг/кг от истока.9 км

Для молибдена существенное значение имеют окислительно-восстановительные условия среды. Известно, что в окислительной обстановке молибден существует преимущественно в виде растворимых молибдат-ионов, тогда как восстановительные условия способствуют его сорбции оксидами железа и органическим веществом. Это объясняет неоднородность изменения содержания элемента по длине русла.

На рисунке 6 показано изменение содержания форм U по длине основного русла ручья.



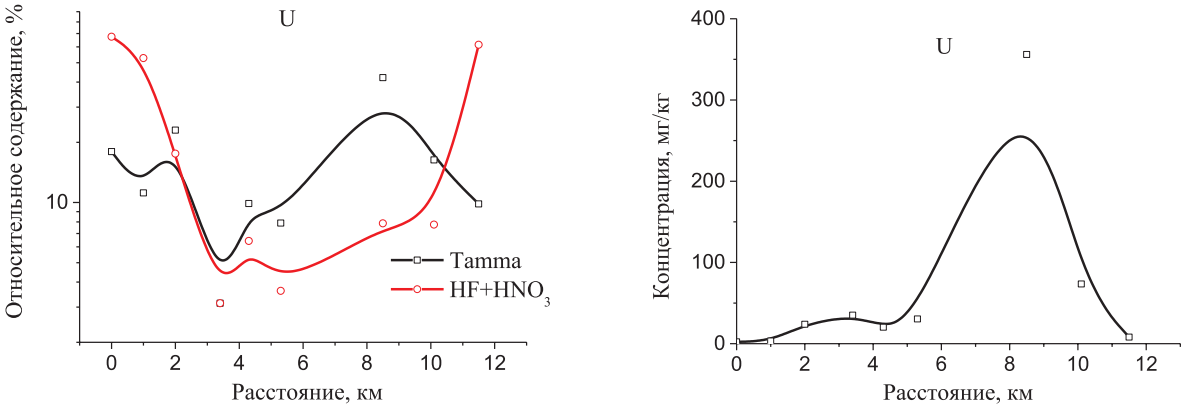


Рисунок 6. Изменение содержания форм соединений U (а, б, в) и валового содержания U (г) по длине русла ручья Карабулак

Для урана характерно высокое содержание в водорастворимой форме (в среднем 32 %), следовательно, U отличается высокой подвижностью и степенью потенциального воздействия на биообъекты. Уровни содержания в прочносвязанных формах колеблются от единиц до десятков процентов, при этом наблюдается общая тенденция к более высоким содержаниям ближе к истоку (0–2 км) и устью (8–12 км), тогда как на 5–7 километре содержание урана значительно ниже.

Содержание урана в водорастворимой фракции достигает значений на уровне десятков процентов от валового содержания, тогда как в обменной форме его доля на два порядка ниже. Существенные различия также установлены между органически связанной и слабоспецифически сорбированной формами: в последней фиксируются значения на уровне десятков процентов, тогда как в органической форме содержание урана ограничивается долями процента. По валовому содержанию элемента отмечен выраженный максимум на расстоянии 9–10 км от истока, где концентрация достигает 360 мг/кг, что превышает кларковое значение примерно на два порядка.

Высокая доля водорастворимой формы урана указывает на преобладание его наиболее мобильных соединений. Подобная особенность может быть связана с поступлением урана с подземными водами, разгружающимися в пределах водотока, а также с особенностями гидрогеохимических условий территории горного массива Дегелен. Одновременно наличие значительной доли остаточной формы свидетельствует о существовании устойчивого природного геохимического фона.

Заключение

Геохимические особенности распределения форм элементов в донных осадках основного русла и притоков ручья Карабулак характеризуются значительной пространственной неоднородностью, обусловленной, прежде всего, сезонным пересыханием отдельных участков водотока и формированием зон застоя воды. В частности, в нижних участках русла наблюдается накопление элементов, отличающихся низкой миграционной способностью. Распределение повышенных концентраций различных форм исследованных элементов характеризуется значительным варьированием значений, достигающим нескольких порядков величины. Минерализованные зоны в пределах долины ручья Карабулак имеют выраженный локальный характер распространения.

В большинстве случаев фиксируется закономерность возрастания абсолютных концентраций форм соединений элементов при переходе от наиболее подвижных к наиболее устойчиво закрепленным фракциям. Распределение элементов по формам соединений отражает не только их миграционные свойства, но и связано с общим уровнем их накопления. Так, в донных осадках притоков, характеризующихся повышенными концентрациями Be, Zn и Sr, указанные элементы преимущественно находятся в более подвижных формах, тогда как при относительно низких концентрациях возрастает доля их присутствия в прочно фиксированных фракциях. Повышенная подвижность и растворимость элементов способствует их последующему накоплению в донных осадках.

На основании различий в концентрациях элементов между основным руслом и усредненными значениями по всей водной системе проведена оценка вклада притоков в загрязнение основного русла. Установлено существенное влияние притоков на поступление Be, Zn, Cd и U, тогда как повышенные концентрации Sr преимущественно характерны для основного русла.

Выявлены значительные превышения кларковых значений по ряду элементов: для урана – до пятикратного превышения (среднее содержание около 13 мг/кг при максимальных значениях до 360 мг/кг); для бериллия – при среднем уровне 9,6 мг/кг и максимальной концентрации до 46 мг/кг; для молибдена – при

среднем содержании около 14 мг/кг, что примерно в девять раз выше кларкового уровня, с пиковыми значениями до 1030 мг/кг; а также для кадмия – при среднем содержании около 0,99 мг/кг и максимальных значениях до 4,4 мг/кг. Для верхнего течения ручья характерны повышенные концентрации Be, Sr и Cd, тогда как содержание Mo и U возрастает по направлению к устьевой части водотока.

Установлено, что содержание бериллия в донных осадках притоков в среднем на порядок превышает его концентрации в основном русле. Существенный вклад в поступление Zn, Cd и U связан преимущественно с притоком 3, тогда как наибольшее содержание Sr отмечено в основном русле. В притоках 3 и 4 зафиксированы повышенные концентрации марганца, при этом в притоке 4 также отмечено повышенное содержание железа. Для притока 2 характерно накопление лантаноидов: суммарное содержание редкоземельных элементов здесь в среднем примерно в два раза превышает соответствующие значения в основном русле и других притоках.

Показано, что уран в донных отложениях основного русла преимущественно присутствует в водорастворимой форме, что свидетельствует о его высокой миграционной способности и потенциальной биодоступности. В то же время в притоках уран в большей степени связан с более устойчивыми геохимическими формами. Полученные результаты позволяют уточнить особенности миграции и аккумуляции микроэлементов в водных экосистемах территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона и могут быть использованы при проведении экологического мониторинга и оценке экологических рисков в данном регионе.

Следует отметить, что интерпретация механизмов закрепления микроэлементов может быть существенно расширена при совместном исследовании гранулометрического состава, минералогических особенностей, содержания органического вещества, а также кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных характеристик донных отложений. Комплексное рассмотрение указанных факторов является перспективным направлением дальнейших исследований.

Исследование финансировалось Агентством Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713), а также за счет грантового финансирования AP19576259 «Экологическая оценка малых рек как показатель трансформации геосистем горнодобывающих районов Восточного Казахстана»

Литература / References:

1. Дюсембаева М.Т. Эколого-геохимические особенности некоторых водных объектов Семипалатинского испытательного полигона / М.Т. Дюсембаева, Н.Ж. Мухамедияров, Г.М. Есильканов, А.Ж. Ташекова, А.О. Айдарханов. – Курчатов : ИД «Интеллект», 2023. – 268 с.
2. Березин С.А. и др. Мирные ядерные взрывы на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – №7(3). – С. 57-62.
3. Батырбеков Э.Г., Айдарханов А.О., Витюк В.А. и др. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография. – Курчатов, 2021. – 340 с.
4. Айдарханова А.К., Лукашенко С.Н., Коростелева С.В. Исследование сорбционных свойств грунтов участка ручья Карабулак // «Вестник НЯЦ РК». – 2015 – №1 (61). – с. 75-84
5. Торопов А.С., Рихванов Л.П., Есильканов Г.М. Пространственное распределение форм нахождения радионуклидов в воде ручья Карабулак Семипалатинского испытательного полигона // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2017. –Т. 328. –No 12. –С. 6–15. URL: http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1954
6. Р.Г. Ермакова, А.К. Айдарханова, Ж.Е. Тлеуканова, А.С. Мамырбаева Исследование вертикального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях водотоков площадки «Дегелен» // «Вестник НЯЦ РК». – 2024 – №4 (61). – с. 128-137 https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-128-137
7. Геохимический фон СИП. Микроэлементы в почвах участков, прилегающих к горному массиву Дегелен» /А.А. Амиров, С.Н. Лукашенко, С.Б. Субботин, В.Д. Кириллов, В.П. Солодухин, Н.М. Бердинова, Д.А. Желтов // Актуальные вопросы ра-диоэкологии Казахстана: Вып. 2 Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007–2009 гг. –Павлодар: Дом печати, 2010. –С. 451–460.6.
8. Шакенов Е.З., Дюсембаева М.Т, Лукашенко С.Н., Темиржанова А.Е., Есилькано Г.М., Мухамедияров Н.Ж. Пространственное распределение химических элементов в водотоке штольни 504 площадки «Дегелен» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. No 9. 70–83 и др.
9. Есильканов Г.М. Оценка элементного состава воды ручья Карабулак (площадка «Дегелен» бывшего Семипалатинского испытательного полигона) / Г. М. Есильканов, Н. Ж. Мухамедияров ; науч. рук. Л.П. Рихванов ; М.Т. Койгельдинова // Творчество юных – шаг в успешное будущее : материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, г. Томск, 23-27 ноября 2015 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2015. – [С. 239-240].
10. Tessier A, Rapin F., Garignan R. Trace metals in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides // Gechim.et Cosmochim. Acta. 1985. Vol.49, N1.
11. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 682-692.
12. Ю.С. Восель, В.Д. Страховенко, И.В. Макарова «Формы нахождения урана в озерных донных отложениях разного типа. Байкальский регион» // Материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4-8 июня 2013г. – С. 130-134.

13. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. Диссертация на соискание ученной степени доктора биологических наук. Москва ¬ 2016.
14. Н.А. Григорьев – Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры. –Геохимия, 2003. – №7. – с. 785-792.
15. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы (ГН 2.1.7.2041-06). – М.: Информ.-издат. Центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006.

ҚАРАБҰЛАҚ ЖЫЛҒАСЫНЫҢ ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ МИКРОЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ ТАРАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ (СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫ)

М.Т. Дюсембаева, А.Ж. Ташекова*, С.Е. Салменбаев, С.Д. Смирнов, Н.К. Нургайсинова

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail:zhymanova.13@mail.ru*

Бұл мақалада Семей сынақ полигонының Дегелең тауларында орналасқан Қарабұлақ өзенінің түбіндегі шөгінділердегі микроэлементтердің кеңістіктік таралуы мен пайда болу формаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Негізгі өзен арнасы мен оның төрт саласы бойындағы 19 нүктеден түбіндегі шөгінді үлгілері алынды. Химиялық элементтердің пайда болу формаларын анықтау үшін тізбекті экстракция әдісі қолданылды. Бұл әдіс суда еритін, алмасатын, әлсіз арнайы сорбцияланған, органикалық заттармен байланысқан, темір және марганец оксиді мен гидроксидімен байланысқан және қалдық формаларды бөліп алуға мүмкіндік береді. Элементтерді сандық анықтау ICP-MS және ICP-AES әдістерін қолдану арқылы жүргізілді. Түбіндегі шөгінділердегі микроэлементтердің таралуы өзеннің гидрологиялық сипаттамаларына және бұрынғы сынақ полигонының антропогендік әсеріне байланысты айтарлықтай кеңістіктік гетерогенділікпен сипатталатыны анықталды. Бірқатар элементтер, ең алдымен уран, бериллий, молибден және кадмий бойынша кларк мәндерінің асып кетуі анықталды. Be, Sr және Cd ең жоғары концентрациясы өзеннің жоғарғы ағысында байқалды, ал Mo және U мөлшері төменгі ағысында артты. Негізгі арнаның түбіндегі шөгінділердегі уран негізінен суда еритін түрінде екені көрсетілді, бұл оның жоғары миграциялық қабілетін және қоршаған ортаға ықтимал қауіп төндіретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: *түбіндегі шөгінділер, микроэлементтер, тізбекті экстракция, кеңістіктік таралуы, ауыр металдар, уран, сирек кездесетін жер элементтері, Семей сынақ полигоны.*

DISTRIBUTION FEATURES OF TRACE ELEMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE KARABULAK STREAM, SEMIPALATINSK TEST SITE

M. T. Dyusembayeva, A.Zh. Tashekova*, S.E. Salmenbaeyv, S.D. Smirnov, N.K. Nurgaisinova

Branch of the Institute of Radiation Safety and Ecology, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

**E-mail for contacts: zhymanova.13@mail.ru*

This article presents the results of a study of the spatial distribution and occurrence forms of trace elements in the bottom sediments of the Karabulak Stream, located within the Degelen Mountains of the Semipalatinsk Test Site. Bottom sediment samples were collected at 19 points along the main stream channel and its four tributaries. A sequential extraction method was used to determine the occurrence forms of chemical elements. This method allows for the isolation of water-soluble, exchangeable, weakly specifically sorbed, organic matter-bound, iron and manganese oxide- and hydroxide-bound, and residual forms. Quantitative determination of elements was performed using ICP-MS and ICP-AES. It was established that the distribution of trace elements in the bottom sediments is characterized by significant spatial heterogeneity due to the hydrological characteristics of the stream and the anthropogenic impact of the former test site. Exceedances of Clarke values were detected for a number of elements, primarily uranium, beryllium, molybdenum, and cadmium. The highest concentrations of Be, Sr, and Cd were observed in the upper reaches of the stream, while Mo and U contents increased in the lower reaches. Uranium in the bottom sediments of the main channel was shown to be predominantly in a water-soluble form, indicating its high migration capacity and potential environmental hazard.

Keywords: *bottom sediments, trace elements, sequential extraction, spatial distribution, heavy metals, uranium, rare earth elements, Semipalatinsk Test Site.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-40-45
УДК 621.384.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ Kr, Xe, He НА УСКОРИТЕЛЕ ДЦ-60

А.М. Темір[1*], И.А. Иванов[1,2], А.Д. Сапар[1,2], Е.О. Унгарбаев[1,2], Е.В. Бихерт[1], Б.С. Аманжулов[1], А.С. Сейтбаев[1,2], И.К. Тлеубай[1]

[1] РГП «Институт ядерной физики» Агентства РК по атомной энергии, Алматы, Казахстан
[2] НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

** E-mail для контактов: a.temir@inp.kz*

В статье представлены результаты оптимизации режимов формирования низкоэнергетических ионных пучков Kr, Xe и He на ускорительном комплексе ДЦ-60, предназначенных для моделирования радиационных повреждений материалов. Выполнена модернизация электронно-циклотронного резонансного источника многозарядных ионов с заменой DECRIS-3 на DECRIS-3M, а также проведена оптимизация параметров ЭЦР-источника, системы инжекции, транспортировки и сканирования ионного пучка. Исследованы зарядовые состояния и интенсивности рабочих пучков, определены оптимальные режимы их формирования и обеспечено равномерное распределение плотности тока по поверхности мишени. Установлено, что средний ток пучка на мишени увеличился с 45 до 77 мкА для ионов He2+, с 13 до 26 мкА для Kr15+ и с 6 до 14 мкА для Xe23+, что соответствует увеличению в 1,7, 2,0 и 2,3 раза соответственно. Полученные результаты позволяют сократить время достижения требуемого флюенса и повысить эффективность проведения экспериментов по моделированию радиационных повреждений материалов.

Ключевые слова: *криптон, ксенон, гелий, низкие энергии, ускоритель.*

1. Введение

В связи с высокой стоимостью и длительностью нейтронных экспериментов ионное облучение широко применяется в качестве эффективного лабораторного метода моделирования радиационных повреждений конструкционных материалов для ядерной энергетики [1]. Использование ускоренных ионных пучков позволяет воспроизводить основные процессы, сопровождающие нейтронное воздействие, включая образование каскадов атомных смещений, генерацию радиационных дефектов и имплантацию газообразных продуктов деления, при этом существенно сокращая время накопления повреждений [2]. Достоверность результатов такого моделирования во многом определяется стабильностью параметров ионного пучка, его интенсивностью, зарядовым состоянием и равномерностью распределения по поверхности облучаемой мишени.

Одной из установок, обеспечивающих проведение подобных исследований, является ускорительный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60. Комплекс предназначен для ускорения положительно заряженных ионов с отношением массового числа к заряду A/Z = 6-12 до энергий 0,3-1,75 МэВ/нуклон и позволяет получать интенсивные пучки различных элементов для фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики, материаловедения и радиационных технологий [3,4]. Источником многозарядных ионов комплекса является электронно-циклотронный резонансный источник DECRIS-3, формирующий пучки ионов в широком диапазоне зарядовых состояний. После селекции требуемого отношения массы к заряду сформированный пучок может быть направлен как в циклотрон для дальнейшего ускорения, так и в низкоэнергетический канал для проведения экспериментов по исследованию радиационного воздействия на материалы.

В процессе многолетней эксплуатации комплекса было установлено, что воздействие высоких температур, плазмы и ионизирующего излучения приводит к постепенному ухудшению характеристик магнитной системы гексаполя ЭЦР-источника и, как следствие, к снижению эффективности формирования многозарядных ионных пучков. Необходимость модернизации источника была обоснована в работе [5], после чего ЭЦР-источник DECRIS-3 был заменен на модернизированную версию DECRIS-3M, обладающую улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Настоящая работа посвящена оптимизации параметров формирования низкоэнергетических пучков ионов Kr, Xe и He на ускорительном комплексе ДЦ-60 после модернизации ЭЦР-источника многозарядных ионов. Основное внимание уделено выбору оптимальных режимов работы ЭЦР-источника, систем инжекции, транспортировки и сканирования, обеспечивающих максимальную интенсивность и стабильность рабочих пучков. Выполнена количественная оценка эффективности модернизации и разработанных режимов, позволившая обосновать повышение среднего тока рабочих пучков и улучшение эксплуатационных характеристик ускорительного комплекса.

2. Методы

2.1 Плазменная очистка и подготовка ЭЦР-источника

Для очистки ионизационной камеры ЭЦР-источника и его внутренних металлических элементов от остаточных загрязнений и примесей проводилась плазменная обработка в аргоне (^{40}Ar). Схематическое изображение ЭЦР-источника представлено на рисунке 1. Плазменная обработка осуществлялась при мощности СВЧ-разряда порядка 350 Вт и поддерживалась в течение длительного времени. Данная процедура направлена на удаление остаточных газовых примесей и загрязнений с внутренних поверхностей плазменной камеры и элементов ЭЦР-источника, что способствовало снижению содержания посторонних примесей в плазме и улучшению условий формирования ионного пучка.

После плазменной очистки проводилась настройка ЭЦР-источника и анализ распределения ионов по зарядовым состояниям. На рисунке 2 представлено зарядовое распределение ионов аргона, полученное при настройке источника.

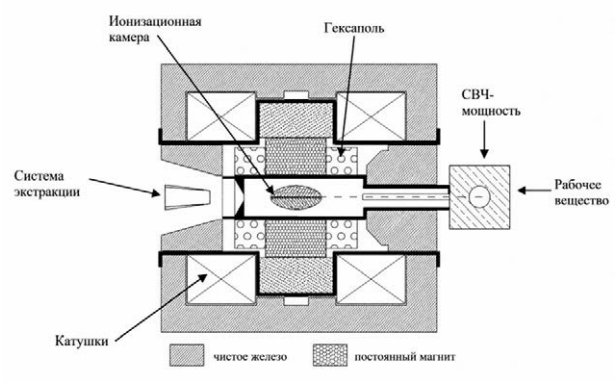


Рисунок 1. Схема ЭЦР-источника

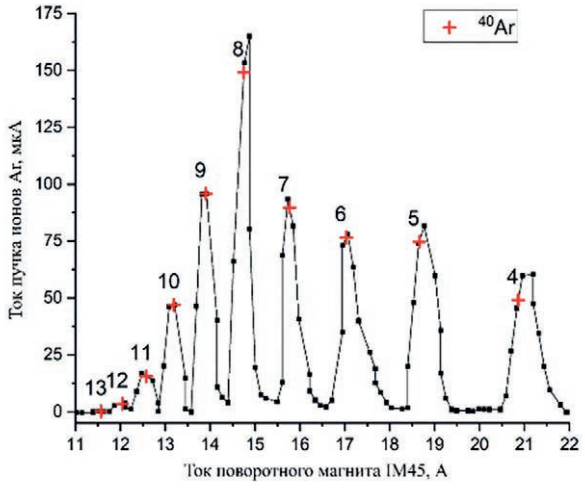
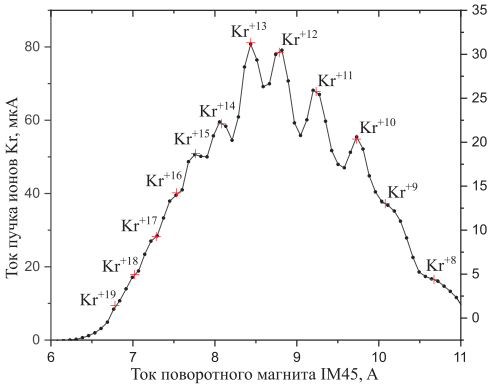


Рисунок 2. Зарядовое распределение ионов аргона

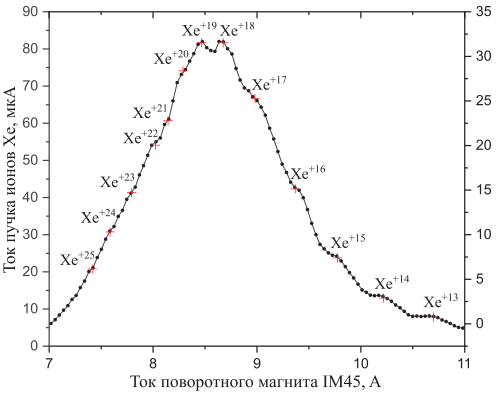
2.2 Настройка системы инжекции пучков ионов криптона, ксенона и гелия на ускорителе ДЦ-60

На следующем этапе работы проводилась оптимизация режимов формирования ионных пучков криптона (Kr), ксенона (Xe) и гелия (He). Целью данного этапа являлось получение стабильных ионных пучков требуемой интенсивности и зарядового состояния для последующего использования в экспериментах по ионному облучению материалов.

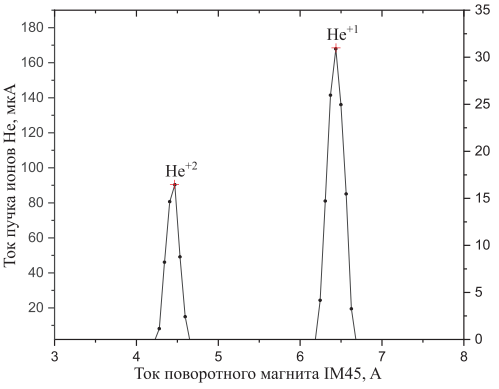
Для анализа сформированных пучков были получены спектры зарядовых состояний ионов криптона, ксенона и гелия, представленные на рисунке 3.



(а) спектр зарядовых состояний ионов криптона;



(б) спектр зарядовых состояний ионов ксенона;



(в) спектр зарядовых состояний ионов гелия

Рисунок 3. Зарядовое распределение ионов криптона, ксенона, гелия

Для ионов криптона и ксенона характерна сглаженная структура спектра зарядовых состояний, представленная на рисунках 3 (а) и 3 (б). Это обусловлено сложным изотопным составом данных элементов, включающим набор стабильных изотопов с различными массовыми числами, а также широким распределением ионов по зарядовым состояниям в плазме ЭЦР-источника. Вследствие этого снижается контраст между максимумами отдельных зарядовых состояний.

При этом выделение требуемого ионного пучка осуществлялось анализирующим поворотным магнитом IM45, предназначенным для селекции ионов по отношению массы к заряду A/Z. Настройка магнитного поля обеспечивала выделение необходимого зарядового состояния и подавление вклада соседних изотопных и зарядовых компонент в транспортируемом пучке. Основные параметры поворотного магнита IM45 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры поворотного магнита IM45

Параметр	Значение
Жёсткость пучка Bp, Т·м	10.22×10^{-2}
Отношение массы к заряду (A/Z)	2–20
Ускоряющий потенциал (U), кВ	25
Угол поворота осевой траектории ϕ, град	45
Радиус осевой траектории ρ0, мм	400
Межполюсный зазор (q), мм	100
Расчётная индукция магнитного поля (B), Т	0.27±1%
Неоднородность индукции поля в рабочей зоне ±50 мм, ΔB/B	$\leq\pm1\times10^{-3}$
Угол торцевого скоса входного полюса ε1, град	+12.00
Угол торцевого скоса выходного полюса ε2, град	+12.00

В рамках исследования была выполнена настройка системы инжекции пучков ионов криптона, ксенона и гелия. Схема ЭЦР-источника, используемого для формирования ионных пучков, представлена на рисунке 1. В состав системы входят катушки магнитной конфигурации, система экстракции, СВЧ мощность, система подачи рабочего вещества, источник смещающего напряжения (Bias), вытягивающее напряжение HV ECR, обеспечивающие необходимые условия для генерации и стабилизации плазмы.

Была проведена настройка параметров СВЧ-волны: для криптона и ксенона она была установлена на уровне 350 Вт, а для гелия – 50 Вт, что обусловлено различиями в динамике плазменных процессов и обеспечило оптимальные условия для ионизации газов и формирования стабильной плазмы.

Для получения требуемых энергий ионов использовались различные зарядовые состояния при фиксированном ускоряющем напряжении 20 кВ: для криптона энергия 300 кэВ достигалась при зарядовом состоянии +15, для ксенона энергия 460 кэВ – при +23, а для гелия энергия 40 кэВ – при +2. Выбор зарядовых состояний определялся соотношением E=qU (где E – энергия иона, q – его электрический заряд, U – ускоряющее напряжение) и являлся компромиссом между требуемой энергией пучка, интенсивностью и стабильностью формирования ионов в ЭЦР-источнике.

Известно, что с увеличением зарядового состояния интенсивность ионов в спектре ЭЦР-источника существенно снижается вследствие уменьшения доли высокозарядных компонент в плазме. Поэтому использование более высоких зарядовых состояний, несмотря на возможность получения больших энергий, сопровождалось значительным уменьшением тока пучка и усложнением условий его транспортировки. В то же время применение более низких зарядовых состояний не обеспечивало достижения требуемых энергетических характеристик ионов при заданном ускоряющем напряжении.

3. Результаты настройки системы аксиальной инжекции пучков ионов криптона, ксенона и гелия на ускорителе ДЦ-60

3.1 Формирование и транспортировка пучка

Для формирования и последующего вывода пучков ионов Kr, Xe и He использовалась система аксиальной инжекции, представленная на рисунке 4.

Система включает в себя последовательность соленоидов AS2, AS3 и AS4, обеспечивающих фокусировку и транспортировку пучка вдоль оси. Изменение траектории пучка, а также его пространственная селекция по зарядовому состоянию, осуществляются с использованием поворотных магнитов с углом отклонения 45° (AM45-1 и AM45-2) на рисунке 4.

Для коррекции траектории пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях применяются корректирующие катушки ACM2H, ACM2V, ACM3H и ACM3V. Дополнительно в системе установлены сканирующие устройства AVS и AHS, предназначенные для управления пространственным распределением пучка.

После прохождения поворотного магнита AM45-1 интенсивность пучка ионов Kr^{15+} составила 60,4 мкА, ионов Xe^{23+} – 34,33 мкА, а ионов He^{2+} – 119,82 мкА.

3.2 Оценка эффективности модернизации

Для оценки эффективности модернизации ЭЦР-источника DECRIS-3 и выполненной оптимизации режимов формирования, инжекции и транспортировки пучков проведено сравнение эксплуатационных характеристик ускорительного комплекса до и после модернизации. В качестве критерия использовали средний ток пучка, зарегистрированный на мишени при одинаковых энергетических режимах.

Эффективность выполненной модернизации подтверждается результатами эксплуатации ускорительного комплекса. Согласно данным журналов

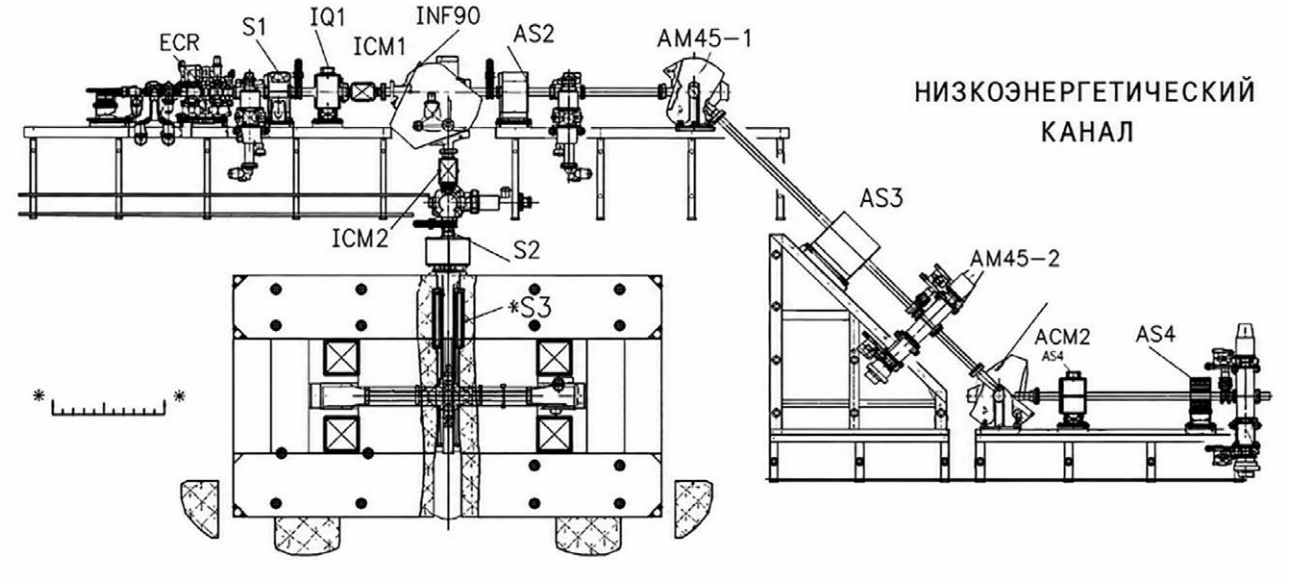


Рисунок 4. Конфигурация системы аксиального ввода ионных пучков криптона, ксенона и гелия на низкоэнергетическом канале ECR - источник ионов; IS1, IS2, IS3 - соленоидные магнитные линзы системы инжекции; IQ1 - квадрупольная линза; ICM1, ICM2 - корректирующие магниты системы инжекции; AS2, AS3, AS4 - соленоидные магнитные линзы системы аксиальной инжекции; AM45-1, AM45-2 - поворотные магниты с углом отклонения 45°; ACM2H, ACM2V, ACM3H, ACM3V — корректирующие магниты системы аксиальной инжекции; AVS и AHS — сканирующие устройства

работы ДЦ-60, после модернизации ЭЦР-источника DECRIS-3 до конфигурации DECRIS-3M и оптимизации режимов формирования, инжекции и транспортировки пучка средний ток ионов He^{2+}с энергией 40 кэВ увеличился с 45 до 77 мкА (в 1,7 раза), Kr^{15+}с энергией 300 кэВ – с 13 до 26 мкА (в 2 раза), а Xe^{23+} с энергией 460 кэВ – с 6 до 14 мкА (в 2,3 раза) по сравнению с показателями, зарегистрированными до модернизации.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном повышении эффективности формирования и транспортировки многозарядных ионных пучков, что обеспечивает сокращение времени достижения, требуемого флюенса и повышение производительности экспериментов по ионному моделированию радиационных повреждений материалов.

Таблица 2. Сравнение средних токов ионных пучков на мишени до и после модернизации ЭЦР-источника: DECRIS-3 и DECRIS-3M

Ион	Энергия, кэВ	До модернизации (DECRIS-3), мкА	После модернизации (DECRIS-3M), мкА	Рост, раз
He2+	40	45	77	1,71
Kr15+	300	13	26	2
Xe23+	460	6	14	2,33

3.3 Оптимизация системы сканирования

Низкоэнергетический канал оснащён профилометром АРМ – специализированным диагностическим прибором, предназначенным для мониторинга параметров ионного пучка. Профилометр, расположенный вблизи зоны облучения, обеспечивал контроль пространственного положения, формы и направления пучка непосредственно перед его попаданием на мишень [6].

В процессе подготовки ионного пучка к облучению мишени перед её поверхностью использовались электромагнитные сканеры AVS и AHS, обеспечивающие формирование однородности распределения плотности тока пучка по поверхности мишени. Подбор токов в обмотках сканеров осуществлялся экспериментально для каждого типа ионов с целью достижения равномерного облучения рабочей области мишени [6].

Система сканирования обеспечивает облучение стационарной мишени размерами 80×80 мм^2 с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже ±5% и с краевыми потерями пучка не более 20%.

Оптимальные параметры сканирования ионного пучка существенно зависят от вида рабочего газа. Для ионов криптона наилучшая однородность распределения плотности и требуемая степень развёртки достигаются при токах 0,9 А в горизонтальном и вертикальном направлении. В случае ксенона аналогичные характеристики обеспечиваются при токах 0,8 А по обоим направлениям. Для гелия оптимальные значения токов ниже и составляют 0,6 А в горизонтальном и вертикальном направлении. Различие в значениях токов обусловлено различиями в массе и энергии ионов, которые определяют условия, необходимые для обеспечения их равномерного распределения по поверхности мишени.

4. Заключение

В работе выполнена комплексная оптимизация режимов формирования низкоэнергетических ионных пучков He^{2+}, Kr^{15+} и Xe^{23+} на ускорительном комплексе ДЦ-60 после модернизации электронно-циклотронного резонансного источника многозарядных ионов с заменой DECRIS-3 на DECRIS-3M. Проведена настройка параметров ЭЦР-источника, системы инжекции, транспортировки и сканирования пучка, что позволило обеспечить стабильное формирование рабочих пучков и равномерное распределение плотности тока по поверхности мишени.

В результате проведенной модернизации и оптимизации средний ток пучка на мишени увеличился с 45 до 77 мкА для ионов He^{2+}, с 13 до 26 мкА для Kr^{15+} и с 6 до 14 мкА для Xe^{23+}, что соответствует увеличению в 1,7, 2,0 и 2,3 раза соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о повышении эффективности формирования и транспортировки многозарядных ионных пучков.

Повышение интенсивности рабочих пучков позволяет сократить время достижения требуемого флюенса при сохранении заданных параметров облучения, повысить производительность экспериментальных исследований и расширить возможности ускорительного комплекса ДЦ-60 для моделирования радиационных повреждений материалов, используемых в ядерной энергетике и радиационном материаловедении.

Данное исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP27511429 «Исследование радиационной стойкости карбидных покрытий под влиянием низкоэнергетического облучения ионами Kr, Xe, He»).

Литература / References:

1. Was G.S. Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation. Journal of Materials Research. 2015; 30(9):1158–1182. https://doi.org/10.1557/jmr.2015.73
2. Taller S., Van Coevering G., Wirth B.D., Was G.S. Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation. Scientific Reports. 2021; 11:2949. https://doi.org/10.1038/s41598-021-82512-w
3. Темир А.М., Иванов И.А., Колобердин М.В., Сапар А.Д., Мустафин Д.А., Унгарбаев Е.О., Бихерт Е.В., Аманжулов Б.С., Сейтбаев А.С., Сембаев С.С., Тлеубай И.К. Оптимизация параметров ускорителя ДЦ-60 для облучения ПЭТФ-плёнок тяжелыми ионами Kr. Вестник НЯЦ РК. 2025; (2):165–173.
4. Gikal B., Dmitriev S., Apel P., Bogomolov S., Borisov O., Buzmakov V., Gulbekyan G., Ivanenko I., Ivanov O., Itkis M., Kazarinov N., Kalagin I., Kolesov I., Papash A., Paschenko S., Tikhomirov A., Khabarov M. DC-60 heavy ion cyclotron complex: The first beams and project parameters. Instruments and Experimental Techniques. 2008; 51(5):642–644. https://doi.org/10.1134/S1547477108070248
5. Иванов И., Курахмедов А., Самбаев Е., Здоровец М., Логинов В., Богомолов С., Бондарченко А., Колобердин М., Сапар А., Унгарбаев Е., Темір А., Мустафин Д., Абдугалимов, Г. Modernization of ECR-source DECRIS-3. Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy Series. 2022; 134(1):29–36.
6. Иванов И.А., Колобердин М.В., Курахмедов А.Е., Сапар А.Д., Мустафин Д.А., Темір А.М., Унгарбаев Е.О., Бихерт Е.В., Аманжулов Б.С., Сейтбаев А.С., Сембаев С.С., Тлеубай И.К., Здоровец М.В. ПОЛУЧЕНИЕ Kr15+ с энергией 1.75 МэВ/нуклон на ускорителе тяжёлых ионов. Журнал ядерного общества Казахстана. 2024 ;(1(64)):78–90.

ДЦ-60 ҮДЕТКІШІНДЕ ТӨМЕН ЭНЕРГИЯЛЫ Kr, Xe, He ИОНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУ РЕЖИМДЕРІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Ә.М. Темір[1*], И.А. Иванов[1,2], Ә.Д. Сапар[1,2], Е.О. Унгарбаев[1,2], Е.В. Бихерт[1], Б.С. Аманжулов[1], А.С. Сейтбаев[1,2], И.К. Тлеубай[1]

[1] ҚР Атом энергиясы агенттігінің «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан
[2] «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: a.temir@inp.kz*

Мақалада материалдардағы радиациялық зақымдануларды модельдеуге арналған ДЦ-60 үдеткіш кешенінде төмен энергиялы Kr, Xe және He ион шоқтарын қалыптастыру режимдерін оңтайландыру нәтижелері ұсынылған. DECRIS-3 электрондық-циклотрондық резонанстық (ЭЦР) көп зарядты иондар көзі DECRIS-3M жаңартылған нұсқасына ауыстырылып, модернизацияланды. Сонымен қатар ЭЦР көзінің, ион шоғын инжекциялау, тасымалдау және сканерлеу жүйелерінің жұмыс параметрлері оңтайландырылды. Жұмысшы ион шоқтарының зарядтық күйлері мен қарқындылығы зерттеліп, оларды қалыптастырудың оңтайлы режимдері анықталды және нысана беті бойынша шоқ тогы тығыздығының біркелкі таралуы қамтамасыз етілді. Зерттеу нәтижесінде нысанадағы орташа шоқ тогы He2+ иондары үшін 45-тен 77 мкА-ға, Kr15+ иондары үшін 13-тен 26 мкА-ға, ал Xe23+ иондары үшін 6-дан 14 мкА-ға дейін артқаны анықталды, бұл сәйкесінше 1.7, 2.0 және 2.3 есе өсімге сәйкес келеді. Алынған нәтижелер қажетті флюенске жету уақытын қысқартуға және материалдардағы радиациялық зақымдануларды модельдеу бойынша эксперименттердің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *криптон, ксенон, гелий, төмен энергиялар, үдеткіш.*

OPTIMIZATION OF IRRADIATION PARAMETERS WITH LOW-ENERGY Kr, Xe, He IONS AT THE DC-60 ACCELERATOR

A.M. Temir[1*], I.A. Ivanov[1,2], A.D. Sapar[1,2], E.O. Ungarbayev[1,2], E.V. Bikhert[1], B.S. Amanzholov[1], A.S. Seitbayev[1,2], I.K. Tleubay[1]

[1]RSE "Institute of Nuclear Physics" of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan
[2]NJSC "L.N. Gumilyov Eurasian National University", Astana, Kazakhstan

** E-mail for contacts: a.temir@inp.kz*

This paper presents the results of optimizing the operating modes for the formation of low-energy Kr, Xe, and He ion beams at the DC-60 accelerator complex intended for simulation of radiation damage in materials. The electron cyclotron resonance (ECR) source of highly charged ions was upgraded by replacing the DECRIS-3 source with the modernized DECRIS-3M. In addition, the operating parameters of the ECR ion source, beam injection, transport, and scanning systems were optimized. The charge-state distributions and beam intensities were investigated; optimal beam formation conditions were determined, and a uniform beam current density distribution over the target surface was achieved. The average beam current on the target increased from 45 to 77 μA for He2+ ions, from 13 to 26 μA for Kr15+ ions, and from 6 to 14 μA for Xe23+ ions, corresponding to increases by factors of 1.7, 2.0, and 2.3, respectively. The obtained results reduce the time required to achieve the desired ion fluence and improve the efficiency of radiation damage simulation experiments in materials.

Keywords: *krypton, xenon, helium, low-energy ions, accelerator.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-46-55
ӘОЖ 621.793.71

AISI 321 БОЛАТ НЕГІЗДЕРІНДЕГІ Al65Cu20Fe15 ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА HVOF ПРОЦЕСІ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Д. Э. Балтабаева[1*], Ш. Курбанбеков [2], Л. Баятанова[1], А. Coruh[3], Ю. Амангельдиева[1]

[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
[2]Қ. А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан
[3]Сакарья университеті, Түркия

** Байланыс үшін e-mail:dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz*

Бұл зерттеуде жоғары жылдамдықты оттегі-отын бүрку (HVOF) әдісі параметрлерінің, әсіресе оттегі қысымына баса назар аудара отырып, Al65Cu20Fe15 жабындарының микроқұрылымы мен трибологиялық өнімділігіне әсері жүйелі түрде зерттелді. Жабындар екі оттегі қысымында (3,0 және 3,5 бар) алынды, ал басқа барлық бүрку параметрлері тұрақты болды. Микроқұрылымдық сипаттама сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (EDS) көмегімен жүргізілді. Ал квазикристалды және кристалды фазалардың үлесін бағалау үшін фазалық құрам талданды. Трибологиялық қасиеттер үйкеліс коэффициентін үздіксіз бақылай отырып, шарлы-дискілі сырғанау сынағы арқылы бағаланды. Алынған нәтижелер оттегі қысымының жабын тығыздығына, фазалық құрамына және трибопленканың пайда болуына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Осылайша, оттегінің 3,5 бар қысымында бүрку арқылы тұндырылған жабын ең оңтайлы сипаттамаларды көрсетті (тұрақты үйкеліс коэффициенті 0,55-0,60 және тұрақты тозу). Бұл квазикристалды фаза үлесінің жоғары болуымен және біртекті трибоқабықшаның түзілуімен түсіндіріледі. Осылайша, талдау үлгілерді 3,5 бар оттегі қысымында өңдеу оңтайлы процесс режимі екенін көрсетті. Бұл тығызырақ микроқұрылымның пайда болуын және жабынның трибологиялық қасиеттерінің жақсаруын қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: *квазикристалдар, Al-Cu-Fe, HVOF, AISI 321, трибология, XRD, SEM, үйкеліс коэффициенті, болат, EDS.*

Кіріспе

Қазіргі заманғы материалтану саласындағы экстремалды жағдайларда – жоғары температурада, абразивті жүктемелерде және агрессивті ортаға ұшырауда қолдануға арналған тозуға және коррозияға төзімді жабындарды әзірлеуге ерекше назар аударады. Сондықтан, өзекті міндеттердің бірі – аэроғарыш, энергетика және машина жасау салаларында қолданылатын құрылымдық материалдардың беріктігін арттыру мен ұзақ мерзімді жұмыс жасауға бейімдеу [1]. Бұл мәселені шешу үшін жылдам кристалдану әдістерімен өндірілген жабындардың қолданысы барған сайын артып келеді. Себебі кристалды, аморфты және квазикристалды фазалардың бірегей үйлесімі бар микроқұрылымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді [2]. Квазипериодты атомдық реттілігі бар квазикристалды материалдар ерекше қасиеттердің үйлесіміне ие: жоғары қаттылық, төмен үйкеліс коэффициенті, жоғары коррозияға төзімділік және 800°C дейінгі температурада жұмыс істейді [3]. Әртүрлі квазикристалды түзетін қорытпалардың ішінде Al-Cu-Fe жүйесі, әсіресе тұрақты квазикристалды фазаны құрайтын Al65Cu20Fe15 қорытпасы ерекше қызығушылық тудырады [4]. Бұл қорытпаға негізделген жабындар 700–1500 HV диапазонындағы микроқаттылықпен, төмен үйкеліс коэффициентімен (құрғақ үйкеліс кезінде 0,1–ге дейін) және жоғары адгезиямен сипатталады. Бұл оларды қарқынды тозу жағдайында жұмыс істейтін беттерді қорғау үшін қолдану әлеуетін арттырады [5]. Квазикристалды жабындарды қондыруға арналған қолданыстағы технологиялардың ішінде HVOF бүрку ең тиімді болып саналады [6]. Бұд әдіс бөлшектердің жоғары жылдамдығымен (700 м/с дейін) және субстрат температурасының салыстырмалы түрде төмен (100–200 °C дейін) болуымен ерекшеленеді, термиялық кернеулерді азайтады және қорытпаның бастапқы фазалық құрылымын сақтайды. Бөлшектердің кинетикалық энергиясының жоғары болуы мен олардың оттегімен шектеулі жанасуы тотығуды неғұрлым азайтып, тығыздығы жоғары жабынның қалыптасуын қамтамасыз етеді [6]. Бұл зерттеуде субстрат ретінде 08Х18Н10Т (AISI 321) тот баспайтын болаты пайдаланылды, ол коррозия мен ыстыққа жоғары төзімділігінің және созылғыштық қасиетінің үйлесіміне байланысты өнеркәсіпте кеңінен қолданылады. Болаттың құрамында шамамен 18% хром, 10% никель және титан бар, ол түйіршікаралық коррозияның алдын алатын тұрақтандырғыш элемент ретінде қолданылады. AISI 321 болатының созылу беріктігі 530–730 МПа, беріктігі 200–250 МПа, салыстырмалы созылуы 40–50%, қаттылығы ≈180 HV және 800 °C дейінгі температурада құрылымдық тұрақтылықты сақтайды [7]. Осы

қасиеттерінің арқасында AISI 321 болаты химия, мұнай және газ, тамақ және энергетика салаларында, әсіресе құбырларды, жылу алмастырғыштарды, реакторларды, қысыммен жұмыс істейтін ыдыстарды және турбина компоненттерін өндіру үшін кеңінен қолданылады. Жоғары беріктігіне қарамастан, тот баспайтын болаттар да үйкеліс, эрозия және экстремалды температура әсерінен зақымдалуы мүмкін. Мұндай зақымданумен күресу үшін квазикристалды Al-Cu-Fe негізіндегі жабындарды қолдану болаттардың қызмет ету мерзімін ұзартудың өте тиімді тәсілдерінің бірі. Бұл жабындар үйкелісті азайтып, тотығу мен тозудан қорғайды.

Бұл зерттеудің мақсаты HVOF әдісін қолдана отырып, AISI 321 болатына квазикристалды Al65Cu20Fe15 жабынын қондыру және оның трибологиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Негіз ретінде AISI 321 аустениттік тот баспайтын болаты (15×45×3 мм^3) пайдаланылды.

1-кесте. AISI 321 болатының химиялық құрамы

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Fe
0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	17,0–19,0	9,0–12,0	0,5	Rest

Алюминий (Al), мыс (Cu) және темір (Fe) ұнтақтарын Hebei Suoyi New Material Technology Co., Ltd. (Ханьдань, Қытай) компаниясы 99,5%-дан астам тазалықпен ұсынды. Бөлшектердің пішіні дұрыс емес, бұрышты және пластина тәрізді, бұл механикалық қорытпалау арқылы өндірілген материалдарға тән. Мұндай морфология әдетте сфералық ұнтақтармен салыстырғанда төмен ағындылыққа әкеледі, бірақ термиялық бүрку кезінде жабынның адгезиясына қолайлы үлкен беттік аумақты қамтамасыз етеді.

Талдау барысында бөлшектердің өлшемі 10-нан 80 микрометрге дейінгі кең диапазонды қамтитыны анықталды, атап айтқанда, 10-шы процентиль 18 мкм, медиана (50-ші процентиль) 40 мкм және 90-шы процентиль 75 мкм болды. Бұл бөлшектердің өлшемдік профилі HVOF технологиясында тегіс өңдеу және материалдың тұрақты берілуі үшін пайдалы [8-9]. Байқалған кубтық кристалдық құрылым, дифракция шыңдарындағы шағын ығысулармен қатар, синтезделген ұнтақтағы квазикристалды және кристалдық аймақтардың бар екенін көрсетеді. Бұл табиғи қаттылықтың, тотығуға төзімділіктің және төмен үйкелістің оңталы тепе-теңдігіне ықпал етеді, сондықтан, Al65Cu20Fe15 құрамы жоғары температура мен тозуға төтеп бере алатын жабындарды әзірлеу үшін жоғары әлеуетке ие [9].

Бұл зерттеу жұмысында HVOF бүрку кезінде оттегі қысымының әсері зерттелді. Себебі бұл параметр жабынның пайда болуы кезінде бөлшектердің жылдамдығын, температураның таралуын және тотығу дәрежесін реттеуде маңызды рөл атқарады. Оттегі қысымы газ ағынының жылдамдығы мен турбуленттілігіне әсер етеді, бұл бөлшектердің қызу және балқу дәрежесін, олардың субстратпен соқтығысу кезіндегі кинетикалық энергиясын, сондай-ақ қалыптасқан жабынның сипаттамаларын – микроқұрылымын, тығыздығын және адгезия беріктігін анықтайды [10]. Оттегі қысымының әсерін жеке бағалау үшін процесстің барлық басқа параметрлері тұрақты деңгейінде сақталды: бүрку саптамасы мен субстрат арасындағы қашықтық 250 мм, пропан қысымы 1,9 бар және ауа қысымы 2,2 бар [11–12].

Бүрку параметрлері HVOF процесінің сипаттамаларына [25] және жоғары сапалы жабындарға қойылатын талаптарға негізделіп таңдалды, 250 мм қашықтық бөлшектердің температурасы мен соққы жылдамдығы арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етті. Қызып кетудің алдын алды және квазикристалды құрылымды сақтады, ал 1,9 бар пропан қысымы бөлшектердің толық еруінсіз тұрақты жануды және біркелкі қызуды қамтамасыз етті. Осылайша, 3,0–3,5 бар оттегі қысымы бөлшектердің кинетикалық энергиясын, жабын тығыздығын және адгезиясын арттырды, ал 2,2 бар ауа қысымы отынның толық жануын және ұшу кезіндегі тотығуды азайтты (2-кесте). Нәтижесінде тұрақты жану, біркелкі бүрку үлгісі және біртекті жабынның қалыптасуы қамтамасыз етілді. Бөлшектер параметрлері мен бүрку арақашықтығының оңтайлылығы олардың жеткілікті дәрежеде қызуын және жоғары соққы энергиясын қамтамасыз етіп, құрылымы біркелкі қабаттың қалыптасуына ықпал етті.

2-кесте. HVOF параметрлері

Пропан қысымы, бар	Оттегі қысымы, бар	Ауа қысымы, бар	Арақашықтық, мм
1,9	3,0	2,2	250
1,9	3,5	2,2	250

Қолданылған жабындардың фазалық құрамы Kα сәулеленуін (λ = 1,5406 Å) генерациялайтын мыс анодымен жабдықталған Panalytical X'Pert PRO дифрактометрін (Philips, Амстердам, Нидерланды) пайдаланып рентгендік дифракция (XRD) әдісімен талданды. Барлық өлшеулер бөлме температурасында (25°C), 40 кВ жұмыс кернеуінде және 30 мА ток күшімен жүргізілді. Дифракциялық үлгілер 2θ диапазонында 20,01°-тан 89,99°-қа дейін, қадам өлшемі 0,02° және әр қадам үшін 2 с санау уақытымен жазылды. Фазаларды анықтау және талдау HighScore Plus бағдарламалық жасақтама пакетін пайдаланып жүргізілді.

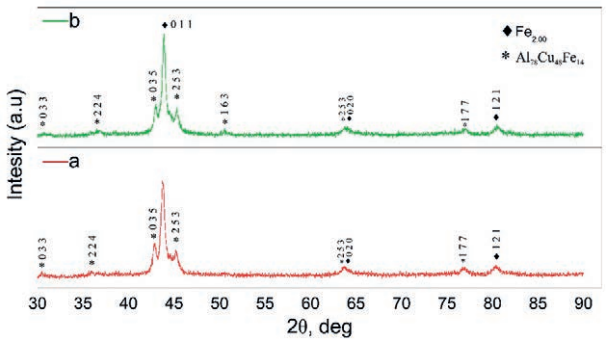
Жабындардың беттік морфологиясы мен элементтік құрамы Tescan Vega 4 микроскобын (Брно,

Чехия) пайдаланып сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) арқылы зерттелді. Трибологиялық көрсеткіштер TRB3 трибометрінде (Антон Паар, Бухс, Швейцария) шар-диск конфигурациясында жүргізілген сырғанау тозу сынақтарын қолдану арқылы бағаланды. Сынақтар құрғақ сырғанау жағдайында қалыпты жүктеме 5 Н, сырғанау жылдамдығы 5 см/с және жалпы сырғанау ұзындығы 90 м болғанда жүргізілді. Қарсы шар ретінде диаметрі 6 мм болатын 100Cr6 болат шар пайдаланылды. Жабынның да, қарсы шардың да тозу жылдамдығы ASTM G99 стандартына сәйкес анықталды.

Нәтижелер және талқылау

Рентгендік дифракциялық талдау пропан, оттегі және ауаны қолдана отырып HVOF әдісімен алынған жабындарда $Al_{0.5}Fe_{1.5}$ және $Al_78Cu_{48}Fe_{14}$ фазаларының бар екенін анықтады. Рентгендік дифракциялық үлгілер (1-сурет) фазалық құрамның тұндыру жағдайларына тәуелділігін көрсетті: параметрлер өзгерген сайын $Al_{0.5}Fe_{1.5}$ шыңдарының қарқындылығы төмендеді, ал квазикристалды фазаның шыңдары арты. Квазикристалдар трансляциялық симметрияның және шексіз бірлік ұяшықтың болмауымен сипатталады, ал құрылымдық жағынан ұқсас жуықтау фазалары реттелген және онша күрделі емес деп саналады [14, 25].

$Al_{0.5}Fe_{1.5}$ металларалық қосылысы (~25 ат.% Al) ұяшық параметрі a≈2,91 Å болатын Im-3m кубтық құрылымда кристалданады [15]. DO_3 типті атомдық реттілік дәстүрлі Fe-Al қатты ерітінділерімен салыстырғанда қаттылық пен тұрақтылықты арттырады. Трибологиялық тұрғыдан алғанда, HVOF арқылы алынған $Al_{0.5}Fe_{1.5}$ негізіндегі жабындар болатта құрғақ сырғанау кезінде жоғары үйкеліс коэффициентін (μ ≈ 0,6-0,7) көрсетеді [16]. Бұл қосылыстың металдық сипатына және айқын жабысқақ өзара әрекеттесуіне байланысты. Тозу негізінен жабысқақ-абразивті сипатқа ие, микрожарықтардың пайда болуымен бірге жүреді. Жоғары қаттылығына қарамастан, материал орташа сынғыштықты көрсетеді, бұл жүктеме кезінде чиптердің пайда болуына ықпал етеді.



1-сурет. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижесі

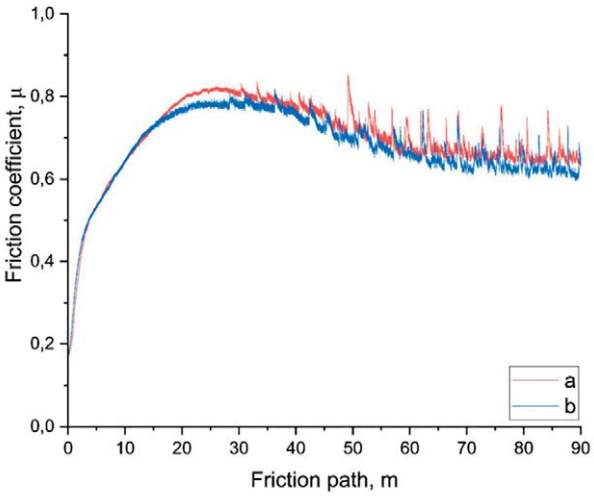
HVOF жабындарындағы квазикристалды құрылым квазикристалды ұнтақтан (балқыма тез салқындағаннан кейін) немесе субстраттағы бөлшектердің жоғары жылдамдықпен шашырауы және тез қатаюы кезінде қалыптасуы мүмкін. Al-Cu-Fe қорытпаларында ($Al_{62-63}Cu_{20-25}Fe_{12-15}$) негізгі фаза икосаэдрлік квазикристалды фаза болып табылады [17].

$Al_{78}Cu_{48}Fe_{14}$ фазасы ұяшық параметрі a = 12,3120 Å болатын кубтық құрылымға (Pm-3) ие және реттелген интерметалдық қосылыс ретінде жіктеледі, себебі олардың болуы тығыз орау және күшті интератомдық байланыстар арқылы қаттылық пен құрылымдық тұрақтылықты арттырады. Квазикристалды Al-Cu-Fe фазалары жоғары қаттылықпен сипатталады (~10 ГПа дейін, ≈1000 HV) [18] және Al 6061-T6-мен салыстырғанда HVOF жабындарының микроқаттылығының 4-6 есе артуын қамтамасыз етеді [19]. Жабындардың қасиеттері фазалық құрамға және тұндыру жағдайларына айтарлықтай байланысты, бұл квазикристалды фазаның тұрақтылығына әсер етеді [20]. Температура жоғарылаған сайын квазикристалды фазадан жуық кристалды фазаға ауысу байқалады [21].

Ұнтақтың морфологиясы (бұрышты және пластина тәрізді) оның аққыштығын төмендетіп, біркелкі берілмеуіне және бөлшектердің агломерациялануына әкелуі мүмкін [22]. Сондай-ақ, меншікті бетінің ауданының ұлғаюы жоғары оттегі қысымы кезінде тотығуға бейімділікті арттырады. Ал бөлшектердің дұрыс емес пішіні жабынның жергілікті ақауларына (микрожарықтар, толық емес күйдіру) ықпал етеді. Осы зерттеуде HVOF әдісі пропан қысымы 1,9 бар, оттегі қысымы 3,0-3,5 бар, ауа қысымы 2,2 бар және бүрку қашықтығы 250 мм болатын жағдайларда жүзеге асырылды. Бөлшектердің жалында болу уақыты қысқа болғандықтан, бұрыс пішінді бөлшектер толықтай қызып үлгермеуі мүмкін, бұл олардың соққы кезіндегі деформациялануын төмендетеді және жабын құрылымының біртексіз болуына әкеледі [23-24].

2-суретте үйкеліс коэффициентінің сырғанау қашықтығына тәуелділігі көрсетілген. Қарсы бет ретінде стандартты тірек материалы болып табылатын 100Cr6 болаты пайдаланылды, бұл нәтижелердің практикалық маңыздылығын қамтамасыз етті. Оттегі қысымын 3,0-ден 3,5 барға дейін арттыру бөлшектердің толық қызуына ықпал етеді, олардың пластикалық деформациясын жақсартады және тығызырақ және біркелкі жабын микроқұрылымын қалыптастырады. Трибологиялық сынақтар (5 Н, 5 см/с, 90 м) «В» үлгісінің (3,5 бар) тозуға төзімділігі ең жоғары екенін көрсетті: тозу ауданы 5764,3 мкм^2, тозу жылдамдығы 2,414×10^{-4} мм^3/Н×м болды. «А» үлгісі үшін (3,0 бар) бұл мәндер сәйкесінше 11 987,6 мкм^3 және 5,021×10^{-4} мм^3/Н×м болды. Осылайша, 3,5

бар оттегі қысымы Al-Cu-Fe жабындарының оңтайлы трибологиялық сипаттамаларын қамтамасыз етеді.

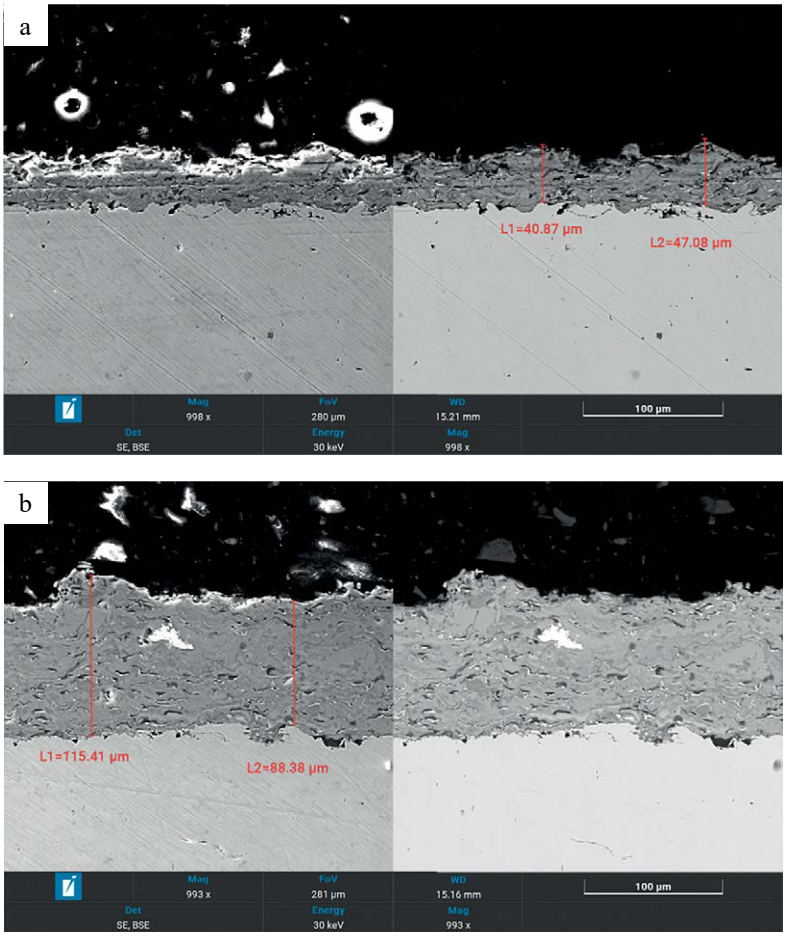


2-сурет. Үйкеліс коэффициентінің үйкеліс жолына тәуелділігінің графигі

Үйкеліс қисықтары (2-сурет) үлгілердің трибологиялық қасиеттеріндегі айырмашылықтарды көрсетеді: «А» үлгісі (оттегі қысымы 3,0 бар) тегіс жұмыс фазасымен және (0,70-0,72)±0,02 тұрақты күйдегі үйкеліс коэффициентімен сипатталады. Үйкелістің артуы металдық жанасу қабатын түзетін және 100Cr6 қарсы бетіне адгезияны күшейтетін интерметалдық Fe_2Al ($Fe_{1.5}Al_{0.5}$) фазасының басым болуына байланысты артып отырды.

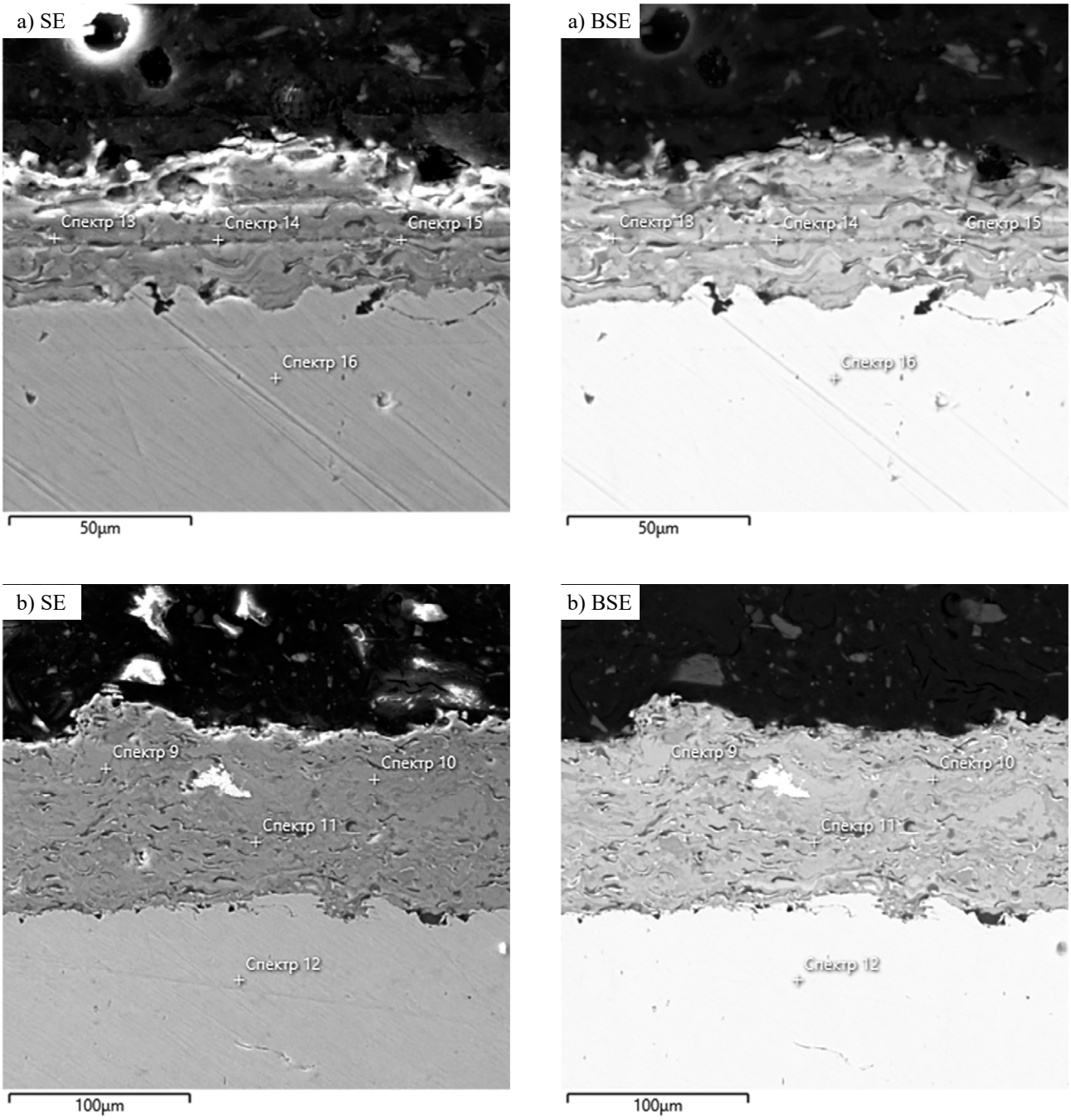
«В» үлгісі (оттегі қысымы 3,5 бар) үйкеліс коэффициентінің тұрақты қисықпен (0,55-0,60)±0,05 дейін төмендегенін көрсетеді. Төмен беттік энергия және квазикристалдардың шектеулі дислокациялық қозғалғыштығы адгезияның төмендеуіне және тұрақты сырғанау қабықшасының пайда болуына ықпал етеді [25]. Сонымен қатар, оңтайлы термиялық өңдеу жабын тығыздығын арттырады және тозуды тудыратын ақаулар санын азайтады.

Жабын қалыңдығы 40,87-ден 115,41 мкм-ге дейін өзгеріп, «А» үлгісі үшін 43,97±3,0 мкм және «В» үлгісі үшін 101,89±13,5 мкм болды. Кері шекарада химиялық өзара әрекеттесудің немесе металларалық фазалардың пайда болуының белгілері анықталмады, бұл негізінен механикалық адгезияны көрсетеді. Бұл адгезия бүрку кезінде бөлшектердің жоғары кинетикалық энергиясына және құммен өңдеуден кейін негіз бетінің кедір-бұдырлығына байланысты (3-сурет).



3-сурет. Al-Cu-Fe жабын қалыңдығының микросуреттер. Үлгілер (a-b)

4-суретте екінші реттік электрондар (SE) және кері шашыраңқы электрондар (BSE) режимдерінде алынған, жергілікті және сызықтық ЭДС талдауы үшін таңдалған «A» және «B» үлгілерінің жабындарының сипаттамалық қималары көрсетілген (оттегі қысымы сәйкесінше 3,0 бар және 3,5 бар).

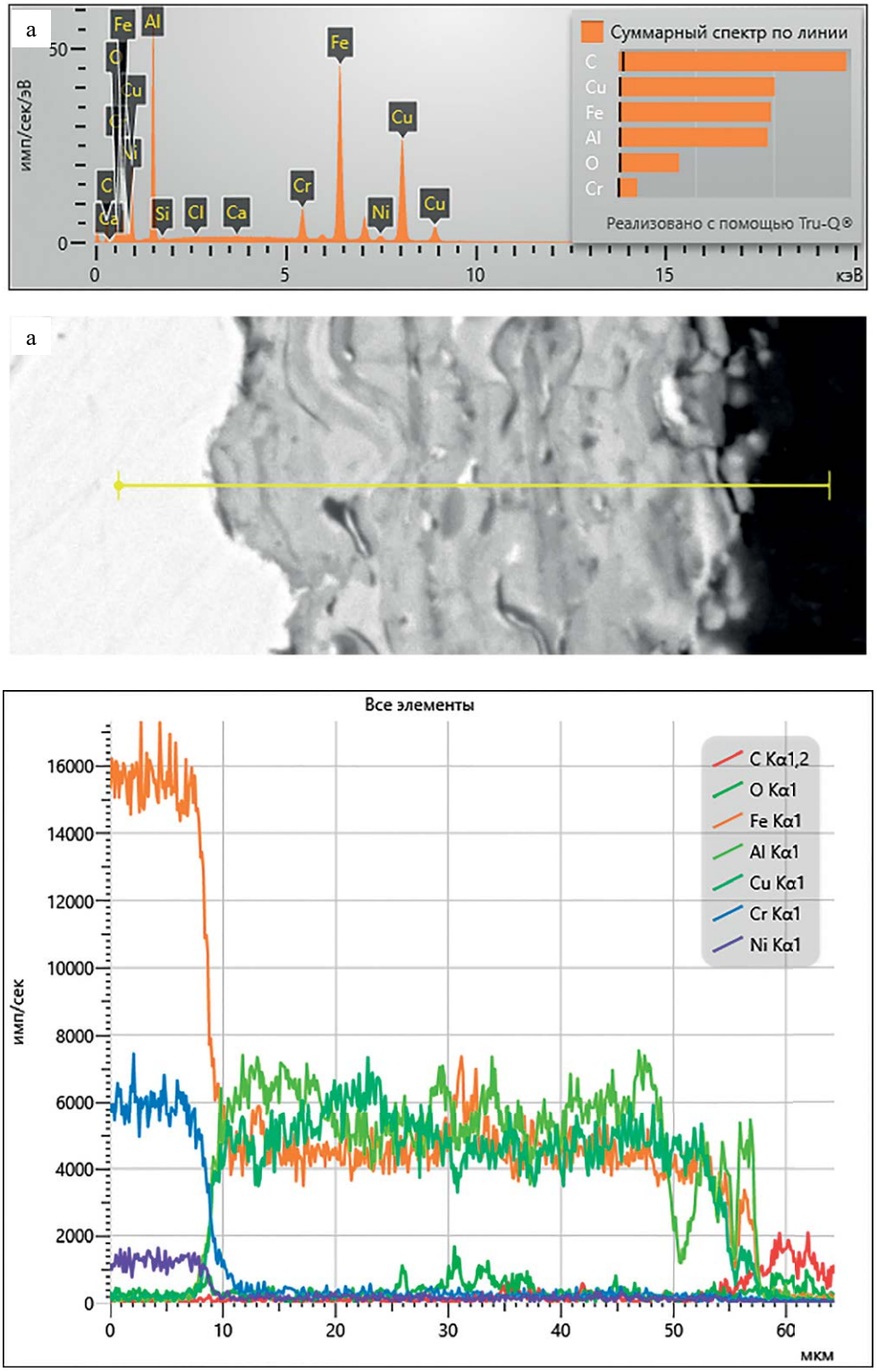


4-сурет. Оттегі режимдеріндегі SE және BSE кескіндері, үлгі: a) 3,0 бар b) 3,5 бар

Жабындардың құрылымдық біртектілігін одан әрі бағалау үшін «A» (оттегі қысымы 3,0 бар) және «B» (оттегі қысымы 3,5 бар) үлгілерінің көлденең қимасында сызықтық EDS талдауы жүргізілді. Алынған элементтің таралу профильдері фазалардың түзілу ерекшеліктерін және AISI 321 субстратымен жанасудың сипатын көрсетеді (5-сурет).

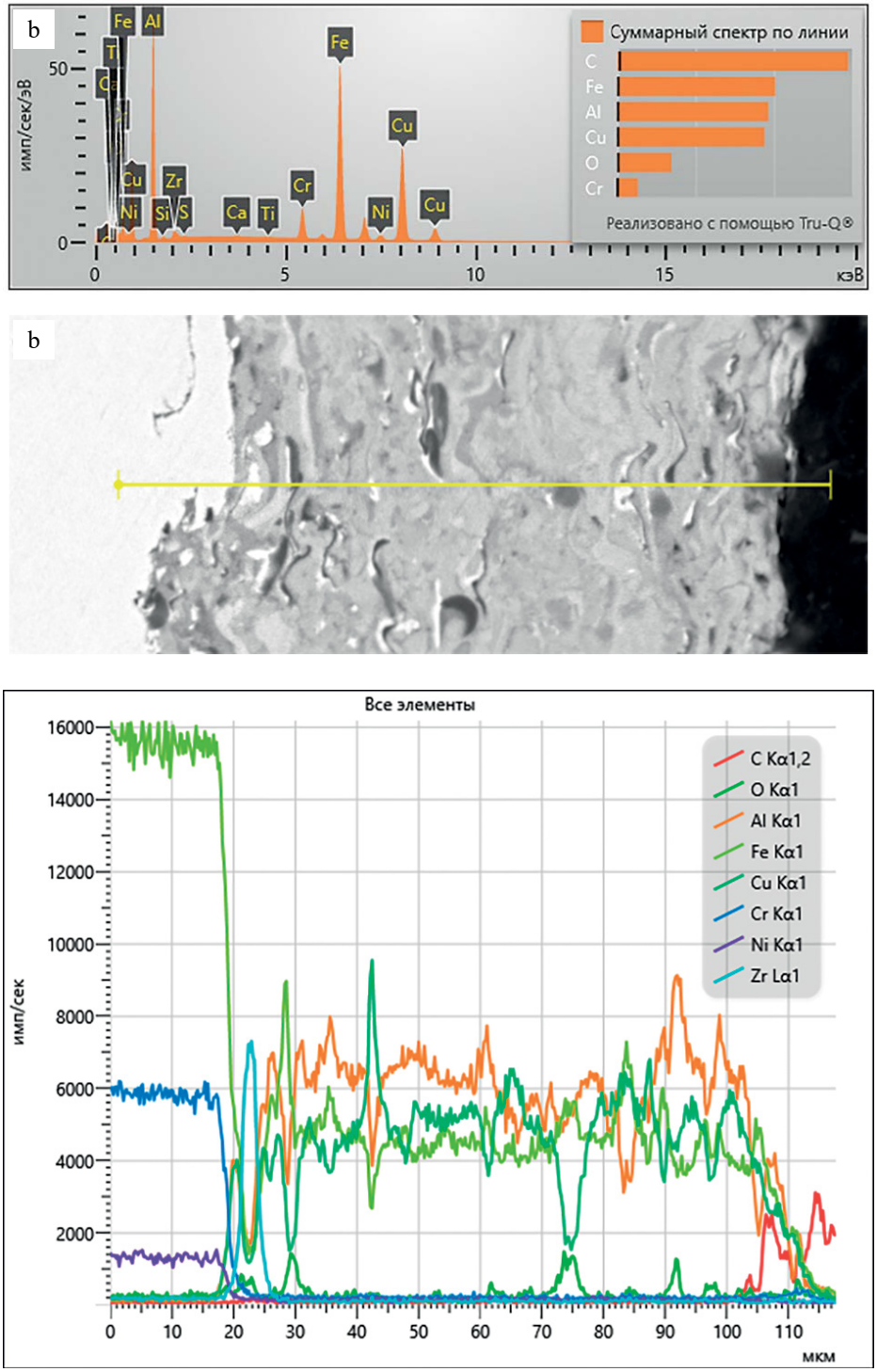
Сызықтық сканерлеу негізгі шыңдардың Al (Kα ≈ 1,49 кэВ), Fe (Kα ≈ 6,40 кэВ) және Cu (Kα ≈ 8,04 кэВ) сәйкес келетінін көрсетеді, бұл Al-Cu-Fe жүйесінің негізгі құрамын көрсетеді. Дегенмен, таралу профильдері, әсіресе Al және Cu үшін, қабат ішінде айқын платолар пайда болмай, айқын қарқындылық ауытқуларымен сипатталады. Бұл оттегі қысымының

төмендеуі кезінде бөлшектердің толық балқуымен байланысты микрокұрылымдық гетерогенділікті көрсетеді [26]. Интерфейс маңында Fe сигналының біртіндеп артуы байқалады, бұл субстраттың үлесіне де, Fe-Al интерметалл қосылыстарын қамтитын өтпелі аймақтың пайда болуына да байланысты болуы мүмкін [27]. Оттегі сигналы (O_2 Kα ≈ 0,52 кэВ) біркелкі тарамаған, бұл ламеллааралық шекаралар бойында жергілікті оксид қосындыларының бар екенін көрсетеді [28]. Жалпы алғанда, профиль тығыздығы аз және ақаулы жабын құрылымын көрсетеді.



5-сурет. 3,0 бар оттегі қысымындағы «А» үлгісінің ЭДС талдауы

Бұл жағдайда Al, Cu және Fe таралу профильдері жабын ішіндегі айқын платоларды және субстрат шекарасында қарқындылықтың күрт төмендеуін көрсетеді, бұл қабаттың жоғары химиялық біртектілігін көрсетеді. Cu таралуы бүкіл қалыңдық бойынша біркелкі, бұл квазикристалды Al-Cu-Fe фазасының тұрақтылығын және сегрегацияның болмауын көрсетеді. Оттегі сигналы орташа және салыстырмалы түрде біркелкі, айқын жергілікті максимумдарсыз, оңтайлы термиялық жағдайларда шектеулі тотығуды растайды. Интерфейстің жанында AISI 321 болатына өтуден туындаған айқын Fe градиенті байқалады, жабынға терең диффузия белгілері жоқ. Бұл элементтің таралу үлгісі минималды кеуектілігі және тұрақты фазааралық шекарасы бар тығыз, құрылымдық тұрғыдан бүтін қабаттың пайда болуын көрсетеді (6-сурет).



6-сурет. 3,5 бар оттегі қысымындағы B үлгісінің ЭДС талдауы

Осылайша, сызықтық ЭДС талдауы оттегі қысымын 3,5 барға дейін арттыру 3,0 бармен салыстырғанда біртекті және химиялық тұрғыдан тұрақты микроқұрылымның пайда болуына ықпал ететінін растайды. Бұл «В» үлгісінің трибологиялық қасиеттерінің жақсаруымен өзара байланысты.

Қорытынды

Осылайша, HVOF әдісі AISI 321 болатының негізіне 3,0 бар оттегі қысымында қалыңдығы 43,97±3,0 мкм және 3,5 барда қалыңдығы 101,89±13,5 мкм болатын квазикристалды Al65Cu20Fe15 жабындарын сәтті қалыптастырды. Жабынның пайда болуы негізінен айқын диффузиялық аймақ түзілмей, негізге механикалық адгезиямен қатар жүрді. Рентгендік дифракциялық талдау $Fe_{1.5}Al_{0.5}$ металларалық фазасының және Al-Cu-Fe жүйесінің квазикристалды фазасының бар екенін көрсетті. Оттегі қысымы 3,5 барға дейін артқан кезде квазикристалды компоненттің үлесінің артуы және Fe-Al фазалық шыңдарының салыстырмалы қарқындылығының төмендеуі байқалады. SEM және EDS зерттеулері 3,5 барда оксид қосындыларының минималды мөлшері бар тығызырақ және химиялық тұрғыдан біртекті құрылым пайда болатынын, ал 3,0 барда микроқұрылымдық гетерогенділік пен жергілікті кеуектілік байқалатынын көрсетті. Трибологиялық сынақтар оттегі қысымын 3,0-ден 3,5 барға дейін арттыру үйкеліс коэффициентінің 0,70-0,72-ден 0,55-0,60-қа дейін төмендеуіне және тозу жылдамдығының екі еседен астам төмендеуіне әкелетінін көрсетті. Өнімділіктің жақсаруы квазикристалды фаза үлесінің артуымен және тұрақты трибопленканың пайда болуымен байланысты. Осылайша, 3,5 бар оттегі қысымы қарқынды үйкеліс және жоғары механикалық жүктемелер кезінде пайдалануға арналған тығыз және тозуға төзімді Al65Cu20Fe15 жабындарын AISI 321 болатына қондыру үшін оңтайлы HVOF бүрку режимі болып табылады.

Алғыс білдіру. *Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант № AP26103943).*

Пайдаланылған әдебиет тізімі / References:

1. Zhu L., Soto-Medina S., Cuadrado-Castillo W., Hennig R. G., Manuel M. V. New experimental studies on the phase diagram of the Al-Cu-Fe quasicrystal-forming system // Materials & Design. – 2020. – Vol. 185. – P. 108186. – https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108186.
2. Wolf W., Koga G. Y., Schulz R., Savoie S., Kiminami C. S., Bolfarini C., Botta W. J. Wear and corrosion performance of Al-Cu-Fe-(Cr) quasicrystalline coatings produced by HVOF // Journal of Thermal Spray Technology. – 2020. – Vol. 29. – P. 1195-1207. – https://doi.org/10.1007/s11666-020-01053-2.
3. Рахадилов Б.К., Курбанбеков Ш.Р., Сейтов Б., Муктанова Н., Балтабаева Д.Э., Катпаева К. [Rahadilov B. K., Kurbanbekov Sh. R., Seytov B., Muktanova N., Baltabayeva D. E., Katpayeva K.] Теоретические исследования и решения оптимальных режимов процесса термического напыления HVOF для покрытия CR_3C_2-NiCr [Spraying process for Cr_3C_2-NiCr coating (in Russian)] // Вестник НЯЦ РК [NNC RK bulletin]. – 2023. – No. 4. – S. 22-31. – https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-4-22-31
4. Рахадилов Б. К., Муктанова Н., Какимжанов Д. Н. [Rahadilov B. K., Muktanova N., Kakimzhanov D. N.] Влияние варьирования расстояния напыления на структурно-фазовое состояние и механо-трибологические свойства покрытий на основе 86WC-10CO-4CR, полученных методом HVOF [Influence of varying the spraying distance on the structural-phase state and mechanotribological properties of 86WC-10Co-4Cr-based coatings obtained by the HVOF method (in Russian)] // Вестник НЯЦ РК [NNC RK bulletin]. – 2024. – No. 3. – S. 91-104. – https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-91-104
5. Пантелеенко Ф. И., Жэн П. [Panteleenko F. I., Zhen P.] Прогрессивные технологии лазерной наплавки и газотермического напыления [Progressive technologies of laser surfacing and gas-thermal spraying (in Russian)] // литье и металлургия [Foundry Production and Metallurgy]. – 2024. – No. 3. – S. 61-65. - https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-61-65
6. Dubois J. M., Belin-Ferré E. Friction and solid-solid adhesion on complex metallic alloys // Science and Technology of Advanced Materials. – 2014. – Vol. 15. – P. 034804. – https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/3/034804.
7. 08Х18Н10Т – сталь коррозионно-стойкая жаропрочная [08Kh18N10T – stal' korrozionno-stoykaya zharoprochnaya (in Russian)] // Марочник стали и сплавов [Marochnik stali i splavov]. – [Б. г. (B. g.)].
8. Kumar R., Sharma S., Singh J. P. et al. Enhancement in wear-resistance of 30MNCRB5 boron steel substrate using HVOF thermal sprayed WC-10%Co-4%Cr coatings // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 27. – P. 1072-1096.
9. Mishra B. B., Nautiyal H. Frictional and wear behavior of Cr_3C_2-NiCr coating on AISI-304 stainless steel // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Vol. 8, No. 4. – P. 4007-4017. – https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2036508.
10. Mora J., García P., Muelas R., Agüero A. Hard quasicrystalline coatings deposited by HVOF thermal spray to reduce ice accretion in aero-structures components // Coatings. – 2020. – Vol. 10, No. 3. – P. 290. – https://doi.org/10.3390/coatings10030290.
11. Shalaeva E. V., Selyanin I. O., Smirnova E. O., Smirnov S. V., Novachek D. D. Deformation behavior and structure of the i-Al-Cu-Fe quasicrystalline alloy in the vicinity of a nanoindenter imprint // Physics of the Solid State. – 2018. – Vol. 60, No. 2. – P. 307-314. – https://doi.org/10.1134/S1063783418020233.
12. Huttunen-Saarivirta E., Turunen E., Kallio M. Microstructural characterisation of thermally sprayed quasicrystalline

Al-Co-Fe-Cr coatings // Journal of Alloys and Compounds. – 2003. – Vol. 354. – P. 269-280. – https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00274-3.
13. Wolf W., Koga G. Y., Schulz R. et al. Wear and corrosion performance of Al-Cu-Fe-(Cr) quasicrystalline coatings produced by HVOF // Journal of Thermal Spray Technology. – 2020. – Vol. 29. – P. 1195-1207. – https://doi.org/10.1007/s11666-020-01053-2.
14. Murray C. ASTM G99 tip's perspective continuous wear contact // Today's Standards Tomorrow's Materials. – 2013. – Vol. 9.
15. Erkisi A., Surucu G. The investigation DO3-type Fe_3M (M = Al, Ga, Si and Ge) full-Heusler alloys within first principles study // Politeknik Dergisi. – 2018. – Vol. 21, No. 4. – P. 927-936.
16. Pougoum F., Martinu L., Klemberg-Sapieha J. E., Savoie S., Schulz R. Wear properties of Fe_3Al-based HVOF coatings strengthened with in-situ precipitated nitride and boride particles // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 307. – P. 109-117.
17. Wolf W., Koga G. Y., Schulz R., Savoie S., Kiminami C. S., Bolfarini C., Botta W. J. Wear and corrosion performance of Al-Cu-Fe-(Cr) quasicrystalline coatings produced by HVOF // Journal of Thermal Spray Technology. – 2020. – Vol. 29. – P. 1195-1207.
18. Babilas R., Bajorek A., Spilka M., Radoń A., Łoński W. Structure and corrosion resistance of Al-Cu-Fe alloys // Progress in Natural Science: Materials International. – 2020. – Vol. 30, No. 3. – P. 393-401.
19. Mora J., García P., Muelas R., Agüero A. Hard quasicrystalline coatings deposited by HVOF thermal spray to reduce ice accretion in aero-structures components // Coatings. – 2020. – Vol. 10. – P. 1-22.
20. Борисова А. Л., Борисов Ю. С., Астахов Е. А. и др. [Borisova A. L., Borisov Yu. S., Astakhov E. A. i dr.] Теплозащитные свойства газотермических покрытий, содержащих квазикристаллический сплав системы Al-Cu-Fe [Teplozashchitnyye svoystva gazotermicheskikh pokrytiy, soderzhashchikh kvazikristallicheskiy splav sistemy Al-Cu-Fe (in Russian)] // Автоматическая сварка [Avtomaticheskaya svarka]. – 2012. – № 4 (708). – С. 36-41.
21. Шалаева Е. В., Прекуль А. Ф. [Shalayeva E. V., Prekul' A. F.] Структурно-фазовые превращения в квазикристаллообразующих сплавах Al-Cu-Fe и дефекты икосаэдрической фазы [Strukturno-fazovyye prevrashcheniya v kvazikristalloobrazuyushchikh splavakh Al-Cu-Fe i defekty ikosaedricheskoy fazy (in Russian)] // Физика металлов и металловедение [Fizika metallov i metallovedeniye]. – 2010. – Т. 109, № 4. – С. 424-433.
22. Dubois J. M., Belin-Ferré E. Friction and solid-solid adhesion on complex metallic alloys // Science and Technology of Advanced Materials. – 2014. – Vol. 15. – P. 034804. – https://doi.org/10.1088/1468-6996/15/3/034804.
23. Fleury E., Kim Y. C., Kim J. S. et al. Sliding friction and wear behavior of Al-Ni-Co-Si quasicrystalline coatings deposited by the high-velocity oxy-fuel spraying technique // Journal of Materials Research. – 2002. – Vol. 17. – P. 492-501.
24. Suárez M. A., Esquivel R., Alcántara J., Dorantes H., Chávez J. F. Effect of chemical composition on the microstructure and hardness of Al-Cu-Fe alloy // Materials Characterization. – 2011. – Vol. 62, No. 9. – P. 917-923.
25. Kurbanbekov S., Gaipov T., Saidakhmetov P. et al. Microstructure, phase components, and tribological properties of Al65Cu20Fe15 quasicrystal coatings deposited by HVOF // Lubricants. – 2025. – Vol. 13, No. 7. – P. 297.
26. Li L., Bi Q., Yang J. et al. Large-scale synthesis of Al-Cu-Fe submicron quasicrystals // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 59, No. 6. – P. 587-590.
27. Suárez M. A., Esquivel R., Alcántara J., Dorantes H., Chávez J. F. Effect of chemical composition on the microstructure and hardness of Al-Cu-Fe alloy // Materials Characterization. – 2011. – Vol. 62, No. 9. – P. 917-923.
28. Huttunen-Saarivirta E., Turunen E., Kallio M. Influence of Cr alloying on the microstructure of thermally sprayed quasicrystalline Al-Cu-Fe coatings // Intermetallics. – 2003. – Vol. 11, No. 9. – P. 879-891.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА HVOF НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ Al65Cu20Fe15 НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ СТАЛИ AISI 321

Д.Э. Балтабаева[1*], Ш. Курбанбеков[2], Л. Баятанова[1], А. Coruh[3], Ю.Амангельдиева[1]

[1]Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан
[2]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан
[3]Университет Сакарья, Турция

** E-mail для контактов:dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz*

В настоящем исследовании систематически изучается влияние параметров высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), с особым акцентом на давление кислорода, на микроструктуру и трибологические характеристики покрытий Al65Cu20Fe15. Покрытия наносились при двух значениях давления кислорода (3,0 и 3,5 бар), при этом остальные параметры процесса напыления оставались неизменными. Микроструктурная характеристика проводилась с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), а фазовый состав анализировался для оценки доли квазикристаллических и кристаллических фаз. Трибологическое поведение оценивалось методом испытаний по схеме «шар-диск» (ball-on-disk) при скользящем трении с непрерывной регистрацией коэффициента трения. Результаты показывают, что давление кислорода сильно влияет на плотность покрытия, фазовый состав и образование трибопленок. Покрытие, нанесенное методом напыления при давлении кислорода 3,5 бар, продемонстрировало наиболее сбалансированные характеристики со стабильным коэффициентом трения 0,55–0,60 и постоянным износом, что объясняется более высокой долей квазикристаллической фазы и однородной трибопленкой. Таким образом, по результатам проведенного анализа установлено, что обработка образцов при давлении кислорода 3,5 бар является оптимальным технологическим режимом, обеспечивающим формирование более плотной микроструктуры и улучшенные трибологические характеристики покрытия.

Ключевые слова: *квазикристаллы, Al-Cu-Fe, HVOF, AISI 321, трибология, XRD, СЭМ, коэффициент трения, сталь, EDS.*

INFLUENCE OF HVOF PROCESS PARAMETERS ON THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF Al65Cu20Fe15 COATINGS ON AISI 321 STEEL SUBSTRATE

D.E. Baltabayeva[1*], Sh. Kurbanbekov[2], L. Bayatanova[1], A. Coruh[3], Y. Amangeldiyeva[1]

[1]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
[2]Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan
[3]Sakarya University, Türkiye

** E-mail for contacts:dilnoza.baltabayeva@ayu.edu.kz*

This study systematically examines the influence of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying parameters, with particular emphasis on oxygen pressure, on the microstructure and tribological performance of Al65Cu20Fe15 coatings. The coatings were deposited at two oxygen pressures (3.0 and 3.5 bar), while all other spraying parameters remained constant. Microstructural characterization was performed using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS), and phase composition was analyzed to assess the proportion of quasi-crystalline and crystalline phases. Tribological behavior was assessed using a ball-on-disk sliding test with continuous friction coefficient recording. The results show that oxygen pressure significantly influences coating density, phase composition, and tribofilm formation. The coating deposited by spraying at an oxygen pressure of 3.5 bar demonstrated the most balanced characteristics, with a stable friction coefficient of 0.55–0.60 and consistent wear, which is explained by a higher proportion of the quasicrystalline phase and a homogeneous tribofilm. Thus, the analysis revealed that processing the samples at 3.5 bar oxygen pressure is the optimal process mode, ensuring the formation of a denser microstructure and improved tribological properties of the coating.

Keywords: *quasicrystals, Al-Cu-Fe, HVOF, AISI 321, tribology, XRD, SEM, friction coefficient, steel, EDS.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-56-62
УДК 621.039.3

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ АМПУЛ НА ПАРАМЕТРЫ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТОПЛИВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РЕАКТОРЕ ИГР

Г.Г. Какимова*, О.М. Жанболатов, Р.А. Иркимбеков, А.С. Сураев, Н.Е. Мухамедов

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: kakimova@nnc.kz*

В данной работе проведен анализ влияния материала защитной ампулы на нейтронно-физические характеристики гамма-нейтронного облучения экспериментальных образцов топлива при испытаниях на исследовательском реакторе ИГР. Расчеты выполнены с использованием кода MCNP6 [1] и библиотек ENDF/B-VII [2]. Рассмотрены конструкционные материалы защитной ампулы, применяемые при испытаниях экспериментальных тепловыделяющих сборок. Определены зависимости энерговыделения, спектральных характеристик нейтронного поля и пространственного распределения потока нейтронов от состава и толщины стенок защитной ампулы. Установлено, что выбор материала ампулы оказывает количественно измеримое влияние на условия облучения топливных элементов, которое необходимо учитывать при интерпретации результатов реакторных испытаний. Полученные результаты формируют основу для обоснования конструктивных решений и оптимизации условий облучения топливных элементов.

Ключевые слова: *защитная ампула, топливные элементы, нейтронно-физические характеристики, энерговыделение, исследовательский реактор ИГР.*

Введение

В настоящее время исследовательские ядерные реакторы широко используются для проведения экспериментальных исследований, направленных на изучение нейтронно-физических и тепловых процессов в ядерном топливе и конструкционных материалах. Одним из основных направлений таких исследований является облучение топливных элементов в специально разработанных защитных ампулах, размещаемых в активной зоне реактора. Результаты подобных экспериментов используются при обосновании проектных решений, повышении уровня безопасности и оптимизации характеристик топлива энергетических ядерных реакторов.

Материалы и конструкция защитной ампулы определяют характер взаимодействия нейтронного потока с веществом, что оказывает влияние на формирование спектра нейтронов, пространственное распределение плотности нейтронного потока и энерговыделение в топливных твэлах. В ряде случаев материал защитной ампулы может оказывать существенное влияние на экспериментальные параметры, что необходимо учитывать при интерпретации результатов облучательных экспериментов.

В испытаниях используются ампулы типов ID-M и WF. Ампула ID-M выполняет функции герметичного силового корпуса экспериментального устройства, обеспечивая локализацию внутренних элементов, их охлаждение и защиту реакторной установки. Ампула WF применяется для методических и физических исследований с модельной ТВС и предназначена для изучения распределения энерговыделения и теплового состояния элементов экспериментального устройства в условиях реакторных экспериментов.

Особый интерес представляет анализ влияния конструкционных материалов с различными нейтронно-физическими свойствами, таких как сталь и цирконий, применяемых в одно- и двустенных защитных ампулах. Стальные ампулы характеризуются относительно высоким сечением захвата нейтронов и способны оказывать экранирующее воздействие на нейтронный поток, тогда как циркониевые сплавы обладают более благоприятными нейтронно-физическими свойствами и широко применяются в ядерной энергетике. Сравнительный анализ указанных вариантов ампул позволяет оценить степень их влияния на параметры облучения твэлов.

Актуальность подобных исследований возрастает при моделировании облучения твэлов перспективных энергетических реакторов в условиях исследовательского реактора ИГР [3], поскольку различия в спектральных характеристиках и геометрии активной зоны могут усиливать влияние конструкционных элементов облучательного устройства на параметры испытаний. В этой связи требуется проведение детального анализа влияния материалов и конструкции защитной ампулы на параметры облучения твэлов с использованием современных методов численного моделирования.

Целью работы является исследование влияния материала и конструкции защитной ампулы на параметры облучения и, в первую очередь, на распределение энерговыделения в топливных твэлах.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: разработка нейтронно-физической расчетной модели с учетом конструктивных особенностей защитных ампул; проведение нейтронно-физических расчетов для различных вариантов материала защитной ампулы; в том числе при различных состояниях активной зоны при различной температуре графитовой кладки реактора и положении стержней регулирования; сравнительная оценка энерговыделения в твэлах при использовании защитных ампул двух типов при различных динамических испытаниях.

Научная новизна работы заключается в комплексной оценке влияния материала и конструктивного исполнения защитных ампул (одностенных и двустенных) на параметры облучения твэлов в условиях исследовательского реактора ИГР. Впервые для рассматриваемой конфигурации выполнено сопоставление стальных и циркониевых ампул с учетом их влияния на распределение энерговыделения, коэффициент размножения нейтронов и параметры реактивности при различных режимах работы активной зоны.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при выборе материала и конструкции защитных ампул для внутриреакторных испытаний топливных элементов. Результаты исследования могут быть применены при проектировании экспериментальных устройств, интерпретации результатов облучательных экспериментов, а также при обосновании условий испытаний перспективного ядерного топлива энергетического реактора.

Результаты работы могут быть использованы при выборе материалов защитных ампул и обосновании конструктивных решений при их проектировании.

Описание объекта исследования

Объектом исследования является экспериментальное устройство, топливом которого являются твэлы энергетического реактора, размещенные в защитных ампулах. Модель активной зоны с размещенными твэлами была построена в программном комплексе MCNP6.

Объект облучения представляет собой квадратную ТВС, окруженную стальной оболочкой. Топливом являются твэлы энергетического реактора. Твэл состоит из герметичной оболочки, внутри которой размещается топливо и локализуются продукты деления. В твэл помещены цилиндрические таблетки из диоксида урана с плотностью 10,31 г/см^3, каждая с внешним радиусом 4,10 мм, формирующие топливный столб высотой 800 мм. Оболочка твэла с радиусом 4,75 мм и высотой 800 мм выполнена из циркониевого сплава. Между топливным материалом и циркониевым сплавом имеется газовый зазор.

Ловушка представляет собой стакан из стали 12Х18Н10Т с внешним радиусом 79 мм и высотой 905 мм. Корпус представляет собой двухслойную сварную конструкцию: наружный корпус – из цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем, внутренний — из обечайки со сферическим днищем, с зазором между ними для тракта охлаждения азотом. Корпуса выполнены из легированных сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, а внутренние охлаждающие трубки – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Основные габариты: наружный диаметр обечайки 219 мм, внутренний – 195 мм; внутренний диаметр страховочного корпуса – 171 мм при длине около 3962 мм. На рисунке 1 представлена схема расположения твэлов (1-9) в ТВС (3×3).

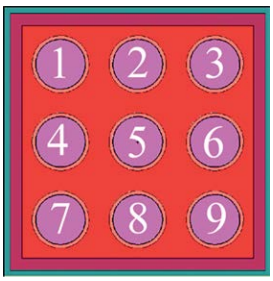


Рисунок 1. Схема расположения твэлов (1-9) в ТВС (3×3)

На рисунке 2 представлено поперечное сечение расчетной модели тепловыделяющей сборки, размещенной в реакторе ИГР.

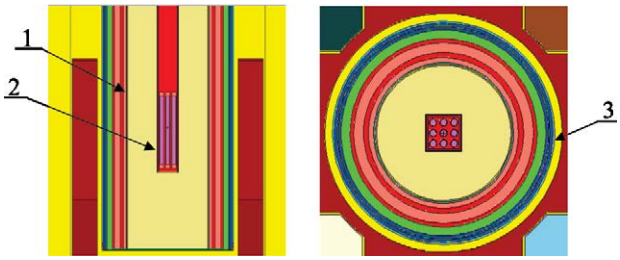


Рисунок 2. поперечное сечение расчетной модели тепловыделяющей сборки, размещенной в реакторе ИГР 1– ловушка, 2 – ТВС, 3 – НА-228

Ампулы ID-M и WF конструктивно включают в себя корпус с днищем и крышкой, образующие замкнутый объем для локализации тепловых и радиационных воздействий, возникающих в процессе эксперимента.

На рисунках 3 и 4 представлены ампулы ID-M и WF [4].

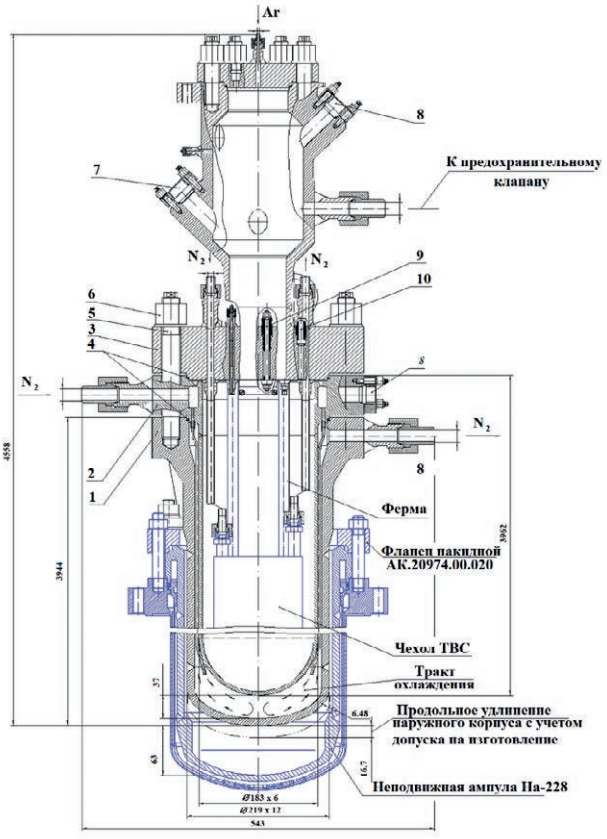


Рисунок 3. Ампула ID-M
1 – корпус наружный; 2 – корпус внутренний; 3 – крышка ID-M; 4 – прокладка 212×202×2; 5 – шпилька М27×2; 6 – гайка М27×2; 7 – заглушка Ду28; 8 – заглушка Ду24; 9 – токоввод; 10 – имитатор

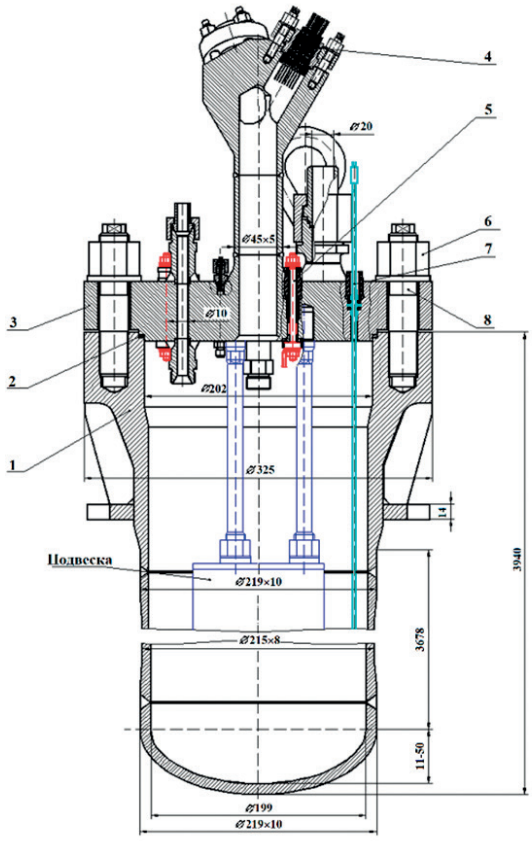


Рисунок 4. Ампула WF
1 – корпус, 2 – прокладка, 3 – крышка, 4 – гермопроходник, 5 – токоввод, 6 – гайка М30×2 ГОСТ 15523-70, 7 – датчик нейтронного потока, 8 – шпилька М30×2

В расчетных исследованиях рассматриваются два варианта исполнения ампул, отличающихся материалом корпуса: из нержавеющей стали и из циркониевого сплава (99% циркония и 1% ниобия). Ампула из стали характеризуется высокой прочностью и устойчивостью к механическим и термическим нагрузкам, тогда как ампула из циркониевого сплава обладает пониженным поглощением нейтронов и меньшим влиянием на нейтронно-физические характеристики активной зоны. При замене стальной ампулы на циркониевую размеры всех элементов конструкции не меняются.

Использование ампул из различных материалов позволяет оценить влияние конструкционного материала силового корпуса на тепловые и нейтронно-физические параметры экспериментального устройства в условиях реакторных испытаний.

Метод исследования

Исследование проводилось с целью оценки влияния материала защитной ампулы на нейтронно-физические характеристики топливных элементов, испытываемых в исследовательском реакторе. Исследование проводилось для холодного и горячего состояний активной зоны, характеризующихся разогревом активной зоны и выведением стержней регулирования до полного извлечения из активной зоны. Расчетная методика для исследования экспериментального устройства при различных состояниях реактора представлена в [5].

В результате проведенных расчетов определяют отношение энерговыделения в твэле к энерговыделению в реакторе ИГР по формуле:

$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m} \qquad (1)$$

где q – энерговыделение в топливном твэле, о.е.;
Q – энерговыделение в реакторе ИГР, о.е.;
m – масса ампулы, г.

Для оценки теплового состояния ампул при интегральной мощности 5200 МДж выполнен расчет адиабатического нагрева по формуле [6]:

$$\Delta T = \frac{k}{c} \cdot 5200 \cdot 10^6 \ (2)$$

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Результаты анализировались в отношении распределения энерговыделения по высоте твэла и изменения нейтронно-физической характеристик в зависимости от материала ампулы.

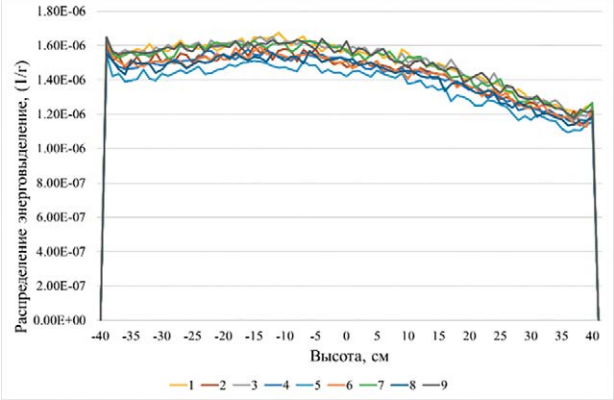
В расчетах были использованы следующие параметры: общее количество нейтронов (историй), запускаемых в одном цикле – 1 000 000; начальное значение коэффициента размножения нейтронов –1,00; количество начальных циклов, которые пропускаются до начала активного расчета – 20, общее количество циклов в расчете – 200.

Результаты расчетов

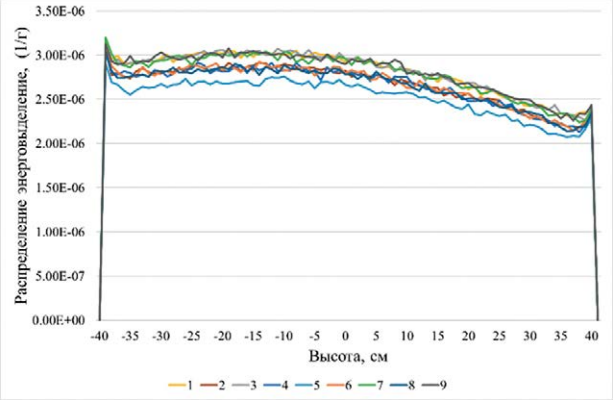
Для предварительного анализа проведен сравнительный расчет энерговыделения в ТВС экспериментального устройства в вариантах с одностенной и двустенной ампулами. Рассматривались два варианта материала оболочки каждой ампулы: нержавеющая сталь и циркониевый сплав. Расчеты проводились при одинаковых нейтронно-физических условиях, соответствующих номинальному режиму работы реактора, что обеспечивало корректное сравнение влияния материала ампулы на распределение энерговыделения.

Расчеты проводились для холодного состояния реактора. Холодное состояние реактора – режим эксплуатации ядерного реактора, при котором температура активной зоны составляет 20 °С. Погрешность расчета энерговыделения составила 1%.

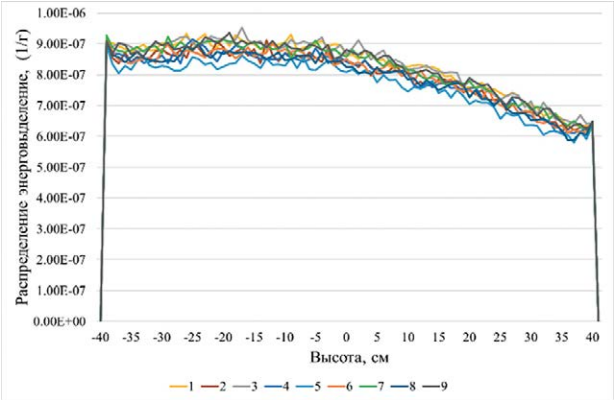
На рисунке 5 представлены распределения энерговыделения в расчетной модели для двух вариантов конструкции ампулы – со стальной и с циркониевой оболочкой, полученные с использованием детекторов WF и ID-M. Показано влияние материала ампулы на уровень и форму распределения энерговыделения по высоте твэлов. В целом характер распределений сохраняется, однако применение циркониевой ампулы приводит к более высоким значениям энерговыделения по сравнению со стальной. Установлено, что замена стальной ампулы на циркониевую приводит к увеличению энерговыделения WF в 1,9 раза, а ID-M – в 3,3 раза.



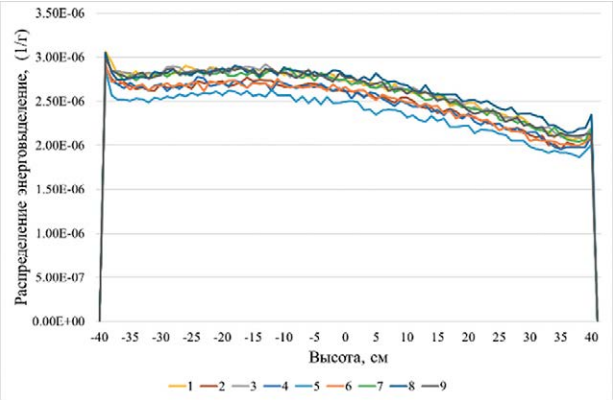
а) стальная (WF)



б) циркониевая (WF)



в) стальная (ID-M)



г) циркониевая (ID-M)

Рисунок 5. Распределение энерговыделения в расчетной модели: со стальной (а, в) и с циркониевой (б, г) ампулой

Проведены расчеты физического веса для ампул WF и ID-M из стали и циркония при наличии и отсутствии устройства, результаты которых приведены в таблице 1.

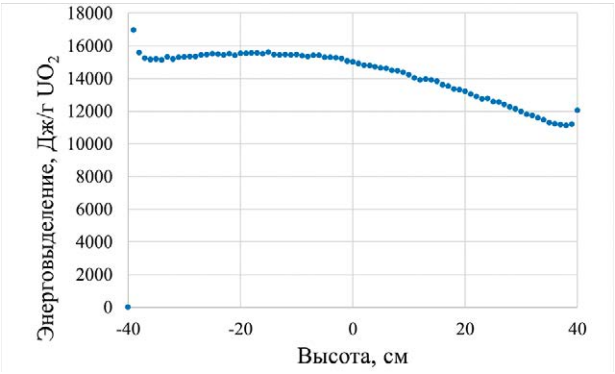
Таблица 1 – Результаты расчета реактивности для различных материалов ампул при наличии и отсутствии устройства.

Вид и материал ампулы		С обл. устройством	Без обл. устройства	Физический вес обл. устройства, β
		ρ1, β	ρ2, β	
Одностенная	Сталь	1,13	7,97	6,84
	Цирконий	2,24	4,07	1,83
Двустенная	Сталь	1,34	9,91	8,57
	Цирконий	1,96	4,07	2,11

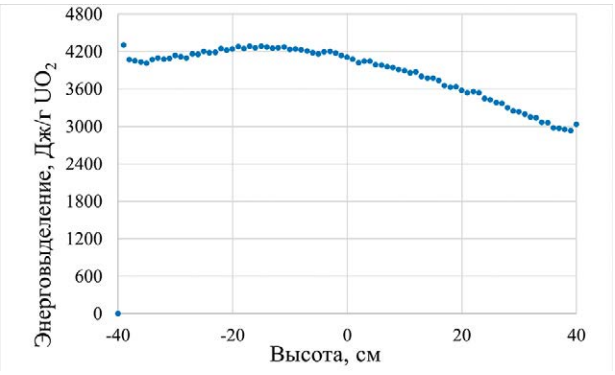
Проведены расчеты температуры циркониевой ампулы при полной интегральной мощности 5200 МДж в реакторе. Одностенная ампула из циркония нагревается до 178 °С, двустенная ампула из циркония 133 °С. Согласно техническим критериям эксплуатации стальных ампул, температура корпуса ампулы не должна превышать 350 °С. Как это видно из результатов расчетов, температура ампул из циркония не выходит за границу предела безопасной эксплуатации.

Расчет энерговыделения в горячем состоянии реактора

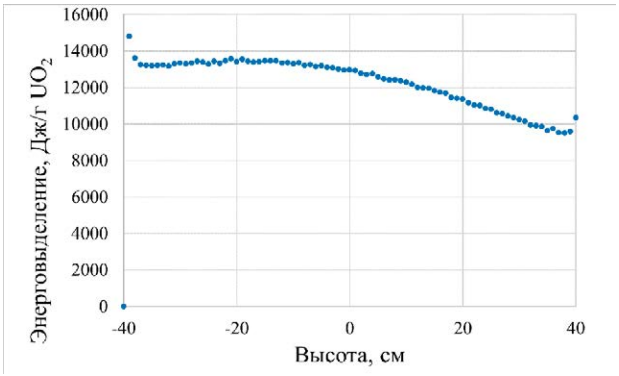
Проведены расчеты энерговыделения в топливе экспериментального устройства в вариативных состояниях реактора, различающихся тепловым полем активной зоны реактора и положением стержней регулирования. Для расчета состояний использовался шаг по энерговыделению в 500 МДж. В случае одностенной стальной ампулы удается реализовать максимально возможное энерговыделение в реакторе 5200 МДж. Поскольку физический вес двустенной стальной ампулы больше, чем одностенной, в реакторе возможно реализовать только 4300 МДж. Расчеты энерговыделения в двустенной и одностенной ампулах из циркония проводились для тех же значений энерговыделения. При использовании ампул из циркония может быть реализовано большее интегральное энерговыделение в реакторе, поскольку остается значительный свободный ход стержней регулирования (запас реактивности). Однако существующие эксплуатационные ограничения по температуре активной зоны (1400 К) не допускают этого.



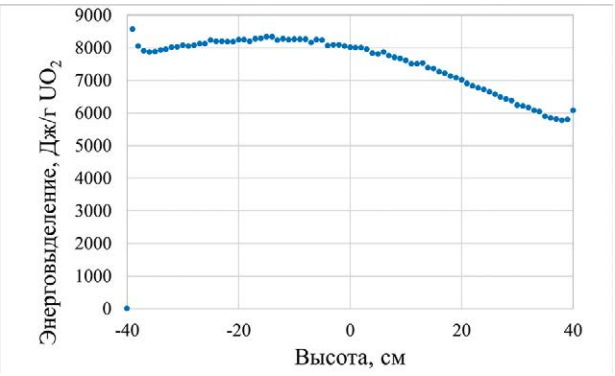
а) стальная (WF)



б) циркониевая (WF)



в) стальная (ID-M)



г) циркониевая (ID-M)

Рисунок 6. Распределение энерговыделения по высоте твэла в расчетной модели: со стальной (а, в) и с циркониевой (б, г) ампулой

На рисунке 6 представлены распределения энерговыделения по высоте твэла в расчетной модели типа ампул WF и ID-M из стали и циркония.

Анализ представленных зависимостей показывает, что энерговыделение распределено неравномерно по высоте твэла: максимальные значения приходятся на центральную область, тогда как в направлении к торцам наблюдается их снижение, что связано с аксиальным распределением нейтронного потока в реакторе.

Сопоставление результатов показывает, что в случае циркониевой ампулы уровень энерговыделения выше по всей длине твэла по сравнению со стальной ампулой, что обусловлено меньшим поглощением нейтронов. При этом для циркониевой ампулы характерно более равномерное распределение энерговыделения, тогда как для стальной ампулы наблюдается более выраженное снижение энерговыделения в верхней части твэла.

Обсуждение

Циркониевые сплавы применяются в атомной промышленности довольно продолжительное время и хорошо зарекомендовали себя в качестве конструкционных материалов ТВС реакторов, поскольку имеют низкое сечение поглощения тепловых нейтронов, удовлетворительную механическую прочность, высокую коррозионную и радиационную стойкость.

Результаты расчетов показывают, что применение циркониевого сплава в качестве материала для защитной ампулы позволяет увеличить флюенс нейтронов на экспериментальных сборках. Это, в свою очередь, позволяет расширить экспериментальные возможности реактора ИГР для исследований топлива действующих и перспективных энергетических реакторов.

Однако использование циркониевого сплава может иметь определенные недостатки по сравнению с нержавеющей сталью. В первую очередь, должна приниматься во внимание высокая стоимость циркониевых ампул, обусловленная большими затратами при производстве циркония, в которые входит очистка руды циркония от примесей, поглощающих тепловые нейтроны. Также материал требует определенных условий для сварки и обработки, что, с учетом большого количества сварных швов и мелких деталей, значительно усложняет изготовление ампул.

Выводы

Разработана нейтронно-физическая модель облучательного устройства с использованием кода MCNP6. Проведены расчеты энерговыделения в твэлах перспективного энергетического реактора с учетом влияния материала защитной ампулы на характеристики облучения.

Показано, что применение циркониевой ампулы приводит к увеличению уровня энерговыделения в твэлах по сравнению со стальной ампулой, при сохранении общего характера распределения по высоте.

Установлено, что материал ампулы оказывает существенное влияние на физический вес. При этом стальные ампулы в большей степени влияют на нейтронно-физические характеристики вследствие более высокого сечения поглощения нейтронов.

В ходе анализа установлено, что температура нагрева одностенной и двустенной ампул из циркония не превышает эксплуатационных пределов.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе материала защитных ампул, а также при обосновании конструктивных решений и условий проведения внутриреакторных испытаний топливных элементов.

Работа была выполнена при поддержке Комитета науки МНВО РК в рамках грантового проекта «Расчетное обоснование режимов внутриреакторных испытаний перспективного ядерного топлива» (ИРН AP26199863).

Литература / References:

1. MCNP6 Monte Carlo N–Particle Transport Code System, MCNP6.1. LANL, 2013.
2. ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. Nuclear Data Sheets (2006).
3. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В. Курчатов, С. М. Фейнберг, Н. А. Доллежаль и др. // Атомная энергия / АН СССР. – 1964. – Т. 17. – Вып. 6. – С. 463-474.
4. Расчет активности стальной ампулы после реакторного облучения / Сураев А.С., Какимова Г.Г., Иркимбеков Р.А. // Вестник НЯЦ РК. - 2023. – Вып. 4. – С. 85-90.
5. Irkimbekov, R.A., Vityuk, V.A., Vityuk, G.A., Zhanbolatov, O.M., Surayev, A.S., Popov, Y.A., & Kotlyar, A.N. (2025). Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor. Nuclear Engineering and Design, 443, 114278. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114278.
6. Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика / И. В. Савельев. – 3-е изд., испр. – Москва: АСТ: Астрель, 2007. – 208 с. – ISBN 978-5-17-045411-0.

ИГР РЕАКТОРЫНДА СЫНАҚ ЖҮРГІЗУ КЕЗІНДЕ СӘУЛЕЛЕНДІРУ ҚҰРЫЛҒЫСЫ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ НЕЙТРОН-ФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА ҚОРҒАНЫШ АМПУЛА МАТЕРИАЛЫНЫҢ ӘСЕРІ

Г. Г. Какимова*, О. М. Жанболатов, Р. А. Иркимбеков, А. С. Сураев, Н. Е. Мухамедов

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: kakimova@nnc.kz*

Осы жұмыста ИГР зерттеу реакторында сынақтар жүргізу кезінде қорғаныш ампула материалының сәулелендіру құрылғысы элементтерінің нейтрондық-физикалық сипаттамаларына әсеріне талдау жасалды. Есептеулер MCNP6 бағдарламалық коды және ENDF/B-VII деректер кітапханалары көмегімен орындалды. Эксперименттік жылу бөлуші құрамаларды сынау кезінде қолданылатын қорғаныш ампуланың конструкциялық материалдары қарастырылды. Қорғаныш ампуласы қабырғаларының құрамы мен қалыңдығына байланысты энергия бөлінуінің, нейтрон өрісінің спектрлік сипаттамаларының және нейтрон ағынының кеңістіктік таралуының тәуелділіктері анықталды. Ампула материалын таңдау отын элементтерін сәулелендіру жағдайларына сандық тұрғыдан өлшенетін әсер ететіні және бұл әсерді реакторлық сынақтардың нәтижелерін түсіндіру кезінде ескеру қажет екені анықталды. Алынған нәтижелер конструкциялық шешімдерді негіздеуге және отын элементтерін сәулелендіру жағдайларын оңтайландыруға арналған ғылыми негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер: *қорғаныш ампула, отын элементтері, нейтрон-физикалық сипаттамалар, энергия бөлінуі, ИГР зерттеу реакторы.*

EFFECT OF PROTECTIVE CAPSULE MATERIAL ON THE NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF IRRADIATION DEVICE ELEMENTS DURING TESTING AT THE IGR REACTOR

G. G. Kakimova*, O. M. Zhanbolatov, R. A. Irkimbekov, A. S. Surayev, N. E. Mukhamedov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: kakimova@nnc.kz*

This study presents the analysis of the influence of the protective capsule material on the neutron-physical characteristics of fuel element irradiation during experiments conducted at the IGR research reactor. The calculations were performed using the MCNP6 code and the ENDF/B-VII nuclear data libraries. Different structural materials of protective capsules used in the testing of experimental fuel assemblies were considered. The dependences of energy deposition, spectral characteristics of the neutron field, and spatial distribution of neutron flux on the composition and wall thickness of the protective capsule were determined. It was found that the choice of capsule material has a quantitatively measurable effect on the irradiation conditions of the fuel elements, which must be taken into account when interpreting the results of reactor experiments. The obtained results provide a basis for substantiating design solutions and optimizing the irradiation conditions of fuel elements.

Keywords: *protective capsule, fuel elements, neutron-physical characteristics, energy release, IGR research reactor.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-63-70
UDC 621.039.5:539.12:620.193

NEUTRON ACTIVATION AND GAS PRODUCTION IN TITANIUM AND CHROMIUM BERYLLIDES IN FISSION AND FUSION NEUTRON FIELDS

D. Sairanbayev[1*], A. Shaimerdenov[1], M. Aitkulov[1], T. Kulsartov[1], M. Podoinikov[2]

[1]Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
[2]Ulba Metallurgical Plant, Kazatomprom, Oskemen, Kazakhstan

** E-mail for contacts: d.sairanbayev@inp.kz*

Beryllium-based intermetallic compounds are considered promising functional and structural materials for advanced nuclear systems due to their favorable neutronic, thermal and activation characteristics. In this work, neutron-induced activation in titanium and chromium beryllides ($Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$) containing technological impurities was investigated under fission and fusion neutron environments. Experimental gamma-spectrometric measurements and Monte Carlo calculations were performed for specimens irradiated in the WWR-K research reactor. Agreement between calculated and measured specific activities for the dominant activation products Sc-46, Mn-54, Fe-59 and Cr-51 confirms the applicability of the neutronics approach. Neutron-induced gas production (He-4, He-3, T and Li-6) was additionally evaluated for an ITER-relevant D-T spectrum under fixed-fluence conditions. The results demonstrate pronounced spectrum-dependent differences in activation and transmutation behaviour and provide a basis for extrapolating fission-irradiation data to fusion-relevant conditions.

Keywords*: beryllides, WWR-K research reactor, gamma spectroscopy, fusion, fission, ITER, DEMO, activation, gas production.*

1. Introduction

Structural and functional materials for fusion blankets and in-vessel components experience a neutron environment that is fundamentally different from that of fission reactors. In D-T fusion devices (ITER/DEMO-class), the neutron field is dominated by ~14.1 MeV neutrons from the D-T reaction, whereas fission systems (especially thermal research reactors) exhibit spectra with a prominent thermal component around 0.025 eV (often referenced at 0.0253 eV, v_0 = 2200 m/s) and a broad epithermal-to-fast tail extending to a few MeV. These spectral differences directly translate into different balances among displacement damage, transmutation, and gas production, and they limit the validity of direct extrapolation from fission irradiation campaigns to fusion service conditions [1-3].

A large body of fusion materials literature has emphasized that “fluence equivalence” alone is not sufficient to reproduce fusion-relevant damage metrics, because the energy dependence of reaction channels strongly biases the formation of helium, hydrogen/tritium, and other transmutation products (Figure 1). In particular, high-energy neutrons increase the probability of threshold reactions that are weak or absent under predominantly thermal spectra, thereby amplifying gas production and shifting activation pathways. Quantitative comparisons of fusion vs fission irradiation have repeatedly shown that, for the same accumulated fluence, fusion conditions can yield substantially higher gas generation and altered damage partitioning [11].

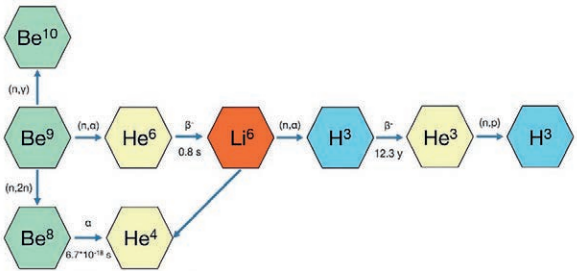


Figure 1. Schematic representation of neutron-induced transmutation reactions in beryllium

At the same time, the lack of high-fluence 14 MeV neutron sources means that fission reactors remain a primary experimental platform for irradiation and post-irradiation examination of candidate fusion materials. Consequently, the field has increasingly converged on “spectrum-aware” qualification strategies: experimental irradiation in available fission facilities combined with validated neutronics/activation/transmutation modelling to translate results into fusion-relevant metrics. This approach is consistent with DEMO-oriented roadmaps that explicitly call for model-anchored qualification frameworks until representative fusion neutron test capability becomes available [4-6].

Within this context, beryllium-based intermetallics (beryllides) have emerged as attractive functional materials for breeding blankets as advanced neutron multipliers, motivated by their thermomechanical stability and irradiation-relevant behaviour. Recent

work on titanium and chromium beryllides has highlighted progress in industrial-scale fabrication and characterization, including microstructural stability and high-temperature mechanical performance relevant for blanket service windows. In parallel, hydrogen isotope interaction (retention/release) remains a central functional constraint for beryllide deployment in fusion systems and has been actively investigated under fusion-relevant boundary conditions [7, 8, 9, 10].

In this study, we combine (i) experimental gamma-spectrometric validation of neutron activation products in $Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$ irradiated in the WWR-K research reactor with (ii) Monte Carlo-based activation/transmutation calculations performed for both the WWR-K spectrum and an ITER-relevant D-T fusion spectrum [2], [5]. Importantly, only the impurity-driven activation products measurable by gamma spectrometry (Sc-46, Mn-54, Fe-59, Cr-51) are treated as experimentally validated, while gas production species (He-4, He-3, T, Li-6) are reported strictly as calculation-based comparative indicators to quantify fusion–fission spectral effects under fixed fluence [11]. This approach directly targets the key qualification gap identified in the literature: separating what can be validated today in fission reactors from what must still be inferred for fusion via physics-based modelling [4-6].

2. Methods

2.1 Materials

The investigated materials were titanium and chromium beryllides ($Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$), considered advanced neutron multiplier candidates for fusion breeding blankets due to their favorable nuclear characteristics and improved thermomechanical stability compared with metallic beryllium. Recent progress in industrial-scale fabrication has demonstrated that dense beryllide blocks can be produced reproducibly by vacuum hot pressing (VHP), including full-size $Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$ blocks manufactured at the Ulba Metallurgical Plant (UMP), which supports the technological readiness of these compounds for blanket-relevant component forms.

For the present irradiation campaign, specimens were prepared as plates with the following dimensions: $Be_{12}Ti$: 8.5×8×1.5 mm, and $Be_{12}Cr$: 5×5×1.5 mm. The densities of $Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$ are 2.25 g/cm^3 and 2.401 g/cm^3, respectively. The beryllide samples contained trace technological impurities (including Sc, Mn, Fe, and Cr), which are critical for neutron activation under fission-spectrum irradiation and therefore dominate the experimentally observable gamma-emitting radionuclide inventory in post-irradiation measurements.

The impurity inventories were accounted for in the activation calculations so that the computed radionuclide inventory reflected the real trace-element content (Table 1) rather than an ideal stoichiometric composition [10].

2.2 Fission Neutron Irradiation (WWR-K Reactor)

Neutron irradiation experiments were carried out at the core of the WWR-K research reactor under steady-state operating conditions. The reactor provides a mixed neutron spectrum dominated by thermal and epithermal neutrons, which is typical of research reactors used for materials testing. The standard neutron energy spectrum of the WWR-K reactor is shown in Figure 2.

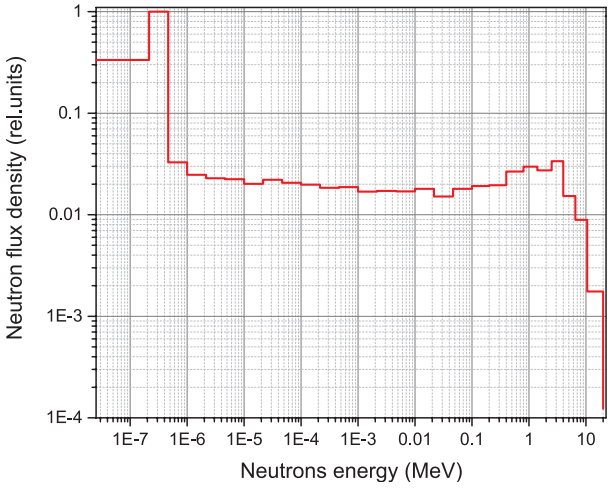


Figure 2. Representative neutron energy spectrum of the WWR-K reactor core

The WWR-K is a 6-MWth, light-water, tank-type research reactor characterized by a predominantly thermal neutron spectrum [12]. It is the Republic of Kazakhstan's only multipurpose research reactor [13]. The facility is equipped with ten neutron beam ports (nine radial and one tangential) to support external experiments and typically offers three central and seven peripheral irradiation positions, with the exact number of peripheral locations adjustable depending on ongoing experimental requirements.

$Be_{12}Ti$ samples were irradiated at low temperature (<80 °C) in an inert atmosphere to two neutron fluence levels over 168 and 252 effective full-power days (EFPD). Detailed irradiation conditions are provided in [14].

$Be_{12}Cr$ specimens were irradiated at high temperature (390 °C) in an inert environment to target neutron fluences of 2.8×10^{20} and 4.5×10^{20} n/cm², corresponding to 68 effective full-power days (EFPD). Further details are provided in [15].

Table 1 Chemical composition of beryllide blocks in wt%. The uranium content is presented in ppm.

Material	Ti	Cr	C	N	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	U, ppm	Be
Be12Ti	27.8	–	0.034	0.106	0.686	< 0.00005	0.020	0.0162	0.015	0.118	0.395	Bal.
Be12Cr	–	30.8	0.0346	0.0177	0.555	< 0.0002	0.0156	0.0237	0.0088	0.114	0.54	Bal.

These irradiation positions represent typical central and peripheral locations in a light-water research reactor, providing predominantly thermal neutron fields with position-dependent flux magnitude and spectral hardness.

2.3 Computational methodology

Monte Carlo neutron-transport and activation calculations were performed using MCNP6 [16] with the ENDF/B-VII.1 evaluated nuclear data library [17]. The computational framework accounted for material composition, technological impurity content and neutron spectral characteristics. For the fission activation calculations, 500 cycles were used, including 50 inactive and 450 active cycles with 200,000 histories per cycle. For the fusion calculations, 10,000,000 histories were used. The cross-section temperature was 293.6 K for all isotopes included in the calculations.

To enable a physically meaningful comparison between fission and fusion environments, the total neutron fluence was fixed to the same value for both cases. As a result, the irradiation time differs between fission and fusion scenarios, reflecting spectrum-dependent reaction rates. This approach follows established practices in fusion materials research aimed at isolating spectral effects from fluence-driven phenomena.

Fusion neutron calculations were performed using an ITER-relevant D-T spectrum, characterized by a dominant neutron energy near 14 MeV (Figure 3). For the fusion case, a D-T plasma in the main tokamak operating mode was modeled as the neutron source. Following the reference conditions reported in [18], the total neutron source strength was set to 2×10^{19} n/s and used as the normalization parameter for the ITER-like neutron spectrum in the activation/transmutation calculations. This source strength was applied to scale the flux level consistently with the reference scenario, while fusion-fission comparisons in the present work were performed under a fixed target fluence (i.e., irradiation time was adjusted to achieve the prescribed fluence in each spectrum).

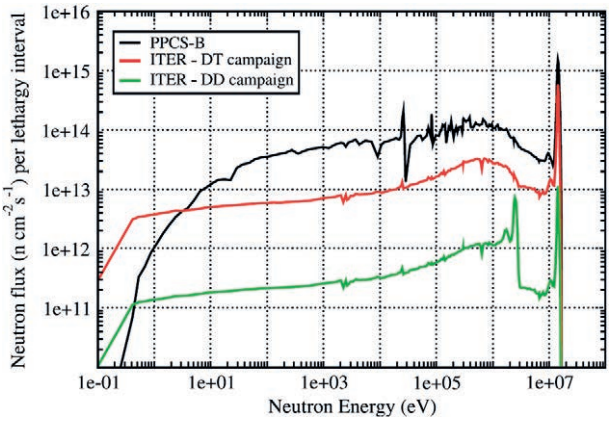


Figure 3. Neutron spectra for the first wall of the model B conceptual power-plant design – PPCS-B[19], as well as the spectra for the two neutron-producing campaigns of ITER.

Although direct experimental validation of fusion gas production was not available, the adopted calculation procedure is consistent with approaches commonly used in DEMO-oriented materials studies.

3. Results and discussion

Table 2 summarizes the atomic densities of the main gas-producing isotopes (Li-6, T, He-3, He-4) in the beryllium sublattice of $Be_{12}Ti$, calculated for two identical integral neutron fluences (1.04×10^{21} and 1.46×10^{21} n/cm²) under WWR-K reactor conditions and an ITER-relevant D–T neutron spectrum.

At a fixed fluence, the most pronounced feature of the fusion spectrum is the substantial increase in He-4 production. At 1.04×10^{21} n/cm², the He-4 concentration increases from 4.26×10^{-6} (WWR-K) to 1.07×10^{-4} (ITER), corresponding to an approximately 25-fold increase. A similar trend is observed at 1.46×10^{21} n/cm², where He-4 increases from 5.95×10^{-6} to 1.50×10^{-4}, again by a factor of ~25. This behavior is directly associated with the increased contribution of threshold and high-energy transmutation reactions in the D–T neutron field.

In contrast, tritium production under ITER conditions is several orders of magnitude lower than in the WWR-K spectrum. At 1.04×10^{21} n/cm², the tritium concentration decreases from 1.13×10^{-7} (WWR-K) to 2.75×10^{-11} (ITER), and at 1.46×10^{21} n/cm² from 2.12×10^{-7} to 5.16×10^{-11}. This trend is consistent with the greater relative contribution of neutron capture and (n,α)-type reactions in thermal spectra, including reactions on impurities and minor isotopes of beryllium and lithium, whereas under a 14 MeV-dominated fusion spectrum gas production is shifted toward helium generation, particularly He-4.

Table 2. Atomic density of main gas-producing isotopes in the Be sublattice of $Be_{12}Ti$ specimens

Integral neutron fluence [n/cm2]	Neutron-induced isotopes in Be [at/barn-cm]			
	Li-6	T	He-3	He-4
WWR-K reactor				
1.04×1021	4.86×10-07	1.13×10-07	5.96×10-10	4.26×10-06
1.46×1021	6.41×10-07	2.12×10-07	1.44×10-09	5.95×10-06
ITER				
1.04×1021	1.29×10-06	2.75×10-11	2.36×10-16	1.07×10-04
1.46×1021	1.80×10-06	5.16×10-11	6.49×10-16	1.50×10-04

Table 3 presents the calculated atomic densities of Sc-46, Mn-54, and Fe-59 in the titanium matrix of $Be_{12}Ti$ and associated impurities at the same neutron fluence levels as those in Table 1.

A pronounced spectral selectivity is observed. Upon transitioning from the WWR-K spectrum to the ITER-

relevant D–T spectrum, the production of Sc-46 increases by several orders of magnitude (e.g., at 1.04×10^{21} n/cm²: from 5.46×10^{-10} to 1.95×10^{-7}), indicating a strong enhancement of high-energy reaction channels responsible for Sc-46 formation under fusion conditions. A similar, though less pronounced, trend is observed for Mn-54, with an increase of approximately one to two orders of magnitude (from 1.62×10^{-11} to 6.01×10^{-10} at 1.04×10^{21} n/cm²).

In contrast, the production of Fe-59 is significantly reduced under fusion conditions (from 1.83×10^{-11} to 1.06×10^{-13} at the same fluence), which is consistent with the dominance of neutron capture reactions in thermal spectra that favor Fe-59 formation, and the reduced contribution of these channels in a 14 MeV-dominated neutron field.

Table 3. Atomic density of main activation products in Ti and impurities of $Be_{12}Ti$ specimens

Integral neutron fluence [n/cm2]	Neutron-induced isotopes in titanium and impurities [at/barn-cm]		
	Sc-46	Mn-54	Fe-59
WWR-K reactor			
1.04×1021	5.46×10-10	1.62×10-11	1.83×10-11
1.46×1021	6.01×10-10	2.07×10-11	1.79×10-11
ITER			
1.04×1021	1.95×10-07	6.01×10-10	1.06×10-13
1.46×1021	2.74×10-07	8.42×10-10	1.47×10-13

Figure 4 illustrates the accumulation kinetics of T, He-3, and He-4 in $Be_{12}Ti$ over a single irradiation cycle. For the WWR-K reactor, a cycle duration of 21 days was adopted, corresponding to a standard operational fuel cycle, whereas for the ITER-relevant case the irradiation time was set to 11 days.

This difference arises from the fact that the comparison is performed at a fixed integral neutron fluence rather than at an equal irradiation time. In the WWR-K reactor, 21 days represent one typical operating cycle and therefore reflect realistic irradiation conditions. In contrast, under the ITER-relevant D–T neutron spectrum, the higher neutron energy (~14 MeV) and flux intensity result in significantly increased reaction rates and radiation damage accumulation, such that the same fluence is achieved over a shorter time (~11 days).

This fluence-normalized approach is widely adopted in fusion materials studies, as it enables a physically meaningful comparison between fission and fusion conditions by isolating spectral effects from irradiation time dependencies [20].

Despite the difference in time scales, the key physical trend remains unchanged: under fusion conditions, He-4 is the dominant product and accumulates significantly faster on a fluence-normalized basis, whereas under fission conditions the relative contribution of tritium becomes more pronounced.

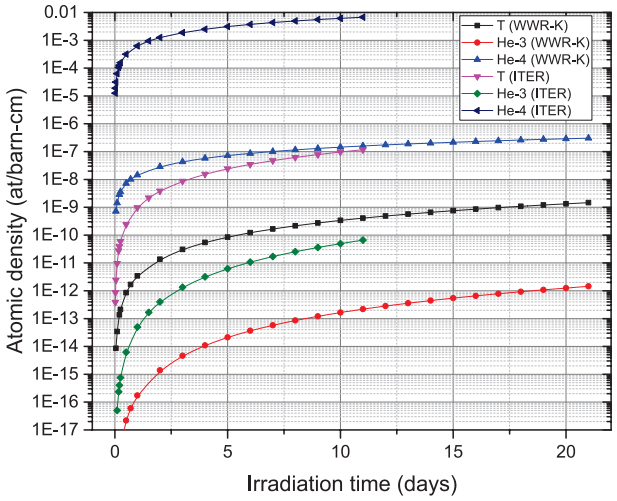


Figure 4. Time-dependent accumulation of T, He-3, and He-4 in $Be_{12}Ti$ during a single irradiation cycle under WWR-K (21 days) and ITER (11 days) conditions

These curves should be interpreted as a time-resolved representation of the same spectral trends: under fusion conditions, products associated with high-energy reaction channels (such as Sc-46 and Mn-54) are formed significantly more rapidly, whereas the contribution of Fe-59 is markedly reduced on a fluence-normalized basis.

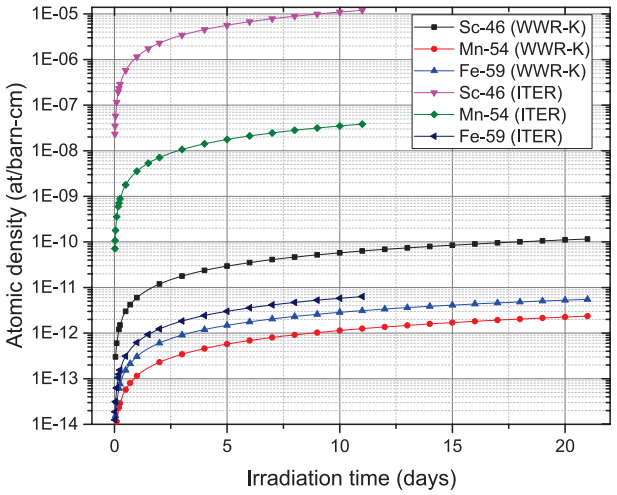


Figure 5. Time-dependent accumulation of Sc-46, Mn-54, and Fe-59 in Be12Ti during a single irradiation cycle under WWR-K (21 days) and ITER (11 days) conditions

Table 4 presents the calculated atomic densities of Li-6, T, He-3, and He-4 in the beryllium sublattice of $Be_{12}Cr$ for two neutron fluence levels (4.53×10^{20} and 2.77×10^{20} n/cm²), with values reported for multiple samples/positions. The small variation between replicated values (e.g., He-4 in WWR-K at 4.53×10^{20} n/cm²: 9.37×10^{-7} and 9.06×10^{-7}) indicates good internal consistency of the calculations under comparable conditions.

As observed for $Be_{12}Ti$, a transition to the ITER-relevant spectrum results in a substantial increase in He-4 production. At 4.53×10^{20} n/cm², He-4 increases from approximately ~9×10^{-7} (WWR-K) to 4.83×10^{-5} (ITER), corresponding to an enhancement of about a factor of 50. In contrast, tritium production decreases by several orders of magnitude (e.g., from 1.30×10^{-8} to 4.62×10^{-12}).

For He-3, the calculated values under fusion conditions decrease markedly, reaching 1.21×10^{-17} and 1.09×10^{-17} at/barn-cm at 2.77 × 10^{20} n/cm² (Table 4); these values fall below the adopted calculation-significance threshold defined in the table footnote and should accordingly be interpreted with caution.

Table 4. Atomic density of main gas-producing isotopes in the Be sublattice of $Be_{12}Cr$ specimens

Integral neutron fluence [n/cm²]	Neutron-induced isotopes in Be [at/barn-cm]			
	Li-6	T	He-3	He-4
WWR-K reactor				
4.53×1020	1.20×10-07	1.30×10-08	3.30×10-11	9.37×10-07
4.53×1020	1.22×10-07	1.33×10-08	3.37×10-11	9.06×10-07
2.77×1020	7.85×10-08	5.08×10-09	1.42×10-11	5.42×10-07
2.77×1020	7.79×10-08	5.04×10-09	1.41×10-11	5.19×10-07
ITER				
4.53×1020	5.65×10-07	4.62×10-12	3.82×10-17	4.83×10-05
4.53×1020	5.64×10-07	4.57×10-12	3.47×10-17	4.83×10-05
2.77×1020	3.45×10-07	1.75×10-12	1.21×10-171	2.96×10-05
2.77×1020	3.45×10-07	1.72×10-12	1.09×10-17a	2.96×10-05

Table 5. Atomic density of main activation products in Cr and impurities of $Be_{12}Cr$ specimens

Integral neutron fluence [n/cm²]	Neutron-induced isotopes in chromium and impurities [at/barn-cm]		
	Cr-51	Mn-54	Fe-59
WWR-K reactor			
4.53×1020	6.63×10-07	4.25×10-12	1.64×10-11
4.53×1020	6.69×10-07	3.95×10-12	1.64×10-11
2.77×1020	4.02×10-07	2.34×10-12	9.86×10-12
2.77×1020	4.01×10-07	2.30×10-12	9.87×10-12
ITER			
4.53×1020	2.04×10-10	2.73×10-10	4.74×10-14
4.53×1020	2.02×10-10	2.73×10-10	4.68×10-14
2.77×1020	1.26×10-10	1.67×10-10	2.87×10-14
2.77×1020	1.29×10-10	1.68×10-10	2.90×10-14

[1] Values below the adopted calculation-significance threshold (relative statistical uncertainty exceeding 50% in the MCNP6 activation run); reported for completeness rather than as a statistically significant result.

Figure 6 presents the accumulation kinetics of gas-producing species in $Be_{12}Cr$ during a single irradiation cycle under WWR-K and ITER-relevant conditions. The interpretation should focus not on the absolute cycle duration but on the fluence-normalized comparison, which shows that the fusion spectrum intrinsically shifts gas generation toward He-4. This effect has direct consequences for swelling, embrittlement, and gas inventory in blanket materials and constitutes one of the primary drivers for the transition from metallic beryllium to beryllide compounds.

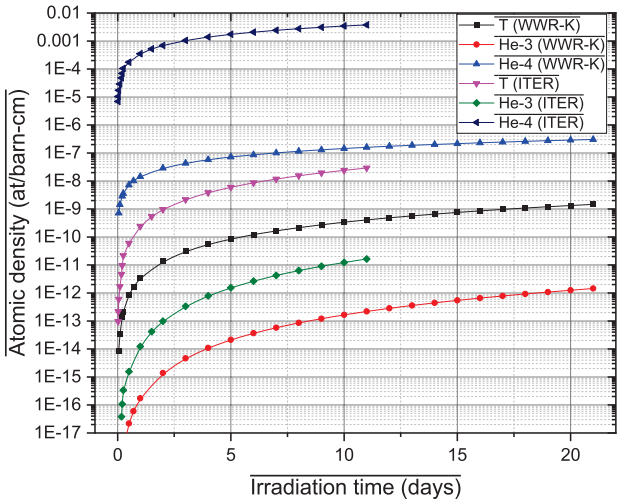


Figure 6. Time-dependent accumulation of T, He-3, and He-4 in $Be_{12}Cr$ during a single irradiation cycle under WWR-K (21 days) and ITER (11 days) conditions

Table 5 presents the calculated atomic densities of Cr-51, Mn-54, and Fe-59 in the chromium-containing matrix of $Be_{12}Cr$ and associated impurities. In contrast to Sc-46 behavior in titanium beryllide, the primary matrix product Cr-51 exhibits the opposite trend: under WWR-K conditions at a fluence of 4.53×10^{20} n/cm², Cr-51 reaches ~6.63×10^{-7}, whereas under ITER conditions it decreases to ~2.04×10^{-10}, corresponding to a reduction by approximately three orders of magnitude (~3.3×10^{3}).

This behavior indicates the dominance of reaction pathways in the thermal neutron spectrum that efficiently produce Cr-51, primarily via neutron capture, and their significantly reduced relative contribution in a 14 MeV-dominated fusion neutron field.

At the same time, Mn-54 exhibits an increase under fusion conditions (e.g., from 4.25×10^{-12} to 2.73×10^{-10} at 4.53×10^{20} n/cm²), whereas Fe-59 decreases (from 1.64×10^{-11} to 4.74×10^{-14}).

Thus, considering the combined results for both $Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$, it is evident that the neutron spectrum affects not only the magnitude of activation but also the profile of dominant radionuclides: some products are enhanced under fusion conditions, while others are suppressed.

Figure 7 shows the time-dependent accumulation of the corresponding activation products over one irradiation cycle under WWR-K and ITER conditions. For the discussion, it is sufficient to emphasize that the differences in curve shapes and saturation levels reflect the combined influence of spectral dependence, radioactive decay (half-lives), and effective production and burn-up rates. This is particularly important for the design of reactor-based irradiation experiments as surrogates for fusion conditions, where the selection of indicator nuclides must be spectrum-sensitive.

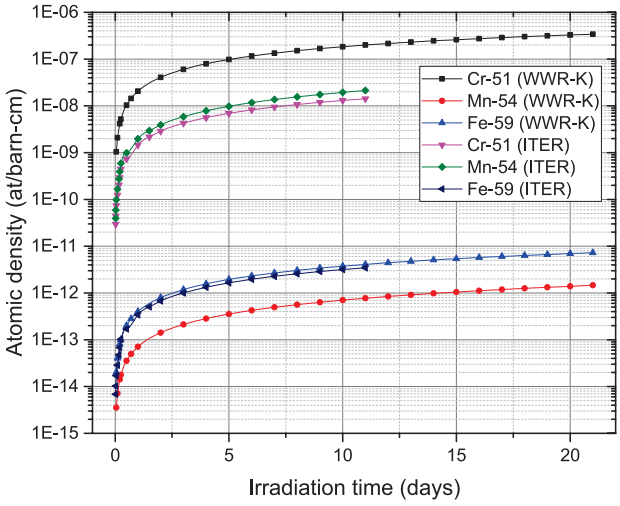


Figure 7. Time-dependent accumulation of Sc-46, Mn-54, and Fe-59 in $Be_{12}Cr$ during a single irradiation cycle under WWR-K (21 days) and ITER (11 days) conditions

4. Conclusions

A comparative analysis of neutron-induced activation and gas production in titanium and chromium beryllides ($Be_{12}Ti$ and $Be_{12}Cr$) was performed for the thermal neutron spectrum of the WWR-K research reactor and an ITER-relevant D–T fusion spectrum under identical integral neutron fluence conditions. This approach enabled the separation of spectral effects from those associated solely with irradiation level, thereby providing a physically consistent basis for comparing fission and fusion environments.

The calculations demonstrate that, at a fixed fluence, gas production in the beryllium sublattice is strongly dependent on the neutron spectrum. For both materials, a pronounced increase in He-4 accumulation is observed under the ITER-relevant spectrum: approximately a factor of ~25 for $Be_{12}Ti$ and ~50 for $Be_{12}Cr$ relative to those under WWR-K conditions at comparable fluence levels. In contrast, tritium production under fusion conditions is several orders of magnitude lower than in the thermal spectrum. These results indicate that direct extrapolation of gas production data from fission experiments to fusion conditions, without accounting for spectral differences, may lead to systematic errors, particularly in the assessment of helium-induced swelling/embrittlement and hydrogen isotope inventories.

A strong spectral selectivity is also observed for activation products in both the matrix and impurities, affecting not only their absolute concentrations but also the composition of dominant radionuclides. In $Be_{12}Ti$, the ITER-relevant spectrum enhances the production of Sc-46 and Mn-54 while suppressing Fe-59, consistent with the energy dependence of the corresponding reaction channels. In $Be_{12}Cr$, the primary matrix product Cr-51 exhibits the opposite behavior: it dominates under WWR-K conditions but is strongly suppressed in the fusion spectrum, while Mn-54 increases and Fe-59 decreases. The time-dependent results (Figures 4-7) further confirm that the transition from fission to fusion conditions leads to a fundamentally different profile of dominant products and their accumulation kinetics over an irradiation cycle.

These findings highlight the importance of accounting for neutron spectrum effects in the qualification of beryllides for fusion applications. Both gas production behavior and activation product inventories must be interpreted with explicit consideration of neutron energy distribution, as it governs the underlying reaction pathways and, consequently, the key indicators of material degradation and radiological performance. The use of fluence-normalized comparison provides a robust and physically justified framework for such analyses and supports the development of reliable strategies for extrapolating fission-based experimental data to fusion-relevant conditions.

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24993119).

References:

1. Zinkle S.J., Busby J.T. Structural materials for fission & fusion energy // Materials Today. - 2009. - Vol. 12. - P. 12-19. DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70294-9.
2. Sawan M.E. Damage parameters of structural materials in fusion environment compared to fission reactor irradiation // Fusion Engineering and Design. - 2012. - Vol. 87. - P. 551-555. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2012.01.022.
3. O'Brien M.H., Loughlin M.J. Displacement damage quantification in future fusion systems // Fusion Engineering and Design. - 2007. - Vol. 82. - P. 2536-2542. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.08.006.
4. Rowcliffe A.F., Garrison L.M., Yamamoto Y., Tan L., Katoh Y. Materials challenges for the fusion nuclear science facility // Fusion Engineering and Design. - 2018. - Vol. 135. - P. 290-301. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.07.012.
5. Gorley P. et al. DEMO structural materials qualification and development // Fusion Engineering and Design. - 2021. - Vol. 163. - Article 112111. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112111.
6. Cohen-Tanugi D., Stapelberg M.G., Short M.P., Ferry S.E., Whyte D.G., Hartwig Z.S., Buonassisi T. Long-term

research and design strategies for fusion energy materials // Matter. - 2024. - Vol. 7. DOI: 10.1016/j.matt.2024.08.017.
7. Bornschein B., Day Chr., Demange D., Pinna T. Tritium management and safety issues in ITER and DEMO breeding blankets // Fusion Engineering and Design. - 2013. - Vol. 88. - P. 466-471. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.03.032.
8. Fujii Y. et al. Hydrogen retention behavior of beryllides as advanced neutron multipliers // Nuclear Materials and Energy. - 2016. - Vol. 9. - P. 233-236. DOI: 10.1016/j.nme.2016.03.001.
9. Hwang T., Kim J.-H., Nakano S., Nakamichi M. Mechanical properties of beryllium-titanium intermetallic compounds fabricated by plasma sintering // Nuclear Materials and Energy. - 2022. - Vol. 30. - Article 101117. DOI: 10.1016/j.nme.2022.101117.
10. Gaisin R., Rolli R., Podoinikov M., Kuksenko V., Seemann K., Bergfeldt T., Chakin V., Vladimirov P. Microstructure and high-temperature mechanical performance of industrial-scale titanium and chromium beryllides for fusion applications // Journal of Alloys and Compounds. - 2025. - Vol. 1044. - Article 184503. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.184503.
11. Khripunov I. et al. Secondary radiation damage and gas production in plasma facing materials under fusion neutron irradiation // Fusion Engineering and Design. - 2017. - Vol. 123. - P. 377-381. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.02.107.
12. Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin S.K., Chakrov P.V., Ye A. Kenzhin the 50th anniversary of the WWR-K research reactor // Physics of Atomic Nuclei. - 2018. - Vol. 81, No. 10. - P. 1408-1411. DOI: 10.1134/S1063778818100162.
13. Arinkin F.M., Shaimerdenov A.A., Gizatulin Sh.Kh., Dyussambayev D.S., Koltochnik S.N., Chakrov P.V., Chekushina L.V. WWR-K research reactor core conversion // Atomic Energy. - 2017. - Vol. 123. - P. 15-20. DOI: 10.1007/s10512-017-0294-0.
14. Shaimerdenov A., Akhanov A., Askerbekov S., Kulsartov T., Aitkulov M., Sairanbayev D., Nessipbay A., Bugybay Zh., Kenzhina I., Shakirov B., Kylyshkanov M., Podoinikov M. Kinetics of gas release from titanium beryllide irradiated to different neutron fluences // Fusion Engineering and Design. - 2025. - Vol. 216. - Article 115069. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2025.115069.
15. Bugybay Zh.T. et al. Development of irradiation capsule design and plan for neutron irradiation of chromium beryllide samples in the WWR-K reactor // Nuclear Materials and Energy. – 2026. – Vol. 47. – Article 102118. DOI: 10.1016/j.nme.2026.102118.
16. Goorley J.T. et al. Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0. - Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2013. - LA-UR-13-22934.
17. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nuclear Data Sheets. - 2011. - Vol. 112. - P. 2887-2996.
18. Afanasenko R., Vukolov K., Andreenko E., Orlovskiy I., Rodionov R. Radiation environment in ITER tokamak equatorial port 11 // Fusion Engineering and Design. - 2024. - Vol. 200. - Article 114208. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2024.114208.
19. Pampin-Garcia R., Loughlin M.J. Neutronic and activation calculations for PPCS plant model B (HCPB). - UKAEA/EURATOM Fusion Association, 2002. - PPCS/UKAEA/PPCS4D2-2.
20. van Houtte D., Okayama K., Sagot F. ITER operational availability and fluence objectives // Fusion Engineering and Design. - 2011. - Vol. 86, No. 6-8. - P. 680-683. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2010.12.069.

БӨЛІНУ ЖӘНЕ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ СИНТЕЗ НЕЙТРОНДЫҚ ӨРІСТЕРІНДЕ ТИТАН ЖӘНЕ ХРОМ БЕРИЛЛИДТЕРІНІҢ НЕЙТРОНДЫҚ АКТИВАЦИЯСЫ МЕН ГАЗ ТҮЗІЛУІ

Д. Сайранбаев[1*], А. Шаймерденов[1], М. Айткулов[1], Т. Кульсартов[1], М. Подойников[2]

[1]Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2]Үлбі металлургиялық зауыты, Өскемен, Қазақстан

**Байланыс үшін e-mail: d.sairanbayev@inp.kz*

Бериллий негізіндегі интерметаллидті қосылыстар жаңа буын ядролық жүйелері үшін перспективалы функционалдық және құрылымдық материалдар ретінде қарастырылады. Бұл жұмыста технологиялық қоспалары бар Be12Ti және Be12Cr бериллидтеріндегі нейтрон әсерінен болатын активация және газ өнімдерінің түзілуі зерттелді. ВВР-К реакторында сәулелендірілген үлгілер бойынша гамма-спектрометриялық өлшеулер Монте-Карло әдісімен орындалған есептеулермен салыстырылды. Sc-46, Mn-54, Fe-59 және Cr-51 негізгі активация өнімдері үшін есептеу мен эксперимент арасында қанағаттанарлық сәйкестік алынды. Сонымен қатар бірдей интегралдық флюенс жағдайында ITER-ге тән D-T нейтрондар спектрі үшін He-4, He-3, T және Li-6 түзілуі есептік түрде бағаланды. Нәтижелер нейтрон спектрі активация және газ түзілу бейінін айтарлықтай өзгертетінін көрсетті. Сондықтан реакторлық сынақ деректерін термоядролық қондырғылар жағдайына көшіру кезінде спектрлік әсерлерді ескеру қажет.

Түйін сөздер: *бериллидтер, ВВР-К реакторы, гамма-спектрометрия, бөліну, термоядролық синтез, ITER, DEMO, активация, газ түзілу.*

НЕЙТРОННАЯ АКТИВАЦИЯ И ГАЗООБРАЗОВАНИЕ В БЕРИЛЛИДАХ ТИТАНА И ХРОМА В НЕЙТРОННЫХ ПОЛЯХ РЕАКТОРОВ ДЕЛЕНИЯ И ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Д. Сайранбаев[1*], А. Шаймерденов[1], М. Айткулов[1], Т. Кульсартов[1], М. Подойников[2]

[1]Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
[2]Ульбинский металлургический завод, Усть-Каменогорск, Казахстан

** E-mail для контактов: d.sairanbayev@inp.kz*

Интерметаллидные соединения на основе бериллия рассматриваются как перспективные функциональные и конструкционные материалы для ядерных систем нового поколения. В работе исследованы нейтронно-индуцированная активация и образование газовых продуктов в титановых и хромовых бериллидах Be12Ti и Be12Cr с учетом технологических примесей. Экспериментальные гамма-спектрометрические измерения образцов, облученных в реакторе ВВР-К, сопоставлены с расчетами методом Монте-Карло. Для основных продуктов активации Sc-46, Mn-54, Fe-59 и Cr-51 получено удовлетворительное согласие расчета и эксперимента. Дополнительно выполнена расчетная оценка образования He-4, He-3, T и Li-6 в спектре D-T-нейтронов, характерном для ITER, при одинаковом интегральном флюенсе. Показано, что нейтронный спектр существенно изменяет профиль активации и газообразования, что необходимо учитывать при переносе данных реакторных испытаний на условия термоядерных установок.

***Ключевые слова**: бериллиды, реактор ВВР-К, гамма-спектрометрия, деление, термоядерный синтез, ITER, DEMO, активация, газообразование.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-71-80
UDC 632.15

A BRIEF OVERVIEW OF THE PFAS POLLUTION PROBLEM IN THE ENVIRONMENT

A. Kamal[1], A. Satayeva[1*], A. Baimenov[2], Y. Mekebayeva[1],
D. Nurakhmet[1], Z. Shadiyar[1], E. Arkhangelsky[1]

[1]Civil and Environmental Engineering Department, School of Engineering and Digital Sciences, Environmental Science & Technology Group (ESTg), Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan
[2] Engineering Profile Laboratory, Satbayev Kazakh National Technical University, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: aliya.satayeva@nu.edu.kz*

This study provides a comprehensive analysis of PFAS contamination in the environment. An analysis of published scientific papers has shown that PFAS are exceptionally resistant to chemical, biological, and photolytic degradation, exhibit significant mobility in water, and can be dispersed across long distances.

PFAS are known as «forever chemicals» with half-lives of thousands of years. PFAS contaminate surface water sources and can accumulate in soil and air.

Detecting and analyzing their concentrations in the environment is crucial due to their extremely prevalent presence in natural habitats, presenting risks to public health and the integrity of the ecosystem.

A review of literature sources revealed that no studies of this problem have been conducted in Kazakhstan. This paper revealed a complete lack of publications on PFAS studies. The materials presented on the websites of Kazakhstani news agencies merely reflect the results of research by foreign scientists studying PFAS in the environment and biomaterials, reflecting the global problem of PFAS contamination.

The prerequisites for this area of research are the lack of publications in Kazakhstan, the lack of PFAS monitoring, the lack of systematic studies, including foreign ones, as well as the lack of various methods for determining PFAS in environmental objects, and this requires close scientific attention and study.

Keywords: *perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS), contaminant pathways, pollution, environment, toxicological behavior.*

Introduction

Perfluoroalkyl substances (PFAS) comprise a broad group of chemicals that are applied directly in, or used during the manufacture of, non-stick surfaces, textiles, paper-based materials, food packaging, certain firefighting foams, and a wide range of other consumer and industrial products. These compounds are extensively applied in the production of consumer goods and industrial applications because of their oil and water repelling properties, their ability to withstand extreme temperatures, and their ability to minimize friction. PFAS encompass a diverse set of compounds that differ in molecular weight and exhibit various structures and functional groups, yet they are unified by a common characteristic: chains of carbon atoms in which most or all bonding sites are occupied by fluorine atoms. Over time, the extensive production and application of these substances, together with their high resistance to degradation, have led to their ubiquitous presence in the environment. At the same time, scientific research is increasingly clarifying the environmental and health impacts associated with PFAS. Among them, perfluorooctanoate (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) are well-known examples of PFAS that are highly mobile, persistent, and bioaccumulative, with no evidence of transformation under environmental conditions [1–3].

Sources of PFAS can include fire ranges, military installations, airports, some manufacturing facilities, and waste landfills. Since the 1950s, PFAS have been extensively utilized in commercial and industrial products like non-stick coatings, surfactants, food packaging materials, and water-soluble foaming compounds due to their hydrophobic, lipophobic, and thermally stable qualities [4]. This has led to multiple environmental releases [5, 6].

Due to increased use, PFAS have been found in a wide range of environments, including the air, surface water, drinking water, sediment, fish, and marine mammals [7, 8]. Furthermore, numerous studies have shown that PFAS are toxic and can accumulate in humans and other biological systems [9]. PFAS are often referred to as ‘forever chemicals’ due to their extreme persistence and resistance to chemical and thermal degradation, which is attributed to the presence of multiple high-energy C-F bonds (531.5 kJ mol^{-1}) [10]. They also exhibit high mobility and have been identified in remote areas, even at locations far removed from their original sources of release [11]. Recent studies have even proposed a new planetary boundary for PFAS, as concentrations

measured in rainwater across the globe frequently surpass the strictest regulatory limits established for PFAS in drinking water [12].

The most extensively investigated PFAS (PFOA and PFOS) have been found reported in drinking water at concentrations up to several μg/L, while other PFAS occur in much lower amounts within the ng/L range. Several regulatory guideline values for drinking water have been introduced to protect human health. Under the European Union's (EU) revised Drinking Water Directive (implemented in December 2020), two regulatory limits for PFAS were introduced: 0.5 μg/L for total PFAS and 0.1 μg/L for the combined concentration of 20 priority PFAS [13]. EU member states are required to comply with regulatory provisions by 12 January 2026; however, a standardized method for determining 'total PFAS' has yet to be established.

In April 2024, the United States Environmental Protection Agency (EPA) adopted the National Primary Drinking Water Regulations, setting enforceable limits for six PFAS. The maximum allowable concentrations were established at 4 ng/L for PFOA and PFOS, and 10 ng/L for PFHxS, PFNA, and GenX and mixtures of two or more of these substances along with perfluorobutanesulfonic acid (PFBS) have a hazard index approach [13].

Materials and methods

The material was based on scientific papers published by international scientists. Unfortunately, an analysis of known works revealed a complete lack of domestic research on this issue. All the studies reviewed are presented as fully as possible in this paper. The search terminology included PFAS, wastewater, surface water, and drinking water treatment, PFAS removal, and environmental and human health risks.

The primary platforms used to locate reliable sources included eLibrary, Open Science, Google Scholar, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and PubMed; these are major international scientometric databases aggregating scientific journal publications, patents, academic literature, articles, books, and dissertations. Additionally, the SCImago Journal Rank - a comprehensive service displaying publication citation data was utilized.

The PRISMA flow diagram [14-15] was employed to outline the literature sources used to analyze the issue (Figure 1).

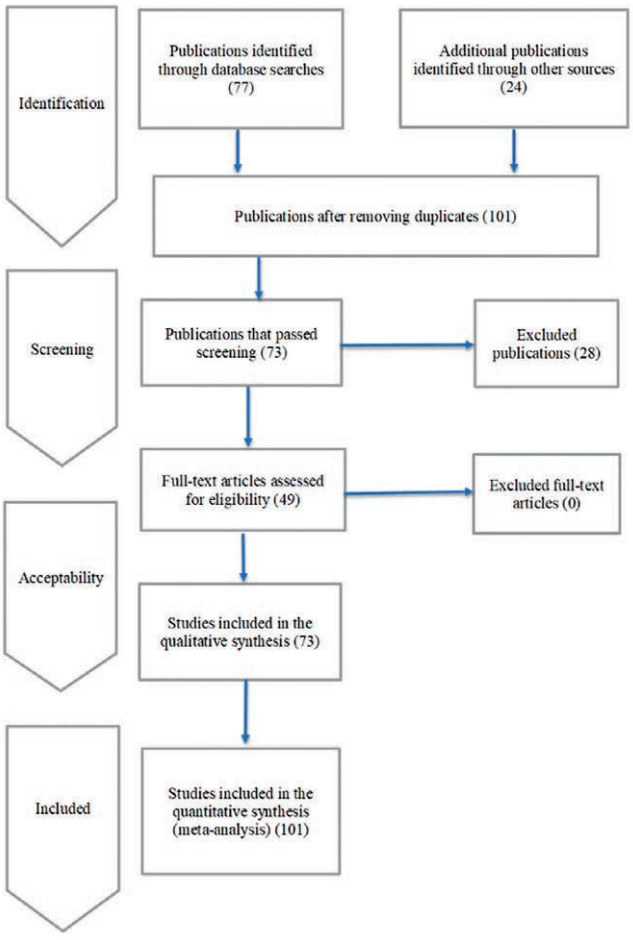


Figure 1. PRISMA flow diagram showing the literature sources used to analyze this issue [14-15].

Results

PFAS are frequently described as environmentally persistent or "forever" chemicals and have recently attracted significant attention because of growing concerns regarding their possible harmful effects on ecosystems and human health [16]. PFAS compounds are extremely persistent and have high mobility: long-chain PFAS exhibit high water solubility and sorption potential, facilitating their leaching into groundwater, dispersion in surface waters, and long-range atmospheric transport [17]. Consequently, even in isolated ecosystems like the Arctic, PFAS contamination has been identified in a variety of matrices, including soil, sediments, drinking water supplies, and biota [16, 17]. As a result of their various physicochemical characteristics, PFAS raise a variety of concerns about bioaccumulation and negative effects, even though the persistence linked to the perfluorinated carbon chain is a fundamental concern [18].

PFAS's behavior in the environment, including their molecular state and distribution, is determined by their physical and chemical qualities as well as environmental factors. Neutral and ionic molecule forms, solid and liquid states, and various habitats and biota (aqueous, pure phase, soil/sediment, biota, and atmosphere) can all undergo partitioning. The ambient behavior of certain PFAS is further complicated by their surface-active characteristics [19,20].

Toxicological evidence demonstrates adverse effects in non-human species, including developmental toxicity, cancer, endocrine disruption, hepatotoxicity, immunotoxicity, and declined reproductive fitness [21]. Hazards associated with human health and environment, along with persistent nature, have positioned PFAS as emerging contaminants of global concern. Current regulatory efforts are increasingly emphasizing source reduction, environmental monitoring, and the development of advanced remediation strategies to mitigate their long-term ecological impacts [22,23].

PFAS are found everywhere in the environment, marking a "planetary boundary" similar to climate change or the ozone hole [24].

PFAS have been extensively utilized in a wide range of everyday consumer goods, including non-stick coatings, food wrapping, cosmetics, cookware, and hair detergents, as well as in industrial applications including surfactants and firefighting foams [25,26] (Figure 2).



Figure 2. PFAS in different consumer products [25, 26].

The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) indicates that more than 4,730 different PFAS compounds exist. The United States EPA DSSTox toxicity database contains 14,735 individual PFAS chemicals [27, 28], while PubChem database records over 6 million [29]. Exposure to PFAS leads to hormonal imbalances, weakened immunity, cancer, and impaired cognitive abilities [30,31]. In a 2018 *Washington Post* article, PFAS were termed "forever chemicals" [32]. The production of PFAS generates approximately $4 billion in profits annually, while global environmental cleanup costs for PFAS are estimated at about $17.5 trillion annually, representing 17.5% of the world's $100 trillion GDP in 2022 [33]. Cleaning contaminated areas is technically challenging and expensive, with annual costs ranging from €170 to €821 billion in the EEA [34,35].

PFAS gained public attention with Todd Haynes' 2019 film *Dark Waters*, which depicted the discovery of the first evidence of this environmental contamination in 1998 at a plant in Parkersburg, West Virginia, where the DuPont chemical group manufactured Teflon.

Since the 1940s, substantial number of new PFAS compounds have been introduced, including traditional substances such as PFOS and PFOA, as well as emerging short-chain and newly identified fluorinated alternatives. These compounds vary considerably in their molecular structure, carbon chain length, and electrical charge [36,37]. PFAS have been identified in marine organisms and in a wide range of aquatic environments, namely rivers, lakes, tributaries, and groundwater, even at trace concentrations in the nanogram-per-liter (ng/L) concentration [38-40]. Despite these low concentrations, exposure to PFAS has been linked with serious health effects, including hormonal imbalance, elevated cholesterol levels, pregnancy complications, cancer, and immune system toxicity, making PFAS contamination a significant environmental and public health concern [41].

Because developmental effects are considered sensitive endpoints for long-chain PFAS, exposures during critical developmental stages (e.g., fetal and infant periods) are particularly important.

PFAS are able to penetrate the placental barrier and move across the developing fetus, and they may also be transmitted from mother to infant via breast milk. Among the general population, breastfed infants can experience higher exposure to long-chain PFAS than their mothers. Moreover, infant exposure can be greater than that of adults when formula is prepared using contaminated water or when breastfeeding mothers consume contaminated drinking water [42].

PFAS may also adsorb onto micro- and nanoplastics, potentially intensifying their harmful effects [43]. PFAS compounds have been successively recognized as persistent organic pollutants (POPs) under the Stockholm Convention: PFOS in 2009, PFOA and related compounds in 2019, and PFHxS with its associated chemicals in 2022 [4, 44]. In addition, toxic long-chain perfluorocarboxylic acids (LC-PFCAs) were scheduled for consideration by the Conference of the Parties in May 2025.

Over the last twenty years, the production of specific PFAS compounds has shifted toward Asia, where oversight and regulation are less rigorous [11]. If emissions continue, PFAS will accumulate further in the environment creating significant challenges for a circular economy in the world.

According to the revised EU Drinking Water Directive (DWD) EU 2020/2184, the maximum limit of the total PFAS concentration in drinking water is up to 0.5 μg/L. However, concentrations exceeding 10,000 ng/L of water have been found at 640 locations in the EU and the UK [11].

Few peer-reviewed studies have evaluated PFAS levels in tap water after point-of-use or outdoor wastewater treatment processes, and only five of these have assessed removal efficiency under real-world conditions. Furthermore, the reported results suggest that not all filters were effective, particularly for short-chain PFAS [45, 46].

In this study, 81 PFAS were examined in tap water derived from three major water sources in East China, a region recognized as a global hotspot for PFAS emissions. Comprehensive quantitative analysis identified 64 PFAS, the highest number reported so far, including 28 newly detected compounds quantified for the first time in Chinese tap water. The conventional water treatment strategies are not that effective, so PFAS concentrations and profiles in tap water closely reflected those in the source water and varied with seasonal changes. As a result, contamination present in raw water was directly conveyed to tap water, with total PFAS concentrations reaching as high as 8970.3 ng/L [47].

In the United States, drinking water quality in Massachusetts is regulated by the Massachusetts Department of Environmental Protection (MassDEP), which has set a mandatory maximum contaminant level (MCL) for PFAS to ensure safe daily and lifetime exposure. These standards limit the combined concentration of six PFAS in drinking water to 20 parts per trillion (ppt), equivalent to nanograms per liter (ng/L). These six PFAS include the following (Table 1):

Table 1. Abbreviations for some PFAS compounds

PFAS Name	Abbreviation
Perfluorohexane sulfonic acid	PFHxS
Perfluoroheptanoic acid	PFHpA
Perfluorooctanoic acid	PFOA
Perfluorooctane sulfonic acid	PFOS
Perfluorononanoic acid	PFNA
Perfluorodecanoic acid	PFDA

The Danish Environmental Protection Agency recommends that drinking water contain no more than 2 ng/L. The highest contamination level has been recorded in Zwijndrecht, Belgium, where a PFAS manufacturing plant is located. Concentrations of up to 73 million ng/L have been observed there - 36.5 million times the recommended safe level. Currently, much of the global funding allocated to addressing PFAS is related to environmental cleanup efforts [35]. These results raise serious concerns due to the persistence, toxicological profile of PFAS and their ability to bioaccumulate in the body and food chain [48].

As PFAS move along commercial pathways from primary producer to commercial consumer to final disposer, releases into the environment occur through both controlled and uncontrolled waste streams (Figure 3).

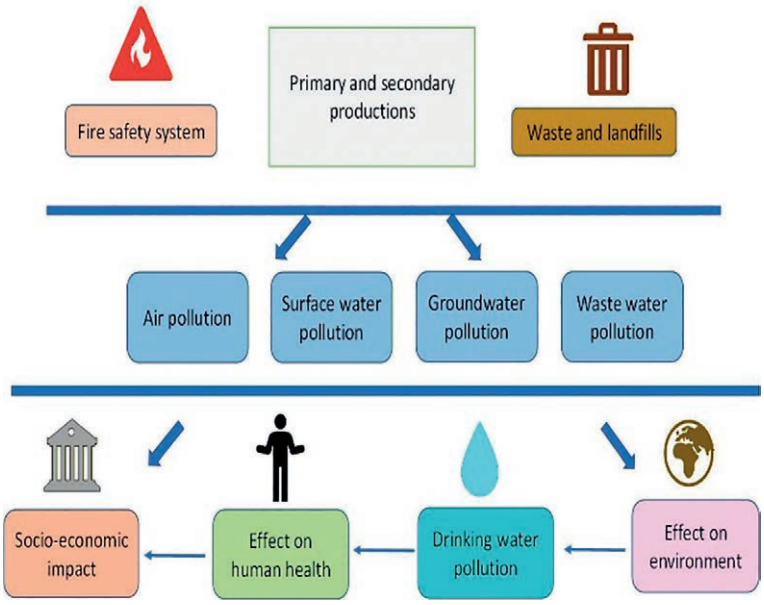


Figure 3. The ways of PFAS to enter the environment.

The main sources of PFAS in aquatic environments are wastewater discharges from treatment plants [49, 50], emissions from manufacturing facilities [51, 52], industrial plants, and landfill leachate [53].

Industrial PFAS sources include both primary and secondary manufacturing facilities. Primary facilities consist of those that synthesize PFAS-based products, produce chemical feedstocks or finished articles, and use PFAS as processing agents in fluoropolymer manufacturing. PFAS-containing process aids are not designed to be part of the final product; however, trace residues may remain [54, 55].

There is a likelihood that secondary manufacturing facilities utilize PFAS-containing substances and fluoropolymers supplied by primary production plants in industrial operations, including the coating of finished products.

According to the U.S. Environmental Protection Agency [56–58], PFAS manufacturers and formulators are categorized within the Organic Chemicals, Plastics, and Synthetic Fibers (OCPSF) point source category. This category covers a wide variety of industries, raw materials, and production processes that can generate or utilize PFAS.

Common mechanisms and pathways for PFAS releases at industrial facilities are shown in Figure 3. Major sources of PFAS include wastewater discharges, on- and off-site solid waste disposal, accidental emissions including leaks and spills, fire-fighting aqueous film-forming foam (AFFF), and stack/fugitive emissions. PFAS can be deposited on surface water bodies and soil systems (followed by leaching and migration to groundwater) related to the facility [59−62] by stack emissions, and transported by air both short and long distances. Industrial facilities may include areas where fire training or emergency response activities involving AFFF have taken place, as well as AFFF storage locations and building-integrated fire suppression systems. Similar to other AFFF release sites, these facilities may also contain co-occurring contaminants such as solvents or petroleum hydrocarbons, which can influence the environmental fate and transport of PFAS.

Identified environmental pathways for PFAS migration include [42]: leaching from soil, advection and dispersion from water and air, atmospheric deposition, and diffusion in water/air. Through these pathways, PFAS can be transported through the atmosphere and deposited in distant locations, resulting in measurable accumulation far from their original sources.

The movement of PFAS through unsaturated soils under rainfall or irrigation conditions varies by site and is influenced by both environmental factors and PFAS molecular characteristics. High PFAS concentrations can lead to micelle formation and its growth, potentially increasing their adsorption behavior on minerals and carbon surfaces. The persistence of many PFAS degradation products contributes to their widespread presence in the environment. Moreover, the increasing number of PFAS that undergo partial degradation further complicates their detection and remediation [63].

PFAS distribution, transport, and transformation occur in a variety of environments. Regulatory attention has focused on PFOS and PFOA due to their toxic nature and environmental persistence, even at trace concentrations [42]. The transformation pathways of some PFAS are well characterized, many others degrade through unknown mechanisms, further expanding the already extensive list of PFAS. For the PFAS that are identified, data on their potential ecological impacts and effects on ecosystem services remain limited. Only a small fraction of these forever chemicals has been thoroughly investigated in ecotoxicological studies, with PFOA and PFOS alone representing 21% and 39% of the ECOTOX database, respectively [64].

At the same time, most research on PFAS focuses on concentration studies, while the removal of PFAS has been poorly explored [37, 65].

The number of emerging PFAS with limited information on their physical, chemical, and toxicological properties is rapidly growing. These compounds exhibit diverse chemical structures, varying volatility and solubility, and uncertain potential impacts from exposure.

Kazakhstan, geographically located in the heart of Eurasia, experiences a sharply continental climate, including hot summers. The city of Almaty is characterized by a growing population, expanding construction, and agriculture. The development of Kazakhstan's capital, Astana, has increased anthropogenic pressure on surface water sources, intensifying their role for recreation purposes. The impact of municipal and industrial activities is accompanied by pollution of both wastewater and surface waters. Therefore, it is important to study the spread of PFAS within the "wastewater-surface water" system to understand the scale of the problem and consider it when developing measures to clean these water bodies. For these reasons, the city's water bodies represent a valuable system for studying the presence of PFAS. According to Kazakhstani experts [66], improper management of municipal wastewater in growing urban areas of Kazakhstan leads to the contamination of rivers with various substances. Since 2008, Kazakhstan has significantly expanded its monitoring infrastructure, yet PFAS monitoring of water resources is not conducted.

At the national level, the Republic has ratified the Stockholm Convention, which implements plans for the management and implementation of modern eco-monitoring methods, but PFAS are not being studied in the environment [67].

The analytical environmental agency Greenwomen has prepared a review on PFAS in Kazakhstan and the world. The article notes that Kazakhstan ratified the Stockholm Convention on November 9, 2007 [67]. The effective dates of amendments to Annexes A, B or C to the Convention for PFAS in Kazakhstan include: PFHxS - November 16, 2023. PFOA – December 3, 2020. Another category of PFAS is used in Kazakhstan in the form of gases and liquids, for example, refrigerants in refrigerators or air conditioning systems. In 2024, Kazakhstan planned to build an industrial complex for the processing of refrigeration equipment and the thermal removal of ODS (ozone depleting substances) and persistent pollutants POPS and the complex is expected to operate in 2026 [68].

The materials of Kazakhstani news agencies only reflect the results of research by foreign scientists, which show the presence of PFAS in the environment and biomaterials, reflecting the global trend towards pollution [69-73].

Issues related to PFAS contamination of water bodies worldwide raise concerns about addressing environmental, biological, social, and economic challenges.

Discussion

Although global data on PFAS concentrations in water has been published, similar studies are lacking in Kazakhstan. The only available research pertains to PFAS content in sports gloves produced in Russia [67].

Unfortunately, most of the global studies on PFAS do not meet established quality standards.

Based on the principle underlying the Water Safety Plan, which involves controlling contaminants at their source, it would be prudent to conduct research aimed at improving wastewater treatment methods for removing PFAS from their main pathway into the aquatic environment. Environmental impact assessment is complicated by the vast number of functionally diverse PFAS and is further complicated by their presence as complex mixtures.

All this leads to an understanding of the need for regular monitoring of PFAS content in environmental water bodies, adaptation of existing methods for surface water samples in Kazakhstan and ultimately ensuring water purification from PFAS and developing appropriate legislative and regulatory frameworks tailored to local conditions.

Conclusion

Technological progress and active industrialization lead to various environmental problems and the number of environmental disasters continues to grow. Among the most serious challenges requiring urgent solutions are the health risks posed by per - and polyfluoroalkyl substances (PFAS), their contamination of water resources and the problem of their disposal.

These problems require immediate attention, active State policy and joint concerted efforts. At the same time, the problem of reducing the health risks associated with PFAS requires a multi-pronged approach that should combine the following areas:

1. Regulatory measures: Governments should ensure the development and enforcement of legislation to control the production and use of PFAS, so that industrial enterprises switch to safer alternatives.

2. Research and innovation: Investments in research to develop effective technologies for removing PFAS from water sources and contaminated sites are crucial.

3. Public awareness: Informing consumers about the dangers of PFAS and promoting PFAS-free products can help shift the market towards safer alternatives.

This study was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant IRN AP26104387 "Determination of PFAS in Wastewater and Surface Water of Astana and Its Vicinity and Development of Modified 3D-Printed Ceramic Membranes for Their Removal"). We declare no conflict of interest.

References

1. USEPA. 2003. Perfluorooctanoic Acid (PFOA), Fluorinated Telomers; Request for Comment, Solicitation of Interested Parties for Enforceable Consent Agreement Development, and Notice of Public Meeting. 68 Federal Register 18626. (Washington D.C.: USEPA). April 16.NTP 2016.
2. NTP. 2016. NTP Monograph on Immunotoxicity Associated with Exposure to Perfluorooctanoic Acid (PFOA) or Perfluorooctane Sulfonate (PFOS). (Division of the National Toxicology Program Office of Health Assessment and Translation, National Institute of Environmental Health Sciences). September. https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/ohat/pfoa_pfos/pfoa_pfosmonograph_508.pdf
3. Smith, J. W. N., Beuthe, B., Dunk, M., Demeure, S., Carmona, J. M. M., Medve, A., & Slenders, H. (2016). Environmental fate and effects of poly-and perfluoroalkyl substances (PFAS). Environmental science for the European refining industry, concawe, report, (8/16).
4. Wang, Y. Q., Hu, L. X., Liu, T., Zhao, J. H., Yang, Y. Y., Liu, Y. S., & Ying, G. G. (2022). Per-and polyfluoralkyl substances (PFAS) in drinking water system: Target and non-target screening and removal assessment. Environment International, 163, 107219. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107219
5. X. Trier, K. Granby, J.H. Christensen. Polyfluorinated surfactants (PFS) in paper and board coatings for food packaging. Environ. Sci. Pollut. Res., 18 (7) (2011), pp. 1108-1120
6. Wang, Z., DeWitt, J. C., Higgins, C. P., & Cousins, I. T. (2017). A never-ending story of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) Environ. Sci. Technol., 51 (5), pp. 2508-2518.
7. Chow, S. J., Ojeda, N., Jacangelo, J. G., & Schwab, K. J. (2021). Detection of ultrashort-chain and other per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in US bottled water. Water research, 201, 117292.
8. Podder, A., Sadmani, A. A., Reinhart, D., Chang, N. B., & Goel, R. (2021). Per and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: A transboundary review of their occurrences and toxicity effects. Journal of hazardous materials, 419, 126361.
9. Pan, C. G., Zhao, J. L., Liu, Y. S., Zhang, Q. Q., Chen, Z. F., Lai, H. J., ... & Ying, G. G. Bioaccumulation and risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in wild freshwater fish from rivers in the Pearl River Delta region, South China. Ecotoxicol. Environ. Saf., 107 (2014), pp. 192-199
10. Niu, Y., Tan, H., & Hui, S. E. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. Progress in Energy and Combustion Science. 2016, Volume: Volume 52. Pages: 1-61.
11. MacKeown, H., Magi, E., Di Carro, M., & Benedetti, B. Removal of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances from tap water by means of point-of-use treatment: A review. Science of The Total Environmen. Volume 954, 1 December 2024, 176764. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176764.
12. Cousins, I. T., Johansson, J. H., Salter, M. E., Sha, B., & Scheringer, M. Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Environmental Science & Technology, 2022, Vol 56/Issue 16
13. EPA, Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation 2024, https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas
14. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Prisma Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and MetaAnalyses: The PRISMA Statement. PLoS Med 6(6): e1000097. https://doi:10.1371/journal.pmed1000097,
15. PRISMA. Last accessed 20 June, 2026. www.prisma-statement.org.
16. Kwiatkowski, C.F., Andrews, D.Q., Birnbaum, L.S., Bruton, T.A., DeWitt, J.C., Knappe, D.R.U., … & Wang, Z. (2020). Scientific basis for managing PFAS as a chemical class. Environmental Science & Technology Letters, 7(8), 532–543.
17. Giesy, J.P. & Kannan, K. (2001). Global distribution of perfluorooctane sulfonate in wildlife. Environmental Science & Technology, 35(7), 1339–1342.
18. Marina G. Evitch, Mary J. B. Davis, James P. McCord, Brad Acree, Jill A. Aukerman, Detlef R. W. Knappe, Andrew B. Lindstrom, Thomas F. Spaeth, Caroline T. Stevens, Mark J. Strynar, Zhanyun Wang, Eric J. Weber, W. Matthew Henderson, John W. Washington. Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. Science. 2022 Feb 4;375(6580):eabg9065. https://doi: 10.1126/science.abg9065.
19. ITRC. 2023. Fate and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2023/10/FT_PFAS_FactSheet_Sept 2023_final.pdf.

20. Routti, H., Letcher, R.J., Arukwe, A., van Bavel, B., Yoccoz, N.G. & Jenssen, B.M. (2017). Influence of body condition on tissue distribution of perfluoroalkyl substances in Arctic fox (Vulpes lagopus). Environmental Science & Technology, 51(12), 6677–6686.
21. Kumar, A., Rothstein, J. C., Chen, Y., Zhang, H., & Zhao, Y. (2025). Experimental Raman spectra analysis of selected PFAS compounds: Comparison with DFT predictions. Journal of Hazardous Materials, 138704.
22. Lau, C., Anitole, K., Hodes, C., Lai, D., Pfahles-Hutchens, A. & Seed, J. (2007). Perfluoroalkyl acids: A review of monitoring and toxicological findings. Toxicological Sciences, 99(2), 366–394.
23. UNEP. (2022). Global governance of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). United Nations Environment Programme.
24. European Environmental Agency, Treatment of drinking water to remove PFAS (Signal), 2024. https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/treatment-of-drinking-water-to-remove-pfas-signal).
25. Das, S. , and Ronen A.. 2022. "A Review on Removal and Destruction of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) by Novel Membranes." Membranes 12, no. 7: 662.
26. Xue, J. , Verstraete W., Ni B.-J., et al. 2025. "Rethink Biosolids: Risks and Opportunities in the Circular Economy." Chemical Engineering Journal 510: 161749.
27. Buck, R. C., Korzeniowski, S. H., Laganis, E., & Adamsky, F. (2021). Identification and classification of commercially relevant per-and poly-fluoroalkyl substances (PFAS). Integrated environmental assessment and management, 17(5), 1045-1055. https://doi.org/10.1002/ieam.4450
28. Schymanski, E. L., Zhang, J., Thiessen, P. A., Chirsir, P., Kondic, T., & Bolton, E. E. (2023). Per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. Environmental science & technology, 57(44), 16918-16928. https://doi:10.1021/acs.est.3c04855
29. National Institute of Environmental Health and Science. Last accessed 10 June, 2026. https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/pfc
30. Ames, J. L., Sharma, V., & Lyall, K. (2025). Effects of early-life PFAS exposure on child neurodevelopment: a review of the evidence and research gaps. Current environmental health reports, 12(1), 9. https://doi: 10.1007/s40572-024-00464-5.
31. PFAS. Last accessed 3 June, 2026. https://en.wikipedia.org/wiki/Per_and_polyfluoroalkyl_substances
32. Washington Post, Joseph G. A. These toxic chemicals are everywhere – even in your body (2018). https://www.washingtonpost.com/opinions/these-toxic-chemicals-are-everywhere-and-they-wont-ever-go-away/2018/01/02/82e7e48a-e4ee-11e7-a65d-1ac0fd7f097e_story.html
33. Crone, B. C. , Speth T. F., Wahman D. G., et al. 2019. "Occurrence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Source Water and Their Treatment in Drinking Water." Critical Reviews in Environmental Science and Technology 49, no. 24: 2359–2396
34. Hara-Yamamura, H. , Inoue K., Matsumoto T., Honda R., Ninomiya K., and Yamamura H.. 2022. "Rejection of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) by Severely Chlorine Damaged RO Membranes With Different Salt Rejection Ratios." Chemical Engineering Journal 446: 137398.
35. Lenka, S. P. , Kah M., and Padhye L. P.. 2021. "A Review of the Occurrence, Transformation, and Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Treatment Plants." Water Research 199: 117187.
36. Zhang, J. , Huang Z., Gao L., Gray S., and Xie Z.. 2022. "Study of MOF Incorporated Dual Layer Membrane With Enhanced Removal of Ammonia and Per-/Poly-Fluoroalkyl Substances (PFAS) in Landfill Leachate Treatment." Science of the Total Environment 806: 151207.
37. Munoz G, Budzinski H, Babut M, Drouineau H, Lauzent M, Menach KL, et al. (August 2017).Evidence for the Trophic Transfer of Perfluoroalkylated Substances in a Temperate Macrotidal Estuary. Environmental Science & Technology. 51 (15): 8450–8459. doi:10.1021/acs.est.7b02399. PMID 28679050
38. Johnson, J.K., Michael Salerno, K., Schlesinger, D.R. et al. Removing forever chemicals via amphiphilic functionalized membranes. npj Clean Water 5, 55 (2022). https://doi.org/10.1038/s41545-022-00193-y
39. Chen, W. , Liu M., Ding M., Zhang L., and Dai S.. 2023. "Advanced Thin-Film Composite Polyamide Membrane for Precise Trace Short-Chain PFAS Sieving: Solution, Environment and Fouling Effects." Process Safety and Environmental Protection 169: 493–503.
40. ITRC (2023). Human and Ecological Health Effects and Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2023/10/HH_Eco_PFAS_Fact-Sheet_Sept2023_final.pdf
41. Samaei, S. H.-A. , Mojahednia P., Chen J., et al. 2025. "What Does the "Trojan Horse" Carry. The Pollutants Associated With Microplastics/Nanoplastics in Water Environments." ACS ES&T Water 5, no. 4: 1530–1545.
42. Li, H. , Junker A. L., Wen J., et al. 2023. "A Recent Overview of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Removal by Functional Framework Materials." Chemical Engineering Journal 452: 139202.
43. Tow, E. W. , Ersan M. S., Kum S., et al. 2021. "Managing and Treating Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Membrane Concentrates." AWWA Water Science 3, no. 5: e1233.
44. European Chemical Agency. Perfluoroalkyl Chemicals. https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas.
45. Zhang, X., Wang, D., Wang, K., Yang, Z., Ai, M., & Zhang, Y. (2025). Legacy and Novel Per-and Polyfluoroalkyl Substances in Tap Water from East China: Impact from Water Sources and Risk Mitigation by Household Purifiers. Environmental Science & Technology, 59(32), 17210-17221. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5c03293.
46. Ecology. https://www.vedomosti.ru/ecology/protection_nature/articles/2023/08/03/988319.
47. IPEN. Last accessed 10 June, 2026. https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-pfas-2021-v1_6w-ru.pdf
48. Pan, C. G., Liu, Y. S., & Ying, G. G. (2016). Perfluoroalkyl substances (PFASs) in wastewater treatment plants and drinking water treatment plants: Removal efficiency and exposure risk. Water research, 106, 562-570.
49. P. Jacob, K.A. Barzen-Hanson, D.E. Helbling. Target and Nontarget Analysis of Per- and Polyfluoralkyl Substances in Wastewater from Electronics Fabrication Facilities. Environ. Sci. Technol., 55 (4) (2021), pp. 2346-2356.

50. Y.i. Wang, N. Yu, X. Zhu, H. Guo, J. Jiang, X. Wang, W. Shi, J. Wu, H. Yu, S.i. Wei. Suspect and Nontarget Screening of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Wastewater from a Fluorochemical Manufacturing Park. Environ. Sci. Technol., 52 (19) (2018), pp. 11007-11016.
51. I. Fuertes, S. Gomez-Lavin, M.P. Elizalde, A. Urtiaga. Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in northern Spain municipal solid waste landfill leachates. Chemosphere, 168 (2017), pp. 399-407).
52. Buck, Robert C., Stephen H. Korzeniowski, Evan Laganis, and Frank Adamsky. 2021. "Identification and classification of commercially relevant per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS)." Integrated Environmental Assessment and Management 17 (5):1045-1055. https://doi.org/10.1002/ieam.4450
53. Buckley, Thomas, Xiaoyong Xu, Victor Rudolph, Mahshid Firouzi, and Pradeep Shukla. 2021. "Review of foam fractionation as a water treatment technology." Separation Science and Technology:1-30.10.1080/01496395.2021.1946698).
54. USEPA. 2021. Multi-Industry Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Study – 2021 Preliminary Report. EPA-821-R-21-004. Washington, DC: Office of Water U.S Environmental Protection Agency.https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-09/multi-industry-pfas-study_preliminary-2021-report_508_2021.09.08.pdf,
55. USEPA. 2021. "PFAS Explained." Last Modified OCtober 18, 2021. accessed 2021.https://www.epa.gov/pfas/pfas-explained; USEPA. 2021. "Human Health Toxicity Assessments for GenX Chemicals." Last Modified November 9, 2021. accessed 2021.https://www.epa.gov/chemical-research/human-health-toxicity-assessments-genx-chemicals;
56. USEPA. 2021. Proposed Approaches to the Derivation of a Draft Maximum Contaminant Level Goal for Perfluorooctanoic Acid (PFOA) (CASRN 335-67-1) in Drinking Water. External Peer Review Draft. EPA 822-D-21-001. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency Office of Water (4304T),
57. Davis, Katherine L., Michael D. Aucoin, Barbara S. Larsen, Mary A. Kaiser, and Andrew S. Hartten. 2007. Transport of ammonium perfluorooctanoate in environmental media near a fluoropolymer manufacturing facility. Chemosphere 67 (10):2011-2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.11.049;
58. de la Torre, Adrián, Irene Navarro, Paloma Sanz, and María de los Ángeles Mártinez. 2019. "Occurrence and human exposure assessment of perfluorinated substances in house dust from three European countries." Science of The Total Environment 685:308-314.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.463;
59. De Silva, Amila O., James M. Armitage, Thomas A. Bruton, Clifton Dassuncao, Wendy Heiger-Bernays, Xindi C. Hu, Anna Kärrman, Barry Kelly, Carla Ng, Anna Robuck, Mei Sun, Thomas F. Webster, and Elsie M. Sunderland. 2021. "PFAS Exposure Pathways for Humans and Wildlife: A Synthesis of Current Knowledge and Key Gaps in Understanding." Environmental Toxicology and Chemistry 40 (3):631-657. https://doi.org/10.1002/etc.4935;
60. Shin, Hyeong-Moo, Verónica M. Vieira, P. Barry Ryan, Russell Detwiler, Brett Sanders, Kyle Steenland, and Scott M. Bartell. 2011. "Environmental Fate and Transport Modeling for Perfluorooctanoic Acid Emitted from the Washington Works Facility in West Virginia." Environmental Science & Technology 45 (4):1435-1442. 10.1021/es102769t657.https://doi.org/10.1002/etc.4935;
61. Jiao S., Shi Q.,Gan Q., Uptake, accumulation, and metabolism of PFAS in plants and health prospects: a critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Engineering, 1–32 (2020).
62. Ankli, G. T., et al., Environmental Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Current State of the Science and Proposed Way Forward. Environmental Toxicology and Chemistry, n/a, (2020).
63. Kazakhstan Environmental Performance Reviews: Third Review https://unece.org/sites/default/files/2021-08/ECE_CEP_185_Rus.pdf
64. Bonn PAC, Hofman JAMH, & van Der Hoek JP (2000). Scaling control of RO membranes and direct treatment of surface water. Desalination, 132(10), 109–119.
65. Boo C, Wang Y, Zucker I, Choo Y, Osuji CO, & Elimelech M (2018). High performance nanofiltration membrane for effective removal of perfluoroalkyl substances at high water recovery. Environmental Science and Technology, 52, 7279–7288. 10.1021/acs.est.8b01040 [PubMed: 29851340]).
66. Miranda, D. A., Benskin, J. P., Awad, R., Lepoint, G., Leonel, J., & Hatje, V. (2021). Bioaccumulation of Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a tropical estuarine food web. Science of the Total Environment, 754, 142146.
67. Regional Bulletin. NGO networks on chemical safety EECCA. (2024). https://ipen.org/wp-content/uploads/2026/03/2024_2_byulleten_ipen_vekca_iyul_2024.pdf.
68. UNIDO, Construction of an Industrial Complex for the Processing of Refrigeration/Air Conditioning Equipment and Thermal Destruction of ODS/POPs in Kazakhstan https://www.waste-management.org/en/success_story/construction_of_an_industrial_complex_for_the_processing/
69. High concentrations of chemicals found in fish-based pet food (2026). https://www.zakon.kz/mir/6508807-v-kormakh-s-ryboy-dlya-domashnikh-zhivotnykh-vyyavili-bolshuyu-kontsentratsiyu-khimikatov.html.
70. Dangerous «forever chemicals» found in one in five children (2023) https://standard.kz/ru/post/opasnye-vecnye-ximikaty-naideny-u-kazdogo-pyatogo-rebenka.
71. Azamatkhan Akhmadov (2025). Scientists have identified the liver's worst enemy, and it isn't alcohol. https://tengrinews.kz/healthy/uchenyie-nashli-glavnyiy-vrag-pecheni-i-eto-ne-spirtnoe-578284/.
72. A simple way to combat «forever chemicals» has been found. Last updated February 2025. https://nauka.kz/
73. National report of the Ministry of Ecology, Geology and Bioresources for 2022

ҚОРШАҒАН ОРТАНЫҢ PFAS ЗАТТАРЫМЕН ЛАСТАНУ МӘСЕЛЕСІНЕ ҚЫСҚАША ШОЛУ

А. Камал[1], А. Сатаева[1*], А. Байменов[2], Ю. Мекебаева[1], Д. Нурахмет[1], Ж. Шадияр[1], Е. Архангельски[1]

[1] Назарбаев университетінің Құрылыс және қоршаған ортаны қорғау инженериясы кафедрасы, Қоршаған орта ғылымы және технология тобы (ESTg), Астана, Қазақстан

[2] Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті Инженерлік профиль зертханасы, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: aliya.satayeva@nu.edu.kz*

Бұл зерттеу қоршаған ортадағы PFAS ластануының кешенді талдауын ұсынады. Жарияланған ғылыми мақалаларды талдау PFAS химиялық, биологиялық және фотолиттік ыдырауға ерекше төзімді екенін, суда айтарлықтай қозғалғыштық танытатынын және ұзақ қашықтыққа таралуы мүмкін екенін көрсетті.

PFAS мыңдаған жылдар бойы жартылай ыдырау кезеңдері бар «мәңгілік химиялық заттар» ретінде белгілі. PFAS жер үсті су көздерін ластайды және топырақ пен ауада жиналуы мүмкін.

Олардың қоршаған ортадағы концентрациясын анықтау және талдау өте маңызды, себебі олар табиғи мекендеу орталарында өте кең таралған, бұл қоғамдық денсаулыққа және экожүйенің тұтастығына қауіп төндіреді.

Әдеби шолу PFAS зерттеулері бойынша жарияланымдардың мүлдем жоқтығын көрсетті. Қазақстандық ақпарат агенттіктерінің веб-сайттарында ұсынылған материалдар қоршаған ортадағы PFAS пен биоматериалдарды зерттейтін шетелдік ғалымдардың зерттеулерінің нәтижелерін ғана көрсетеді, бұл PFAS ластануының жаһандық мәселесін көрсетеді.

Зерттеудің бұл бағытының алғышарттары – Қазақстанда жарияланымдардың аздығы, PFAS мониторингінің болмауы, жүйелі зерттеулердің, соның ішінде шетелдік зерттеулердің болмауы, сондай-ақ қоршаған орта нысандарындағы PFAS анықтаудың әртүрлі әдістерінің болмауы, және бұл мұқият ғылыми назар аударуды және зерттеуді қажет етеді.

Түйін сөздер:*перфторалкил және полифторалкил заттар (PFAS), ластаушы жолдар, ластану, қоршаған орта, токсикологиялық мінез-құлық.*

КРАТКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПФАС

А. Камал[1], А. Сатаева[1*], А. Байменов[2], Ю. Мекебаева[1], Д. Нурахмет[1], Ж. Шадияр[1], Е. Архангельски[1]

[1]Кафедра гражданского и экологического строительства, Школа инженерных и цифровых наук, Группа экологических наук и технологий (ESTg), Университет Назарбаева, Астана, Казахстан

[2]Лаборатория инженерного профиля, Казахский национальный технический университет им. Сатбаева, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: aliya.satayeva@nu.edu.kz*

В данном исследовании представлен всесторонний анализ загрязнения окружающей среды ПФАС. Анализ опубликованных научных работ показал, что ПФАС обладают исключительной устойчивостью к химической, биоло-гической и фотолитической деградации, проявляют значительную подвижность в воде и могут распространяться на большие расстояния.

ПФАС известны как «вечные химические вещества» с периодом полураспада в тысячи лет. ПФАС загрязняют поверхностные водные источники и могут накапливаться в почве и воздухе.

Выявление и анализ их концентраций в окружающей среде имеют решающее значение из-за их чрезвычайно широкого распространения в природных местообитаниях, представляющих опасность для здоровья населения и целостности экосистемы.

Обзор литературных источников показал, что в Казахстане не проводились исследования по этой проблеме. Обзор литературы выявил полное отсутствие публикаций по исследованиям ПФАС. Материалы, представленные на сайтах казахстанских информационных агентств, лишь отражают результаты исследований зарубежных ученых, изучающих ПФАС в окружающей среде и биоматериалах, что отражает глобальную проблему загрязнения ПФАС.

Предпосылками для данного направления исследований являются недостаток публикаций в Казахстане, отсут-ствие мониторинга ПФАС, отсутствие систематических исследований, в том числе зарубежных, а также отсут-ствие разнообразных методов определения ПФАС в объектах окружающей среды, что требует пристального на-учного внимания и изучения.

Ключевые слова*: перфторалкильные и полифторалкильные вещества (ПФАС), пути распространения загрязняющих веществ, загрязнение, окружающая среда, токсикологическое поведение.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-81-89
УДК 621.039

КОНЦЕПЦИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРА БН-350 В ГЛУБОКИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ

Д.И. Абулгазинова*, К.С. Садыков, Л.П. Дерябина, В.А. Поспелов, А.Г. Коровиков

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: davydenko@nnc.kz*

В статье рассматриваются концептуальные проектные решения по окончательному захоронению отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора БН-350. Выполнен анализ технологий окончательного захоронения ОЯТ без переработки, включая шахтные пункты захоронения и глубокие скважины в твердых породах. Рассмотрены концептуальные проектные решения подземной лаборатории, конструктивные особенности подземных комплексов, организация проходческих работ, инженерная инфраструктура и транспортно-технологические схемы обращения с контейнерами, содержащими ОЯТ. Представлены основные характеристики наземных и подземных сооружений, объемы горнопроходческих работ, параметры шахтных стволов и технологических площадок. Показано, что применение многоуровневой системы инженерных и геологических барьеров обеспечивает долгосрочную радиационную безопасность и минимизацию риска миграции радионуклидов в биосферу.

Ключевые слова: *отработавшее ядерное топливо, БН-350, пункт захоронения радиоактивных отходов, глубокое геологическое захоронение, подземная лаборатория, глубокие скважины.*

Введение

Проблема обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и высокоактивными радиоактивными отходами (ВАО) является одной из наиболее сложных и долгосрочных задач современной атомной энергетики. Для Республики Казахстан данная проблема имеет особое значение в связи с необходимостью обеспечения безопасного обращения с ОЯТ реактора БН-350 и определения оптимального варианта его окончательного захоронения. ОЯТ реактора БН-350 характеризуется высокой радиационной активностью, тепловыделением и представляет потенциальную опасность для биосферы. Поэтому для его окончательного захоронения необходимы инженерные решения, обеспечивающие надежную изоляцию радиоактивных материалов на длительный период. Такой подход должен учитывать особенности обращения с ОЯТ БН-350 и требования к его долговременной изоляции.

После остановки реакторной установки БН-350 в Республике Казахстан возникла необходимость безопасного обращения с более чем 2800 отработавшими тепловыделяющими сборками. В рамках программы вывода из эксплуатации осуществляется их долговременное хранение с последующей проработкой вариантов окончательного захоронения.

Согласно подходам Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), наиболее безопасным и устойчивым решением для окончательной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов является глубокое геологическое захоронение в стабильных геологических формациях, обеспечивающее многоуровневую систему естественных и инженерных барьеров. Данный подход минимизирует вероятность миграции радионуклидов в биосферу и обеспечивает долгосрочную безопасность без необходимости активного контроля со стороны человека [1,2].

Международная практика подтверждает эффективность данного метода. Так, в Финляндии реализуется проект глубокого геологического захоронения «Онкало» (Onkalo) в районе АЭС Олкилуото, который считается первым в мире промышленным объектом окончательного захоронения ОЯТ, рассчитанным на изоляцию радиоактивных материалов на срок до 100 000 лет. В Соединенных Штатах Америки ведется эксплуатация подземного комплекса Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) для захоронения трансурановых отходов в соляных формациях, а также рассматривается проект Yucca Mountain как потенциальное хранилище высокоактивных отходов. Во Франции реализуется национальная программа Cigéo, предполагающая захоронение радиоактивных отходов на глубине около 500 метров в глинистых формациях [3,4]. Указанные проекты демонстрируют различные геологические и инженерные подходы к долгосрочной изоляции радиоактивных материалов. Для настоящей работы международный опыт используется как основа для выбора и обоснования инженерных решений, применимых к окончательному захоронению ОЯТ реактора БН-350.

В мировой практике также развиваются альтернативные концепции, включая захоронение в глубоких скважинах, создание специализированных подземных исследовательских лабораторий и применение многоуровневых систем инженерных барьеров (кон-

тейнеры, буферные материалы, геологическая среда), обеспечивающих последовательное снижение риска миграции радионуклидов [5].

В Республике Казахстан вопросы обращения с радиоактивными отходами регулируются законом «Об использовании атомной энергии» [6], а также подзаконными актами, устанавливающими требования к выбору площадок размещения ядерных установок и объектов захоронения [7]. Дополнительно применяются нормы и руководства МАГАТЭ, включая стандарты безопасности по захоронению радиоактивных отходов, мониторингу и долгосрочному контролю объектов ядерного наследия [1,8].

Методы исследования

Разработка концепции захоронения ОЯТ реактора БН-350 осуществлена с учетом международного опыта исследований в области обращения с радиоактивными материалами. При этом рассмотренные подходы адаптируются к условиям и задачам окончательного захоронения ОЯТ БН-350. За десятилетия развития атомной энергетики была сформирована комплексная система требований к пунктам захоронения радиоактивных отходов, направленная на обеспечение долговременной радиационной и экологической безопасности. Основной задачей таких объектов является надежная изоляция радиоактивных веществ от биосферы на протяжении длительных временных интервалов, достигающих десятков и сотен тысяч лет.

В качестве базовой концепции для окончательного захоронения ОЯТ реактора БН-350 рассматривается глубокое геологическое захоронение в стабильных горных породах. Данный подход предполагает размещение контейнеров с ОЯТ в подземных сооружениях на глубине нескольких сотен метров. Основной целью рассматриваемой концепции захоронения ОЯТ БН-350 является предотвращение миграции радионуклидов в окружающую среду в течение длительного периода. Для этого предусматривается сочетание инженерных и естественных барьеров. При этом особое значение имеет выбор площадки размещения объекта, который должен учитывать не только геологические и гидрогеологические характеристики, но и политические, социальные, экологические и экономические факторы. Для реализации концепции окончательного захоронения ОЯТ БН-350 рассматриваются различные типы стабильных геологических сред. К ним относятся гранитные и кристаллические породы, каменная соль, глинистые формации, а также метаморфические и отдельные виды осадочных пород. Выбор конкретной геологической среды должен основываться на результатах комплексных исследований и оценке ее пригодности для размещения ОЯТ БН-350.

Создание пункта захоронения ОЯТ представляет собой многоэтапный процесс. Он включает предварительный выбор площадки, экологическую и концептуальную оценку территории, исследование геологической среды и разработку проектных решений. Далее выполняются лицензирование, строительство и эксплуатация объекта. Завершающим этапом является закрытие объекта с обеспечением его долговременной изоляции. Одним из наиболее сложных этапов является подтверждение пригодности геологического массива для размещения подземного комплекса.

В рассматриваемой концепции захоронения ОЯТ БН-350 используется принцип многоступенчатой защиты, предусматривающий применение нескольких взаимодополняющих барьеров безопасности. Такая система должна обеспечить последовательное снижение вероятности выхода и миграции радионуклидов из зоны захоронения. Для ОЯТ в качестве первого инженерного барьера предусматривается матрица, в которой фиксируются радиоактивные вещества. В качестве материалов матрицы применяются цемент, битум, фосфатные и боросиликатные стекла, обеспечивающие удержание радионуклидов и снижение вероятности их выхода за пределы системы хранения. Концепция захоронения ОЯТ БН-350 не предусматривает предварительную переработку и, следовательно, помещения продуктов переработки ОЯТ в первичную матрицу.

Элементом защиты для окончательного размещения ОЯТ БН-350 служит металлический контейнер, предназначенный для долговременной герметизации радиоактивных материалов. Для изготовления контейнеров предусматривается использование нержавеющей стали, углеродистой стали и медных сплавов. В ряде проектных решений применяется система двойных контейнеров, обеспечивающая дополнительную защиту от коррозионных процессов и механических воздействий.

В концепции захоронения ОЯТ БН-350 важным компонентом системы безопасности является буферный материал, размещаемый между контейнером и массивом горных пород. Наиболее широко используется бентонитовая глина, обладающая низкой водопроницаемостью и высокой сорбционной способностью. Бентонит ограничивает проникновение подземных вод, перераспределяет механические напряжения, компенсирует возможные подвижки пород, снижает тепловое воздействие на окружающий массив и способствует абсорбции радионуклидов в результате миграционных процессов [9-11].

Последним и основным естественным барьером выступает геологическая среда - массив горных пород, обеспечивающий долговременную изоляцию отходов от биосферы. Основными требованиями к геологической среде являются низкая водопроницаемость, тектоническая стабильность, высокая механическая прочность, устойчивость к температурным воздействиям и минимальная вероятность миграции радионуклидов.

Следует отметить, что оценка свойств горных пород исключительно на основе лабораторных исследований является недостаточной. Для получения достоверных данных о поведении геологической среды в условиях размещения радиоактивных отходов требуется проведение комплексных исследований в подземных лабораториях, расположенных непосредственно в ненарушенных массивах пород. Проведение таких исследований позволяет оценить гидрогеологические, геомеханические и геохимические характеристики массива, а также подтвердить долговременную безопасность проектируемого пункта захоронения ОЯТ [12].

При разработке решений по обращению с ОЯТ БН-350 необходимо учитывать его остаточное тепловыделение и соответствующие температурные условия хранения и размещения [13].

Концепция захоронения в пункте захоронения шахтного типа

В рамках проекта захоронения ОЯТ реактора БН-350 рассмотрена концепция создания подземной исследовательской лаборатории, предназначенной для подтверждения пригодности выбранного геологического массива к окончательному захоронению отработавшего ядерного топлива. Создание подобного объекта рассматривается как один из ключевых этапов реализации проекта глубинного геологического захоронения, поскольку проведение исследований непосредственно в ненарушенном массиве горных пород позволяет получить достоверные данные о поведении геологической среды в условиях длительного размещения радиоактивных материалов. При выборе места размещения подземной лаборатории учитываются геологические, гидрогеологические, экологические, техногенные, а также социально-экономические факторы.

Основным назначением подземной лаборатории в рамках проекта захоронения ОЯТ БН-350 является проведение комплексных исследований геологической среды и процессов, способных влиять на долговременную безопасность размещения топлива. Полученные результаты должны использоваться для оценки пригодности выбранного массива пород и обоснования проектных решений по захоронению ОЯТ БН-350. В рамках эксплуатации лаборатории предусматривается изучение агрессивности поровых вод, исследование коррозионной активности среды, выполнение геохимического моделирования, а также анализ взаимодействия радиоактивных отходов с окружающим массивом пород. Проведение подобных исследований позволяет оценить устойчивость инженерных барьеров, скорость возможных коррозионных процессов и вероятность миграции радионуклидов в геологической среде. Принципиальное устройство подземной опытной лаборатории приведено на рисунке 1.

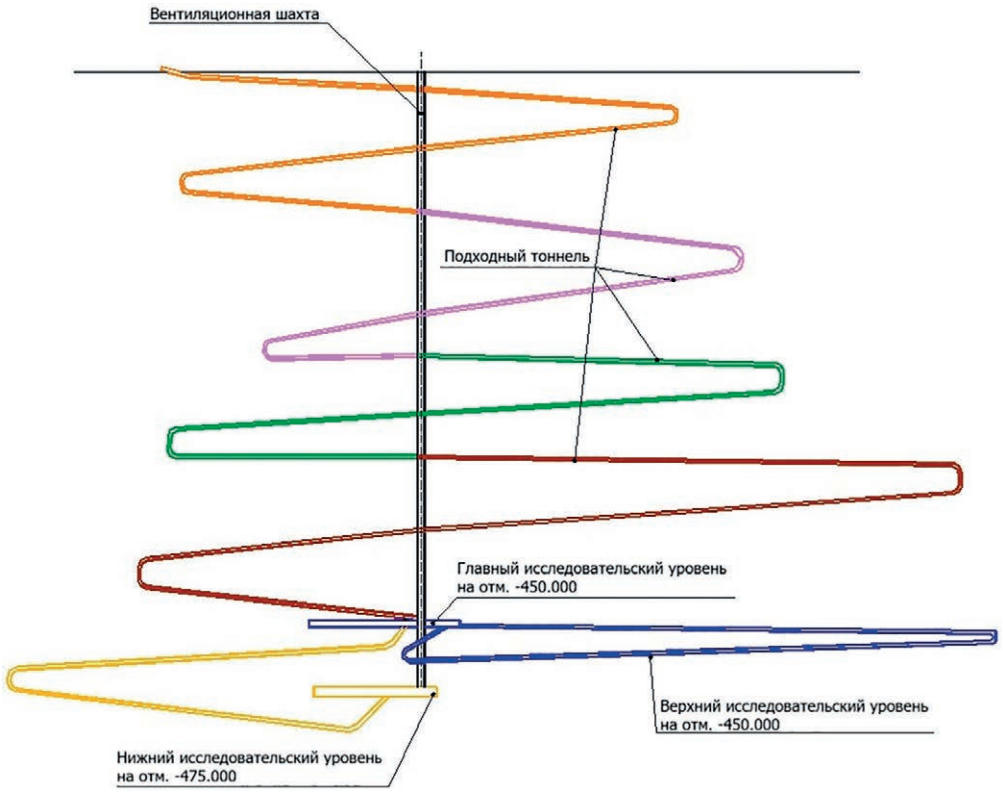


Рисунок 1. Схема подземной лаборатории

Согласно проектным решениям, подземная лаборатория должна функционировать в течение нескольких десятков лет, обеспечивая непрерывное накопление научных данных и проведение долговременных наблюдений за состоянием геологического массива. В состав подземного комплекса входят основные сооружения, включающие спиральный подходной тоннель протяженностью около 5 км, вентиляционную шахту, а также двухуровневый исследовательский комплекс, расположенный на глубинах 450 и 475 м. Такая схема размещения позволяет проводить исследования на различных горизонтах массива и оценивать изменение свойств пород в зависимости от глубины залегания.

Для выполнения научных исследований и мониторинга состояния геологической среды проектом предусматривается бурение специальных ниш и исследовательских скважин вдоль тоннелей. Данные выработки предназначены для проведения геомеханических, гидрогеологических и геохимических исследований, а также для контроля параметров массива пород в процессе эксплуатации подземной лаборатории.

Для окончательного захоронения ОЯТ реактора БН-350 рассмотрен шахтный вариант пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) с вертикальным размещением контейнеров. Данный вариант предусматривает размещение контейнеров в вертикальных скважинах, расположенных в подземных туннелях (рисунок 2).

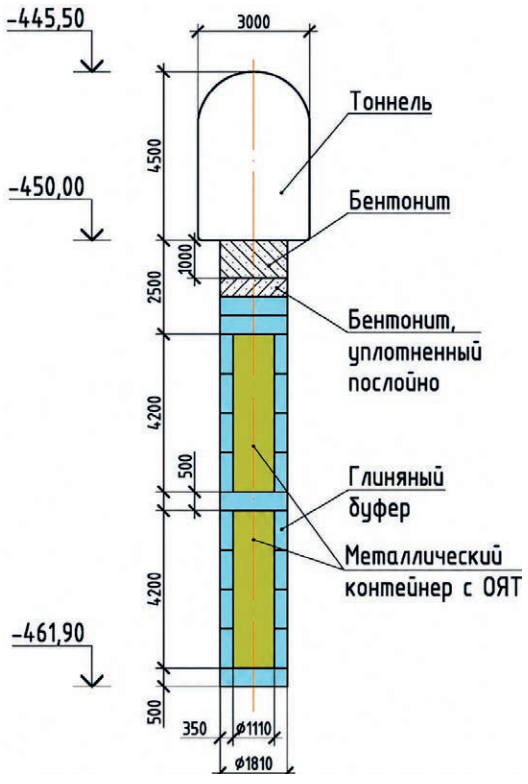


Рисунок 2. Концепция захоронения ОЯТ

Одиночные медные контейнеры размещаются в скважинах на дне туннелей, в горной породе на глубине 400 - 500 метров. Само же хранилище – это сеть туннелей для окончательного захоронения вокруг лаборатории.

Каждая вертикальная скважина заполнена бентонитом – глиной, которая служит буфером между окружающей породой и контейнером. Пропитавшись водой и разбухнув, бентонит должен ограничивать поступление грунтовых вод к контейнеру, проводить тепло, выделяемое отработавшим топливом в окружающую породу и поглощать радионуклиды в случае их выброса из контейнера. Будучи более пластичным, чем контейнер и вмещающая порода, бентонит защищает контейнер от небольших смещений горной породы.

Сами же породы, непосредственно прилегающие к скважине с контейнером, защищают его от неблагоприятных условий окружающей среды. Любой случайный выброс радионуклидов из контейнера локализуется горной породой. Туннели будут заполнены смесью щебня и бентонита, которая должна удерживать бентонитовую смесь после ее разбухания в скважинах и предохранять туннели от затопления грунтовыми водами. Заполнитель также защитит хранилище от несанкционированного вторжения.

ПЗРО-Ш (шахтного типа) состоит из двух основных комплексов: наземного и подземного. План всех уровней приведен на рисунке 3. Схема подземного комплекса ПЗРО-Ш показана на рисунке 4.

Площадь территории объекта составляет около 2 км^2. Концептуальным проектом предусматривается строительство следующих промышленных площадок и сооружений:

- промплощадка технологического ствола и закладочной скважины;
- промплощадка вспомогательного ствола;
- промплощадка вентиляционного ствола;
- площадка водопроводных сооружений;
- подъездных автомобильных дорог и инженерных сетей.

Площадки вспомогательного ствола и водопроводных сооружений предназначены для сооружения и обеспечения функционирования подземных выработок.

Основной площадкой ПЗРО-Ш является площадка технологического ствола и закладочной скважины (рисунок 5). Ее площадь составляет около 3,8 га. Ориентировочный объем выемки под площадку составит примерно 100 тыс. м^3. Объемы проходки технологического ствола – приблизительно 14500 м^3. Объемы проходки ствола закладочной скважины – приблизительно 2400 м^3. Объемы проходки туннелей до ПЗРО – приблизительно 24000 м^3.

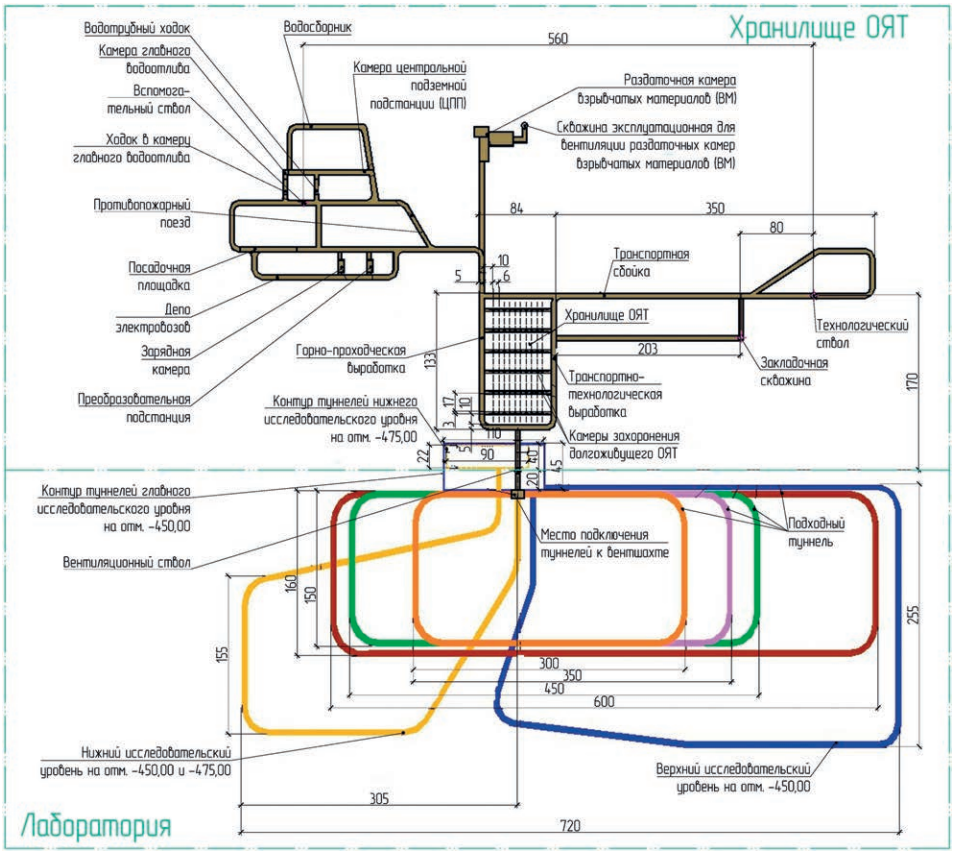


Рисунок 3. План-схема хранилища с подземной лабораторией

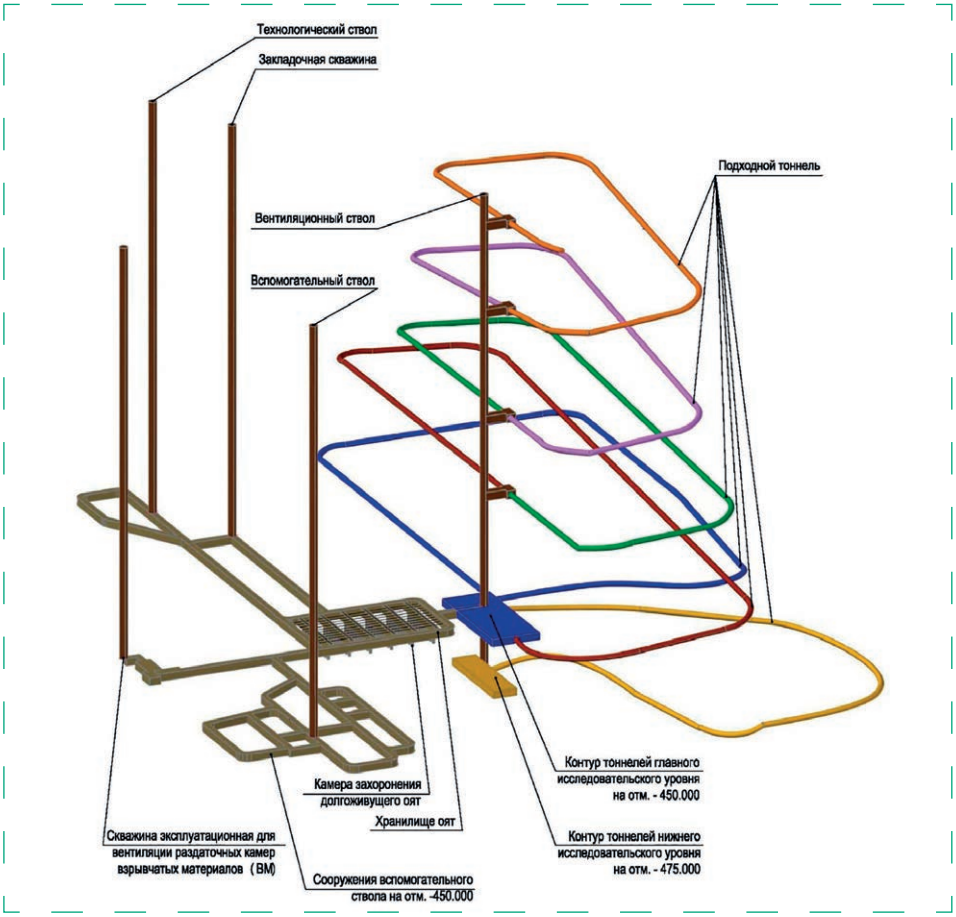
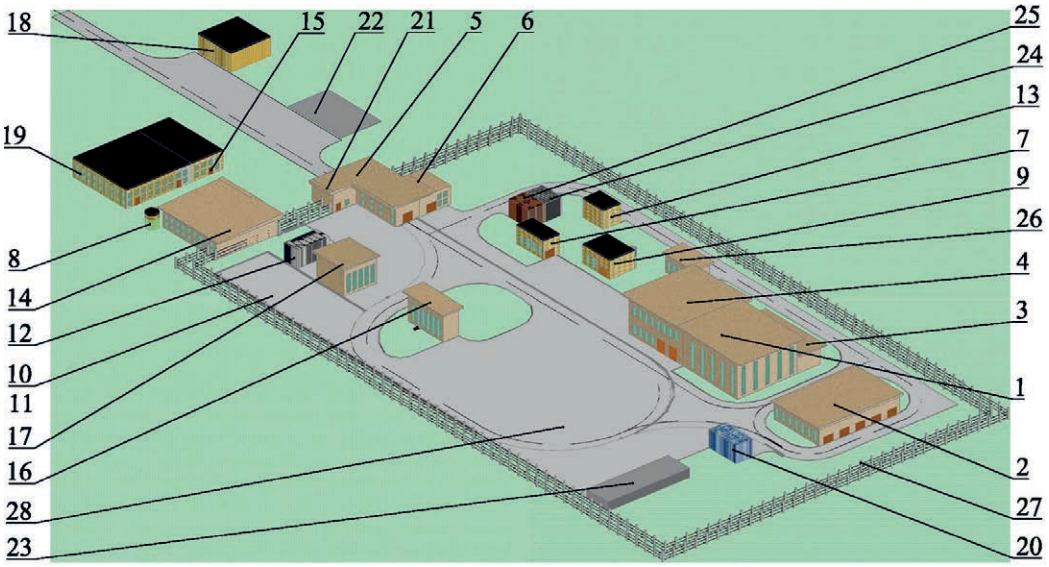


Рисунок 4. Схема ПЗРО-Ш с подземной лабораторией



1 – надшахтное здание вспомогательного ствола; 2 – здание подъемной машины; 3 – здание калориферной; 4 – завод по капсулированию; 5 – пункт дезактивации автотранспорта; 6 – здание хранения и подготовки реагентов; 7 – очистка контейнеров, загрязненных спецвеществами; 8 – канализационная насосная станция бытовых стоков; 9 – резервуар и насосная станция дождевых стоков; 10 – комплекс приготовления сухой закладочной смеси; 11 – открытая складская площадка; 12 – комплектная трансформаторная подстанция; 13 – тепловой пункт; 14 – санпропускник; 15 – лабораторный корпус; 16 – надшахтное здание закладочной скважины; 17 – здание подъемной машины; 18 – топливозаправочная станция комплексной поставки с блоком хранения топлива; 19 – административный корпус; 20 – закрытое ЗРУ - 6 кВ; 21 – контрольно-пропускной пункт (локальный) со смотровой площадкой; 22 – стоянка автотранспорта; 23 – противорадиационное укрытие; 24 – установка кондиционирования и очистки жидких радиоактивных отходов; 25 – модульная установка цементирования; 26 – установка очистки и обеззараживания шахтных вод; 27 – система физической защиты; 28 – зона разворота трейлера

Рисунок 5. Площадка технологического ствола и закладочной скважины

Концепция окончательной изоляции ОЯТ реактора БН-350 основана на сочетании применения искусственных и естественных барьеров. К искусственным барьерам относятся кондиционирование матрицы, упаковочные и буферные материалы. Естественным барьером служит глубокая геологическая формация. Ее свойства предполагается исследовать с помощью сопряженной подземной лаборатории, расположенной на единой площадке с пунктом захоронения. Предлагаемый технологический цикл обращения с ОЯТ БН-350 предусматривает транспортировку топлива в контейнерах ТУК-123 по железной дороге с последующей перегрузкой и доставкой их на промплощадку технологического ствола. Для ОЯТ БН-350 на смежном заводе капсулирования предусматривается дистанционная перегрузка герметичных чехлов из УКХ-123 в финальные стальные или медные контейнеры. После герметизации контейнеры спускаются по технологическому стволу и размещаются в подземных туннелях. Финальное захоронение контейнеров осуществляется в вертикальных скважинах диаметром 1,8 м и глубиной 11,9 м. Безопасность процесса обеспечивается локализацией радиационно-опасных операций на пункте перегрузки, площадках технологического и вентиляционного стволов, а также функционированием систем очистки жидких радиоактивных отходов, цементирования и обеззараживания шахтных вод.

Концепция захоронения в пункте захоронения скважинного типа

В качестве альтернативного варианта окончательного захоронения ОЯТ БН-350 рассмотрена концепция пункта захоронения скважинного типа. Она предусматривает использование вертикальных скважин, пробуренных с поверхности земли в скальном основании на глубину от 4 до 5 км. Схема захоронения ОЯТ в глубокой скважине показана на рисунке 6.

ОЯТ инкапсулируется в контейнерах небольшого диаметра с внешним диаметром 0,5 м и длиной в 5 м. Контейнеры для захоронения опускаются в отверстия и располагаются один над другим. Расположение происходит на глубине между 2 и 4 км. Диаметр отверстия – 1 м до 2 км вниз и 0,8 м там, где располагаются контейнеры.

Предпочтительной вмещающей породой является геологически стабильная кристаллическая «коренная» порода. Для нее характерна очень медленная

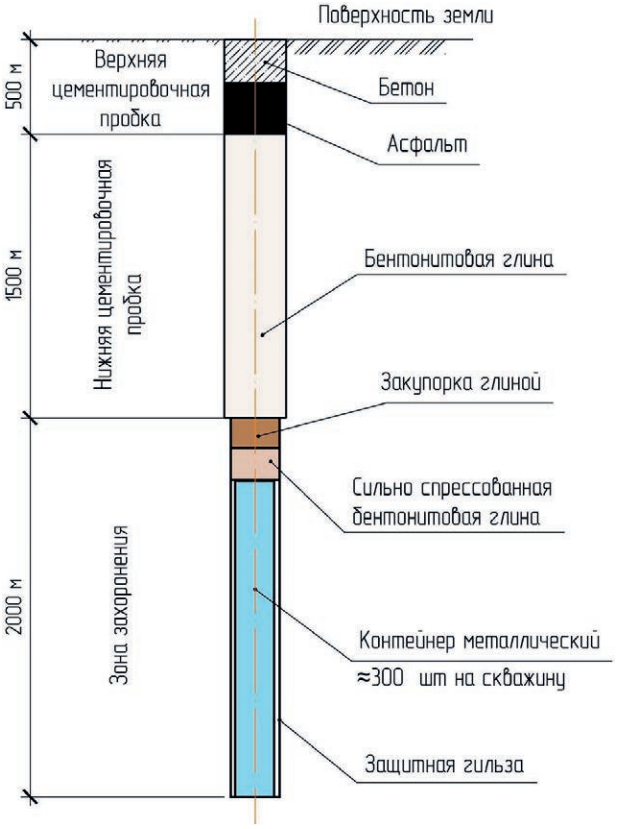
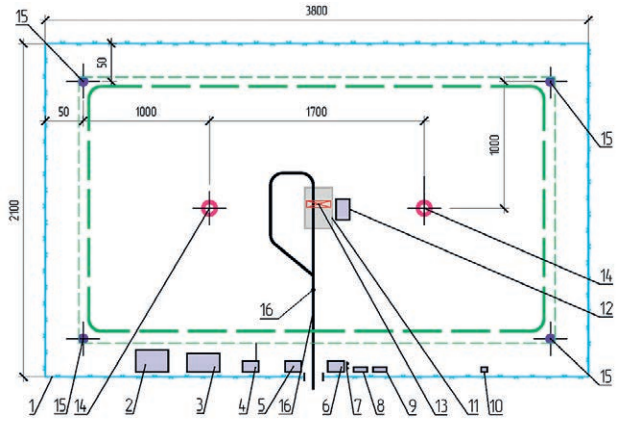


Рисунок 6. Схема концепции захоронения в глубокой скважине



1 – ограждение с комплексом физической защиты;
2– площадка комплекса видеонаблюдения и регистрации;
3 – ТП 35/10/0,4 кВ; 4 – комплекс горного мониторинга;
5 – КПП с вышкой наблюдения; 6 – санпропускник;
7 – щит пожарного инвентаря; 8 – бытовое здание;
9 – медпункт; 10 – уборная; 11 – площадка перегрузки ТУК (УКХ); 12 – здание упаковки чехлов с ОЯТ в контейнеры захоронения; 13 – кран козловой, 150 т; 14 – скважина захоронения (2 шт) ∅1000 мм в интервале от 0 до минус 2000 м, ∅800 мм в интервале от минус 2000 до минус 4000 м; 15 – исследовательская скважина (4 шт) диаметром от 150-450 мм глубиной до 5000 м;
16 – автомобильная дорога шириной 4,5 м

Рисунок 7. План-схема ПЗРО-С

циркуляция подземных вод. Это может подтверждаться высокой соленостью воды и возрастом изотопов. По предлагаемой концепции, контейнеры окружаются глиняным буфером, а уплотненный бентонит помещается между контейнерами.

План-схема ПЗРО-С (скважинного типа) в глубокой скважине приведена на рисунке 7.

Для ОЯТ БН-350 скважинный вариант представляет интерес как альтернативная концепция окончательного захоронения. Вместе с тем его технологическая проработанность и накопленный опыт применения уступают шахтному варианту. Дополнительными сложностями являются проведение внутрискважинных исследований и обеспечение устойчивости стенок скважин в условиях горного и пластового давления. При бурении исследовательских скважин возникает необходимость отбора керна в больших объемах и проведения внутрискважинных геофизических исследований. Трудной задачей также является сохранение устойчивости горных пород на стенках ствола скважины в условиях проявления горного и пластового давлений.

Заключение

В работе представлены концептуальные подходы к окончательному захоронению ОЯТ реактора БН-350 в глубоких геологических формациях с учетом особенностей его обращения и необходимости обеспечения долговременной изоляции радиоактивных материалов.

Для ОЯТ БН-350 рассмотрены два варианта размещения: в пункте захоронения шахтного типа и в глубоких скважинах. Для шахтного варианта разработана концептуальная схема, включающая подземную исследовательскую лабораторию, систему вертикального размещения контейнеров, инженерные и естественные барьеры, а также технологическую инфраструктуру для транспортирования и капсулирования ОЯТ.

Проведенное сравнение показало перспективность шахтного варианта для дальнейшей проработки применительно к ОЯТ БН-350. Его преимуществом является возможность комплексного сочетания подземной исследовательской лаборатории, системы тунелей и вертикальных скважин, а также организации последовательного технологического цикла от транспортирования и перегрузки ОЯТ до его окончательного размещения.

Скважинный вариант рассматривается как альтернативное решение. Его реализация связана с необходимостью решения дополнительных технических задач, включая проведение глубоких скважин, исследование массива горных пород и обеспечение устойчивости их стенок.

Таким образом, предложенная концепция ориентирована непосредственно на окончательное захоронение ОЯТ реактора БН-350. Представленные решения могут служить основой для дальнейших исследований и обоснования параметров будущего объекта захоронения ОЯТ БН-350.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы BR24993104 «Проведение исследований в обоснование выбора эффективных и оптимальных способов и технологий обращения с ОЯТ реакторной установки БН-350».

Литература / References:

1. International Atomic Energy Agency. Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Vienna: IAEA, 2011. 62 p.
2. International Atomic Energy Agency. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-14. Vienna: IAEA, 2011. 104 p.
3. Birkholzer J.T., Houseworth J.E., Tsang C.-F. Geologic disposal of high-level radioactive waste: status, key issues, and trends // Annual Review of Environment and Resources. 2012. Vol. 37. P. 79–106. DOI: 10.1146/annurev-environ-090611-143314.
4. Ahn J., Apted M.J. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. 778 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-100642-9.00001-3.
5. Gibb F.G., Beswick J., Travis K. Borehole disposal of spent fuel and other high-level wastes: the case for deep, vertical, fully cased holes in saturated “hard” rock // Frontiers in Nuclear Engineering. 2024. Vol. 3. Article 1470443. DOI: 10.3389/fnuen.2024.1470443.
6. Закон Республики Казахстан «Об использовании атомной энергии» от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК (с изменениями и дополнениями).
7. Об утверждении Правил выбора площадки размещения ядерных установок и пунктов захоронения: постановление Правительства Республики Казахстан от 24 мая 2016 года № 301.
8. International Atomic Energy Agency. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSG-23. Vienna: IAEA, 2012. 120 p.
9. Norris S. Multiple roles of clays in radioactive waste confinement – introduction // Geological Society, London, Special Publications. 2019. Vol. 482. DOI: 10.1144/SP482-2019-4.
10. Lee J., Choi H., Lee C., Ji S., Cho D. Analyses on the thickness of the bentonite buffer in deep geological disposal for spent nuclear fuels // Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology. 2024. Vol. 22, No. 4. P. 491–501. DOI: 10.7733/jnfcwt.2024.039.
11. Han J., et al. Re-evaluation of the bentonite buffer dimension in a geological repository for spent nuclear fuel under the KURT conditions // Progress in Nuclear Energy. 2022. Vol. 145. Article 104138. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104138.
12. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: planning, site selection, site characterization and in situ tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10, No. 3. P. 411–435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.
13. Koyanbayev Ye.T., Skakov M.K., Ganovichev D.A., Martynenko Ye.A., Sitnikov A.A. Simulation of the Thermal Conditions of Cask with Fuel Assemblies of BN-350 Reactor for Dry Storage // Science and Technology of Nuclear Installations. 2019. Article 3045897. 5 p. DOI: 10.1155/2019/3045897.

БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЯДРОЛЫҚ ОТЫНЫН ТЕРЕҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ТҮЗІЛІМДЕРДЕ КӨМУ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ

Д. И. Абулгазинова*, К. С. Садыков, Л. П. Дерябина, В. А. Поспелов, А. Г. Коровиков

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: davydenko@nnc.kz*

Мақалада БН-350 реакторының пайдаланылған ядролық (ОЯТ) отынын көму мүмкіндігі бойынша тұжырымдамалық жобалық шешімдер қарастырылады. Шахталық көму пункттері мен қатты жыныстардағы терең ұңғымаларды қоса алғанда, ояту-без қайта өңдеусіз түпкілікті көму технологияларына талдау жасалды. Жерасты зертханасының тұжырымдамалық жобалық шешімдері, жерасты кешендерінің конструктивтік ерекшеліктері, ұңғыма жұмыстарын ұйымдастыру, инженерлік инфрақұрылым және ОЯТ бар контейнерлермен жұмыс істеудің Көліктік технологиялық схемалары қаралды. Жер үсті және жерасты құрылыстарының негізгі сипаттамалары, тау-кен жұмыстарының көлемі, шахта оқпандары мен технологиялық алаңдардың параметрлері ұсынылған. Инженерлік және геологиялық кедергілердің көп деңгейлі жүйесін қолдану ұзақ мерзімді радиациялық қауіпсіздікті және радионуклидтердің биосфераға көшу қаупін азайтуды қамтамасыз ететіні көрсетілген.

Түйін сөздер: *пайдаланылған ядролық отын, БН 350, радиоактивті қалдықтарды көму пункті, терең геологиялық көму, жерасты зертханасы, терең ұңғымалар.*

CONCEPT OF DISPOSAL OF WASTE NUCLEAR FUEL FROM THE BN-350 REACTOR IN DEEP GEOLOGICAL FORMATIONS

D.I. Abulgazinova*, K.S. Sadykov, L.P. Deryabina, V.A. Pospelov, A.G. Korovikov

"Institute of Atomic Energy" Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

**E-mail for contacts: davydenko@nnc.kz*

The article discusses conceptual design solutions for the disposal of spent nuclear fuel (SNF) from the BN-350 reactor. It analyzes technologies for the final disposal of SNF without processing, including mine disposal sites and deep wells in solid rocks. The article also examines conceptual design solutions for an underground laboratory, the design features of underground complexes, the organization of tunneling operations, engineering infrastructure, and transportation and processing schemes for containers containing SNF. The main characteristics of above-ground and underground structures, the volume of mining operations, and the parameters of mine shafts and technological sites are presented. It is shown that the use of a multi-level system of engineering and geological barriers ensures long-term radiation safety and minimizes the risk of radionuclide migration into the biosphere.

Keywords: *Spent nuclear fuel, BN-350, radioactive waste disposal facility, deep geological disposal, underground laboratory, deep wells.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-90-102
УДК 550.34

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЙОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ ШУЛЬБИНСКОЙ ГЭС

Ә.А. Исағали*, Н.Н. Михайлова, М.В. Шульга

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: a.issagali@kndc.kz*

Шульбинская гидроэлектростанция (ГЭС) является объектом повышенной инженерной ответственности, что требует уточненной оценки локальной сейсмической опасности. В работе представлены результаты инструментальных сейсмологических исследований территории Шульбинской ГЭС, выполненных с использованием пяти временных пунктов наблюдений (SB1–SB5). Произведен анализ спектральных характеристик микросейсмического шума, определен отклик грунтов методом HVSR, проведен анализ отношений амплитуд на разных станциях, полученных по записям землетрясений и взрывов для разных типов волн.

Показано, что исследуемая территория сейсмически неоднородна: наиболее выраженное локальное усиление сейсмических колебаний выявлено на насыпной плотине (пункт SB1) – приращение интенсивности по шкале MSK-64 составляет 0,7–0,9 балла, тогда как на остальных пунктах значимого увеличения интенсивности колебаний по отношению к эталонной станции не отмечается. Выявленные отличия связаны с грунтовыми условиями, показателем которых является значение Vs30, определенное проведенными сейсморазведочными работами по 10 профилям. На основании согласованных результатов HVSR и анализа волновых форм событий даны рекомендации по необходимости организации постоянного мониторинга состояния плотины сейсмическими методами.

Ключевые слова: *Шульбинская ГЭС, сейсмическая опасность, сейсмическая станция, сейсмическое микрорайонирование, HVSR, сейсмические шумы, приращение интенсивности.*

Введение

Шульбинская ГЭС представляет собой ответственный инженерный объект, для которого требуется детальная оценка сейсмических условий как в пределах плотины, так и на прилегающей территории. Особый интерес представляет выявление участков, где вследствие строения и параметров грунтов возможны локальное усиление колебаний и увеличение сейсмической интенсивности. Такие данные необходимы для уточнения сейсмичности площадки, районирования территории по сейсмическим свойствам грунтов и обоснования мероприятий по дальнейшему мониторингу состояния сооружений.

Район исследований административно расположен вблизи поселка Шульбинск Абайской области Республики Казахстан (рисунок 1). Площадка Шульбинской ГЭС находится в долине реки Иртыш, где были размещены временные сейсмические станции на различных участках гидротехнического сооружения и прилегающей территории. Пункты наблюдений охватывали насыпную плотину, правобережный участок, район «Лесник», территорию Михайло-Архангельского храма и западную часть поселка. Пункты наблюдений находятся в пределах территории с координатами 50.3894–50.4053° с. ш. и 81.0463–81.0835° в. д., что отражает локальный охват территории гидроузла и его ближайшего окружения.



Рисунок 1. Шульбинская ГЭС, правобережная плотина

Целью настоящей работы является оценка сейсмических условий площадки Шульбинской ГЭС по данным инструментальных сейсмических наблюдений в различных точках территории гидроузла. В рамках исследования были поставлены задачи по регистрации сейсмических шумов и событий, анализу спектральных характеристик микросейсмического поля, определению параметров отклика грунтов методом HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) и количественной оценке приращения сейсмической интенсивности на исследуемых пунктах.

Сейсмотектоническая характеристика. Положение площадки Шульбинской ГЭС было изучено по картам общего сейсмического районирования территории Казахстана, утвержденным в качестве действующих на территории РК в 1978, 2006 и 2017 годах [1, 2, 3], на которых показано положение сейсмогенерирующих зон, изолинии сейсмической интенсивности в баллах по шкале MSK-64 и в пиковых ускорениях грунта (на картах 2017 г.).

По карте сейсмического районирования СССР 1978 г. (рисунок 2, а) район расположения площадки Шульбинской ГЭС относился к зоне с интенсивностью I ≤ 6 баллов. Такая оценка отражала существовавший на то время этап изученности территории. Была недостаточно изучена сейсмичность Восточного Казахстана, отсутствовала сеть сейсмических станций в пределах рассматриваемого региона. Следовательно, по материалам этого периода площадка будущей Шульбинской ГЭС рассматривалась как находящаяся в асейсмичной зоне.

Шульбинская ГЭС была открыта в 1987 году, когда состоялся пуск первого гидроагрегата. Строительство гидроузла началось в 1976 году, а ввод всех шести гидроагрегатов был завершен в 1994 году. Следует отметить, что проектирование и строительство ГЭС осуществлялись в период действия карты сейсмического районирования 1978 года, согласно которой район расположения объекта относился к зоне с интенсивностью I <6 баллов по шкале MSK-64. При проектировании площадка фактически рассматривалась как территория с расчетной сейсмичностью 6 баллов.

На карте общего сейсмического районирования Республики Казахстан 2006 г. (рисунок 2, б) ожидаемая интенсивность в районе площадки уже была оценена иначе. К этому времени в Восточном Казахстане в 1990 г. произошло сильное Зайсанское землетрясение [4] с магнитудой M=6,9, вызвавшее разрушение в близких к эпицентру поселках. Это землетрясение заставило пересмотреть карту сейсмического районирования всей территории Восточного Казахстана. После этого землетрясения Институтом сейсмологии АН КазССР были открыты первые сейсмические станции в этом районе. В 2003 году близ границы с Казахстаном произошло сильнейшее Чуйское землетрясение (Алтайское) [5] с магнитудой M=7,3, ощущавшееся на большой территории Восточного Казахстана.

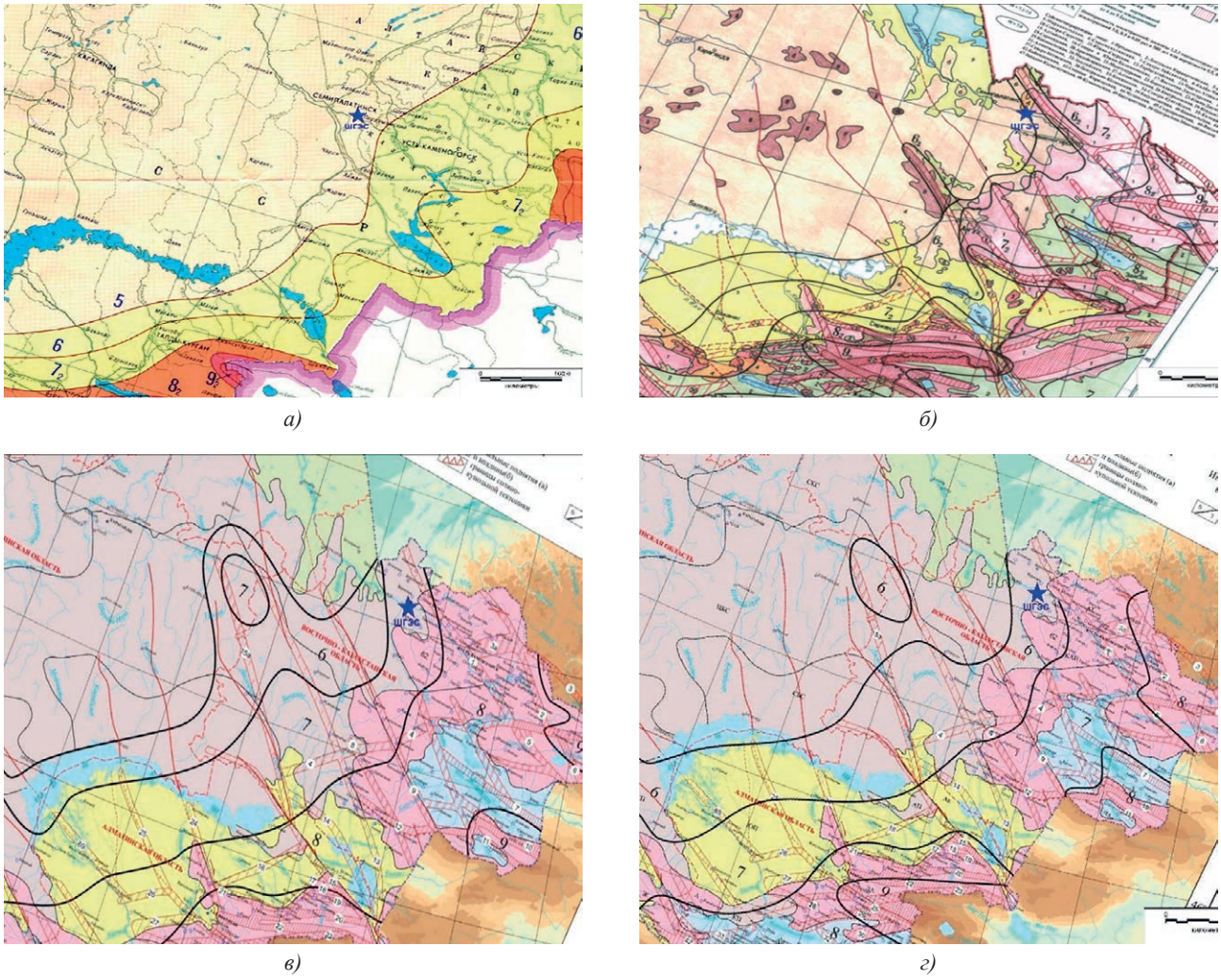
С начала 2000-х годов начали свою работу новые современные сейсмические группы сети Института геофизических исследований НЯЦ РК. По карте общего сейсмического районирования Казахстана 2006 г. изолинии балльности построены с учетом новых данных по регистрации сильных землетрясений. В результате район расположения Шульбинской ГЭС уже попадает в 6-балльную зону. Это свидетельствует о повышении нормативной оценки сейсмической опасности по сравнению с картой 1978 г. и отражает возросшую роль региональных сейсмотектонических представлений при оценке площадки.

Еще более существенные изменения претерпела оценка сейсмической опасности всего региона при составлении карты общего сейсмического зонирования (ОСЗ) 2017 г. По карте общего сейсмического зонирования 2017 г. (рисунок 2, в) для периода повторяемости 2475 лет район расположения площадки Шульбинской ГЭС относится к зоне с интенсивностью 7 баллов. Это означает возможность достижения здесь интенсивности 7 баллов и выше при 2%-ной вероятности превышения за 50 лет. Для сравнения, по картам 2017 г. для периода повторяемости 475 лет (рисунок 2, г) площадка Шульбинской ГЭС располагается в 6-балльной зоне, что отражает различие между нормативными уровнями сейсмического воздействия для обычных и ответственных сооружений.

Сопоставление карт 1978, 2006 и 2017 гг. показывает последовательное увеличение нормативной сейсмичности района расположения Шульбинской ГЭС: от I <6 баллов по карте 1978 г. до 6 баллов по карте 2006 г. и до 7 баллов по действующим картам ОСЗ-2017 для ответственных объектов. Такая динамика связана с уточнением положения площадки относительно активных сейсмогенерирующих зон и с совершенствованием методов оценки сейсмической опасности в Казахстане. Следовательно, при оценке сейсмических условий Шульбинской ГЭС в качестве исходного нормативного уровня сейсмичности района должна приниматься сейсмичность 7 баллов, соответствующая действующим картам для периода повторяемости 2475 лет.

Вместе с тем, локальные условия в пределах гидроузла неоднородны, что может приводить к изменению параметров сейсмического воздействия на отдельных участках территории. Поэтому данные сейсмического районирования мы рассматривали как исходную основу для последующего уточнения сейсмичности площадки методами инструментальных сейсмологических наблюдений и сейсморазведки.

Методика исследований. Для оценки сейсмичности площадки с учетом локальных характеристик грунтовых условий территории Шульбинской ГЭС был выполнен комплекс инструментальных сейсмо-



а) *б)*

в) *г)*

Рисунок 2. Фрагменты карт общего сейсмического районирования в баллах шкалы MSK-64: а)1978 года, б) 2006 года, в) 2017 года для периода повторяемости 2475 лет и г) 2017 года для периода повторяемости 475 лет (изолинии баллов черного цвета) для района расположения площадки Шульбинской ГЭС

логических исследований, включающий регистрацию микросейсмического шума, колебаний при землетрясениях и взрывах, анализ спектральных характеристик шумового поля, HVSR-анализ.

Кроме сейсмологических исследований на этой же территории проводились и другие работы, в том числе сейсморазведочные. Их также проводила группа специалистов ИГИ НЯЦ РК, результаты также были использованы для оценок.

Сейсморазведочные исследования.

Первым этапом на территории Шульбинской ГЭС были выполнены сейсморазведочные исследования методом первых вступлений. В качестве источника упругих колебаний использовалась кувалда массой 6 килограммов. Продольные волны возбуждались вертикальными ударами, а поперечные SH-волны горизонтальными ударами. Для регистрации сигналов применялись вертикальные и горизонтальные сейсмоприемники, а регистрация выполнялась 48-канальной сейсмостанцией SGD-SEL. Наблюдения проводились по профилям длиной около 300 метров с шагом приемников 2 метра (рисунок 3). Для повышения качества записей использовалось накопление до 10 воздействий. Основной целью работ было определение скоростей поперечных волн и уточнение сейсмических свойств грунтов на различных участках площадки.

После окончания полевых наблюдений проводилась обработка волновых полей, включавшая фильтрацию техногенных помех, построение годографов первых вступлений и расчет скоростей распространения волн. Полученные результаты показали, что скорость поперечных волн существенно возрастает с глубиной: от примерно 200 м/с в верхней части разреза до 1500–1800 м/с на глубинах более 20–30 метров. Значения средней скорости поперечных волн Vs,30 изменяются в пределах от 294 до 740 метров в секунду при среднем значении около 440 метров в секунду (рисунок 4). Большая часть территории от-



1, 2 – профили сейсморазведочных зондирований первого (1) и второго (2) этапов; 3 – точки расположения сейсмологических станций (SB).

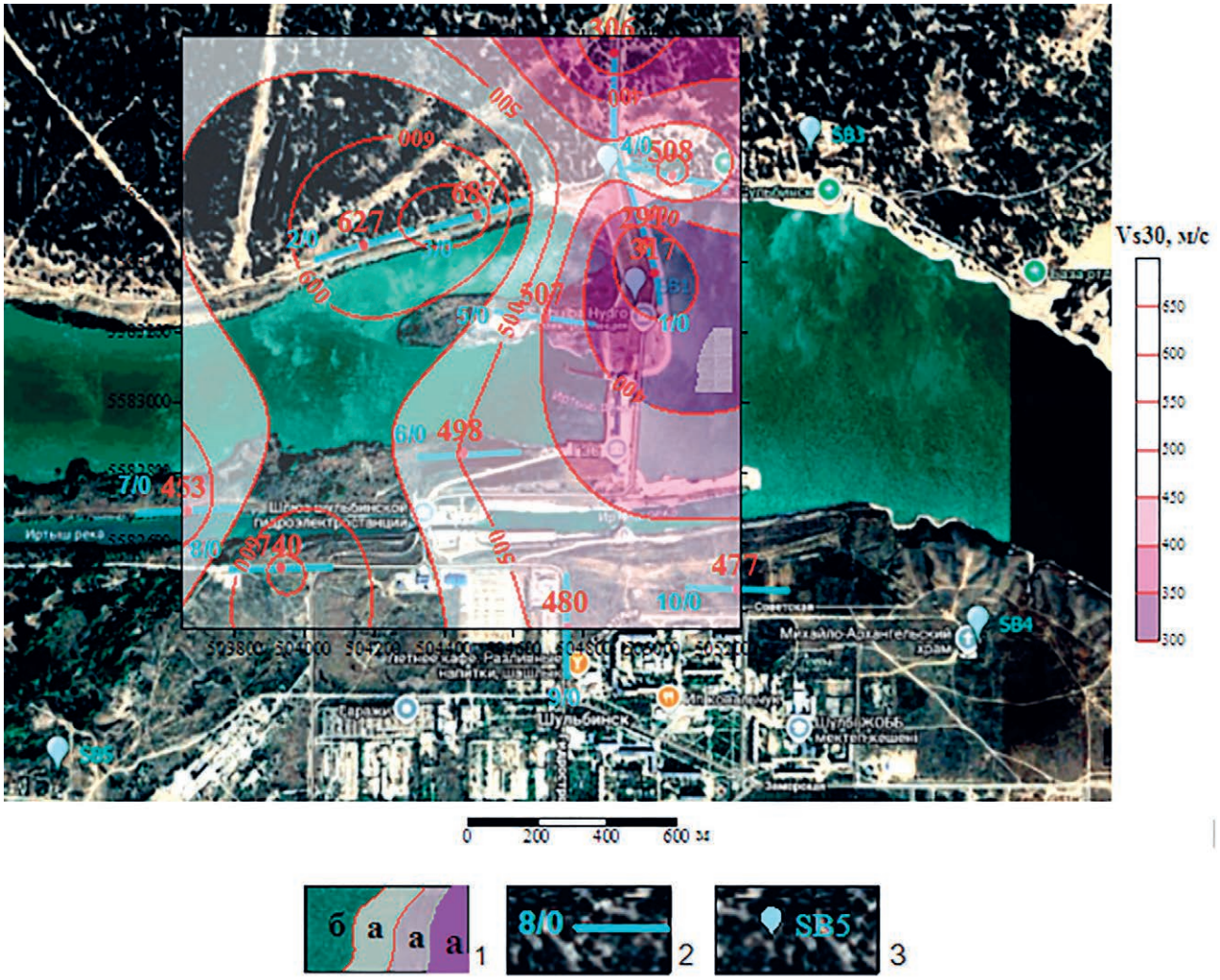
Рисунок 3. Схема отработки сейсморазведкой территории, прилегающей к ГЭС, для сейсмического микрорайонирования

носится ко II категории грунтов по сейсмическим свойствам. Однако в пределах насыпной плотины выявлены области с пониженными значениями скорости, где возможно локальное усиление сейсмических воздействий.

Инструментальные сейсмологические исследования

Инструментальные наблюдения проводились на пяти временных сейсмических станциях SB1–SB5, установленных на разных участках территории Шульбинской ГЭС и прилегающей зоны (рисунок 5, таблица 1). Станция SB1 была размещена непосредственно на насыпной плотине, SB2 - на правом берегу, SB3 - в пункте «Лесник», SB4 - на территории Михайло-Архангельского храма и SB5 - на восточной окраине поселка Новобаженово. Такое размещение обеспечивало сравнение записей на площадках с различными локальными условиями. Окончательный выбор мест установки оборудования осуществлялся с учетом рекомендаций персонала ГЭС касательно обеспечения сохранности оборудования и возможности подъезда автотранспорта к месту установки.

Для проведения работ использовался комплект оборудования, включающий регистратор DAS 6501, сейсмометр CMG-40T, а на станциях SB1, SB2 и SB4 были установлены акселерометры CMG-5TC. Регистрация выполнялась с частотой дискретизации 100 отсчетов в секунду. Параметры - скорость колебаний грунта и ускорение смещения колебаний - регистрировались в формате CSS 3.0. Продолжительность регистрации на станциях составляла приблизительно 10 суток (от 208 ч 56 мин до 256 ч 01 мин) на каждой станции.



1 – изолинии средней скорости поперечных волн: а – 270≤ Vs,30<550 м/с, б -550≤Vs,30<800 м/с;
2 – профили сейсморазведочных зондирований; 3 – точки расположения сейсмических станций (SB).

Рисунок 4. Схема районирования по средней скорости поперечных волн на глубине 30 метров по данным сейсморазведки

Таблица 1. Координаты мест установки станций по GNSS

Код точки	Северная широта (Lat)°	Восточная долгота (Lon)°	Высота над уровнем моря (Alt) м.
SB1	50,40145	81,06963	233
SB2	50,40459	81,06849	241
SB3	50,40534	81,07668	246
SB4	50,39273	81,08346	274
SB5	50,38936	81,04627	223

В ходе инструментальных наблюдений регистрировались сейсмические сигналы от землетрясений и взрывов, а также непрерывный сейсмический шум. Это позволило использовать полученные записи для оценки сейсмических условий на различных участках площадки [6, 7].

Анализ спектральных характеристик сейсмических шумов на площадках установки полевых станций

Для оценки условий регистрации на различных участках был проведен анализ спектральных характеристик сейсмических шумов, зафиксированных полевыми станциями. Это позволило выявить различия в уровне шумового фона и определить особенности сейсмической обстановки на отдельных площадках.

Обработка данных сейсмических шумов осуществлялась с использованием программы DBNoise, входящей в состав программного пакета Antelope.

Для каждой станции рассчитывались значения медианы уровней спектральной плотности мощности сейсмического шума для дневного и ночного времени суток. Расчеты проводились по отрезкам записей про-



– сейсмометр; – сейсмометр + акселерометр.

Рисунок 5. Обзорная карта района работ и мест установки оборудования

должительностью 10 минут. На основе этих данных были построены спектральные зависимости параметров сейсмического шума по станциям с использованием программного пакета Origin. На рисунке 6 представлены медианные спектры плотности мощности сейсмического шума для станций SB1–SB5 (показаны разным цветом), рассчитанные отдельно для дневного и ночного времени по HHZ компоненте. Для сравнения на графиках также нанесены мировые кривые моделей низкого и высокого уровня шумов (NLNM и NHNM) по (Peterson (1993)) [8].

Анализ спектральных характеристик сейсмических шумов по компонентам HHE, HHN и HHZ показал, что обстановка по уровню шумов на площадке Шульбинской ГЭС является пространственно-неоднородной и зависит как от местоположения станции, так и от компоненты регистрации. Во всех случаях спектры на станциях SB1-SB4 имеют похожую структуру: высокий уровень шума в области коротких периодов менее 0,3 с, связанный преимущественно с локальными техногенными источниками; далее близкие уровни шума по всем станциям при периодах более 3 с; четкий экстремум в области 5 с, отражающий влияние штормовых океанических микросейсм. На разных станциях отмечается локальный пик на периоде около 0,83 с, связываемый с работой турбин электростанции.

Особое положение занимает станция SB5, для которой характерна выраженная аномалия сейсмического шума. Аномальный характер шума на станции SB5 заметен даже визуально на исходных записях. Оказалось, что место установки этой станции было выбрано очень неудачно, что объяснялось отсутствием других доступных для установки станции мест. Вся территория близ этого места закрыта для доступа или находится в частных руках. В нескольких сотнях метров от места установки станции находился эксплуатируе-

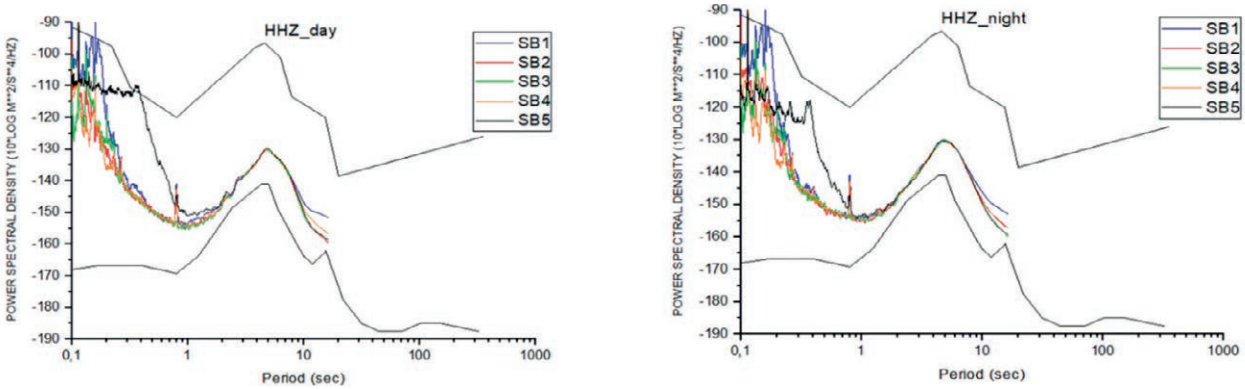


Рисунок 6. Спектральная плотность мощности сейсмического шума на станциях SB1–SB5 для дневного и ночного времени суток по HHZ компоненте

мый закрытый подземный резервуар очистных сооружений, в другом направлении – водонапорная башня. Деятельность этих объектов, причем и днем, и ночью, создает постоянные помехи в широком диапазоне частот. Поэтому данные этой станции не использовались для оценки приращения балльности за счет локальных сейсмических условий.-

В целом анализ спектральной плотности сейсмического шума по компонентам HHE, HHN и HHZ показывает, что наиболее неблагоприятная шумовая обстановка из четырех станций наблюдается на станции SB1, расположенной на плотине, а наиболее стабильный фон в большинстве случаев характерен для станций SB3 и SB4.

Результаты HVSR-измерений

Анализ выполнен с использованием метода спектральных отношений горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмического шума — метода H/V, или метода Накамуры [9]. Метод основан на обработке записей трехкомпонентного сейсмометра, одновременно регистрирующего одну вертикальную и две взаимно ортогональные горизонтальные компоненты микросейсмических колебаний. Отношение амплитудных спектров горизонтальных компонент к амплитудному спектру вертикальной компоненты позволяет определить преобладающую (резонансную) частоту площадки и оценить относительное усиление колебаний [10]. Обработка данных выполнена в программном комплексе Geopsy [11]. Выбор временных окон, расчет и интерпретация кривых H/V осуществлялись в соответствии с рекомендациями проекта SESAME [12, 13].

Измерения проведены в 5 пунктах наблюдений (SB1–SB5). В результате обработки микросейсмических записей определены резонансные частоты грунтовой толщи (f_0) и соответствующие уровни отношения H/V.

По результатам метода HVSR подтверждается вывод о резком отличии характеристик колебаний на станции SB5 от других станций. На станциях SB1-SB4 резонансные частоты довольно близки и характеризуются диапазоном 3,5 – 5,3 Гц (рисунок 7 таблица 2). На SB5 резонансная частота равна 1,2 Гц (рисунок 2). Это низкая резонансная частота, которая почти точно совпадает с частотой работы турбины и не отражает особенностей сейсмических свойств грунтов в этом месте.

На рисунке 7 приведены полученные результаты по всем пяти станциям. Во всех пунктах наблюдаются выраженные максимумы H/V, что свидетельствует о наличии контраста сейсмических свойств между верхней толщей грунтов и подстилающими более жесткими породами. Полученные резонансные частоты грунтовой толщи (f_0) и соответствующие амплитуды H/V по каждой станции и их средние значения приведены в таблице 2, наиболее выраженный пик зарегистрирован в пункте SB1, что указывает на значительное сейсмическое усиление колебаний на частотах 3,35 Гц.

Расчет приращения балльности по каждому сейсмологическому пункту произведен по следующей формуле:

$$\Delta I = 2log\frac{Ai}{Ae},$$

где Ai – амплитуда H/V, соответствующая грунтам на исследуемой станции, Ae – амплитуда H/V по эталонной станции.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 2. Резонансные частоты (f_0) и соответствующие уровни отношения H/V по станциям SB1-SB4.

№	SB1		SB2		SB3		SB4	
	f_0	H/V	f_0	H/V	f_0	H/V	f_0	H/V
1	3.4	12	4.3	6.4	5.4	4.1	5.2	6.3
2	3.4	16.6	4.2	6.7	5.2	4.1	5.2	6.4
3	3.5	15	4.2	6.2	5.4	4.2	5.5	6.6
4	3.4	16.2	4.2	8	4	4.1	5.2	6.5
5	3.5	16.9	4.2	8.8	4	4.2	5	5.6
6	3.5	15.6	4.2	7.6	4	4.2	5.4	4.8
7	3.5	14.4	4.3	6.5	4	4.2	5.2	7.4
8	3.5	14.2	4.2	7.3	4	4.1	5.1	6.2
9	3.5	14.3	4.2	7.4	5.2	4.2	5.2	6.5
10	3.5	14.6	4.2	7.8	5.2	4.3	5.2	6.7
11	3.5	15.2	4.2	8.3	4	4.1	5.4	6.6
12	3.4	14.3	4.3	8	4	4.1	5.2	6.7
13	3.5	14.2	4.2	7.3	5.2	4.3	5.4	6.6
Σ	3.5	14.9	4.5	7.4	4.6	4.2	5.3	6.4

Для оценки приращения интенсивности за счет грунтовых условий в качестве эталонной была выбрана сейсмическая станция SB4. Этот выбор базировался на результатах предварительных сейсморазведочных работ.

Для определения категории грунтов по сейсмическим свойствам в месте расположения сейсмостанции SB4 вблизи нее выполнены сейсмические зондирования на поперечных волнах с последующей интерпретацией наблюденных годографов по точкам их излома [14] с расчетом интервальных скоростей и мощностей по преломляющим горизонтам. Эти данные составили основу для последующих расчетов средней скорости поперечных волн, в том числе на глубине 30 метров, и представлены на рисунке 8-А.

Как видно из этого рисунка, изученный разрез в поле поперечных волн характеризуется явно выраженными преломляющими свойствами, где интервальная скорость в диапазоне глубин 0…45 метров возрастает с 270 до 1200 м/с.

Для инженерно-геологической интерпретации полученных данных использованы сведения о строении разреза [15], согласно которым в районе сейсмостанции он представлен песчано-галечниковыми отложениями, перекрытыми просадочными супесями и суглинками неоген-четвертичного возраста, несогласно залегающими на алевролитах верхнего карбона. Для стратиграфической привязки скоростных границ использованы обобщенные данные [14].

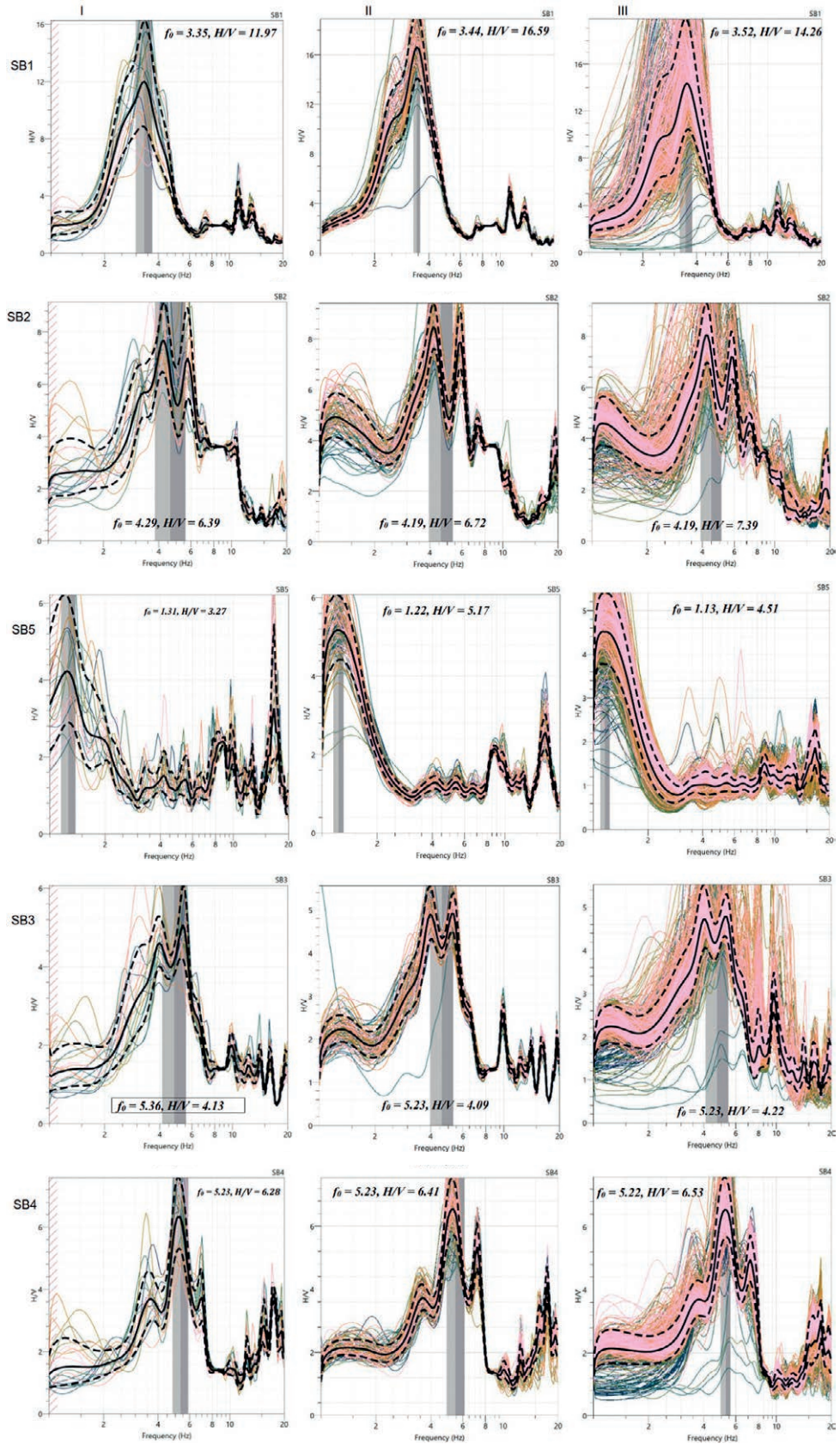
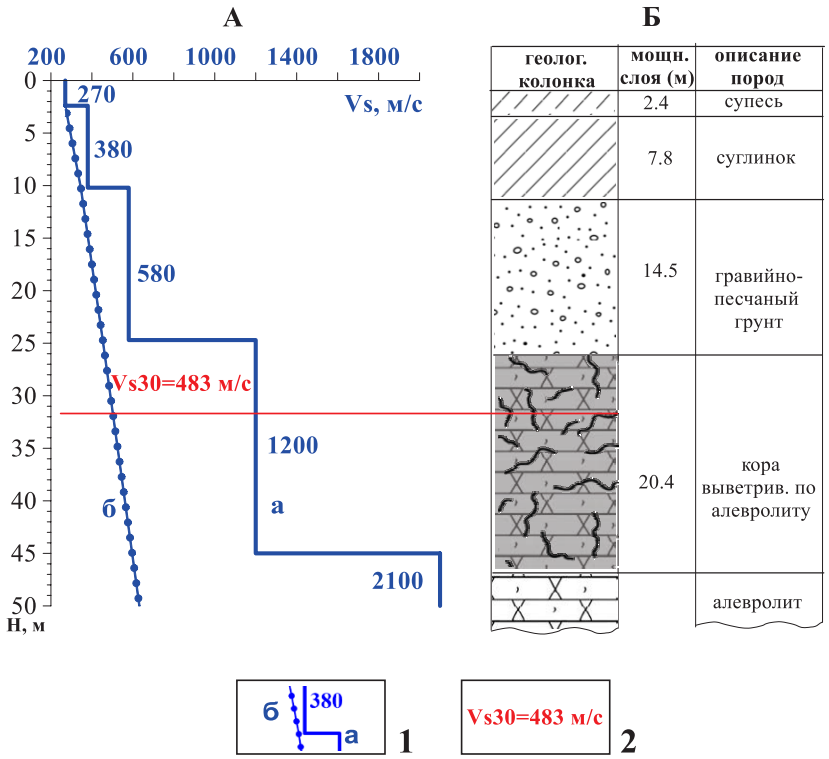


Рисунок 7. HVSR –спектр по пяти станциям SB1-SB5. Для каждой станции показаны результаты трех вариантов расчетов – длина записи 25 минут, 20-секундные интервалы; длина записи 40 минут, 20-секундные интервалы; длина записи одни сутки, 60- секундные интервалы



1 – графики интервальной (а) и средней (б) скоростей поперечных SH волн; 2 – графики значений средней скорости поперечных волн на глубине 30 метров.

Рисунок 8. Район Шульбинской ГЭС, сейсмостанция SB4. Скоростная колонка (А) в параметрах интервальной и средней скорости поперечных волн и ее инженерно-геологическая интерпретация (Б)

Самая верхняя часть разреза мощностью 2,4 метра (рисунок 1-Б), характеризующаяся минимальными значениями скорости поперечных волн (279 м/с), определена как сложенная рыхлым супесным грунтом. Незначительное повышение интервальной скорости (до 380 м/с) вниз по разрезу вероятно связано с горизонтом суглинков мощностью 7,8 метра, ниже которых залегает более высокоскоростной (580 м/с) пласт гравийно-песчаного грунта мощностью 14,5 метров.

Более контрастными представляются преломляющие границы на глубине 25 и 45 метров, где скорость поперечных волн резко возрастает до 1200 и 2100 м/с соответственно. Такие значения типичны для осадочных горных пород, в данном случае - алевролитов. При этом интервал глубин 25…45 метров определен как сложенный продуктами корообразования по алевролитам, ниже которых залегает слабо измененная эта горная порода.

В целом разрез в районе сейсмостанции SB4 на глубину до 30 метров характеризуется средней скоростью поперечных волн 483 м/с. Принимая во внимание то, что полученное значение этого параметра находится в интервале 270≤Vs,30<550 м/с, грунтовые условия по сейсмическим свойствам, согласно требованиям [3], отнесены к категории II. К этой же категории они относятся и по описательным признакам грунтов в этом диапазоне глубин.

Таблица 3. Отношение амплитуд H/V на каждой станции к амплитуде H/V на эталонной станции и рассчитанное приращение интенсивности (в баллах шкалы MSK-64).

Site	Ai/Ae	ΔI, балл	f_0, Гц
SB-1	2,3	0,7	3,5
SB-2	1,2	0,1	4,5
SB-3	0,7	-0,4	4,6
SB-4	1,0	0,0	5,3

Результаты оценки приращения интенсивности ΔI показывают (таблица 3), что только на станции SB1 отмечено существенное приращение балльности +0,7 балла. На других станциях значения ΔI малы или даже отрицательны.

Анализ зарегистрированных полевыми станциями сейсмических событий (землетрясений и взрывов)

Просмотр всех полученных сейсмическими станциями данных позволил выявить два вида зарегистрированных сейсмических событий. Первый вид – это записи телесейсмических и региональных землетрясений, второй вид - это близкие взрывы на карьерах Каражыра и Бакырчик (рисунок 9).

В результате обработки сейсмических данных проведено более 160 замеров максимальных амплитуд А

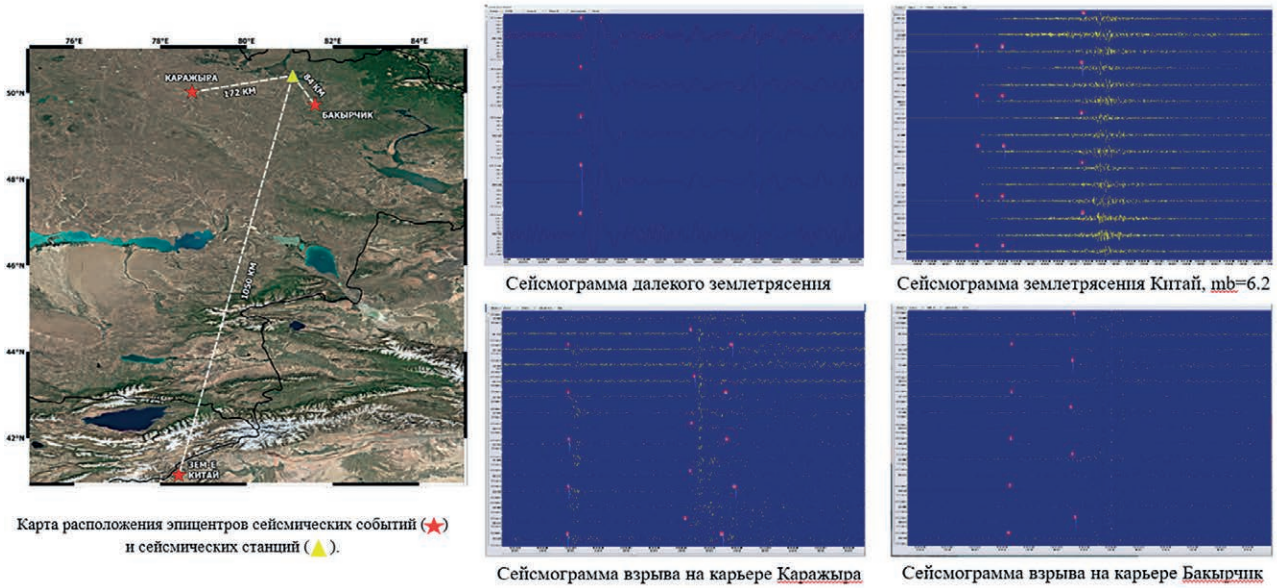


Рисунок 9. Записи зарегистрированных сейсмических событий

и соответствующих им периодов T по далеким и региональным событиям, карьерным взрывам. На рисунке 10 приведен фрагмент созданной базы данных по параметрам обработанных записей.

Полученные в результате замеров значения A и T использованы для расчета превышения интенсивности ΔI. В первую очередь, были рассчитаны отношения амплитуд сейсмических фаз по четырем станциям по каждому событию и по каждому типу волн относительно опорной станции (эталонной). Далее по всей выборке рассчитано медианное значение отношения амплитуд. По этим значениям проведен расчет ΔI – превышения интенсивности в баллах по соотношению:

$$\Delta I = 3.3log\frac{Ai}{Ae}.$$

all.arrival

File Edit View Options Graphics Help

ok X

0	sta	time	arid	chan	iphase	deltim	amp	per	fm	auth
	SB5	11/29/2025 (333) 12:34:47.988	1	HHZ	P	0.160	40.8	0.76	c.	dbp:spep:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 12:34:48.001	2	HHZ	P	0.200	28.0	0.66	d.	dbp:spep:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 12:34:47.995	3	HHZ	P	0.236	30.3	0.70	c.	dbp:spep:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 12:34:47.995	4	HHZ	P	0.180	33.9	0.78	d.	dbp:spep:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 12:34:48.015	5	HHZ	P	0.187	27.3	0.58	d.	dbp:spep:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 19:32:43.989	24	HHZ	P	0.027	4.6	0.30	d.	dbp:spep:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 19:32:44.370	25	HHZ	P	0.037	0.4	0.14	c.	dbp:spep:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 19:32:43.959	26	HHZ	P	0.065	1.9	0.34	d.	dbp:spep:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 19:32:44.306	27	HHZ	P	0.039	0.4	0.16	c.	dbp:spep:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 20:09:55.545	30	HHZ	P	0.023	7.2	0.62	c.	dbp:spep:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 20:09:55.698	31	HHZ	P	0.027	7.2	0.60	c.	dbp:spep:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 20:09:55.779	32	HHZ	P	0.022	4.2	0.40	d.	dbp:spep:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 20:09:55.881	33	HHZ	P	0.020	1.8	0.16	c.	dbp:spep:125234
	SB5	11/29/2025 (333) 20:09:55.327	34	HHZ	P	0.141	7.7	0.30	c.	dbp:spep:125234
	SB1	11/29/2025 (333) 20:49:18.158	35	HHZ	P	0.107	6.9	0.34	c.	dbp:spep:125234
	SB2	11/29/2025 (333) 20:49:18.533	36	HHZ	P	0.047	0.5	0.14	d.	dbp:spep:125234
	SB3	11/29/2025 (333) 20:49:18.465	37	HHZ	P	0.052	0.7	0.16	d.	dbp:spep:125234
	SB4	11/29/2025 (333) 20:49:18.387	38	HHZ	P	0.042	1.7	0.36	c.	dbp:spep:125234
	SB5	11/30/2025 (334) 23:27:36.100	1	HHZ	P	0.084	44.2	0.96	c.	dbp:spep:125234
	SB4	11/30/2025 (334) 23:27:36.073	2	HHZ	P	0.048	24.7	0.68	d.	dbp:spep:125234
	SB3	11/30/2025 (334) 23:27:36.082	3	HHZ	P	0.055	21.4	0.58	c.	dbp:spep:125234
	SB2	11/30/2025 (334) 23:27:36.037	4	HHZ	P	0.082	23.0	0.58	c.	dbp:spep:125234
	SB1	11/30/2025 (334) 23:27:36.155	5	HHZ	P	0.068	14.0	0.40	d.	dbp:spep:125234
	SB5	12/01/2025 (335) 9:28:21.681	1	HHZ	P	0.107	7.2	0.38	d.	dbp:spep:125234
	SB3	12/01/2025 (335) 9:28:21.757	2	HHZ	P	0.072	2.7	0.36	d.	dbp:spep:125234

164

Dismiss

Рисунок 10. Фрагмент базы данных сейсмических фаз в формате CSS3.0 [15]

В результате расчетов получены значения ΔI в диапазоне от – 0,2 до + 0,9, при этом наибольшее значение ΔI = 0,9 балла получено для станции SB-1, самые низкие ΔI= -0,2 получены для станции SB-2. В таблице 4 приведены результаты расчета ΔI по каждой станции.

Таблица 4. Приращение интенсивности на основании анализа записей сейсмических событий

STA	T, c	Ai/Ae	ΔI, балл
SB-1	0,3	1,9	0,9
SB-2	0,3	0,9	-0,2
SB-3	0,3	1,0	0
SB-4	0,3	1,0	0

Для наглядности сравнения результатов превышения интенсивности ΔI, полученных по методу HVSR (по сейсмическим шумам) и Ai/Ae (по землетрясениям и взрывам), результаты объединены в таблицу 5.

Таблица 5. Расчетные значения превышения интенсивности ΔI по методу HVSR (метод Накамуры) и Ai/Ae

Site	ΔI, балл		ΔI, балл
	HVSR	Ai/Ae	Среднее
SB-1	0,7	0,9	0,8
SB-2	0,1	−0,2	−0,1
SB-3	−0,4	0,1	−0,2
SB-4	0	0	0

Так, на станции SB-1 по двум методам наблюдается наибольшее превышение интенсивности, равное ΔI=0.7…0,9 балла. Для станций SB-2 и SB-3 превышения интенсивности ΔI практически отсутствуют.

Заключение

Выполненные инструментальные сейсмологические наблюдения на территории Шульбинской ГЭС позволили оценить особенности сейсмических условий площадки и выявить различия в отклике грунтов на сейсмические воздействия на отдельных участках гидроузла. Анализ записей землетрясений, карьерных взрывов и микросейсмического шума показал, что площадка характеризуется неоднородными условиями регистрации и различной степенью локального усиления колебаний.

Исследование спектральных характеристик сейсмических шумов по компонентам HHE, HHN и HHZ выявило пространственную неоднородность шумового поля на территории ГЭС. Наиболее неблагоприятные условия наблюдаются на станции SB1, расположенной на насыпной плотине, тогда как станции SB3 и SB4 характеризуются наиболее стабильным фоновым уровнем. Станция SB5 оказалась существенно подверженной техногенным помехам, связанным с работой сооружений ГЭС, что ограничивает возможность ее использования для надежной интерпретации локальных сейсмических условий.

Результаты HVSR-анализа показали, что наиболее выраженное локальное усиление наблюдается на станции SB1. По данным метода Накамуры, приращение интенсивности на этом пункте составляет около 0,7 балла по шкале MSK-64. Анализ записей землетрясений и техногенных взрывов подтвердил этот вывод: по амплитудным отношениям сейсмических волн на станции SB1 величина приращения интенсивности достигает 0,7…0,9 балла. Для станций SB2, SB3 и SB4 значимого увеличения интенсивности не выявлено.

Сопоставление результатов, полученных разными сейсмологическими методами, показало их хорошую согласованность и позволило сделать вывод о том, что наиболее чувствительным к усилению сейсмических воздействий участком является тело насыпной плотины. Это имеет важное практическое значение, поскольку при нормативной сейсмичности района 7 баллов по действующим картам общего сейсмического зонирования локальные условия в пределах плотины могут приводить к увеличению сейсмического воздействия приблизительно на один балл.

Таким образом, выполненные исследования подтвердили необходимость учета локальных условий площадки при оценке сейсмических условий района расположения Шульбинской ГЭС. Для дальнейшего уточнения сейсмических параметров и контроля состояния гидротехнического сооружения целесообразно создание постоянно действующей системы сейсмического мониторинга, включающей как сейсмические станции, так и акселерометры сильных движений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

Литература / References:

1. Карта сейсмического районирования СССР. Масштаб 1:5 000 000 / гл. ред. М. А. Садовский; Межведомственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – 1978.
2. Карта общего сейсмического районирования Республики Казахстан и прилегающих районов Кыргызстана, Узбекистана, Туркменистана и Китая. Масштаб 1:2 500 000 / сост. А. К. Курскеев, А. В. Тимуш, А. Сыдыков, В. И. Шацилов; при участии А. Б. Садыковой, П. Н. Горбунова; Министерство образования и науки Республики Казахстан, Институт сейсмологии. – 2003.
3. СП РК 2.03-30-2017. Строительство в сейсмических зонах: с изменениями и дополнениями по состоянию на 21.10.2021.
4. Нурмагамбетов А., Садыков А., Тимуш А. В., Хайдаров М. С., Власова А. А., Михайлова Н. Н., Сабитов М. М., Умирзакова А., Гапич В. А. Зайсанское землетрясение 14 июня 1990 г. // Землетрясения в СССР в 1990 году. – М.: ГС РАН, 1996. – С. 54–60.
5. Арефьев С. С., Быкова В. В. Алтайское землетрясение 2003 г.: очаг и афтершоки // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: тезисы докладов Всероссийской конференции. – М., 2008. – Т. 2. – С. 211–213.
6. Дягилев Р. А., Маловичко Д. А. Микросейсмическое районирование: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Пермский государственный университет, 2007. – 90 с.
7. Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний / под ред. С. В. Медведева // Вопросы инженерной сейсмологии. – М.: Наука, 1973. – Вып. 15. – 206 с.
8. Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise. Open-File Report 93-322, Albuquerque, New Mexico, 1993- 42 pp..
9. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – Vol. 30, No. 1. – P. 25–33.
10. Molnar S., Cassidy J. F., Castellaro S., Cornou C., Crow H., Hunter J. A., Matsushima S., Sanchez-Sesma F. J., Yong A. Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art // Surveys in Geophysics. – 2018. – Vol. 39. – P. 613–631.
11. Wathelet M. Geopsy Project [Electronic resource]. – URL: http://www.geopsy.org/ (accessed: 31.08.2026).
12. SESAME. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation. – SESAME European Research Project WP12, 2004. – 62 p.
13. Quinlan D. M., Harvey D. Datascope: A Relational Database System for Scientists // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 1994. – Vol. 75. – P. 431–432.
14. Горяинов Н. Н., Ляховицкий Ф. М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – М.: Недра, 1979. – 143 с.
15. Anderson J., Farrell W. E., Garcia K., Given J., Swanger H. Center for Seismic Studies Version 3 Database: Schema Reference Manual. – Arlington: Center for Seismic Studies, 1990. – Technical Report C90-01. – 64 p.

ШҮЛБІ ГЭСІ ОРНАЛАСУ АУМАҒЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН БАҒАЛАУ

Ә.А. Исағали*, Н. Н. Михайлова, М. В. Шульга

ҚР ҰЯО «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: a.issagali@kndc.kz*

Шүлбі су электр станциясы (ГЭС) жоғары инженерлік жауапкершілікке ие нысан. Сондықтан оның аумағындағы жергілікті сейсмикалық қауіптілікті нақты бағалап, бақылау қажет. Бұл жұмыста SB1–SB5 бес уақытша бес сейсмикалық станциялардың деректері негізінде жүргізілген Шүлбі ГЭС-і аумағындағы аспаптық сейсмологиялық зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Микросейсмикалық шудың спектрлік сипаттамалары талданып, HVSR әдісі арқылы грунттың динамикалық әсері анықталды. Сонымен қатар алынған нәтижелер жер сілкіністері мен жарылыстар жазбалары бойынша есептелген амплитудалық қатынастармен салыстырылды.

Зерттеу нәтижелері зерттеу аумағының сейсмикалық тұрғыдан біртекті емес екенін көрсетті. Сейсмикалық тербелістердің жергілікті күшеюі ең айқын түрде SB1 сейсмикалық станцияда байқалды, мұнда MSK-64 шкаласы бойынша қарқындылықтың өсімі шамамен 0,7–0,9 балды құрайды. Ал қалған бақылау пункттерінде тербеліс қарқындылығының артуы анықталған жоқ. Анықталған айырмашылықтар грунттардың жергілікті қасиеттерімен және плотина айналасындағы Vs30 параметрінің төмен мәндерімен байланысты. HVSR әдісі мен сейсмикалық құбылыстардың толқындарын талдау нәтижелерінің өзара сәйкестігі негізінде бөгеттің техникалық күйін сейсмикалық әдістер арқылы тұрақты мониторингтеуді ұйымдастыру қажеттілігі жөнінде ұсыныстар берілді.

Түйін сөздер: *Шүлбі ГЭС-і, сейсмикалық қауіптілік, сейсмикалық станция, сейсмикалық микроаудандастыру, HVSR, сейсмикалық шу, қарқындылық өсімі.*

ASSESSMENT OF SEISMIC CONDITIONS IN THE SHULBINSK HPP AREA

A.A. Issagali*, N.N. Mikhailova, M.V. Shulga

RSE NNC RK Branch "Institute of Geophysical Research", Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: a.issagali@kndc.kz*

The Shulbinsk Hydroelectric Power Plant (HPP) is a critical infrastructure facility with a high level of engineering responsibility, necessitating a detailed assessment of local seismic hazard. This study presents the results of instrumental seismological investigations conducted within the Shulbinsk HPP area using data acquired from five temporary observation sites (SB1–SB5). Spectral characteristics of ambient seismic noise were analyzed, site response was evaluated using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method, and the obtained results were compared with amplitude ratios derived from recordings of earthquakes and quarry blasts.

The results indicate significant seismic heterogeneity across the study area. The most pronounced local amplification of seismic ground motion was identified at the embankment dam site (station SB1), where the increment in seismic intensity reaches approximately 0.7–0.9 points on the MSK-64 scale. In contrast, no significant increase in seismic intensity was observed at the remaining observation sites. The identified differences are associated with local soil conditions and low Vs30 values within the embankment body. Based on the consistency between the HVSR results and waveform analyses of recorded seismic events, recommendations are provided regarding the implementation of continuous seismic monitoring of the dam condition.

Keywords: *Shulbinsk Hydroelectric Power Plant (HPP), seismic hazard, seismic station, seismic microzonation, HVSR, ambient seismic noise, seismic intensity increment.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-103-112
УДК 621.039.53

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ РЕАКТОРА ИГР

Д.М. Секен[1,2*], А.С. Сураев[1,2], О.М. Жанболатов[1], Р.А. Иркимбеков[1], Н.Е. Мухамедов[1,2]

[1]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2]Шәкәрім университет, Семей, Казахстан

E-mail для контактов: seken@nnc.kz

В работе представлены результаты расчетного нейтронно-физического моделирования облучательных устройств ID-M и WF с топливом реакторов ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000, размещаемых в центральном экспериментальном канале реактора ИГР. С использованием программного комплекса MCNP выполнены расчеты уран-водного соотношения, распределений удельного энерговыделения в твэлах и средней удельной мощности по высоте активной части топлива. Проведен анализ влияния конструктивных особенностей одностенных и двустенных облучательных устройств на нейтронно-физические характеристики топлива. Установлено, что применение облучательного устройства ID-M приводит к снижению среднего уровня удельного энерговыделения приблизительно на 45% по сравнению с устройством WF. Сопоставление расчетных характеристик облучательных устройств с параметрами реакторов ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000 показало возможность воспроизведения в реакторе ИГР, в течение 100–200 с, уровней энерговыделения, характерных для эксплуатации топлива энергетических реакторов. Полученные результаты могут быть использованы при подготовке внутриреакторных испытаний перспективного ядерного топлива, оценке тепловых режимов и обеспечении безопасности экспериментальных исследований.

Ключевые слова: *нейтронно-физическое моделирование, облучательные устройства, ИГР, энергетический реактор, энерговыделение, удельная мощность, MCNP.*

Введение

Развитие современных ядерных технологий требует проведения экспериментальных исследований, направленных на обоснование безопасности и работоспособности перспективного ядерного топлива в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации в энергетических реакторах. Одним из ключевых этапов подготовки внутриреакторных экспериментов является расчетное нейтронно-физическое моделирование режимов испытаний. Для этого выполняется разработка и верификация нейтронно-физических моделей облучательных устройств, предназначенных для размещения образцов топлива в исследовательских реакторах. Корректность таких моделей определяет достоверность расчетного обоснования режимов облучения, оценку тепловых нагрузок на элементы экспериментального устройства и безопасность проведения реакторных испытаний.

В настоящее время интерес представляет развитие базы внутриреакторных испытаний топлива в различных режимах, что позволяет говорить об актуальности моделирования облучательных устройств, содержащих ядерное топливо энергетических реакторов, таких как ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000. Данные энергетические реакторы относятся к наиболее распространенным проектам современной атомной энергетики и отличаются геометрией топливных сборок, конструкционными материалами и нейтронно-физическими характеристиками.

Целью работы является валидация разработанных нейтронно-физических моделей облучательных устройств с топливом из диоксида урана реакторов ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000, размещенных в реакторе ИГР [1]. В качестве объектов моделирования были выбраны современные водо-водяные энергетические реакторы, разработанные соответственно в России, Южной Корее и Китае. Данные реакторные установки отличаются конструкцией топливных сборок и уран-водным соотношением, что позволяет оценить возможности реактора ИГР по воспроизведению условий эксплуатации топлива этих энергетических реакторов, в частности, в аварийных и переходных режимах. В качестве исследуемого топлива рассматривались твэлы с диоксидом урана (UO_2), характерные для указанных энергетических реакторов. Нейтронно-физические модели были разработаны для одностенных и двустенных облучательных устройств. В программном комплексе MCNP выполнены расчеты, направленные на оценку возможности воспроизведения в реакторе ИГР условий облучения, характерных для энергетических реакторов, при этом оценивались значения уран-водного соотношения, определялись распределения удельного энерговыделения и средней удельной мощности в твэлах [2]. Расчеты проводились на основе разработанных нейтронно-физических

моделей облучательных устройств [3]. Валидация моделей осуществлялась путем сопоставления расчетных характеристик экспериментальных устройств с параметрами, характерными для активных зон энергетических реакторов. Полученные результаты позволяют оценить степень соответствия условий облучения в реакторе ИГР условиям эксплуатации топлива в энергетических реакторах и обосновать режимы проведения внутриреакторных испытаний.

1 Нейтронно-физические модели облучательных устройств

1.1 Конструктивные параметры облучательных устройств

При проведении экспериментальных исследований на реакторе ИГР приоритетное значение имеют требования ядерной и радиационной безопасности. Одним из ключевых условий является использование одностенного или двустенного облучательного устройства (ОУ) в центральном экспериментальном канале (ЦЭК) реактора, которое служит физическим барьером между топливными элементами ОУ и неподвижной ампулой (НА-228), штатно установленной в ЦЭК.

Неподвижная ампула обеспечивает герметизацию газовой полости реактора и защищает объекты испытаний от теплового воздействия кладки активной зоны. Помимо неподвижной ампулы применяют извлекаемые облучательные устройства, состоящие из топливной секции и конструкционных элементов. В зависимости от условий эксперимента используют одностенные или двустенные облучательные устройства, конструкционные элементы которых изготавливаются из реакторной стали марки 12Х18Н10Т.

Конструктивно одностенное ОУ представляет собой сварную цилиндрическую конструкцию, включающую обечайку корпуса, фланец и эллиптическое днище. Геометрические размеры составляют 4249 × 316 мм; наружный диаметр обечайки в области активной зоны равен 215 мм, а за пределами активной зоны – 219 мм. Внутренний диаметр обечайки составляет 199 мм. Основной функцией ОУ является локализация расплава и удержание тепловой энергии, возникающего внутри ее объема под воздействием внутренних факторов, а также предотвращение теплового воздействия от внутренних элементов на неподвижную ампулу реактора НА-228. Общий вид одностенного ОУ представлен на рисунке 1.

Двустенное ОУ (рисунок 1) предназначено для энергонапряженных реакторных пусков, в которых содержится значительное количество ядерного топлива. При необходимости обеспечения герметичной среды

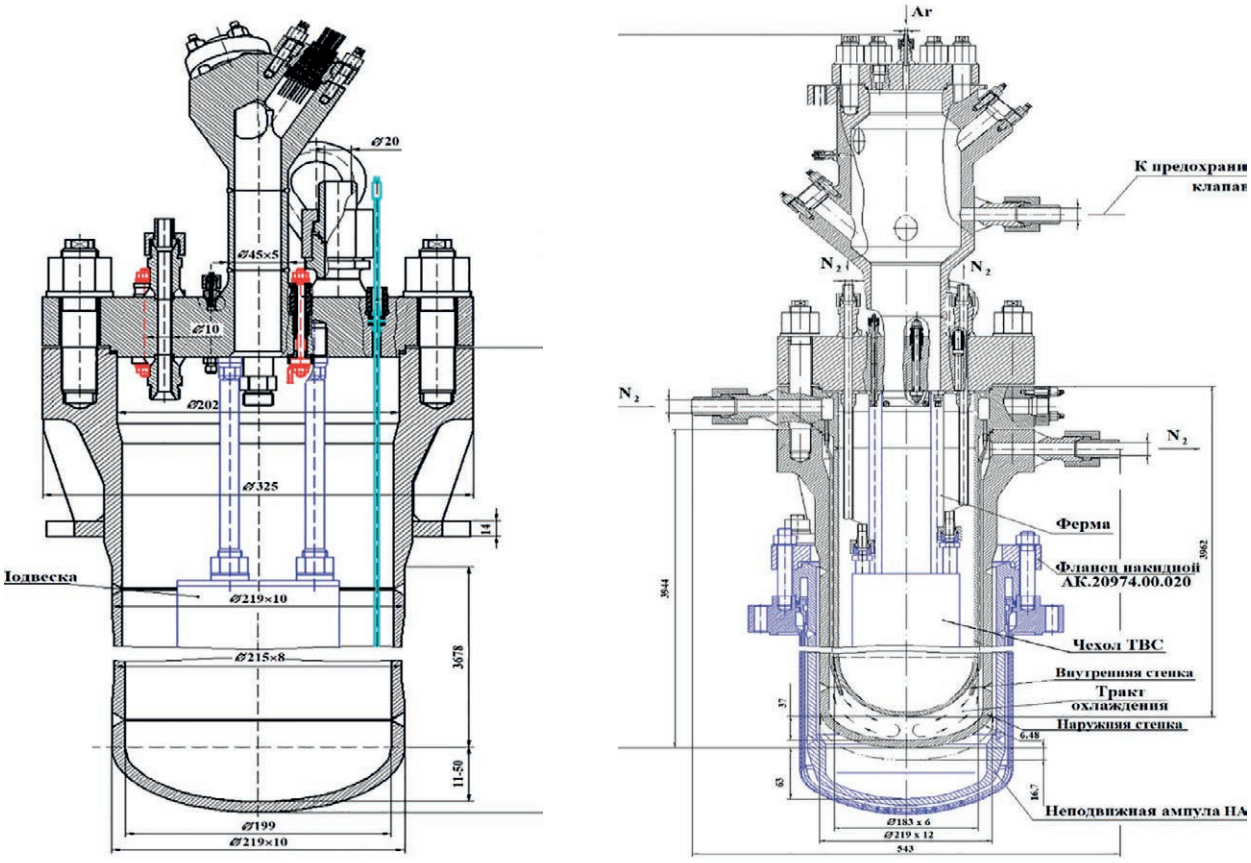


Рисунок 1. Облучательные устройства (экспериментальное топливо не показано)

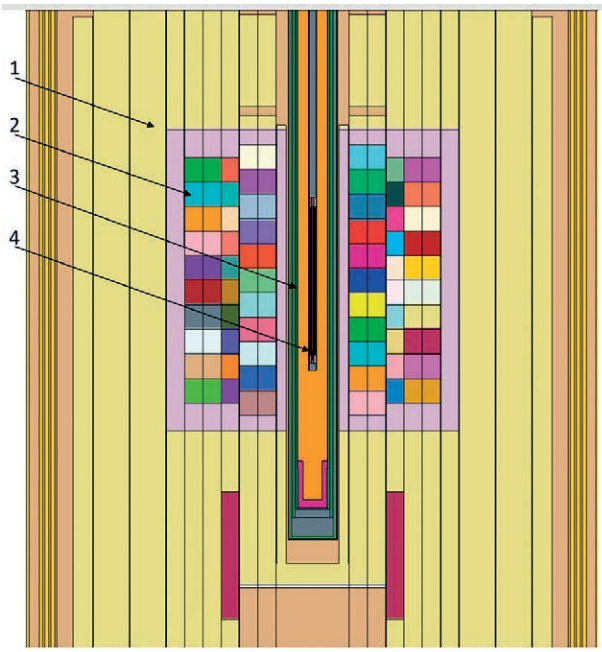
внутри устройства, оно комплектуется специальной крышкой, оснащенной герметичными разъемами и каналами для подключения к системам реактора. Также возможно размещение внутри ОУ дополнительного защитного корпуса с ловушкой расплава в случае предполагаемого или ожидаемого расплавления топливных и конструкционных элементов.

Разница между двустенным и одностенным ОУ заключается в том, что двустенное ОУ имеет дополнительную внутреннюю стенку, формирующую замкнутое межстенное пространство, которое используется как защитная или разгрузочная полость, тогда как в одностенном ОУ эта внутренняя стенка отсутствует, и область, соответствующая межстенному зазору, представляет собой просто заполненный воздухом объем без механически оформленной стенки.

1.2 Нейтронно-физические модели облучательных устройств

Выполнено нейтронно-физическое моделирование трех водо-водяных энергетических реакторов различного поколения и конструктивного исполнения: ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000 [4-7]. Выбор указанных реакторов обусловлен их широкой распространенностью, а также отличиями в геометрии активной зоны, типе топливных сборок и материалах конструктивных элементов.

Реактор ВВЭР-1000 представляет собой типичный корпусной водо-водяной реактор с гексагональной геометрией топливных сборок, характерной для реакторов российского дизайна. Такая компоновка активной зоны обеспечивает равномерное распределение нейтронного потока и эффективное использование топлива.



1 – отражатель, 2 – графитовые блоки, 3 – стальная обечайка, 4 – топливная сборка

Рисунок 2. Общий вид нейтронно-физической модели облучательного устройства и реактора ИГР

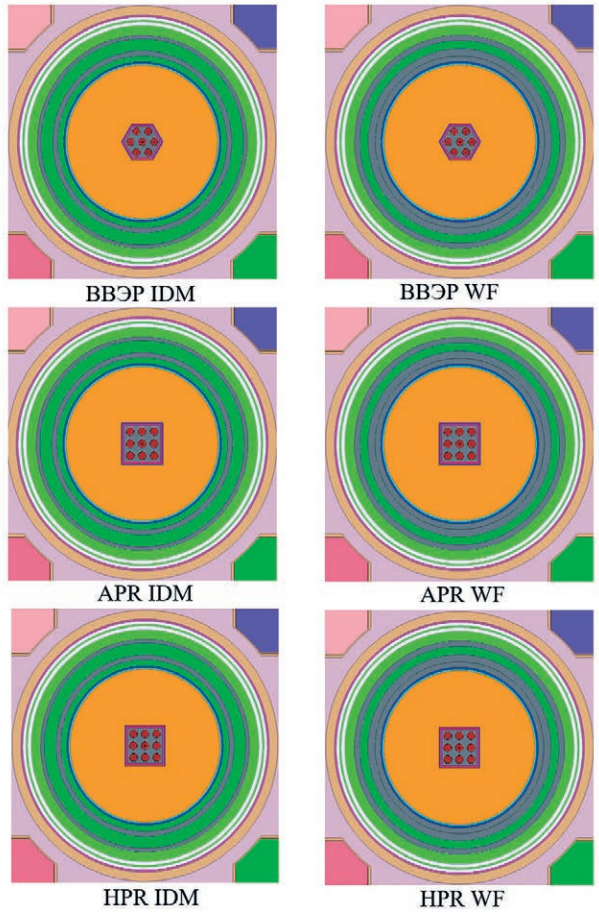


Рисунок 3. Нейтронно-физические модели ОУ

Реактор APR-1400 относится к реакторам поколения III+ и является развитием классических PWR с квадратной решеткой размещения твэлов. Отличительной особенностью данного реактора является оптимизированная геометрия топливной сборки, направленная на повышение тепловой мощности и топливной эффективности.

Реактор HPR-1000 (Hualong One) также относится к современным PWR-реакторам поколения III+ и сочетает в себе решения, применяемые в западных и азиатских проектах.

Для всех реакторов расчетные модели были реализованы в программном комплексе MCNP6.2 (рисунок 2, 3) с учетом геометрических параметров и материальных характеристик (таблица 1). Сравнительный подход к моделированию обеспечивает возможность анализа влияния конструктивных и топливных особенностей на основные нейтронно-физические параметры реакторов.

Таблица 1. Исходные данные для расчетов

Параметр	**Значение**		
Реактор	ВВЭР-1000 [4]	APR-1400 [6]	HPR-1000 [7]
Материал оболочки твэла	Э110	Zircaloy-4	Zircaloy-4
Плотность оболочки твэла	6515 кг/м^3	6550 кг/м^3	6550 кг/м^3
Высота оболочки твэла	900 мм		
Внутренний радиус оболочки твэла	3,9 мм	4,1873 мм	4,18 мм
Толщина стенки оболочки твэла	0,65 мм	0,5625 мм	0,57 мм
Материал топлива	UO_2		
Плотность топлива	10400 кг/м^3	10310 кг/м^3	10310 кг/м^3
Обогащение по 235U	3,3%	3,64 %	3,1%
Внешний радиус топливной таблетки	3,765 мм	4,09575 мм	4,01 мм
Радиус центрального отверстия таблетки	0,7 мм	–	–
Длина столба топливных таблеток	800 мм		
Форма чехла ТВС	Правильный шестиугольник	Квадрат	Квадрат
Количество твэл в ТВС	7	9	9
Высота чехла ТВС	1000 мм		
Материал стального чехла	Сталь 12Х18Н10Т		
Размер стального чехла	r = 17,5 мм	40 × 40 мм	40 × 40 мм
Толщина стенки стального чехла	2 мм		
Плотность стали	7920 кг/м^3		
Материал графитового чехла	Графит		
Размер графитового чехла	r = 19,5 мм	44 × 44 мм	44 × 44 мм
Схема размещения твэлов	Треугольная	Квадратная	Квадратная
Шаг между осями твэлов	12,75 мм	12,852 мм	12,6 мм

1.3 Уран-водное соотношение

Уран-водное отношение (модерирующее отношение) является определяющим параметром при проектировании активных зон водо-водяных энергетических реакторов, таких как ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000. В инженерной практике оно чаще всего выражается как объемное отношение теплоносителя к топливу (V (H_2O) / V(UO_2)), которое для современных установок поколения III/III+ поддерживается в диапазоне 1,9–2,1. Данный показатель критически важен для обеспечения «недозамедленного» состояния решетки твэлов, что гарантирует отрицательное значение температурного коэффициента реактивности. Это означает, что при случайном перегреве и снижении плотности воды интенсивность цепной реакции падает естественным образом, обеспечивая внутреннюю самозащищенность реакторной установки.

С физической точки зрения выбор оптимального значения представляет собой компромисс между эффективностью замедления нейтронов и экономическими показателями топливного цикла. Избыток замедлителя (перезамедленная решетка) может привести к неустойчивости реактора, в то время как его дефицит ухудшает использование топлива и требует более высокого обогащения по ^{235}U.

В реакторах ВВЭР-1000 за счет плотной гексагональной упаковки твэлов достигается компактность активной зоны при сохранении расчетного отношения около 1,9, что позволяет эффективно сжигать топливо при высокой энергонапряженности. В свою очередь, в проектах APR-1400 и HPR-1000 с квадратной матрицей расположения твэлов значения смещены ближе к 2,0–2,1. В процессе эксплуатации реактора массовое уран-водное соотношение не остается постоянным, существенно изменяясь при переходе от «холодного» состояния к рабочим параметрам. При нагреве воды до 300–320°C (573–593 K) ее плотность снижается почти на 30%, что приводит к соответствующему уменьшению массы замедлителя в активной зоне при неизменной массе загруженного диоксида урана. Этот эффект учитывается при детальном профилировании обогащения и размещении поглотителей, позволяя поддерживать стабильный профиль энерговыделения на протяжении всей топливной кампании.

Принимая во внимание данный параметр, было оценено водно-топливное соотношение для разработанных облучательных устройств (таблица 2). В таблице 3 представлены результаты сравнения данного параметра с известными значениями.

Таблица 2.Уран-водное соотношение в ОУ

Параметр	**ОУ ВВЭР-1000**	**ОУ APR-1400**	**ОУ HPR-1000**
Объем топлива, м^3	0,24	0,38	0,36
Объем воды, м^3	0,48	0,77	0,77
Уран-водное соотношение	2,01	2,03	2,12

Таблица 3. Сравнение уран-водного соотношения

Параметр	ВВЭР-1000	APR-1400	HPR-1000
Уран-водное соотношение в модели ОУ	2,01	2,03	2,12
Уран-водное соотношение по литературным данным [4-7]	1,9	2,0	2,0
Δ, %	5,47	1,47	5,66

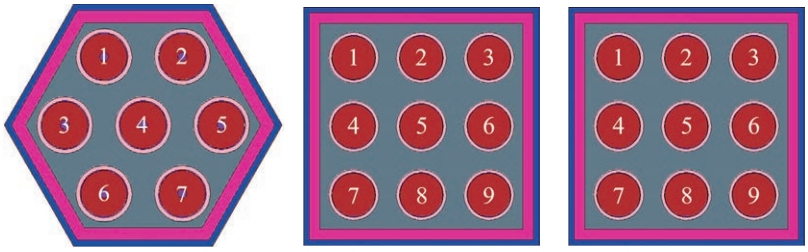
Анализ уран-водного соотношения, полученного в рассматриваемых моделях облучательных устройств, говорит о том, что данные значения находятся в пределах рекомендованного диапазона. Это позволяет говорить о том, что по данному параметру разработанные модели ОУ хорошо валидируются и могут применяться для проведения расчетных исследований.

2 Расчет энерговыделения

Нейтронно-физические расчеты выполнены с использованием программного комплекса MCNP6.2 [2] и библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VII [8]. Расчеты проводились методом Монте-Карло для разработанных трехмерных моделей экспериментальных устройств и реактора ИГР.

Были выбраны следующие условия нейтронно-физических расчетов: общее количество нейтронов составило 50 000 000, начальное значение коэффициента размножения нейтронов принято равным 1,00. Для достижения стационарного режима было пропущено 50 начальных циклов, после чего проведено 150 итерационных циклов моделирования. Полученная погрешность расчета k_{eff} составила ±0,000018, что соответствует относительной ошибке ±0,0018% и является хорошим уровнем точности для результатов нейтронно-физических расчетов с использованием метода Монте-Карло. Расчет энерговыделения проводился с помощью tally функционалов, погрешность расчета энерговыделения составила ±5,1%.

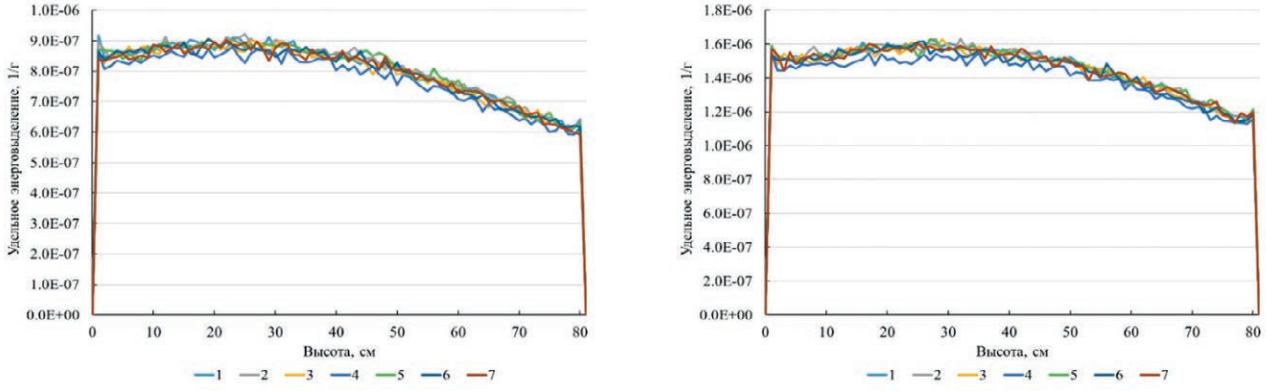
На основе разработанных нейтронно-физических моделей были проведены расчеты распределения удельного энерговыделения для твэлов реакторов энергетического типа в составе облучательных устройств ID-M и WF, расположенных в центральном экспериментальном канале реактора ИГР. В ходе расчетов получена зависимость удельного энерговыделения от высоты активной части твэла, что позволило оценить характер неравномерности энерговыделения и влияние отражающих и поглощающих свойств материалов облучательных устройств. На рисунке 4 представлена схема размещения и нумерации твэлов в нейтронно-физических моделях ОУ.



а) ОУ ВВЭР-1000 б) ОУ APR-1400 в) ОУ HPR-1000

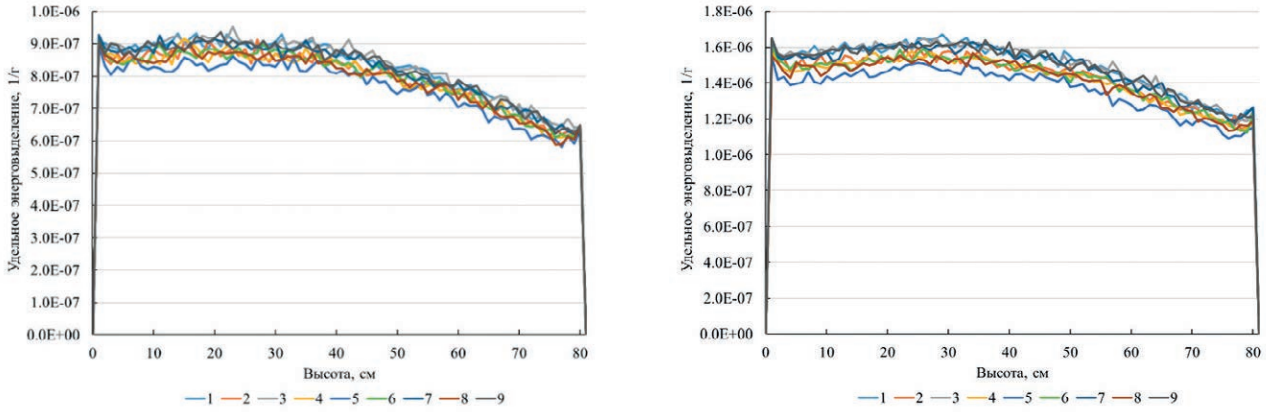
Рисунок 4. Схема размещения твэлов в ОУ

На рисунках 5–7 представлено распределение удельного энерговыделения по высоте ТВС. По результатам расчетов установлено, что центральный твэл характеризуется наименьшими значениями удельного энерговыделения по сравнению с периферийными твэлами. Количественные характеристики, включая средние, максимальные и минимальные значения удельного энерговыделения, приведены в таблице 4.



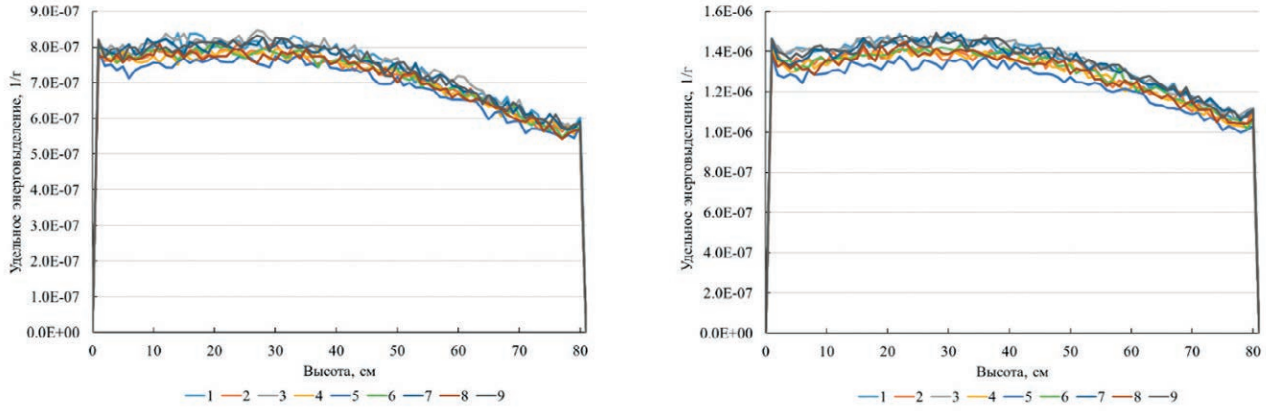
а) ОУ ID-M б) ОУ WF

Рисунок 5. Распределение удельного энерговыделения твэлов реактора ВВЭР-1000, размещенных в облучательных устройствах ID-M и WF, в активной зоне реактора ИГР



а) ОУ ID-M б) ОУ WF

Рисунок 6. Распределение удельного энерговыделения твэлов реактора APR-1400, размещенных в облучательных устройствах ID-M и WF, в активной зоне реактора ИГР



а) ОУ ID-M б) ОУ WF

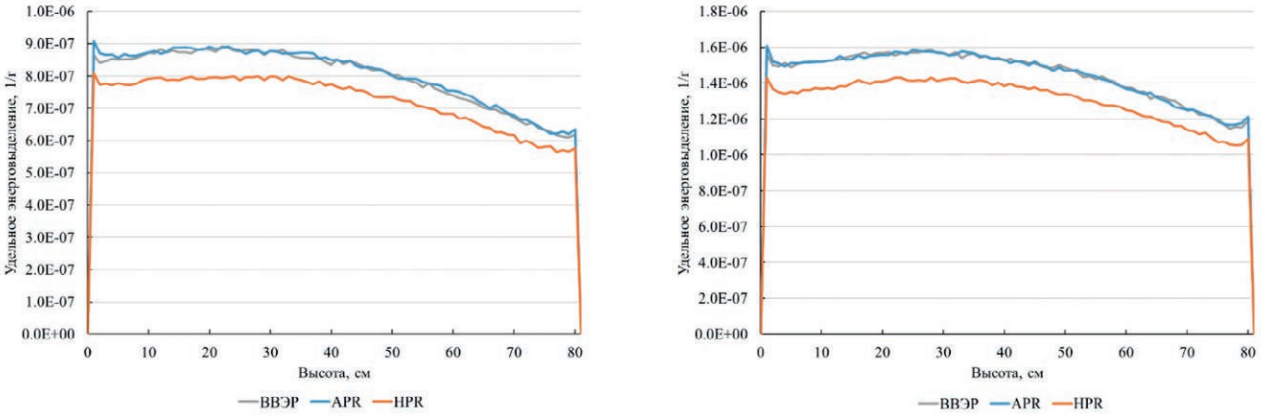
Рисунок 7. Распределение удельного энерговыделения твэлов реактора HPR-1000, размещенных в облучательных устройствах ID-M и WF, в активной зоне реактора ИГР

Таблица 4. Сравнение удельного энерговыделения для различных типов облучательных устройств

Реактор	ОУ	Wср, 1/г	Wмакс, 1/г	Wмин, 1/г
ВВЭР-1000	ID-M	$7{,}8\times10^{-7}$	$8{,}92\times10^{-7}$	$6{,}2\times10^{-7}$
	WF	$1{,}42\times10^{-6}$	$1{,}58\times10^{-6}$	$1{,}15\times10^{-6}$
APR-1400	ID-M	$7{,}87\times10^{-7}$	$9{,}08\times10^{-7}$	$6{,}09\times10^{-7}$
	WF	$1{,}42\times10^{-6}$	$1{,}61\times10^{-6}$	$1{,}17\times10^{-6}$
HPR-1000	ID-M	$7{,}11\times10^{-7}$	$8{,}07\times10^{-7}$	$5{,}65\times10^{-7}$
	WF	$1{,}28\times10^{-6}$	$1{,}43\times10^{-6}$	$1{,}05\times10^{-6}$

Как следует из данных таблицы 4, использование ОУ ID-M приводит к снижению среднего уровня удельного энерговыделения примерно на 45% по сравнению с одностенным ОУ WF для всех рассмотренных типов реакторов. Данный эффект обусловлен дополнительным ослаблением нейтронного потока внутренней стенкой ОУ ID-M. Несмотря на различия в абсолютных значениях энерговыделения, для обоих типов ампул сохраняется характерная форма осевого распределения с максимумом в центральной части активной зоны и снижением к ее границам.

На рисунке 8 показано высотное распределение среднего удельного энерговыделения для топлива реакторов ВВЭР, APR и HPR, размещенных в облучательных устройствах в активной зоне реактора ИГР. Для всех рассмотренных вариантов характерна типичная для тепловых реакторов косинусоидальная форма распределения с максимумом в центральной части активной зоны и снижением энерговыделения к ее границам. Наибольшие значения удельного энерговыделения наблюдаются для твэлов APR и ВВЭР, при этом кривые имеют близкий характер по всей высоте топлива.



а) ОУ ID-M б) ОУ WF

Рисунок 8. Распределение среднего удельного энерговыделения в твэлах, размещенных в облучательных устройствах ID-M и WF

Более низкий уровень удельного энерговыделения в реакторе HPR-1000 по сравнению с ВВЭР-1000 и APR-1400 обусловлен совокупностью нейтронно-физических и конструктивных факторов. Основным из них является более низкое обогащение топлива по ^{235}U (3,1%), что приводит к уменьшению скорости делений и снижению энерговыделения при прочих равных условиях.

Дополнительно влияние оказывает геометрия активной зоны. Отсутствие центрального отверстия в топливной таблетке при меньшем обогащении также снижает удельную плотность делений в объеме топлива. Также, квадратная форма чехла ТВС по сравнению с шестиугольной компоновкой ВВЭР-1000 сопровождается увеличением нейтронных утечек, что особенно проявляется в периферийных частях активной зоны.

3 Валидация

Валидация разработанных моделей проводилась путем сопоставления распределений средней удельной мощности в твэлах, рассчитанных для различных условий их размещения: в активных зонах энергетических реакторов типа ВВЭР-1000, APR-1400 и HPR-1000, а также в облучательных устройствах ID-M и WF, испытываемых в исследовательском реакторе ИГР.

На рисунке 9 представлено рассчитанное аксиальное распределение удельной мощности в твэле, размещенном непосредственно в активной зоне реактора ВВЭР-1000. Характер распределения соответствует типичному для тепловых реакторов профилю: наблюдается максимум в центральной части активной зоны и снижение энерговыделения к периферийным областям по высоте, что обусловлено утечками нейтронов и неравномерностью нейтронного потока.

На рисунке 9 приведены результаты расчета распределения удельной мощности в твэлах, размещенных в облучательных устройствах ID-M и WF в активной зоне реактора ИГР. Полученные зависимости демонстрируют схожий характер изменения энерговыделения по высоте, однако имеют более сглаженный профиль, что связано с особенностями нейтронного спектра, геометрии ампул и условий облучения. Более равномерное распределение мощности может приводить к снижению локальных максимумов энерговыделения по сравнению с условиями эксплуатации энергетических реакторов, что следует учитывать при интерпретации результатов внутриреакторных испытаний топлива. При этом сохранение общего характера аксиального распределения мощности подтверждает возможность использования разработанных экспериментальных устройств для моделирования условий облучения топлива энергетических реакторов.

Сопоставление результатов показало, что уровни удельной мощности в ампульных устройствах реактора ИГР являются сопоставимыми с расчетными значениями для реактора ВВЭР-1000 при соответствующем выборе режимов облучения. В частности, для одностенной ампулы WF сопоставимость достигается при мощности реактора ИГР 45 МВт и длительности облучения 116 с, а для двустенной ампулы ID-M – при мощности 25 МВт и длительности облучения 208 с.

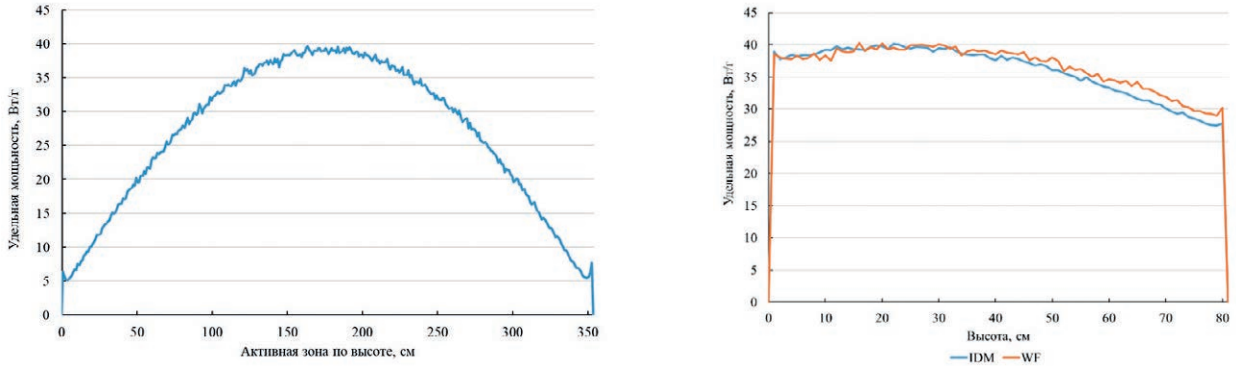


Рисунок 9. Высотное распределение средней удельной мощности в твэлах, размещенных в составе модели реактора ВВЭР-1000 (слева) и ОУ в реакторе ИГР (справа)

На рисунке 10 представлены аналогичные результаты для реактора APR-1400 и соответствующих конфигураций ОУ. Сопоставление показывает, что уровни удельной мощности в ОУ ИГР согласуются с расчетными значениями для APR-1400 при мощности реактора 37 МВт и длительности облучения 141 с (одностенное ОУ), а также при мощности 21 МВт и длительности облучения 260 с (двустенное ОУ).

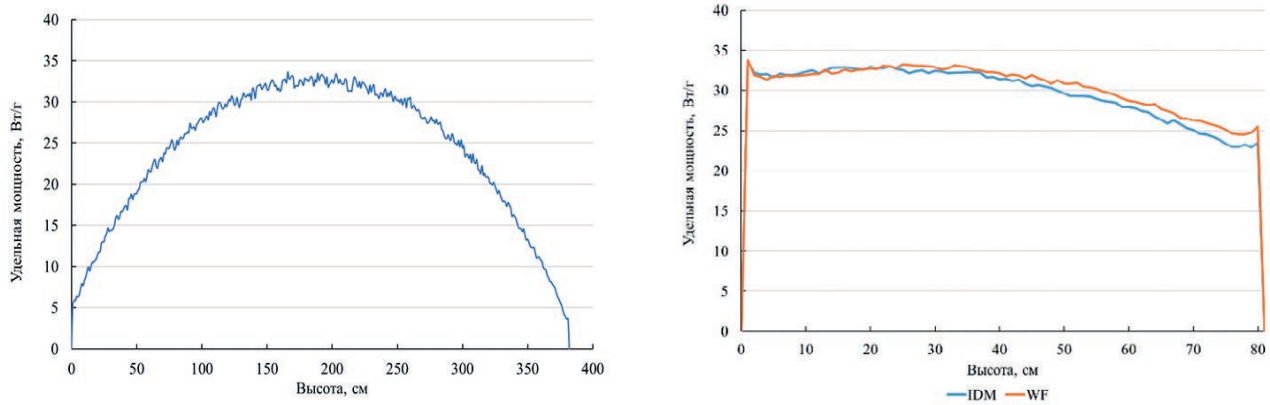


Рисунок 10. Высотное распределение средней удельной мощности в твэлах, размещенных в составе модели реактора APR-1400 (слева) и ОУ в реакторе ИГР (справа)

На рисунке 11 приведены результаты для реактора HPR-1000. В данном случае сопоставимость уровней удельной мощности достигается при мощности реактора ИГР 58 МВт и длительности облучения 90 с для одностенного ОУ, а также при мощности 32 МВт и длительности облучения 163 с для двустенного ОУ.

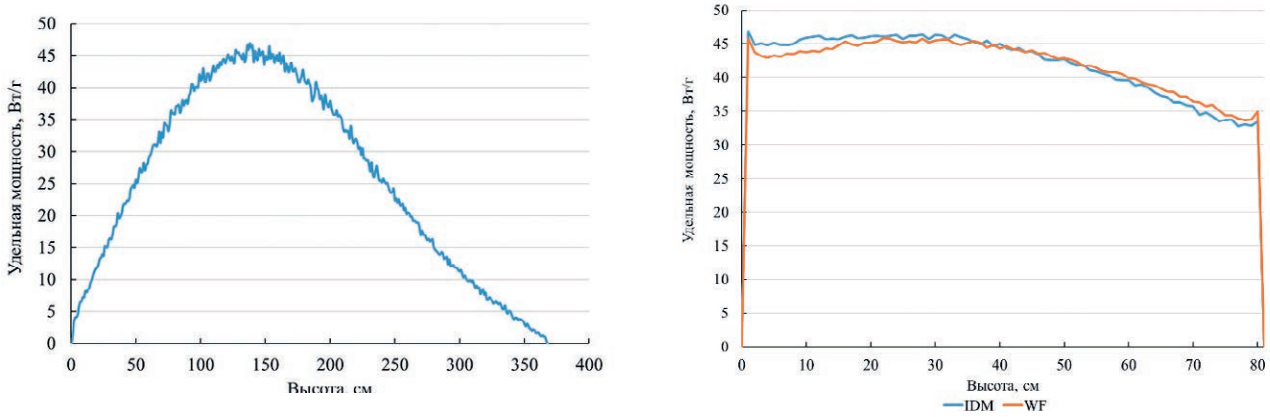


Рисунок 11. Высотное распределение средней удельной мощности в твэлах, размещенных в составе модели реактора HPR-1000 (слева) и ОУ в реакторе ИГР (справа)

Полученные результаты свидетельствуют о корректности построенной нейтронно-физической модели и подтверждают возможность воспроизведения уровней энерговыделения, характерных для реакторов, в экспериментальных условиях реактора ИГР.

Выводы

В рамках данной работы выполнен расчет нейтронно-физических характеристик облучательных устройств ID-M и WF с твэлами реакторов энергетического типа, размещенных в центральном экспериментальном канале реактора ИГР. Проведенное моделирование позволило получить распределения удельного и среднего удельного энерговыделения по высоте твэлов и по сечению топливной сборки, что является ключевым параметром для оценки тепловых нагрузок и обоснования безопасности проводимых экспериментов.

Анализ результатов показал, что во всех рассмотренных расчетных вариантах центральный твэл характеризуется минимальным удельным энерговыделением по сравнению с периферийными твэлами. Это обусловлено особенностями пространственного распределения тепловых нейтронов в топливной сборке. Плотность потока тепловых нейтронов в центральной области оказывается ниже, чем в периферийных твэлах, что объясняется внутренним блок-эффектом.

Сравнительный анализ расчетов для одностенного облучательного устройства WF и двустенного облучательного устройства ID-M показал, что конструктивные особенности ОУ оказывают влияние на абсолютные значения энерговыделения и характеристики нейтронного поля, однако не приводят к изменению общего характера пространственных распределений. Полученные результаты подтверждают корректность разработанных нейтронно-физических моделей и могут быть использованы в качестве исходных данных для последующего расчетного обоснования тепловых режимов и безопасности внутриреакторных облучательных испытаний ядерного топлива.

В дальнейшем планируется исследовать возможность применения циркония в качестве материала облучательных устройств, который теоретически должен улучшить нейтронно-физические параметры облучаемого топлива энергетических реакторов.

Работа была выполнена при поддержке Комитета науки МНВО РК в рамках грантового проекта «Расчетное обоснование режимов внутриреакторных испытаний перспективного ядерного топлива» (ИРН AP26199863).

Литература / References:

1. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов: а. с. No 2738 от 27.12.16 Республика Казахстан / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.
2. MCNP User's Manual Code Version 6.2. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-17-29981. Los Alamos, NM, USA. October 2017.
3. Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А., Мухамедов Н.Е. Расчет диаграммы мощности экспериментального устройства с конвертором нейтронов. Вестник НЯЦ РК. 2020;(4):82-87. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-4-82-87
4. Seken, D.M.; Surayev, A.S.; Irkimbekov, R.A.; Vityuk, G.A.; Mukhamedov, N.Y.; Zhanbolatov, O.M.; and Vityuk, V.A. (2025) «Development Of A Neutronic Model Of The Wwer-1000 Reactor Facility Core,» Eurasian Journal of Physics and Functional Materials: Vol. 9: No. 2, Article 6. DOI: https://doi.org/10.69912/2616-8537.1248
5. Секен, Д., Сураев, А., Иркимбеков, Р., Жанболатов, О., Витюк, Г., Мухамедов, Н., Витюк, В. (2025). Расчет выгорания топлива в реакторной установке ВВЭР-1000. Recent Contributions to Physics, 94(3), 32–42. https://doi.org/10.26577/RCPh20259434
6. Какимова Г.Г., Иркимбеков Р.А., Сураев А.С. Разработка и верификация нейтронно-физической модели реактора APR-1400. Вестник НЯЦ РК. 2025;(4):5-11. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-5-11
7. UK HPR1000 GDA. Pre-Construction Safety Report. Chapter 5: Reactor Core. HPRGDA-PCSR-0005. Rev. 001. June 2020. RWM Reference LL/35516003. URL: UK HPR1000 Reactor Core Report (дата обращения: 05.05.2026).
8. 8 ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. Nuclear Data Sheets (2006).

ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ РЕАКТОРЛАР ОТЫНЫН ПАЙДАЛАНУ ЖАҒДАЙЛАРЫН ИГР РЕАКТОРЫНЫҢ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНДА ҚАЙТА ЖАҢҒЫРТУ

Д. М. Секен[1,2*], А. С. Сураев[1,2], О. М. Жанболатов[1], Р. А. Иркимбеков[1], Н. Е. Мухамедов[1,2]

[1]Атом энергиясы институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2]Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан

**Байланыс үшін e-mail: seken@nnc.kz*

Жұмыста ИГР реакторының орталық эксперименттік каналында орналастырылатын ВВЭР-1000, APR-1400 және HPR-1000 реакторларының отыны бар ID-M және WF сәулелендіру құрылғыларын есептік нейтрондық-физикалық модельдеу нәтижелері ұсынылған. MCNP бағдарламалық кешенін пайдалану арқылы уран-су қатынасының, твэлдердегі меншікті энергия бөлінуінің таралуының және отынның белсенді бөлігінің биіктігі бойынша орташа меншікті қуаттың есептеулері орындалды. Бір қабырғалы және екі қабырғалы сәулелендіру құрылғыларының конструкциялық ерекшеліктерінің отынның нейтрондық-физикалық сипаттамаларына әсеріне талдау жүргізілді. ID-M сәулелендіру құрылғысын қолдану WF құрылғысымен салыстырғанда орташа меншікті энергия бөліну деңгейінің шамамен 45%-ға төмендеуіне әкелетіні анықталды. Сәулелендіру құрылғыларының есептік сипаттамаларын ВВЭР-1000, APR-1400 және HPR-1000 реакторларының параметрлерімен салыстыру ИГР реакторында энергетикалық реакторлар отынын пайдалануға тән энергия бөліну деңгейлерін кайта жаңғырту мүмкіндігін көрсетті. Алынған нәтижелер келешектегі ядролық отынды реакторішілік сынақтарға дайындау, жылу режимдерін бағалау және эксперименттік зерттеулердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *нейтрондық-физикалық модельдеу, сәулелендіру құрылғылары, ИГР реакторы, ВВЭР-1000, APR-1400, HPR-1000, энергия бөліну, меншікті қуат, MCNP.*

REPRODUCTION OF OPERATING CONDITIONS OF POWER REACTOR FUEL IN EXPERIMENTAL DEVICES OF THE IGR REACTOR

D.M. Seken[1,2*], A.S. Surayev[1,2], O.M. Zhanbolatov[1], R.A. Irkimbekov[1], N.E. Mukhamedov[1,2]

[1]Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2]Shakarim University, Semey, Kazakhstan

**E-mail for contacts: seken@nnc.kz*

The paper presents the results of computational neutron-physical modeling of irradiation devices ID-M and WF containing fuel from VVER-1000, APR-1400, and HPR-1000 reactors and placed within the central experimental channel of the IGR reactor. Using the MCNP code system, calculations of the uranium-water ratio, specific power generation distributions in fuel rods, and average specific power along the active fuel height were performed. An analysis of the influence of the design features of single-wall and double-wall irradiation devices on the neutron-physical characteristics of the fuel was carried out. It was established that the use of the double-wall ID-M irradiation device results in approximately a 45% reduction in the average specific power generation level compared to the single-wall WF device. Comparison of the calculated characteristics of the irradiation devices with the corresponding parameters of VVER-1000, APR-1400, and HPR-1000 reactors demonstrated the possibility of reproducing in the IGR reactor power generation levels characteristic of fuel operation in commercial power reactors. The obtained results can be applied to the preparation of in-reactor testing of advanced nuclear fuels, thermal regime assessment, and safety assurance of experimental investigations.

Keywords: *neutron-physical modeling, irradiation devices, IGR reactor, VVER-1000, APR-1400, HPR-1000, power generation, specific power, MCNP.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-113-121
UDC 621.039.619; 621.384.8

RESULTS OF THE FIRST EXPERIMENTAL TESTS OF THE RF PLASMA HEATING SYSTEM OF THE KTM TOKAMAK WITH AN EQUIVALENT PLASMA LOAD

K. Zhenis[1]*, B.Zh. Chektybayev[1], A.V. Gulkin[2], A.T. Kusainov[1], V.I. Savkin[1], S.V. Kotov[1], D.A. Olkhovik[1], Ye.A. Kashikbayev[1], S.A. Mukeneva[2], A.M. Gubin[3], D.V. Getman[3], V.M. Bayev[3]

[1] Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2] RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan
[3] D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, Saint Petersburg, Russia

** E-mail for contacts: kulan@nnc.kz*

This paper presents the results of the first experimental tests of the ion cyclotron radio-frequency (RF) plasma heating system of the KTM tokamak with an equivalent plasma load. Measurements of the operating parameters of the RF generator and the antenna-feeder system were carried out under conditions approximating plasma operation. The generator circuits were tuned and matched to the load, and the generation characteristics as well as the conditions for stable RF power transmission to the load were investigated. Stable operating regimes of the system and the conditions ensuring stable RF power generation were determined. The test results confirm the functionality of the main components of the RF heating system and demonstrate the possibility of further testing with plasma in the KTM tokamak.

***Keywords**: KTM tokamak, RF plasma heating, ion cyclotron heating, antenna module, equivalent plasma load.*

Introduction

One of the key areas of research in controlled thermonuclear fusion is the study of interactions between plasma radiation and the materials of the tokamak first wall. To support such investigations, the Kazakhstan Material Testing Tokamak (KTM) was established in the Republic of Kazakhstan [1–3]. The facility is intended for studying the behavior of materials under exposure to intense heat fluxes.

The KTM tokamak is equipped with an auxiliary plasma heating system operating in the ion cyclotron resonance frequency range (ICRH) [6]. The ICRH system comprises RF generators, antenna modules (AMs), and an antenna-feeder transmission line for delivering RF power to the plasma. High-power GU-98AM triodes are used as RF power sources [4]. At the nominal RF power level of 8 MW, the discharge duration and divertor heat-flux density are expected to reach 5 s and 20 MW/m^2, respectively, for plasma currents of 750 kA and plasma densities of 5×10^{19} m^{-3}.

Direct operation of the RF heating system with plasma without preliminary tuning and testing may result in abnormal operating conditions and equipment damage. Therefore, prior to plasma-heating experiments, a series of commissioning and verification procedures must be carried out [5,6]. System preparation includes testing the RF generators using equivalent loads.

Previous studies on the KTM tokamak involved testing the RF generator with an equivalent active load (EAL), which enabled preliminary adjustment of the RF power generation and transmission system [7]. The next stage of system preparation requires testing with an equivalent plasma load (EPL), simulating RF power absorption by the plasma and verifying the performance of the antenna-feeder transmission line under conditions close to those expected during actual operation. Accordingly, the objective of the present work was to prepare and perform the first tests of the RF generator with an equivalent plasma load. To achieve this objective, the following tasks were addressed: confirming stable operation of the RF generator in push-pull mode at a frequency of approximately 13 MHz and verifying proper phase balancing between the generator branches; investigating matching conditions and the need for additional tuning of resonant circuits and phase correction when transitioning from an equivalent active load to an equivalent plasma load; experimentally verifying stable operation with an equivalent plasma load under conditions approximating real plasma interaction; and determining the range of parameters that ensure stable RF generation and efficient RF power transfer from the antenna to the load.

This paper reports the first experimental tests of the KTM tokamak RF plasma heating system with an equivalent plasma load. The operating characteristics of the RF generator and antenna-feeder transmission line are examined, and the parameters ensuring stable RF generation and efficient power transfer to the load are identified.

KTM Tokamak RF Heating System

The RF heating system of the KTM tokamak is designed for auxiliary plasma heating through the excitation of ion cyclotron waves. The system provides RF power coupling to the plasma at a frequency of 13±0.5 MHz [8].

The system consists of four identical RF generator modules with a power output of up to 2 MW each, anten-

na modules, and an antenna-feeder transmission line. The total design power of the system is 8 MW with a pulse duration of up to 5 s.

High-power GU-98AM triodes operating in a self-oscillating mode are used as RF power sources. Power is transmitted from the generators to the antenna modules via quarter-wave coaxial transmission lines.

The antenna module (AM) is designed to excite fast magnetosonic waves in the ion cyclotron frequency range, enabling energy transfer to the plasma. The module consists of a symmetric resonant circuit with antiphase excitation of the radiating loop.

The operating frequency of the antenna module is 13±0.5 MHz. The design allows adjustment of the resonant frequency without breaking the vacuum. Figure 1 shows the antenna-module loop equipped with graphite limiters and a boron nitride protective shield.

Experimental Setup and Methods for RF Generator Testing with an Equivalent Plasma Load

Testing of the RF heating system with an EPL represents the next stage of bench testing following experiments with an EAL [7]. Unlike the EAL, the EPL is intended to simulate the complex input impedance of the plasma, including its reactive component, as well as RF-power absorption conditions associated with wave-plasma interaction during RF power transfer from the antenna to the plasma.

The EPL tests are intended to investigate the operating characteristics of the RF generator and the antenna-feeder transmission line under conditions close to those encountered during plasma operation, including assessment of generation stability, impedance matching, and RF power transfer to the load.

The EPL is a resonant system designed to simulate the plasma impedance in the ion cyclotron resonance frequency range. Unlike an active load, the EPL possesses a pronounced reactive component that determines the matching conditions of the system.

Based on calculations of the geometry and volume of the RF-power absorber, an equivalent plasma load was fabricated for the auxiliary RF heating system of the KTM tokamak.

Figure 2 shows the calculated RF-power absorption coefficient as a function of the conductivity of the working medium. The calculations showed that RF-power absorption approaching 100% can be achieved when the conductivity of the solution is approximately (1…2) × 10^{-4} S/m.

Figure 3 shows the overall view of the equivalent plasma load and the antenna-module profile made of polymethyl methacrylate (PMMA).

The equivalent plasma load is designed as a rectangular resonator made of 12Cr18Ni10Ti stainless steel, with an end insert made of PMMAthat forms an internal profile matched to the geometry of the AM. The internal volume of the EPL is filled with distilled water, which acts as an RF power absorber.

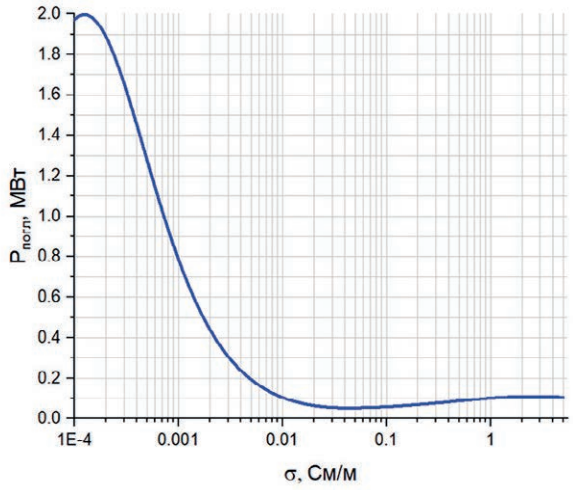
The resonator dimensions (Lx = 1.85 m, Ly = 1.25 m, Lz = 1.84 m) were selected to provide RF-power absorption of 1.94 MW for a solution conductivity of 2 × 10^{-4} S/m.



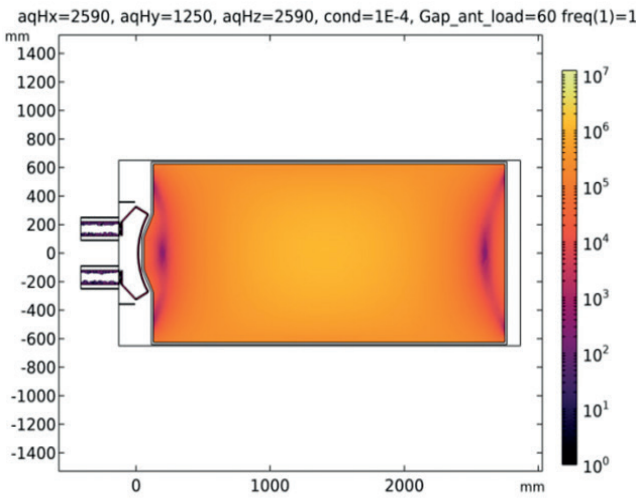
a) AM

b) AM equipped with limiters and a boron nitride shield

Figure 1. AM of the KTM tokamak RF heating system



a) Dependence of the absorption coefficient on distilled-water conductivity



b) Distribution of absorbed power density (W/m³) in the EPL under standing-wave excitation

Figure 2. Calculated absorption coefficient and absorbed power-density distribution in the EPL



a) Overall view of the EPL



b) PMMA profile of the AM in the EPL

Figure 3. Equivalent Plasma Load

To monitor thermal conditions and evaluate absorbed energy, the design includes provisions for the installation of temperature sensors.

The test procedure includes assembling the RF generator and antenna-feeder transmission line in the same configuration as that used for plasma heating in the KTM tokamak. However, instead of being installed on the tokamak vacuum vessel, the AM is connected to the EPL.

Since reducing the generator anode voltage decreases the output power while having little effect on other key parameters, such as the operating frequency, testing with the EPL can be carried out under simplified conditions. This makes it possible to perform the experiments without installing the AM inside the tokamak vacuum chamber.

The dielectric properties of the PMMA profile permit operation at voltages of up to 10…15 kV. Therefore, the EPL experiments were conducted at a reduced anode voltage not exceeding 10 kV.

Figure 4 shows a schematic diagram of the test facility, including the RF generator, antenna-feeder transmission line, AM, and EPL.

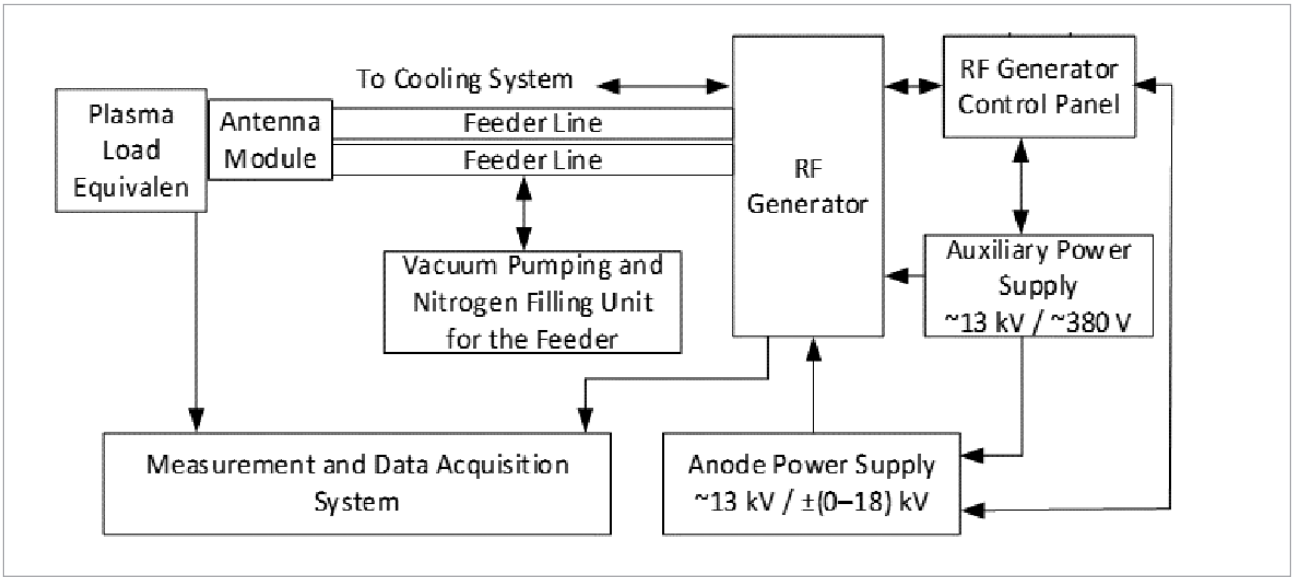


Figure 4. Block diagram of RF generator, transmission line (feeder), and AM testing using an EPL

The tests were carried out using the standard RF generator circuit in the push-pull mode shown in Figure 5. Prior to testing, preliminary tuning of the oscillation frequencies of both generator branches and matching of the resonant-circuit parameters were performed.

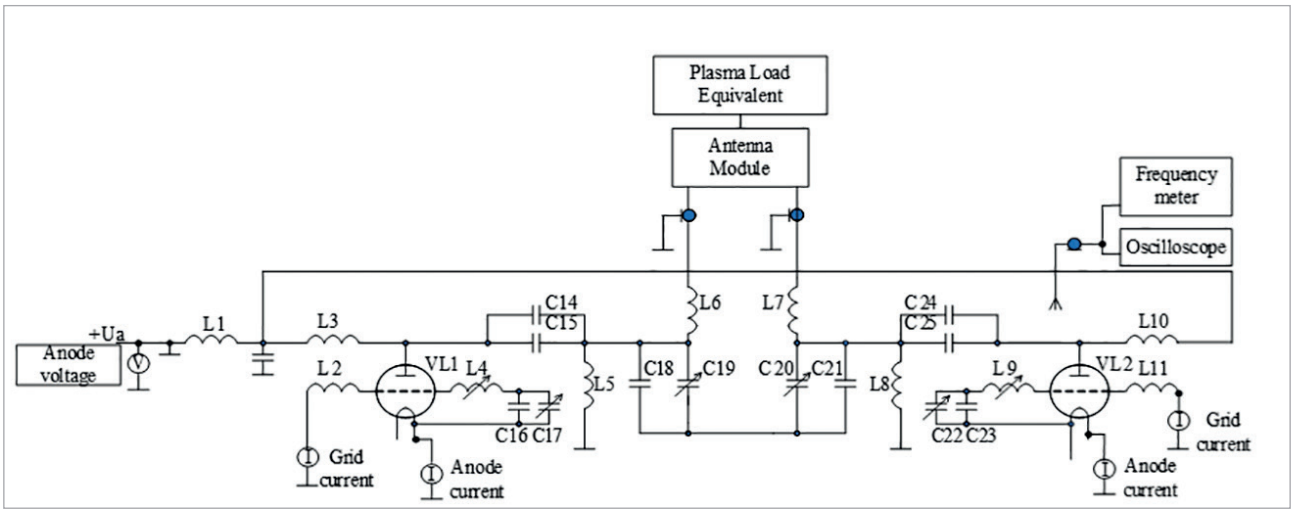
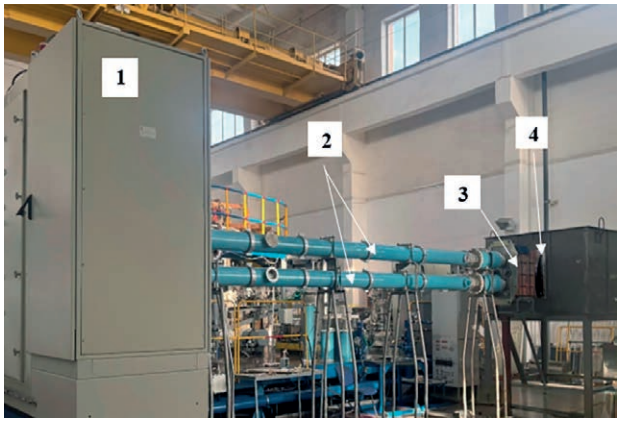


Figure 5. Circuit diagram of the RF generator test setup with the EPL in *push*-pull mode

As part of the preparation, the test facility was assembled by connecting the EPL, AM, feeder line, and RF generator. A general view of the assembled RF system is shown in Figure 6.



1 – RF generator; 2 – feeder line; 3 – AM; 4 – EPL

Figure 6. EPL assembly with the standard feeder line and antenna module

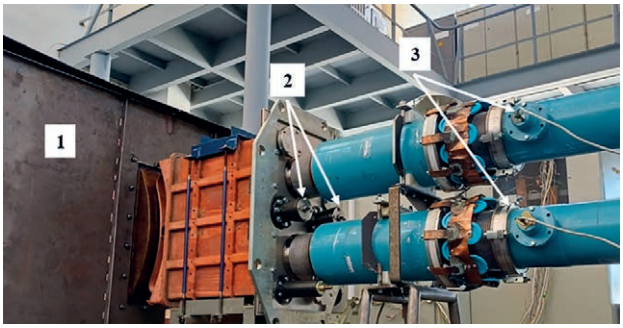
The measurements were carried out using a digital oscilloscope Tektronix THS3024 (bandwidth 200 MHz, real-time sampling rate up to 5 GS/s, four isolated channels, vertical resolution of 8 bits, input impedance of 1 MΩ, and maximum input voltage up to 300 V CAT II) for monitoring voltage waveforms in the RF circuits. The operating frequency was monitored using a frequency counter VC3165 (measurement range up to 1.5 GHz, frequency resolution of 10 Hz, and time base stability of $\pm 2\times10^{-6}$) for precise determination of the generator frequency.

The data acquisition system provided real-time recording of the main parameters, including voltage, current, and phase relationships between the generator branches. The measurement uncertainty did not exceed ±(0.01…0.05)% for frequency and ±5% for voltage and current. All measuring instruments were calibrated prior to the experiments in accordance with standard procedures.

Testing and Analysis of the RF Heating System Performance on the EPL

The tests were conducted with the RF generator operating in push-pull mode using two GU-98AM power triodes. The system was operated in short-pulse mode with pulse durations of approximately 5 s, while the anode voltage was increased stepwise from ~4 kV to ~10 kV.

Preliminary tuning of the RF generator and the antenna module (AM) to a frequency of 13 MHz was performed based on calculated parameters and the results of previous experiments using an equivalent active load (EAL). Figure 7 shows the antenna module and the locations of the RF-voltage probes along the feeder line.

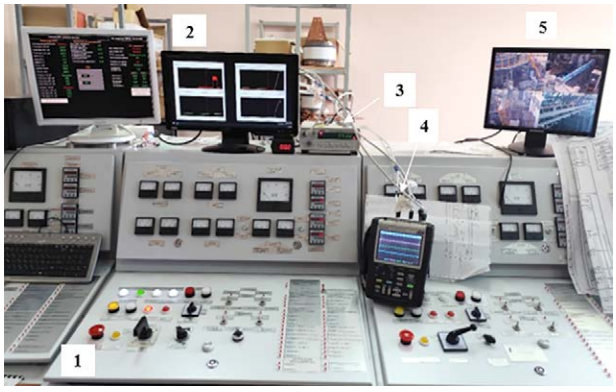


1 – EPL; 2 – AM and vacuum-capacitor drive mechanism; 3 – RF voltage probes

Figure 7. Frequency tuning of the AM and locations of RF voltage probes at the ends of the feeder lines

The operating modes of the RF generator were monitored using standard control panel instruments, including anode voltage, anode current, filament current, and grid current of the generator tubes. In addition, an oscilloscope was used to monitor waveform shape, amplitude, and phase relationship of the signals from the RF voltage probes at the ends of the feeder line, while the generation frequency was measured using a frequency counter.

Figure 8 shows the control panel of the RF generator. During the tests, the parameters of the RF-generator resonant circuits and load-matching elements were adjusted. Tuning was performed by adjusting the capacitances of the anode circuits (C19, C20) and grid circuits (C17, C22), as well as by selecting appropriate values of the grid-circuit inductors L4 and L9 in order to achieve stable oscillation and minimize mismatch between the RF generator and the EPL.



1 – control panel; 2 – data acquisition system; 3 – frequency counter; 4 – oscilloscope; 5 – video surveillance system

Figure 8. RF generator control panel

The preliminary tuning of the RF generator was performed based on parameters obtained earlier during tests on the EAL [7]. These settings ensured stable push-pull operation and were used as initial settings for testing with the EPL.

During the initial stage of testing with the EPL, asymmetry was observed in the signals from the CH1 and CH2 RF voltage probes on the feeder lines, accompanied by increased noise levels and signal distortion, as shown in Figure 9. This behavior is attributed to the insufficient matching of the system when operating on the EPL, since the tuning parameters obtained with the EAL did not fully ensure the optimal matching under EPL conditions.

The transition from the EAL to the EPL was accompanied by changes in the matching conditions of the antenna-feeder line due to differences in the electrical properties of the loads. Unlike the EAL, which presents a predominantly resistive load, the EPL has a significant reactive impedance component, leading to changes in the system's resonant operating regime and redistribution of RF voltages and currents in the resonant circuits.

To eliminate the observed asymmetry, additional tuning of the resonant circuits and phase balancing of the RF generator branches were performed. For this purpose, the following modifications were introduced into the triode anode power supply circuits:

– the anode supply decoupling chokes L3 and L10 were divided into sections corresponding to 1/4 and 3/4 of the total inductance;

– an additional capacitor with a capacitance of approximately 1.4 nF was connected at the tap point (three K15U-1A capacitors, 15 kV, 470 pF, 40 kvar, connected in parallel);

– the second terminal of the capacitor was connected to ground (Figures 10 and 11).

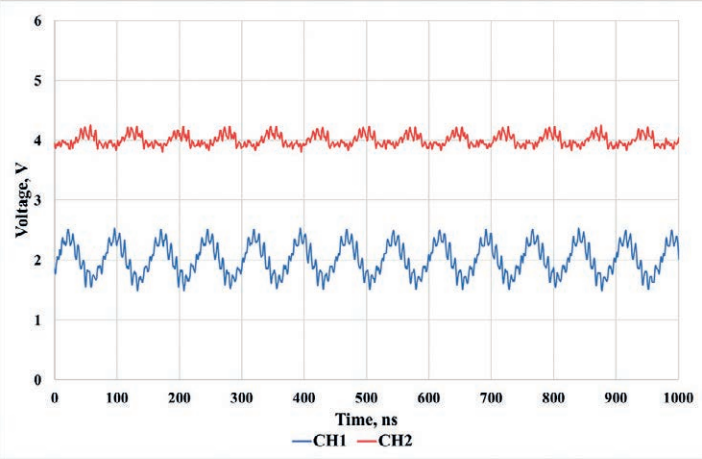
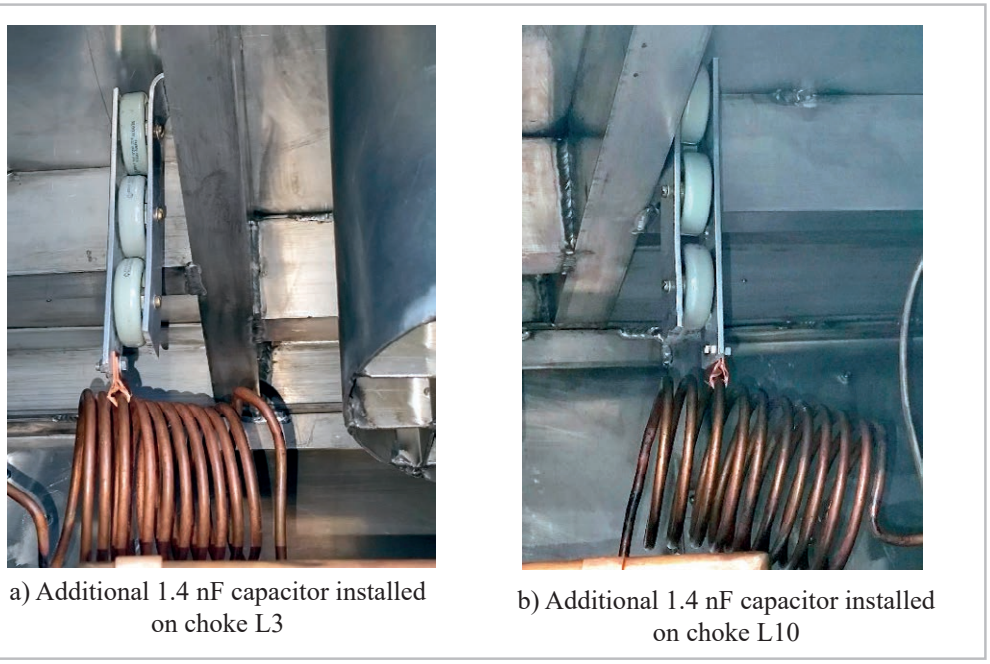


Figure 9. Oscillograms of the signals from RF-voltage probes installed at the ends of the feeder lines



a) Additional 1.4 nF capacitor installed on choke L3

b) Additional 1.4 nF capacitor installed on choke L10

Figure 10. Installation of additional 1.4 nF capacitors

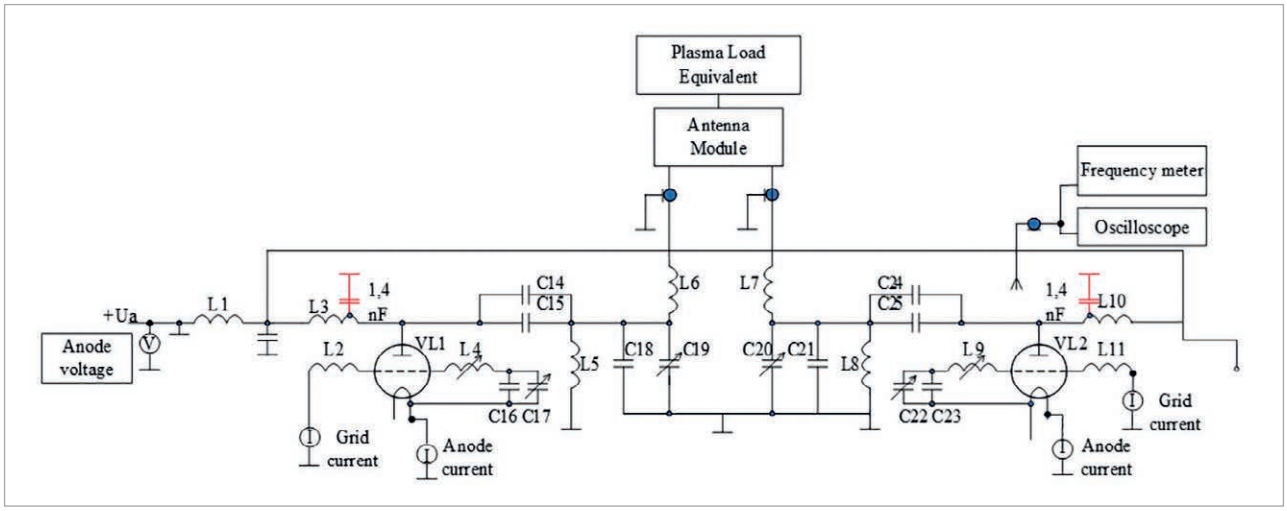


Figure 11. Schematic diagram of the phase-balancing circuit of the RF generator branches with additional 1.4 nF capacitors installed

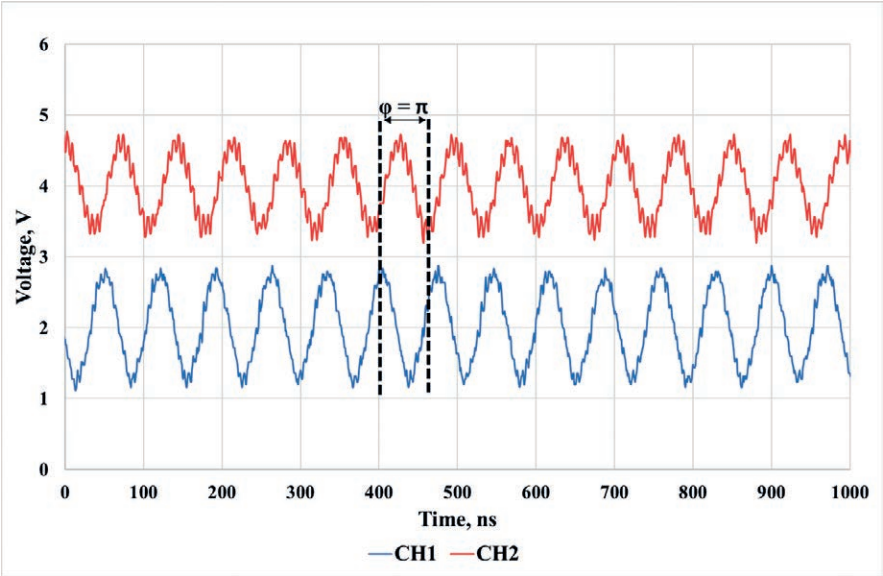


Figure 12. Oscillograms of the signals from RF-voltage probes installed at the ends of the feeder lines

The addition of these components provided phase balancing of the generator arms and improved the stability of the push-pull operating mode. After further tuning of the resonant circuits, stable sinusoidal signals with an oscillation frequency of approximately 13 MHz were obtained. Oscillograms of the CH1 and CH2 signals are shown in Figure 12.

The CH1 and CH2 signals are in antiphase, which corresponds to the calculated push-pull operating mode of the RF generator. The obtained results confirm proper balancing of the RF-generator branches, matching of the resonant-circuit parameters, and stable RF-power transfer to the EPL.

The system was tuned within the following ranges:

– anode capacitance, Ca = 157…171 pF;

– grid capacitance, Cc = 587…621 pF;

– grid inductance, L = 0.28 μH.

During the tests, the following conditions were achieved:

– stable operation of the RF generator in push-pull mode;

– stable generation frequency at approximately 13 MHz;

– absence of oscillation interruptions and significant parasitic effects;

– proper operation of the antenna-feeder transmission line and the measurement system.

The RF-generator tuning parameters corresponding to stable operation with the EPL are presented in Table 1.

Table 1. RF-generator tuning parameters for stable operation on the EPL

No.	U Anode (kV)	F (MHz)	Anode circuit capacitance Ca (pF), tubes No. 1 and 2	Grid circuit capacitance Cg (pF), tubes No. 1 and 2	Anode current Ia (A), tubes No. 1 and 2	Grid current Ig (A), tubes No. 1 and 2
1	4	13.1	157/157	621/587	50/50	6/6
2	5	13.1	171/171	621/621	60/55	6/6
3	4,5	13.1	157/157	621/621	50/50	6/6

Based on the test results, the ranges of parameters providing stable oscillation and proper matching of the RF system with the EPL were identified. The main operating parameters of the RF generator during operation with the EPL are presented in Table 2.

Table 2. RF-generator operating parameters with the EPL

Symbol	Description	Unit	Value
If	Filament current	A	1000 ± 100
Ea	Anode voltage	kV	9
Ig	Grid current	A	6-8
Ia	Anode current	A	50-60
f	Operating frequency	MHz	13.0 ± 0.5
t	Pulse duration	s	up to 5

Thus, the EPL test results confirmed the proper operation of the RF generator, the correct tuning of the antenna-feeder transmission line, and the ability to achieve stable oscillation at the design frequency of approximately 13 MHz in push-pull mode. These results indicate that the system is ready for further testing at higher power levels and for the subsequent transition to plasma experiments.

It should be noted that the experiments were conducted at a reduced anode voltage (not exceeding 10 kV) and in the absence of real plasma. Although the equivalent plasma load (EPL) reproduces the complex impedance of the plasma, including its reactive component, it does not fully replicate all plasma-related effects, such as nonlinear wave–plasma interactions and dynamic variations of plasma parameters.

Conclusion

This paper presents the results of the first experimental studies of the RF generator of the ion cyclotron resonance heating (ICRH) system of the KTM tokamak using an EPL.

During the tests, stable operation of the RF generator in push-pull mode at a frequency of approximately 13 MHz was achieved at an anode current of 50…60 A and with a pulse duration of up to 5 s. Proper phase balancing of the generator branches was also maintained at a reduced anode voltage level (up to 10 kV).

It was established that the transition from the equivalent active load to the equivalent plasma load changes the matching conditions of the antenna-feeder transmission line and requires additional tuning of the resonant circuits and phase correction.

For the first time, stable operation of the KTM tokamak RF heating system with an equivalent plasma load has been experimentally demonstrated, enabling reproduction of conditions close to actual plasma interaction. The parameter ranges providing stable oscillation and efficient RF-power transfer to the load have been determined.

The obtained results confirm the operability of the RF system under plasma-relevant conditions and its readiness for further high-power testing and subsequent transition to plasma experiments on the KTM tokamak.

Based on the obtained results and the determined RF-generator tuning parameters, subsequent plasma-heating experiments on the KTM tokamak will be carried out.

The work was carried out within the framework of the scientific and technical program IRN BR23891779, "Scientific and Technical Support of Experimental Research at the Kazakhstan Materials Science KTM Tokamak," with program-targeted funding from the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy.

The authors express their sincere gratitude to the personnel of the KTM facility and the staff of the Fusion Research Department of the IAE NNC for their assistance in carrying out this work.

References:

1. B. Chektybayev, I. Tazhibayeva, E. Batyrbekov, E. Kashykbayev, D. Olkhovik, D. Zarva, S. Zhunisbek, A. Duisen, A. Zhaksybayeva, A. Lee, V. Pavlov, V. Dokuka, R. Khayrutdinov, Improvement of plasma discharge performance at KTM tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2024. – Vol. 208. – Art. no. 114684. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114684
2. B. Chektybayev, S. Zhunisbek, I. Tazhibayeva, D. Olkhovik, E. Batyrbekov, D. Zarva, A. Korovikov, A. Lee, V. Pavlov, E. Kashikbayev, A. Zhaksybayeva, A. Duisen Overview of the first experiments at KTM tokamak to obtain plasma discharges // Fusion Engineering and Design. – 2023. – Vol. 194. – Art. no. 113847. ISSN 0920-3796, https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113847
3. B. Chektybayev, A. Sadykov, E. Batyrbekov, A. Lee, V. Pavlov, Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber // Fusion Engineering and Design. – 2021. – Vol. 163. – Art. no. 112167. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112167
4. A.V. Gulkin, et al., Optimization and preparation for the start-up of the plasma ICR heating system at the KTM tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2024. – Vol. 206. – Art. no. 114596. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114596

5. A.N. Satibekov, et al., Research of the frequency response parameters of the antenna module circuit of the high-frequency plasma heating system of the KTM tokamak // Vestnik. Seriya Fizicheskaya. – 2022. – Vol. 82. – No. 3. https://doi.org/10.26577/RCPh.2022.v82.i3.09
6. M.J. Mantsinen et al. Experiments in high-performance JET plasmas in preparation of second harmonic ICRF heating of tritium in ITER // Nucl. Fusion. – 2023. – Vol. 63. – No. 11. – Art. no. 112015. https://doi.org/10.1088/1741-4326/aceb08
7. A.V. Gulkin, K. Zhenis, B.Zh. Chektybayev, A.T. Kusainov, V.I. Savkin, S.V. Kotov, D.B. Zarva, S.A. Mukeneva, E.A. Kashikbayev, D.A. Olkhovik, A.M. Gubin, D.V. Getman, Testing of the RF generator of the ICR plasma heating system of the KTM tokamak on an active load equivalent // Vestnik NNC RK. – 2025. – No. 3 (103). – P. 183–191. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-183-191
8. Azizov E.A., Gostev A.A., Brykov S.I., Gur'evich S.G., Ivanov V.N., Podymov A.N., Trebich V.D., Frumkin G.A., Gubin A.M., Demidov V.L., Seredenko E.V., Engel'ko V.I., Shapovalov G.V. RF system for additional plasma heating of the KTM tokamak // Induction Heating. –2011. – No. 1(15). – P. 28–31.

КТМ ТОКАМАГЫ ПЛАЗМАСЫН ЖОҒАРЫ ЖИІЛІКТІ ҚЫЗДЫРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ПЛАЗМАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕ БАЛАМАСЫНДАҒЫ АЛҒАШҚЫ СЫНАҚ НӘТИЖЕЛЕРІ

К. Женіс[1]*, Б. Ж. Чектыбаев[1], А. В. Гулькин[2], А. Т. Кусаинов[1], В. И. Савкин[1], С. В. Котов[1], Д. А. Ольховик[1], Е. А. Кашикбаев[1], С. А. Мукенова[2], А. М. Губин[3], Д. В. Гетман[3], В. М. Баев[3]

[1] ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2] Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан
[3] Д. В. Ефремов атындағы электрфизикалық аппаратура бойынша ғылыми-зерттеу институты, Санкт-Петербург, Ресей

** Байланыс үшін e-mail: kulan@nnc.kz*

Жұмыста КТМ токамагының плазмасын жоғары жиілікті ион-циклотрондық қыздыру жүйесінің плазмалық жүктеменің эквивалентіндегі алғашқы сынақтарының нәтижелері ұсынылған. Плазмамен жұмыс істеу жағдайларына барынша жақындатылған шарттарда ЖЖ-генератор мен антенна-фидерлік трактінің жұмыс режимдеріне өлшеулер жүргізілді. Генератор тізбектері жүктememен сәйкестендіріліп, бапталды, генерация параметрлері және ЖЖ-қуатты жүктемеге тұрақты түрде жеткізу шарттары зерттелді. Жүйенің тұрақты жұмыс істеу режимдері және ЖЖ-сәулеленудің тұрақты генерациясын қамтамасыз ететін шарттар анықталды. Сынақ нәтижелері ЖЖ-қыздыру жүйесінің негізгі элементтерінің жұмысқа қабілеттілігін және КТМ токамагының плазмасында одан әрі сынақтар жүргізу мүмкіндігін растайды.

Түйін сөздер: *КТМ токамагы, плазманы ЖЖ-қыздыру, иондық-циклотрондық қыздыру, антенналық модуль, плазмалық жүктеме баламасы.*

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ВЧ-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ НА ЭКВИВАЛЕНТ ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКИ

К. Женис[1]*, Б.Ж. Чектыбаев[1], А.В. Гулькин[2], А.Т. Кусаинов[1], В.И. Савкин[1], С.В. Котов[1], Д.А. Ольховик[1], Е.А. Кашикбаев[1], С.А. Мукенова[2], А.М. Губин[3], Д.В. Гетман[3], В.М. Баев[3]

[1] Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2] РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан
[3] Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова Санкт Петербург, Россия

** E-mail для контактов: kulan@nnc.kz*

В работе представлены результаты первых испытаний системы высокочастотного ионно-циклотронного нагрева плазмы токамака КТМ на эквивалент плазменной нагрузки. Проведены измерения режимов работы ВЧ-генератора и антенно-фидерного тракта в условиях, приближенных к работе на плазму. Выполнена настройка и согласование цепей генератора с нагрузкой, исследованы параметры генерации и условия устойчивой передачи ВЧ-мощности в нагрузку. Определены режимы устойчивой работы системы и условия, обеспечивающие стабильную генерацию ВЧ-излучения. Результаты испытаний подтверждают работоспособность основных элементов системы ВЧ-нагрева и возможность дальнейшего проведения испытаний на плазму токамака КТМ.

Ключевые слова: *токамак КТМ, ВЧ-нагрев плазмы, ионно-циклотронный нагрев, модуль антенный, эквивалент плазменной нагрузки.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-122-133
УДК 539.371, 539.1.09

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КЕРАМИКЕ ZrO_2

К.М.Тынышбаева [1], А.Л.Козловский [1,2]*, И.З.Жуматаева [1]

[1]НАО Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
[2]РГП на ПХВ Институт ядерной физики АРКАЭ, Алматы, Казахстан

**E-mail для контактов: artem88sddt@mail.ru*

В ходе проведенного комплексного анализа структурных параметров, исследуемых механически активированных ZrO_2-керамик был установлен оптимальный температурный диапазон термической обработки, обеспечивающий максимальную структурную однородность, высокую степень структурного упорядочения и минимальную концентрацию остаточных механических напряжений. Анализ структурных изменений в керамиках, выполненный с использованием методов рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии позволил установить, что увеличение температуры отжига приводит к частичной релаксации механически-индуцированных напряжений и перераспределению кислородных вакансий. При этом во всем исследуемом диапазоне температуры отжига не наблюдается инициализации процессов фазовых полиморфных трансформаций, характерных для диоксида циркония в случае интенсивных механических воздействий или наличия большого количества кислородных вакансий. Анализ полученных данных показал, что при температуре отжига 1000…1100 °С в структуре керамик доминируют комплексные дефекты, связанные с наличием деформационных остаточных напряжений и областей сильного разупорядочения, возникших при механическом ударном воздействии. При повышении температуры отжига до 1200…1300 °С наблюдается равновероятное распределение дефектов в структуре, в то время как при температурах выше 1400 °С наблюдается доминирование F^+- центров и V_O – вакансий, увеличение концентрации которых связано с повышением структурного упорядочения за счет частичной релаксации дефектов и образования кислородных вакансий.

***Ключевые слова**: ZrO_2-керамики, структурное упорядочение, остаточные напряжения, деформационные искажения, вакансионные дефекты.*

Введение

Как известно, диоксид циркония является весьма востребованным функциональным и конструкционным керамическим материалом благодаря сочетанию высокой температуры плавления, химической инертности, низкой теплопроводности, высоких показателей устойчивости к коррозионным процессам и механическим воздействиям [1,2]. На сегодняшний день керамические материалы на основе диоксида циркония нашли свое применение в качестве теплозащитных покрытий газотурбинных двигателей, элементов твердооксидных топливных элементов, биомедицинских имплантатов в зубном протезировании, огнеупорных материалов, а также конструктивных элементов, предназначенных для эксплуатации в условиях воздействия высокой температуры, агрессивных сред или ионизирующего излучения [3-7]. Большой интерес к данным типам керамик обусловлен также возможностью управления его эксплуатационными характеристиками за счет целенаправленного изменения фазового состава путем полиморфных трансформаций или допирования, микроструктурных особенностей, обусловленных изменением размерных факторов, и изменением концентраций кислородных вакансий [8-11]. При этом хорошо известно, что свойства цирконийсодержащих керамик в значительной мере определяются условиями их получения и последующими процедурами термической обработки, использование которой, как правило, основано на возможности стабилизации дефектной структуры, снижения ее концентрации и инициализации процессов фазовых полиморфных трансформаций [10,11]. При этом одним из наиболее эффективных способов интенсификации процессов синтеза керамических материалов является механическая активация порошковых керамических смесей, в основе которой лежит измельчение частиц, приводящее к увеличению удельной поверхности, накоплению структурных дефектов и остаточных механических напряжений, а также к образованию большого количества кислородных вакансий в структуре [12,13]. В данном случае возникающее при механическом ударном воздействии неравновесное структурное состояние позволяет ускорить кинетику термического спекания, процессы рекристаллизации, роста зерен и формирования микроструктурных особенностей.

При этом, несмотря на большое количество экспериментальных работ [14-17], посвященных изучению свойств цирконий-содержащих керамик, механизмы структурной эволюции механически активированных керамических порошков в случае высокотемпературного воздействия и спекания остаются не до конца

изученными. При этом большинство работ в данном направлении сосредоточено на изучении механизмов стабилизации диоксида циркония различными легирующими добавками, способными ускорить процессы фазовых полиморфных трансформаций, а также сдерживать рост зерен при спекании, тогда как закономерности изменения структурных особенностей нестабилизированных механически активированных керамик при изменении температуры спекания остаются не до конца изученными [16-20]. Как правило, использование подобных стабилизирующих добавок обусловлено возможностями управления фазовыми превращениями, включающим в себя трансформации из моноклинной в тетрагональную или кубическую фазу, способностью снижать энергию активации фазовых трансформаций за счет изменения концентрации кислородных вакансий в структуре, а также способностью увеличивать механическую прочность за счет формирования межфазных границ или снижения деформационных искажений и остаточных механических напряжений [18-20]. При этом в случае нестабилизированных цирконий-содержащих керамик структурная эволюция определяется исключительно внутренними процессами, возникающими вследствие механического воздействия при механоактивации и дроблении, а также последующей высокотемпературной обработки, что, в свою очередь, позволяет проследить фундаментальные закономерности влияния механической активации на процессы формирования структурных особенностей, а также определить кинетику процессов рекристаллизации и стабилизации кристаллической решетки. Особый интерес в данном случае представляют исследования, направленные на установление взаимосвязей между изменением структурных параметров и концентрацией структурных дефектов, вызванных механической активацией при перемалывании и дроблении.

Основная цель данного исследования заключается в определении роли температуры спекания на структурные изменения в ZrO_2-керамиках, подвергнутых механическому воздействию, а также в установлении закономерностей изменения процессов рекристаллизации, роста зерен и изменения структурных параметров при вариации температуры спекания. В работе уделено особое внимание установлению закономерностей между температурой спекания и изменениями структурных характеристик (параметров и объема кристаллической решетки, степени искажения кристаллической решетки, степени кристалличности).

Материалы и методы

В качестве образцов для исследований были выбраны керамические порошки диоксида циркония (ZrO_2). Исходные образцы керамики были подвергнуты механической активации, включающей в себя измельчение керамического порошка в результате высокоинтенсивного ударного воздействия мелющими телами в процессе перемалывания. Перемалывание осуществлялось в планетарной мельнице PULVERISETTE 6 (Fritsch, Берлин, Германия). Скорость ударного воздействия мелющих тел диаметром 10 мм составляла 250 об/мин, время ударного воздействия составляло 30 минут. Выбор скорости помола осуществлен на основе априорных экспериментальных данных, а также серии экспериментов, связанных с определением оптимальных режимов измельчения, согласно которым было установлено, что при малых скоростях помола удается исключить эффекты холодного сваривания образцов и их прилипания на стенки мелющих стаканов, что является весьма критичным фактором в процессе механохимического синтеза. При этом измельчение при малых скоростях позволяет инициировать в перемалываемых порошках деформационные искажения и ударные напряжения, накопление которых способствует процессам структурной релаксации и кристаллизации при термическом спекании. Данные процессы механической активации сопровождаются накоплением дислокационных дефектов высокой плотности, формированием локальных областей с высоким содержанием механических остаточных напряжений, а также формированием кислородных вакансий и точечных дефектов в структуре. При этом возникающие неравновесные состояния, вызванные механическим ударным воздействием, способны привести к изменениям термодинамических процессов, а также кинетики спекания образцов. Термическое спекание осуществлялось в муфельной печи Nabertherm (Nabertherm, Лилиенталь, Германия) в диапазоне температуры от 1000 до 1600 °C с шагом 100 °C. Скорость нагрева составляла порядка 10 °C/мин. Время выдержки при заданном температурном режиме составляло порядка 5 часов, по истечении которого нагрев останавливался и образцы остывали вместе с печью в течение 20 – 25 часов до полного остывания. Выбор температуры отжига образцов осуществлялся на основе сочетания следующих факторов. Во-первых, основные фазовые трансформации, связанные с полиморфными превращениями в диоксиде циркония, происходят при температурах выше 1000 – 1200 °C, при которых может происходить инициализация переходов из моноклинной фазы в тетрагональную в случае соблюдения условий, связанных с концентрацией кислородных вакансий, необходимых для инициализации процессов структурных изменений. Второй фактор, ограничивающий условия проведения эксперимента, заключался в технологических возможностях печи, в которой проводился отжиг образцов, что не позволило отжигать образцы при температурах выше 1600 °C.

Определение структурных особенностей исследуемых керамик в зависимости от температуры спекания было осуществлено с применением метода рентгеноструктурного анализа. Дифрактограммы были полу-

чены на порошковом дифрактометре D8 ADVANCE ECO (Bruker, Карлсруэ, Германия) в геометрии Брегг – Брентано. Угловой диапазон измерений составлял 2θ=20…80°, с шагом 0,05° и временем набора в точке 1 сек. Обработка полученных дифрактограмм осуществлялась в программном коде DiffracEVA v.4.2. Анализ включал в себя уточнение параметров кристаллической решетки и оценку деформационного искажения их относительно эталонных значений, взятых из базы данных PDF-2, а также вычисление степени структурного упорядочения и оценку размеров областей когерентного рассеяния (ОКР). Для определения остаточных механических напряжений и структурных особенностей исследуемых керамик был использован метод рамановской спектроскопии, выполненный на рамановском микроскопе Enspectr M532 (Spectr-M LLC, Черноголовка, Россия).

Определение концентрации кислородных вакансий и структурных дефектов в составе керамик в зависимости от температуры спекания было выполнено путем анализа оптических спектров поглощения. Спектры были сняты на спектрофотометре SPECORD 200/210/250 PLUS (Analytik Jena, Йена, Германия) с использованием интегральной сферы. Концентрация дефектов оценивалась с использованием закона Бугера – Ламберта – Бера, основанного на оценке изменений коэффициентов поглощения и площадей соответствующей полосы поглощения.

На рисунке 1 приведена схема последовательности проведенных экспериментов, включающая в себя детализацию процессов получения и методов исследования образцов.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены результаты рентгеновской дифракции исследуемых ZrO_2 керамик в зависимости от вариации температуры отжига образцов в диапазоне от 1000 до 1600 °C, отражающие структурные изменения, связанные с термически-индуцированными процессами релаксации и образования кислородных вакансий. Согласно представленным данным рентгеноструктурного анализа, изменение температуры отжига не приводит к инициализации процессов полиморфных трансформаций в диоксиде циркония, при этом во всем исследуемом температурном диапазоне наблюдается сохранение единого структурного мотива, выражающегося в моноклинной фазе, пространственной сингонии P21/c(14). Отсутствие дополнительных дифракционных рефлексов, характерных для тетрагональной или кубической фазы, даже в случае отжига при температурах выше 1200 °C, для которых характерно полиморфное превращение типа m-ZrO_2 → t – ZrO_2, а также сохранение интенсивностей и всего набора дифракционных рефлексов для установленной фазы свидетельствует о высокой фазовой стабильности порошков, подвергнутых механическому дроблению при перемалывании. Также следует отметить, что выбранные условия механического дробления не приводят к усилению или интенсификации полиморфных трансформаций, из чего следует, что выбранные условия механической активации не способствуют фазовой трансформации, а также приводят к деформационному искажению основной моноклинной фазы. При этом следует отметить, что основные изменения обусловлены изменением структурных

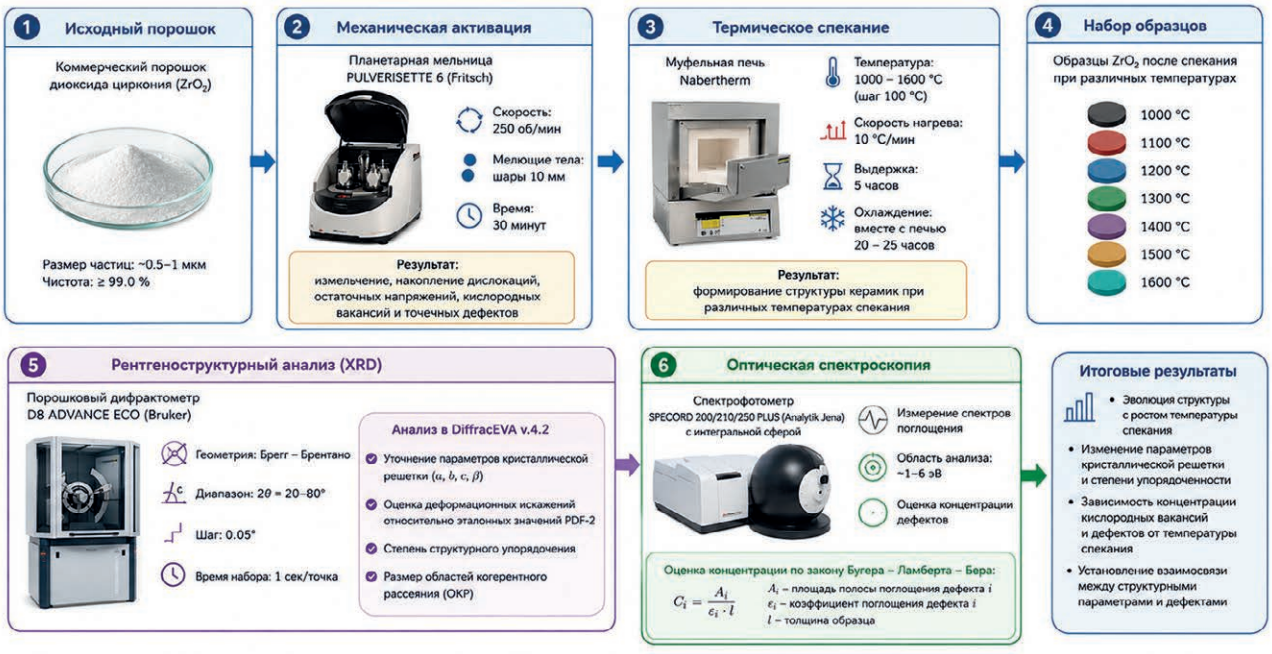


Рисунок 1. Схема последовательности проведения экспериментальных работ с исследуемыми образцами керамик

параметров, выражающихся в изменении параметров кристаллической решетки, степени структурного упорядочения и размеров ОКР. Подобная эволюция обусловлена активизацией диффузионных процессов, приводящих к релаксации внутренних механических напряжений, перераспределению кислородных вакансий, снижению плотности дислокационных дефектов и постепенному восстановлению периодичности кристаллической решетки. В случае температур спекания 1000 °С и 1100 °С полученные дифрактограммы характеризуются уширенными дифракционными рефлексами, свидетельствующими о достаточно высокой концентрации структурных дефектов, вызванных деформационным воздействием при механическом перемалывании. При этом из полученных данных можно сделать вывод о том, что при выбранных условиях и температурных режимах отжига наблюдаемые изменения на дифрактограммах характерны для частичной релаксации дефектной структуры, вызванной механическим воздействием при дроблении, что также приводит к ограниченности роста зерен в порошке. Увеличение температуры отжига до 1200°С, 1300 °С и 1400 °С приводит к изменению ширины и интенсивности дифракционных рефлексов, свидетельствующих о росте степени структурного упорядочения и снижению концентрации деформационных искажений за счет релаксационных процессов, вызванных термическим воздействием. В данном случае увеличение температуры отжига керамических порошков приводит к активизации процессов рекристаллизации, восстановлению локальной симметрии, релаксации деформационных искажений за счет увеличения подвижности дефектов и кислородных вакансий в структуре керамик. Также рост интенсивности дифракционных рефлексов свидетельствует о росте размеров ОКР, которое также характеризует эволюцию структурных особенностей керамик. При температуре отжига 1500 °С и 1600 °С наблюдается искажение формы дифракционных рефлексов, характеризующееся уширением и частичным расслоением рефлексов. Следует отметить, что подобные изменения не сопровождаются появлением новых дифракционных рефлексов, характерных для образования дополнительных фаз, что исключает возможность полиморфных превращений моноклинной структуры. Наблюдаемое изменение формы может быть обусловлено неравновесностью процессов рекристаллизации и ростом зерен различной фракции, которые при рентгенографировании могут давать две одинаковые дифракционные картины с одинаковым структурным мотивом, однако с различием в параметрах кристаллической решетки, обусловленным деформационными искажениями. В процессе спекания рост отдельных зерен определяется их кристаллографической ориентацией, локальной концентрацией дефектов, плотностью кислородных вакансий и энергией межзеренных границ. В результате часть зерен успевает полностью рекристаллизоваться и практически освобождается от внутренних механических напряжений, тогда как другая часть сохраняет остаточные деформации или находится на промежуточной стадии структурной релаксации. С физической точки зрения данный эффект представляет собой проявление структурной бимодальности или двухмодального распределения деформационных состояний кристаллической решетки. В данном случае, незначительные изменения параметров решетки, вызванные различной степенью остаточных напряжений или неодинаковой концентрацией кислородных вакансий, приводят к смещению положения соответствующих максимумов согласно закону Брэгга. Если в объеме материала одновременно присутствуют два типа зерен с близкими, но не идентичными параметрами решетки, результирующий профиль рефлекса становится асимметричным или разделяется на две перекрывающиеся составляющие. Также следует отметить, что кислородные вакансии, формирование которых происходит при высокотемпературном отжиге, могут вызывать локальное изменение длин связей Zr-O и параметров элементарной ячейки, поэтому неоднородное распределение вакансий также способствует появлению нескольких близких значений межплоскостных расстояний и, соответственно, частичному расщеплению дифракционных максимумов.

В таблице приведены результаты оценки структурных параметров, исследуемых образцов керамик в зависимости от температуры отжига. Представленные данные наглядно отражают закономерности эволюции структурных параметров, связанных с процессами рекристаллизации, релаксации внутренних напряжений и перераспределения дефектов в кислородной подрешетке. Несмотря на сохранение моноклинной модификации диоксида циркония во всем исследуемом температурном диапазоне, изменение параметров элементарной ячейки, объема кристаллической решетки, степени структурного упорядочения и среднего размера ОКР свидетельствует о сложной последовательности процессов рекристаллизации, релаксации внутренних напряжений и перераспределения дефектов кислородной подрешетки. В случае температур отжига 1000 °С, 1100 °С и 1200 °С наблюдаемое увеличение параметров кристаллической решетки свидетельствует об их стабилизации и приближении к эталонным значениям карточки PDF- 01-070-2491, при этом также наблюдается рост степени структурного упорядочения, свидетельствующий о частичной релаксации остаточных механических напряжений в структуре керамик, вызванной механическим ударным воздействием при перемалывании. Следует отметить, что релаксация структурных искажений от температуры отжига носит явно не линейный характер, а максимальное значение степени структурного упорядочения достигается при температуре 1200 °С. По-

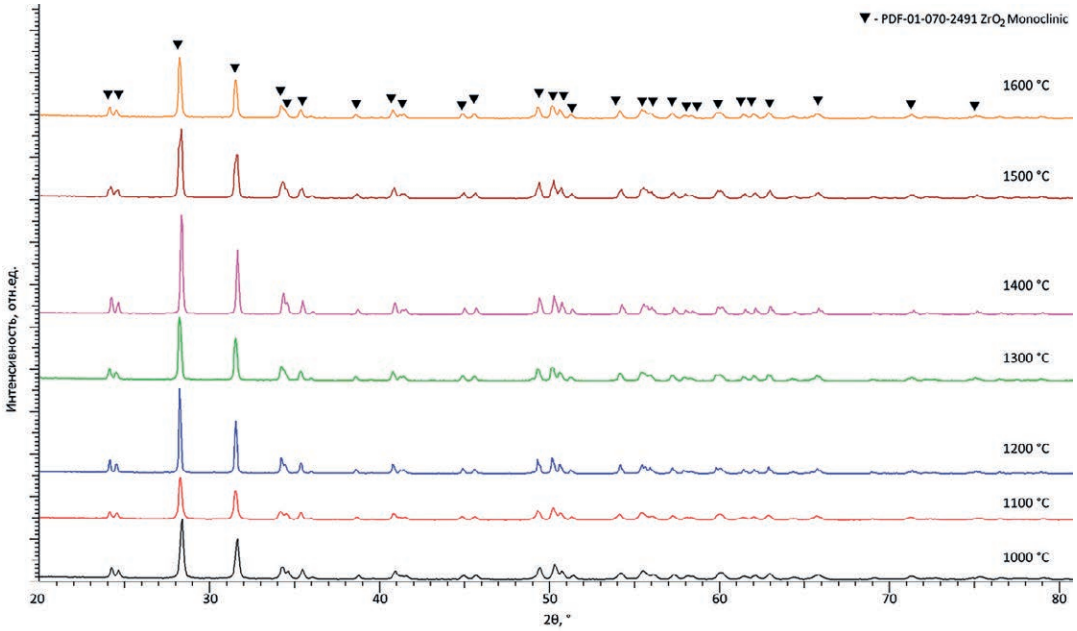


Рисунок 2. Результаты рентгеноструктурного анализа исследуемых ZrO_2 керамик в зависимости от температуры отжига

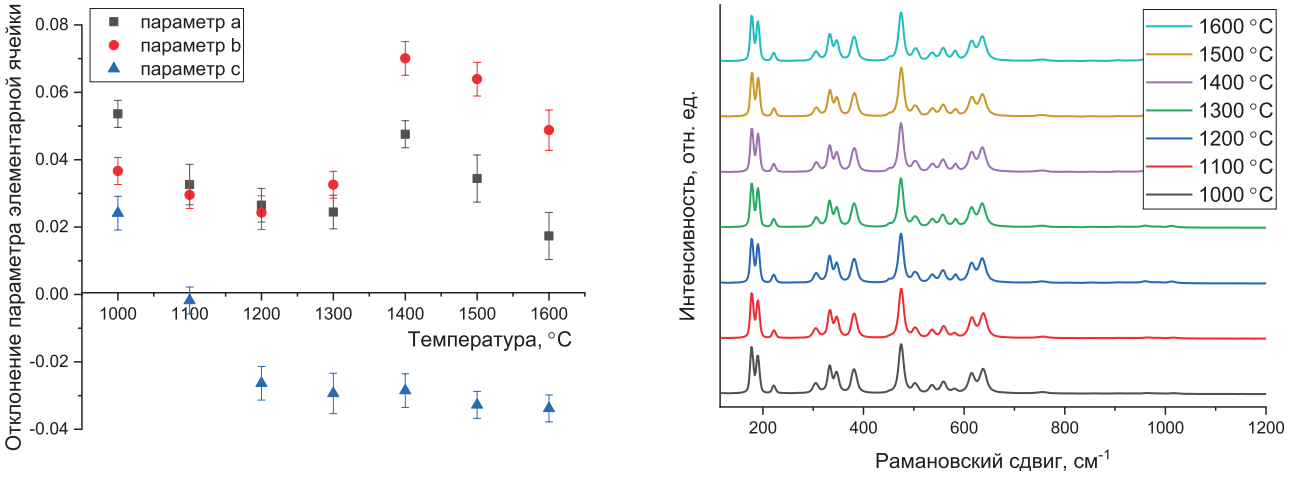
добное поведение связано с активизацией процессов рекристаллизации и роста зерен, сопровождающихся снижением плотности дислокаций и частичной релаксацией внутренних напряжений. Одновременно увеличение объема элементарной ячейки указывает на перераспределение кислородных вакансий и локальную перестройку кислородной подрешетки, приводящую к временному расширению кристаллической решетки вследствие уменьшения упругих искажений. Последующее снижение степени структурного упорядочения в данном случае обусловлено переходом от процессов релаксации структурных искажений к процессам накопления кислородных вакансий и их последующей эволюцией при росте зерен. При увеличении температуры спекания возрастает подвижность кислородных вакансий, которые активно мигрируют к границам зерен и формируют более равновесное распределение дефектов. Одновременно продолжающийся рост зерен сопровождается снижением плотности межзеренных границ, что вызывает локальное перераспределение внутренних напряжений и частичное уменьшение размеров ОКР вследствие формирования субзеренной структуры. Подобное поведение структурных характеристик при высоких температурах отжига (1500 °C и 1600 °C) свидетельствует о том, что после завершения процессов первичной рекристаллизации начинают доминировать высокотемпературные диффузионные процессы, сопровождающиеся перераспределением кислородных вакансий, формированием термодинамически равновесной дефектной структуры и возникновением локальных напряжений, обусловленных неоднородной скоростью роста отдельных зерен. Уменьшение размеров ОКР при сохранении высокой кристалличности указывает не на

Таблица 1. Данные структурных параметров

Параметр	Температура отжига, °C						
	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
Параметры кристаллической решетки	a=5,0953±0,0014 Å, b=5,1751±0,0016 Å, c=5,2906±0,0012 Å, β=99,084°	a=5,1163±0,0022 Å, b=5.1822±0,0017 Å, c=5,3165±0,0018 Å, β=99,026°	a=5,1224±0,0013 Å, b=5,1875±0,0021 Å, c=5,3441±0,0024 Å, β=99,302°	a=5,1244±0.0013 Å, b=5,1792±0,0013 Å, c=5,3441±0,0016 Å, β=99,281°	a=5,1013±0,0022 Å, b=5,1417±0,0016 Å, c=5.3432±0.0024 Å, β=99,242°	a=5,1145±0,0026 Å, b=5,1479±0,0014 Å, c=5.3474±0.0016 Å, β=99,281°	a=5,1315±0,0013 Å, b=5,1630±0,0017 Å, c=5,3485±0,0016 Å, β=99,302°
Объем кристаллической решетки	137,76±0,33 Å^3	139,21±0,24 Å^3	140,14±0,29 Å^3	139,98±0,22 Å^3	138,33±0,34 Å^3	138,95±0,36 Å^3	139,84±0,32 Å^3
Степень структурного упорядочения, %	89	89,9	93,4	92,2	92,1	91,1	91
Средний размер ОКР, нм	39,6±2	43,3±3	65,8±3	53,6±3	47,8±2	43,5±3	34,1±2

деградацию структуры, а на образование развитой субзеренной организации, возникающей вследствие релаксации внутренних напряжений и перераспределения дефектов внутри крупных рекристаллизованных зерен.

На рисунке 3а приведены результаты оценки деформационного искажения параметров кристаллической решетки, полученные путем сравнения данных, приведенных в таблице 1, с параметрами эталонного образца, взятых из базы данных PDF-2. Приведенные результаты наглядно отражают анизотропность искажений кристаллической решетки вдоль осей, а также неоднородности релаксационных процессов остаточных механических напряжений, вызванных термическим воздействием, а также перераспределения кислородных вакансий в структуре за счет изменения их подвижности. Наиболее выраженные изменения наблюдаются для параметра «b», причем степень деформационных искажений меняется в зависимости от температуры спекания и имеет разнонаправленный характер. При температуре 1000 °C величина деформационного изменения составляет около 3.5%, после чего при 1100 °C и при 1200 °C наблюдается ее снижение до 2.2…2.8%, что свидетельствует о начале релаксации внутренних напряжений. Однако дальнейшее повышение температуры до 1400 °C сопровождается резким увеличением отклонения параметра «b» до максимального значения порядка 7%. Подобное поведение указывает на интенсивную перестройку кислородной подрешетки, связанную с перераспределением кислородных вакансий и локальным расширением кристаллической решетки вдоль данного кристаллографического направления. При увеличении температуры до 1500 °C и 1600 °C наблюдаемое постепенное уменьшение деформационного изменения параметра «b» свидетельствует о завершении процессов высокотемпературной релаксации и формировании более равновесной структуры. При этом скачкообразное изменение параметров, а также рост сжимающих остаточных напряжений вдоль параметра «c» при увеличении температуры свидетельствует о перераспределении дефектов за счет их миграции, а также неравновесности процессов кристаллизации при высоких температурах отжига, проявляющихся в расслоении дифракционных рефлексов. Менее выраженные изменения параметра «a» при высоких температурах спекания свидетельствуют о том, что вдоль данного направления релаксация механических напряжений происходит более эффективно, чем вдоль оси «b» вследствие различной анизотропии межатомных связей в моноклинной структуре диоксида циркония. Результаты изменений параметра «c» в зависимости от температуры спекания свидетельствуют о том, что релаксация внутренних напряжений сопровождается преимущественным сжатием элементарной ячейки вдоль оси «c», тогда как вдоль направлений «a» и «b» наблюдается преимущественное расширение. Подобная анизотропия деформаций является характерной особенностью моноклинной структуры диоксида циркония и обусловлена различной жесткостью связей Zr–O в различных кристаллографических направлениях. Наблюдаемый максимум структурных искажений при температуре спекания 1400 °C может быть обусловлен ростом дефектов, в частности, точечных дефектов и кислородных вакансий, а также локальным перераспределением межатомных расстояний и анизотропной деформацией элементарной ячейки. При этом рост концентрации точечных дефектов происходит уже после значительной релаксации механически индуцированных дислокационных напряжений, поэтому максимальная деформация параметров решетки обусловлена преимущественно пере-



а) б)

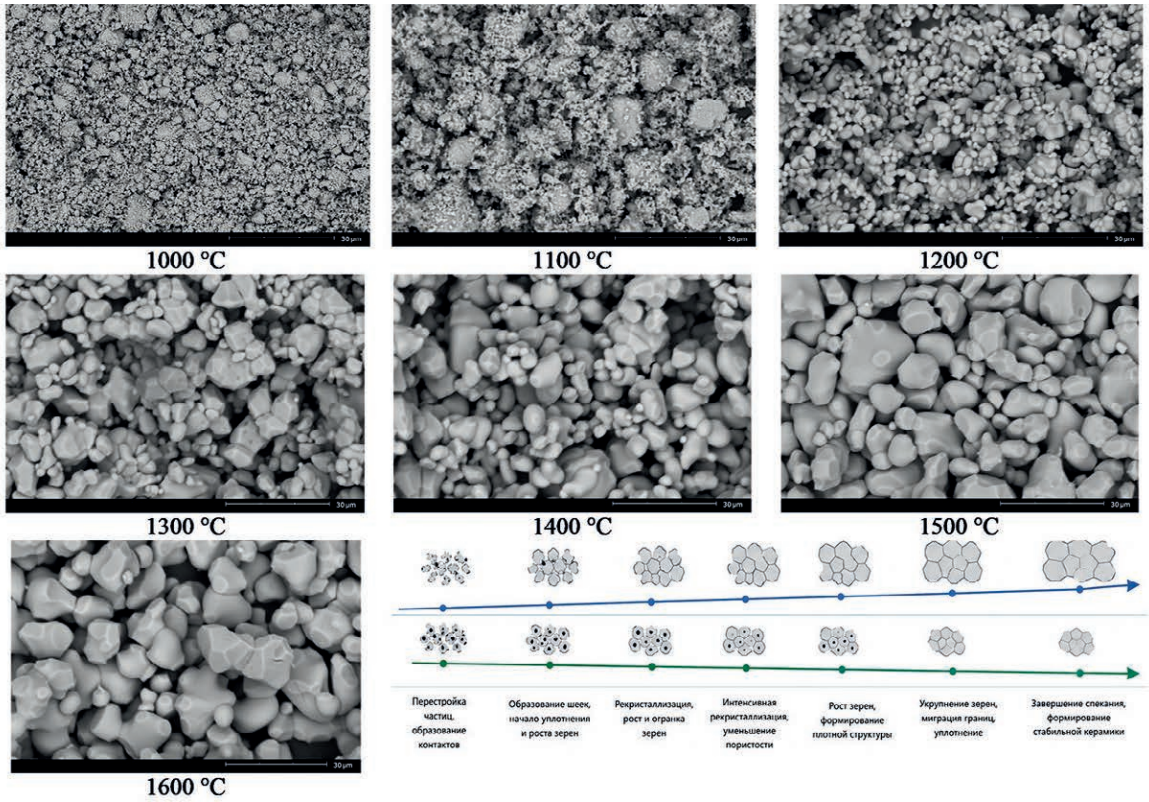
Рисунок 3. а) Результаты оценки деформационного искажения параметров кристаллической решетки в зависимости от температуры отжига; б) Результаты рамановской спектроскопии исследуемых ZrO_2 керамик в зависимости от температуры отжига

стройкой кислородной подрешетки, а не накоплением механических дефектов.

На рисунке 3б приведены результаты измерений рамановской спектроскопии исследуемых керамик в зависимости от температуры отжига, отражающие структурные изменения, связанные с термическими эффектами и процессами рекристаллизации. Согласно данным, приведенным на рамановских спектрах, положение и набор спектральных мод характерны для моноклинной фазы диоксида циркония, структурный мотив которой сохраняется во всем исследуемом температурном диапазоне. Также следует отметить, что на исследуемых спектрах не наблюдается появление каких–либо дополнительных спектральных мод, что свидетельствует о структурной стабильности и ее сохранении при изменении температуры спекания. Отсутствие появления дополнительных полос или исчезновения характерных мод моноклинной фазы свидетельствует о том, что структурная эволюция исследуемых керамик обусловлена преимущественно изменением дефектного состояния и степени структурного упорядочения, а не полиморфными фазовыми превращениями. Представленные данные рамановских спектров, отражающие отсутствие новых мод, характеризующих полиморфные трансформации, полностью согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа. При этом изменение температуры спекания приводит к существенной эволюции интенсивности, ширины и разрешения отдельных рамановских полос, отражающих изменение степени структурного упорядочения, концентрации кислородных вакансий и остаточных механических напряжений. Для образцов, отожженных при 1000 °С, рамановские спектры характеризуются сравнительно низкой интенсивностью большинства колебательных мод и их заметным уширением, которое обусловлено высокой концентрацией структурных дефектов, накопленных в процессе механической активации, а также наличием микродеформаций и остаточных механических напряжений. При повышении температуры отжига до 1100 °С и 1200 °С наблюдается постепенное увеличение интенсивности основных колебательных мод при одновременном уменьшении их полуширины. Подобная эволюция спектров свидетельствует о начале процессов рекристаллизации и частичной релаксации внутренних напряжений. Для образцов, спеченных при 1300 °С и 1400 °С, интенсивность большинства рамановских мод достигает максимальных значений. Особенно заметно усиливаются полосы в области 470…500 $см^{-1}$ и 610…640 $см^{-1}$, соответствующие валентным колебаниям связей Zr-O в моноклинной структуре. При дальнейшем увеличении температуры отжига до 1500 °С и 1600 °С существенных изменений положения основных колебательных мод не наблюдается, что подтверждает сохранение моноклинной структуры ZrO_2. При этом интенсивность отдельных полос несколько возрастает, а их ширина продолжает уменьшаться, что свидетельствует о завершении процессов высокотемпературной релаксации и формировании наиболее совершенной кристаллической структуры. Одновременно происходит снижение концентрации комплексных деформационных дефектов и остаточных механических напряжений вследствие интенсивной диффузии и перераспределения кислородных вакансий в подрешетках.

На рисунке 4 приведены результаты изменений морфологических особенностей исследуемых керамик в зависимости от температуры спекания, отражающие рост зерен и изменение их структуры и формы при различных температурах. Согласно представленным данным, было установлено, что при температуре отжига 1000 °С структура сохраняет характерные признаки механически активированного порошка, подвергнутого интенсивному дроблению. Керамические порошки представляют собой рыхлые агломераты, состоящие из большого количества мелкодисперсных частиц неправильной формы. Подобная морфология свидетельствует о том, что процессы твердофазной диффузии находятся лишь на начальной стадии, а спекание ограничивается образованием локальных межчастичных контактов. Высокая дисперсность и развитая поверхность частиц указывают на сохранение большого количества механически индуцированных дефектов в структуре. При увеличении температуры отжига до 1100 °С размер агломератов уменьшается, а между соседними частицами формируются более выраженные диффузионные контакты. При этом структура зерен остается достаточно рыхлой и неоднородной, сохраняется высокая пористость, а распределение размеров частиц характеризуется значительной неоднородностью. При повышении температуры до 1200 °С процессы уплотнения значительно ускоряются. На приведенных РЭМ изображениях отчетливо наблюдается формирование отдельных хорошо ограненных зерен с более гладкой поверхностью. Одновременно уменьшается количество открытых пор и возрастает площадь межзеренных контактов. Морфология становится значительно более однородной, что свидетельствует об активном развитии процессов рекристаллизации и увеличении степени структурного упорядочения. Для образцов, отожженных при 1300 °С, характерно дальнейшее развитие процессов рекристаллизации. Большинство зерен приобретает выраженную многогранную форму с хорошо сформированными межзеренными границами. Существенно уменьшается объем открытой пористости, а размеры зерен становятся более равномерными. Появление характерных плоских граней свидетельствует о достижении высокой степени кристалличности и снижении поверхностной энергии зерен вследствие интенсивной высокотемпературной диффузии. При температуре 1400 °С наблюдается

наиболее интенсивное развитие процессов рекристаллизации и роста зерен. Размеры отдельных зерен заметно увеличиваются, их форма становится более правильной, а границы приобретают высокую четкость. Плотность материала возрастает вследствие практически полного исчезновения мелкой открытой пористости. Несмотря на продолжающийся рост зерен, структура остается достаточно однородной без признаков аномального укрупнения отдельных кристаллитов. При температуре отжига 1500 °С процессы роста зерен становятся доминирующим механизмом структурной эволюции. На РЭМ изображениях хорошо заметно увеличение среднего размера зерен, сопровождающееся дальнейшим уменьшением количества межзеренных пор. Большинство зерен имеет полиэдрическую форму с четко выраженными границами и высокой степенью огранки. Увеличение размеров зерен свидетельствует о существенном снижении плотности границ зерен вследствие их миграции и объединения соседних кристаллитов. При температуре отжига 1600 °С аномального роста отдельных зерен не наблюдается, что указывает на достаточно равномерное протекание процессов высокотемпературной рекристаллизации. Следует также отметить, что при температурах отжига 1500°С и 1600 °С, помимо хорошо кристаллизованных крупных зерен, наблюдается наличие мелкодисперсных зерен, количество которых увеличивается по мере увеличения температуры отжига. Подобные изменения имеют хорошее согласие с результатами рентгеновской дифракции, согласно которым для образцов, отожженных при данных температурах, наблюдалось наличие эффекта расслоения рефлексов, характерного для структурных элементов различных размеров и степени структурного упорядочения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что завершающая стадия спекания исследуемых механически активированных ZrO_2-керамик характеризуется неравновесным характером рекристаллизации, при котором процессы роста зерен протекают неодинаково в различных областях материала. В процессе высокотемпературного отжига отдельные зерна, обладающие более высокой подвижностью межзеренных границ и меньшей концентрацией дефектов, начинают интенсивно укрупняться, тогда как соседние области с повышенной плотностью дислокаций, кислородных вакансий или примесных сегрегаций сохраняют более низкую скорость миграции границ зерен. В результате реализуется локально неоднородная кинетика рекристаллизации, сопровождающаяся одновременным существованием крупных полностью рекристаллизованных зерен и мелких кристаллитов, находящихся на различных стадиях структурной перестройки. Следует подчеркнуть, что увеличение количества мелкодисперсных зерен при высоких тем-



а) б)

Рисунок 4. Результаты морфологических особенностей исследуемых ZrO_2 керамик: а) Серия РЭМ изображений в зависимости от температуры отжига; б) общая схема трансформации морфологических особенностей керамик

пературах не свидетельствует о повторном измельчении структуры. Напротив, данный эффект отражает формирование структурной бимодальности, возникающей вследствие неодинаковой скорости роста отдельных зерен и локальной стабилизации части мелких кристаллитов. Подобная бимодальная структура является характерной особенностью заключительной стадии высокотемпературного спекания механически активированных керамик, когда процессы рекристаллизации, миграции межзеренных границ и диффузионной релаксации еще не завершены полностью.

На рисунке 5 приведены результаты оценки дефектов в составе керамик, представленные в виде оптических спектров поглощения и их разложения на составляющие (в процентном соотношении), которые отражают количественную оценку концентрации комплексных дефектов, F^+ - центров и кислородных вакансий (V_O) в составе образцов керамик в зависимости от температуры отжига образцов. Представленные спектры поглощения свидетельствуют о существенном влиянии температуры спекания на электронную структуру и дефектное состояние ZrO_2 керамик. Изменение интенсивности полос поглощения в области 3.8 – 5.5 эВ отражает эволюцию концентрации кислородных вакансий, электронных центров окраски и степени структурной упорядоченности, что хорошо согласуется с результатами рентгеноструктурного анализа.

Для образцов, отожженных при 1000 °C, спектр характеризуется сравнительно низкой интенсивностью поглощения и сглаженной формой широкой полосы в области 4.2…5.3 эВ. Подобное поведение свидетельствует о высокой концентрации структурных дефектов, сформированных в процессе механической активации, однако значительная часть кислородных вакансий находится в составе дефектных комплексов или ассоциирована с дислокациями и границами зерен. Вследствие высокой степени структурной раз-

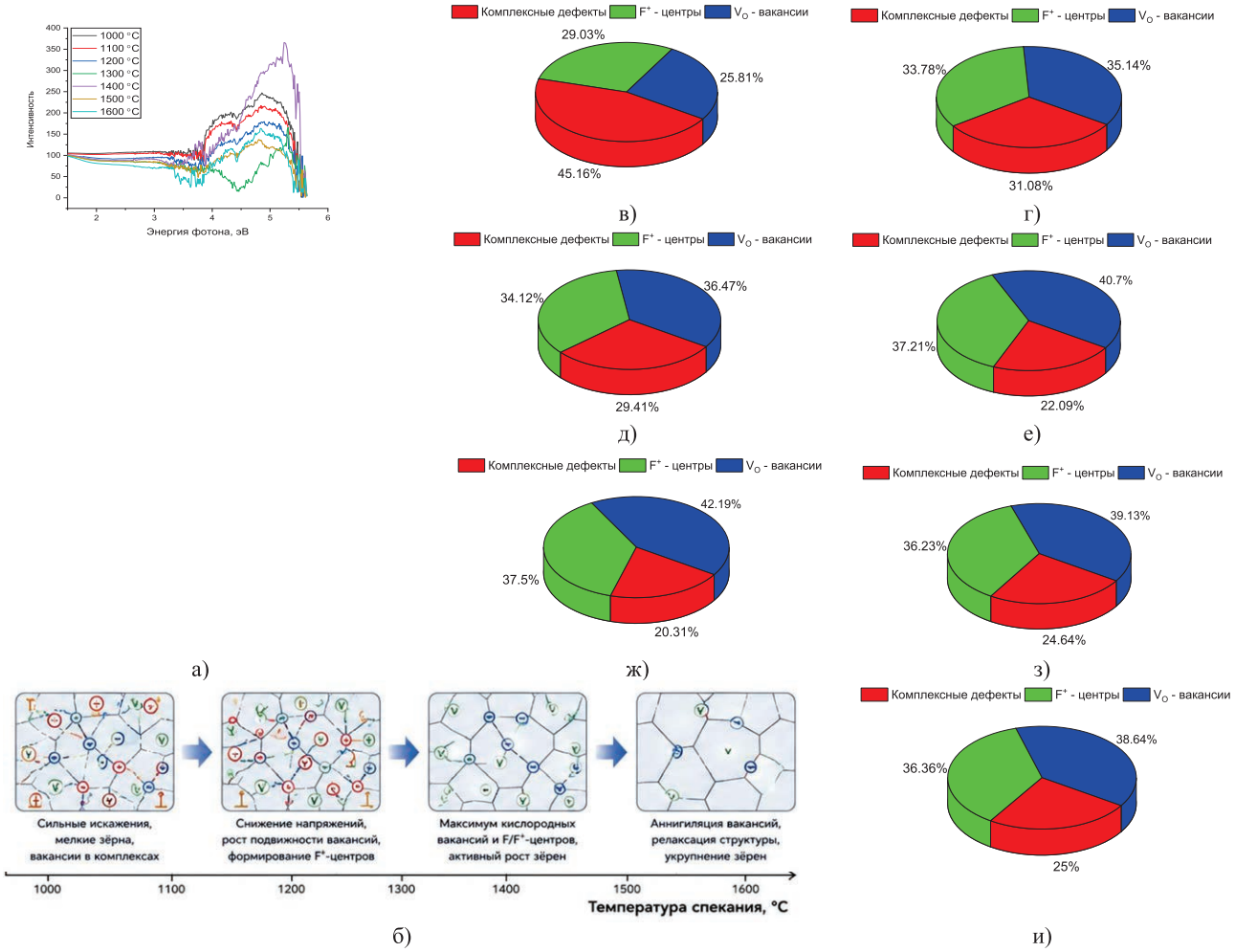


Рисунок 5. Результаты оценки оптических свойств исследуемых ZrO_2 керамик: а) спектры поглощения в зависимости от температуры спекания; б) общая схема структурных дефектов в зависимости от температуры спекания; результаты оценки вкладов различных дефектов, полученные на основе оценки разложения спектров поглощения: в) при температуре 1000 °C; г) при температуре 1100 °C; д) при температуре 1200 °C; е) при температуре 1300 °C; ж) при температуре 1400 °C; з) при температуре 1500 °C; и) при температуре 1600 °C

упорядоченности локальные энергетические уровни оказываются распределенными по широкой области запрещенной зоны, что приводит к уширению полосы поглощения и снижению ее максимальной интенсивности. При повышении температуры спекания до 1100 °С и 1200 °С наблюдается увеличение интенсивности полосы поглощения с сохранением ее широкой формы. Одновременно максимум полосы становится более выраженным, что свидетельствует об активизации процессов рекристаллизации и перераспределения дефектов кислородной подрешетки. В этом температурном диапазоне возрастает подвижность кислородных вакансий, которые мигрируют из объема сильно деформированных областей в энергетически более выгодные положения. В результате происходит увеличение концентрации изолированных кислородных вакансий (V_O и F^+-центров), формирующих локальные электронные уровни вблизи дна зоны проводимости и обусловливающих усиление оптического поглощения. Наиболее выраженные изменения наблюдаются для керамик, спеченных при 1300 °С и 1400 °С. Именно в этом температурном интервале интенсивность полосы поглощения достигает максимального значения, особенно для образца после спекания при 1400 °С. Максимум спектра становится более узким и смещается в область более высоких энергий фотонов, что свидетельствует о повышении степени структурной упорядоченности и формировании преимущественно однотипных кислородных вакансий. Согласно данным рентгеновской дифракции, в данном температурном диапазоне достигается высокая степень кристалличности и завершается основная стадия рекристаллизации. Одновременно происходит перераспределение вакансий кислорода между объемом зерен и межзеренными границами, вследствие чего увеличивается концентрация стабильных электронных центров окраски, ответственных за интенсивное поглощение в области 4.5…5.3 эВ. Рост интенсивности полосы также свидетельствует об увеличении числа локализованных электронных состояний, возникающих при удалении атомов кислорода из решетки ZrO_2. При дальнейшем увеличении температуры до 1500 °С интенсивность поглощения уменьшается, несмотря на сохранение высокой степени кристалличности материала. Это свидетельствует о начале процессов высокотемпературной релаксации дефектной структуры. При данных температурах коэффициент диффузии кислорода значительно возрастает, вследствие чего часть кислородных вакансий аннигилирует либо объединяется в более крупные дефектные комплексы, обладающие меньшим вкладом в электронное поглощение. Кроме того, продолжающийся рост зерен уменьшает суммарную площадь межзеренных границ, являющихся основными накопителями вакансий и электронных ловушек. Наиболее существенное снижение интенсивности наблюдается после отжига образцов керамик при температуре 1600 °С, для которых спектр характеризуется минимальной интенсивностью полосы поглощения в области 4.0…5.5 эВ, что свидетельствует о значительном уменьшении концентрации электронно-активных кислородных вакансий. Высокотемпературная обработка обеспечивает практически полную релаксацию остаточных механических напряжений, сопровождаемую перераспределением дефектов и частичной аннигиляцией вакансий вследствие интенсивной диффузии кислорода.

Таким образом, изменение спектров поглощения имеет немонотонный характер и определяется конкуренцией двух процессов. На первой стадии (спекание при температуре от 1000 °С до 1400 °С) преобладают рекристаллизация, релаксация внутренних напряжений и формирование стабильных кислородных вакансий, что сопровождается увеличением интенсивности полосы поглощения. На второй стадии (спекание при 1500 °С и 1600 °С) начинают доминировать высокотемпературные диффузионные процессы, приводящие к перераспределению и частичной аннигиляции вакансий кислорода, уменьшению концентрации электронных центров окраски и снижению плотности локализованных энергетических состояний.

Заключение

В рамках проведенных исследований были установлены основные закономерности структурной эволюции механически активированных ZrO_2-керамик в случае вариации температуры спекания в широком диапазоне от 1000 °С до 1600 °С. Используя методы рентгеноструктурного анализа, рамановской спектроскопии, оптической спектроскопии и растровой электронной микроскопии были определены взаимосвязи между температурой спекания и изменением структурного состояния керамик, а также концентрациями кислородных и комплексных дефектов, и особенностей формирования морфологии зерен керамик.

Согласно полученным результатам было установлено, что выбранные условия механического помола не приводят к инициализации процессов полиморфных трансформаций в керамиках, во всем температурном диапазоне отжига наблюдается сохранение моноклинной фазы, что подтверждает высокую стабильность керамик к механическим и термическим воздействиям. Впервые установлена многостадийность структурной релаксации механически активированной керамики в зависимости от температуры спекания, включающая последовательный переход от микродеформационного разупорядочения при 1000 °С и 1100 °С к интенсивной рекристаллизации и структурному упорядочению при 1200 °С 1300 °С и последующему росту зерен и перераспределению кислородных вакансий при 1400 °С, 1500 °С и 1600 °С.

Результаты морфологических особенностей исследуемых керамик показали, что повышение темпе-

ратуры отжига приводит к последовательному уплотнению, рекристаллизации и росту зерен, которые сопровождаются переходом от рыхлых агломератов, полученных после механического дробления, до формирования высокоупорядоченной структуры керамик, представленной крупными зернами сферической или ромбовидной формы.

Общий анализ полученных результатов позволил установить, что структурная эволюция механически активированных ZrO_2-керамик при высокотемпературном спекании реализуется посредством последовательной релаксации механически индуцированных дефектов, рекристаллизации, роста зерен и перераспределения кислородных вакансий, без изменения фазового состава материала, что позволяет, в свою очередь, путем подбора температуры спекания управлять размерами и морфологическими особенностями керамик с возможностью сохранения структурной и фазовой стабильности.

Определен оптимальный температурный интервал спекания 1200…1300 °C, обеспечивающий наиболее благоприятное сочетание структурных характеристик механически активированной ZrO_2-керамики, включающее в себя минимизацию микродеформационных искажений и дислокационных дефектов, повышение степени кристаллического упорядочения и формирование совершенной морфологии зерен.

Впервые предложена комплексная модель структурной эволюции механически активированной ZrO_2-керамики, согласно которой высокотемпературное спекание реализуется через взаимосвязанные процессы релаксации остаточных напряжений → аннигиляции механически индуцированных дефектов → рекристаллизации → роста зерен → перераспределения кислородных вакансий, при этом данные процессы протекают без фазовой трансформации.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. AP26104627 «Изучение механизмов радиационно-индуцированных повреждений и диффузионного расширения поврежденного слоя в стабилизированных ZrO_2 керамиках при высокотемпературном облучении тяжелыми ионами»).

Литература / References:

1. Qi, B., Liang, S., Li, Y., Zhou, C., Yu, H., & Li, J. (2022). ZrO_2 matrix toughened ceramic material-strength and toughness. *Advanced Engineering Materials*, *24*(6), 2101278.
2. Xing, H., Zou, B., Li, S., & Fu, X. (2017). Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D printed ZrO_2 ceramic components by laser scanning stereolithography. *Ceramics International*, *43*(18), 16340-16347.
3. Gautam, C., Joyner, J., Gautam, A., Rao, J., & Vajtai, R. (2016). Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. *Dalton transactions*, *45*(48), 19194-19215.
4. Hussien, Z. Y., Moften, A. Q., & Abdulrehman, M. A. (2025). Review of zirconia (ZrO_2) biomedical applications: Advanced manufacturing techniques and materials properties. *Revue des Composites et des Materiaux Avances*, *35*(2), 345.
5. Zhang, X., Li, W., Hong, C., Han, W., & Han, J. (2008). A novel development of ZrB_2/ZrO_2 functionally graded ceramics for ultrahigh-temperature application. *Scripta Materialia*, *59*(11), 1214-1217.
6. He, Q., Wang, L., Chang, L., Chen, J., & Zeng, Y. (2025). Superhydrophobic surface modification of 3D-printed ZrO_2 ceramics: Structural design and wear resistance investigation. *Ceramics International*, *51*(21), 33966-33976.
7. Chauhan, V., Gupta, D., Upadhyay, S., Ram, J., Kumar, S., & Kumar, R. (2021). Advancement of High-k ZrO_2 for Potential Applications: A Review. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, *593*(12), 811.
8. Jin, L., Zhou, G., Shimai, S., Zhang, J., & Wang, S. (2010). ZrO_2-doped Y2O3 transparent ceramics via slip casting and vacuum sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, *30*(10), 2139-2143.
9. Vollath, D., Fischer, F. D., Hagelstein, M., & Szabó, D. V. (2006). Phases and phase transformations in nanocrystalline ZrO_2. *Journal of nanoparticle research*, *8*(6), 1003-1016.
10. Fu, L., Li, B., Xu, G., Huang, J., Engqvist, H., & Xia, W. (2021). Size-driven phase transformation and microstructure evolution of ZrO_2 nanocrystallites associated with thermal treatments. *Journal of the European Ceramic Society*, *41*(11), 5624-5633.
11. Fu, L., Li, L., Cheng, Y., Wang, B., & Wu, H. (2023). Influences of powder morphology on the densification and microstructure of a ZrO_2-based nanocrystalline glass–ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, *106*(1), 722-737.
12. Bocanegra-Bernal, M. H., & De La Torre, S. D. (2002). Phase transitions in zirconium dioxide and related materials for high performance engineering ceramics. *Journal of materials science*, *37*(23), 4947-4971.
13. Rittidech, A., Somrit, R., & Tunkasiri, T. (2013). Effect of adding Y2O3 on structural and mechanical properties of Al_2O_3–ZrO_2 ceramics. *Ceramics international*, *39*, S433-S436.
14. Hussain, I., Barimah, E. K., Iqbal, Y., Jose, G., Zeb, A., & Muhammad, R. (2021). Mechanical and optical properties of ZrO_2 doped silicate glass ceramics. *Silicon*, *13*(3), 877-883.
15. Guo, H., Guo, J., Baker, A., & Randall, C. A. (2017). Cold sintering process for ZrO_2-based ceramics: significantly enhanced densification evolution in yttria-doped ZrO_2. *Journal of the American Ceramic Society*, *100*(2), 491-495.
16. Lee, S. G., & Kang, D. S. (2003). Dielectric properties of ZrO_2-doped (Ba, Sr, Ca) TiO_3 ceramics for tunable microwave device applications. *Materials Letters*, *57*(9-10), 1629-1634.
17. Aktas, B., Tekeli, S., & Salman, S. (2016). Improvements in microstructural and mechanical properties of ZrO_2 ceramics after addition of BaO. *Ceramics International*, *42*(3), 3849-3854.

18. Zhang, K., He, R., Ding, G., Feng, C., Song, W., & Fang, D. (2020). Digital light processing of 3Y-TZP strengthened ZrO_2 ceramics. *Materials Science and Engineering: A*, *774*, 138768.
19. Zhu, X., Hou, G., Ma, J., Zhang, X., An, Y., Zhou, H., & Li, W. (2024). Effect of Y2O3 doping content on phase composition, mechanical properties and cavitation erosion performance of ZrO_2 ceramics. *Ceramics International*, *50*(9), 14718-14730.
20. Vojtko, M., Puchy, V., Múdra, E., Milkovič, O., & Kovalčíková, A. (2020). Coarse-grain CeO_2 doped ZrO_2 ceramic prepared by spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, *40*(14), 4844-4852.

КҮЙДІРУ ТЕМПЕРАТУРАСЫНЫҢ ZrO_2 КЕРАМИКАЛАРЫНДАҒЫ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРГЕ ӘСЕРІ

К. М. Тынышбаева [1], А. Л. Козловский [1,2], И. З. Жуматаева [1]

[1]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
[2]ҚР АЭА Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail:artem88sddt@mail.ru*

Зерттелген механикалық белсендірілген ZrO_2 керамикаларының құрылымдық параметрлеріне жүргізілген кешенді талдау нәтижесінде құрылымның барынша біртектілігін, құрылымдық реттелудің жоғары дәрежесін және қалдық механикалық кернеулердің ең төменгі концентрациясын қамтамасыз ететін термиялық өңдеудің оңтайлы температуралық аралығы анықталды. Рентгендік дифракция және Раман спектроскопиясы әдістерін қолдана отырып, керамикадағы құрылымдық өзгерістерге талдау жүргізілді. Талдау нәтижесінде күйдіру температурасының жоғарылауы механикалық индукцияланған кернеулердің ішінара босаңсуына және оттегі вакансияларының қайта бөлінуіне әкелетіні анықталды. Сонымен қатар, зерттелген күйдіру температураларының барлық диапазонында қарқынды механикалық қысым немесе оттегі бос орындарының көп болуы жағдайында цирконий диоксидіне тән фазалық полиморфты трансформация процестерінің инициализациясы байқалмайды. Алынған деректерді талдау 1000–1100 °C күйдіру температурасында құрылымда деформация қалдық кернеулерінің және механикалық әсерден пайда болған күшті бұзылу аймақтарының болуымен байланысты күрделі ақаулар басым болатынын көрсетті. Күйдіру температурасы 1200–1300 °C дейін көтерілген кезде құрылымдағы ақаулардың бірдей ықтимал таралуы байқалады. Ал 1400 °C жоғары температурада F^+ – орталықтары мен V_O – вакансияларының басым болуы байқалады. Олардың концентрациясының артуы ақаулардың ішінара релаксациясына және оттегі вакансияларының пайда болуына байланысты құрылымдық реттіліктің артуымен байланысты.

***Түйін сөздер**: ZrO_2 керамикасы, құрылымдық реттелу, қалдық кернеулер, деформация бұрмаланулары, вакансия ақаулары.*

THE ROLE OF ANNEALING TEMPERATURE ON STRUCTURAL CHANGES IN ZrO_2 CERAMICS

K. M. Tynyshbayeva [1], A. L. Kozlovskiy [1,2*], I. Z. Zhumatayeva [1]

[1]NJSC L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
[2] RSE on REM Institute of Nuclear Physics ARKAE, Almaty, Kazakhstan

**E-mail for contacts: artem88sddt@mail.ru*

During the comprehensive analysis of the structural parameters of the studied mechanically activated ZrO_2 ceramics, the optimal temperature range for heat treatment was established, ensuring maximum structural homogeneity, a high degree of structural ordering and a minimum concentration of residual mechanical stresses. An analysis of structural changes in ceramics, carried out using X-ray diffraction and Raman spectroscopy methods, made it possible to establish that an increase in annealing temperature leads to partial relaxation of mechanically induced stresses and redistribution of oxygen vacancies. Moreover, in the entire range of annealing temperatures studied, no initialization of phase polymorphic transformation processes, characteristic of zirconium dioxide in the case of intense mechanical pressures or the presence of a large number of oxygen vacancies, is observed. Analysis of the data obtained showed that at annealing temperatures of 1000 – 1100 °C, the structure is dominated by complex defects associated with the presence of deformation residual stresses and areas of strong disorder that arose under mechanical impact. With an increase in the annealing temperature to 1200 – 1300 °C, an equally probable distribution of defects in the structure is observed, while at temperatures above 1400 °C, there is a dominance of F^+ centers and V_O – vacancies, the growth in the concentration of which is associated with an increase in structural ordering due to partial relaxation of defects and the formation of oxygen vacancies.

***Key words**: ZrO_2 ceramics, structural ordering, residual stresses, deformation distortions, vacancy defects.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-134-141
УДК 621.039.6, 621.793.3, 537.525

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БОРОНИЗАЦИИ ДЛЯ ТОКАМАКА КТМ

А.Ж. Дуйсен[1*], Б.Ж. Чектыбаев[1,2], А.Г. Коровиков[1], Е.А. Кашикбаев[1,2], В.С. Полковников[1], Д.А. Ольховик[1], А.Т. Кусаинов[1], Қ. Жеңіс[1]

[1]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2]НАО «Шакарим университет», Семей, Казахстан

** E-mail для контактов: duysen@nnc.kz*

В данной работе проведен литературный обзор применения и особенностей боронизации на установках типа токамак, обоснована методика подготовки вакуумной камеры (ВК) токамака КТМ к плазменным экспериментам с использованием системы боронизации на основе карборана. Описана техническая реализация процесса в условиях тлеющего разряда, включая конструкцию системы подачи паров с обогреваемым ресивером и транспортного тракта на токамаке КТМ. Представлен проект разрабатываемого диагностического комплекса для оперативного контроля чистоты среды, объединяющий масс-спектрометрию и оптический мониторинг линии излучения бора.

Ключевые слова: *токамак, КТМ, боронизация, тлеющий разряд, первая стенка.*

Введение

Подготовка вакуумной камеры к экспериментам по получению плазменных разрядов является одной из важнейших задач на установках управляемого термоядерного синтеза. От состояния и чистоты стенок зависит качество и повторяемость плазменных разрядов. Для минимизации поступления примесей со стенок во многих токамаках применяется метод боронизации.

Боронизация – метод плазмохимического осаждения боруглеродной пленки на первую стенку вакуумной камеры. Целью боронизации является снижение поступления примесей (кислород, углерод и т.п.) в плазму, контроль рециклинга изотопов водорода.

Впервые данный метод был применен на токамаке TEXTOR в 1989 году в среде тлеющего разряда гелия и диборана (B_2H_6). Выбор диборана был обусловлен летучестью и легкостью диссоциации в плазме. После боронизации на TEXTOR резко уменьшились радиационные потери плазмы, снизилась концентрация кислорода в плазме и эффективный заряд плазмы опустился до значения, близкого к 1 [1].

В данной статье представлена методика проведения боронизации на токамаке КТМ и методы определения толщины осаждаемого покрытия с использованием образцов-свидетелей. Следует отметить, что данный процесс будет применен на токамаке КТМ впервые и направлен на повышение чистоты плазмы за счет снижения уровня примесей, уменьшение радиационных потерь и общее улучшение ключевых параметров плазменного разряда, за счет контроля рециклинга водорода в первой стенке вакуумной камеры.

Обзор современных методов боронизации в токамаках

После массового перехода на графитовые лимитеры и диверторы в установках типа токамак возникли проблемы с загрязнением плазмы легкими примесями, такими как углерод и кислород. Непрерывная десорбция паров воды с неочищенных металлических поверхностей и первой стенки вакуумной камеры инициирует лавинный механизм. Ионизированный на периферии шнура кислород внедряется в приповерхностные слои графита, а затем высвобождается в виде молекулярных соединений под воздействием ионной бомбардировки. Экспериментально зафиксированный рост потоков углерода и кислорода по мере приближения плазмы к стенке подтверждает, что именно пристеночные химические реакции и последующее распыление диафрагм ионами кислорода доминируют в загрязнении разряда и вносят вклад в рост радиационных потерь плазмы. Традиционные методы очистки камеры, такие как тлеющий разряд в гелии, дают лишь кратковременный эффект, поскольку не устраняют сам источник десорбции воды, что делает необходимым поиск принципиально новых методов долговременной пассивации внутрикамерных поверхностей [1].

Успешная демонстрация улучшения параметров плазмы на токамаке TEXTOR инициировала повсеместное внедрение боронизации плазмообращенных компонентов на других термоядерных установках. В экспериментах на TEXTOR в качестве прекурсора использовался диборан (B_2H_6), применение которого обеспечило эффективное подавление потоков примесей, снижение эффективного заряда плазмы Z_{eff} и радиационных потерь. Ключевым результатом модификации поверхности стало значительное снижение рециклинга водорода. Минимизация неконтролируемой десорбции рабочего газа со стенок предотвратила избыточный рост плотности и связанные с ним радиационные срывы, что позволило реализовать прецизионное управление плотностью плазмы и повысить общую стабильность разряда.

Однако использование диборана серьезно усложнено его высокой токсичностью, взрывоопасностью

и эффектом насыщения стенок водородом, который искажает изотопный состав топлива. Так, на токамаке TFTR высокая опасность диборана требовала использования смесей с гелием и метаном, а проблема водородного удержания в конечном итоге вынудила перейти на дейтерированный диборан (B_2D_6.) [2].

Для обеспечения безопасности в последующем на установках были внедрены твердые прекурсоры, сублимирующие при 60–120 °C. Декаборан ($B_{10}H_{14}$) на токамаке JT-60U показал результаты, аналогичные диборановому методу (содержание бора в пленках >90%, падение концентрации кислорода в плазме) [3, 6]. Наиболее популярным благодаря безопасности и дешевизне стал карборан ($C_2B_{10}H_{12}$), формирующий аморфную пленку a-B/C:H с отношением B/C до 3,7. Методика успешно применяется на токамаках Т-15МД, Глобус-М2, ТУМАН-3, EAST и KSTAR, снижая Z_{eff} до ~1 и увеличивая предельную плотность плазмы в 1,5–2 раза [4].

Триметилбор ($B(CH_3)_3$) – это газообразный прекурсор, который рассматривался как менее опасная альтернатива диборану, хотя и уступает твердым карборану и декаборану по удобству работы, но выгодно отличается возможностью подачи непосредственно в плазменный разряд для кондиционирования стенок в реальном времени [5, 6, 7].

Подробное сравнение основных прекурсоров представлено в таблице 1. Стоит отметить, что для установок с полностью металлическими стенками приоритетными являются прекурсоры без углерода в составе (для исключения нежелательного накопления углерода на металле), а также замена водорода на дейтерий для предотвращения нежелательного изотопного обмена и разбавления рабочего топлива.

Выбор прекурсора и конкретные методические подходы кардинально зависят от материала первой стенки токамака, что накладывает жесткие технологические ограничения. В случае графитовой первой стенки использование карборана является оптимальным, так как сродство аморфной боруглеродной пленки с пористой структурой графита обеспечивает отличную адгезию без риска отслоения. Это позволяет наносить относительно толстые слои (до 100–150 нм) без строгого контроля температуры подложки, а в качестве прекурсора здесь стандартно используют наиболее доступный и легко испаряемый орто-карборан. Напротив, для металлических стенок из вольфрама или стали карборан принципиально не применяется — вместо него используются исключительно безуглеродные прекурсоры, например, декаборан или диборан. Это обусловлено тем, что перенос углерода из карборана на металл привел бы к формированию боруглеродного слоя, что полностью нивелирует технологические преимущества чистой металлической стенки и маскирует ее истинные материаловедческие свойства.

Если раньше боронизация в среде тлеющего разряда считалась «золотым» стандартом, то с появлением новых установок типа сверхпроводящего токамака начали появляться и новые методы нанесения борсодержащих покрытий, что коснулось и выбора прекурсоров. Дело в том, что тлеющий разряд требует электрического поля для ускорения ионов, но в сильном магнитном поле электроны и ионы закручиваются по спиралям (разряд стягивается в шнур) и не могут эффективно и равномерно бомбардировать стенку.

Сверхпроводящий токамак – это установка, в которой для удержания плазмы используются обмотки из сверхпроводящих материалов вместо традиционных медных. Данный выбор обусловлен временем импульса разряда: медные катушки очень быстро нагреваются из-за омического сопротивления. По сравнению с ними сверхпроводящие катушки позволяют генерировать более сильные магнитные поля.

Основным отличием от классических токамаков является наличие постоянного магнитного поля. Так как отключение магнитных катушек нецелесообразно с энергетической точки зрения (ввод и вывод тока из магнитов требует огромной пиковой мощности от энергосети), намного экономичнее поддерживать ток в сверхпроводниках постоянно. Также немаловажными факторами являются механические нагрузки на материалы сверхпроводников и риск теплового срыва.

Для решения задачи проведения боронизации в условиях постоянного магнитного поля идеально подошли безэлектродные методы: СВЧ-разряд (ЭЦР)

Таблица 1. Сравнение прекурсоров, применявшихся для боронизации на токамаках

Прекурсор	Агрегатное состояние	Применение на токамаках	Достигнутые эффекты
Диборан (B_2H_6) / Дейтерированный диборан (B_2D_6)	Газ	TFTR, ASDEX-U	Подавление потоков примесей, снижение Z_{eff}
Декаборан ($B_{10}H_{14}$) / Дейтерированный декаборан ($B_{10}D_{14}$)	Твердый	JT-60U	Падение концентрации кислорода в плазме, высокое содержание бора в осаждаемой пленке.
Карборан ($C_2B_{10}H_{12}$)	Твердый	Т-15МД, Глобус-М2, EAST, KSTAR, выбран для КТМ	Снижение Z_{eff} до ~1, увеличение предельной плотности плазмы в 1,5–2 раза. Уменьшение рециклинга, улучшение удержания.
Триметилбор ($B(CH_3)_3$)	Газ	COMPASS, NSTX, TJ-I	Снижение потоков металлов, кислорода и углерода, уменьшение Z_{eff} и радиационных потерь, повышение предела плотности плазмы.

и ВЧ-разряд (ИЦР). Первыми в мире боронизацию с использованием СВЧ-разряда на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) провели японские физики на экспериментальной термоядерной установке Heliotron E (Университет Киото) в 1992–1993 годах.

Японский эксперимент на Heliotron E доказал принципиальные преимущества СВЧ-метода, главным из которых стала рекордная чистота покрытия с минимальным содержанием водорода. Оказалось, что атомное соотношение водорода к бору (H/B) в получившейся пленке составило всего 0,1, тогда как при обычном тлеющем разряде этот показатель достигал 0,4–1,0. Меньшее количество водорода в пленке означало, что стенки не будут бесконтрольно «выбрасывать» лишний газ в рабочую плазму во время термоядерных импульсов [8].

Требование к системе боронизации

Токамак КТМ – мегаамперная электрофизическая установка, предназначенная для исследования физики плазмы и испытания материалов первой стенки [9]. Для проведения материаловедческих испытаний материалов под тепловой нагрузкой плазмы в 20 МВт/м² необходимо обеспечить протекание плазменного разряда, в соответствии с заданным сценарием и воспроизводимостью. Поступление примесей со стенок вакуумной камеры в плазму может привести к снижению ее температуры и плотности, что, в свою очередь, сказывается на мощности потока частиц и энергии в SOL (Scrape-Off Layer).

Вакуумная камера токамака КТМ выполнена из нержавеющей стали 08Cr18Ni12Ti. Она обладает площадью 33 м^2, объемом 13,5 м^3 и оснащена 10 экваториальными, 10 вертикальными и 6 дивертерными диагностическими портами. Вся внутренняя металлическая поверхность камеры облицована графитовыми пластинами марки FP-479 [10].

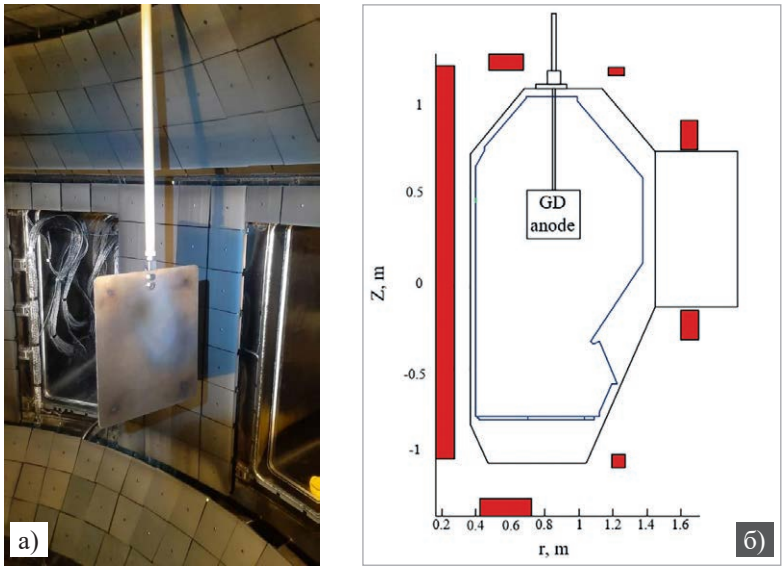
Разрабатываемая система боронизации будет входить в состав вакуумной системы токамака КТМ и использоваться для кондиционирования первой стенки в штатном режиме. Исходя из анализа литературных данных и опыта применения различных прекурсоров на ведущих термоядерных установках, для проведения боронизации на токамаке КТМ в качестве борсодержащего прекурсора был выбран карборан. Данный прекурсор хорошо зарекомендовал себя на ведущих научных установках при формировании равномерных аморфных боруглеродных покрытий, обладающих высокой адгезией и обеспечивающих эффективное связывание примесей кислорода и углерода, поступающих в плазму со стенок вакуумной камеры. Формирование такого покрытия способствует снижению уровня примесей в плазме, уменьшению рециклинга водорода и улучшению условий удержания плазмы. Карборан нетоксичен и прост в применении, что существенно упрощает регламентные работы, поскольку после каждой экспериментальной кампании вакуумная камера вскрывается для юстировки, калибровки диагностического оборудования, технологических операций и очистки от пыли.

На основе проведенного анализа существующих подходов к осуществлению боронизации, а также с учетом технических возможностей токамака КТМ, критериев эффективности и эксплуатационной безопасности, в качестве рабочего метода было выбрано нанесение покрытия в тлеющем разряде. Альтернативный метод кондиционирования с использованием ионно-циклотронного резонанса (ИЦР) в данном случае неприменим из-за специфики работы высокочастотных (ВЧ) генераторов токамака КТМ. ВЧ-генераторы установки не способны функционировать в непрерывном режиме и требуют обязательной технологической паузы длительностью не менее 15 минут после каждого импульса, что делает невозможным поддержание стабильного и непрерывного процесса осаждения пленки. При этом внедрение отдельной специализированной ВЧ-системы потребует значительных временных и финансовых затрат, в связи с чем на данном этапе это представляется нецелесообразным.

В свою очередь, проведение боронизации в тлеющем разряде позволяет полностью обойти это ограничение, обеспечивая квазистационарный технологический цикл. Низкая энергия ионов в таком разряде, с одной стороны, полностью исключает нежелательное физическое распыление материала стенки, а с другой — обеспечивает мягкую активацию поверхности, необходимую для формирования однородной борсодержащей пленки. Благодаря способности тлеющего разряда стабильно заполнять весь сложный геометрический объем вакуумной камеры, достигается равномерное покрытие всех внутренних поверхностей, а отсутствие дуговых переходов и резких скачков тока делает процесс безопасным, легко управляемым и полностью соответствующим требованиям штатного кондиционирования установки.

Кондиционирование вакуумной камеры КТМ к экспериментам

Процедура подготовки вакуумной камеры к экспериментам осуществляется в несколько этапов. На первом этапе (при разгерметизированной камере) производится механическая очистка поверхности первой стенки от пыли и мелких частиц с помощью промышленного пылесоса. После герметизации осуществляется откачка камеры до давления 10^{-6} Торр с помощью одного безмасляного форвакуумного и трех турбомолекулярных насосов. Контроль давления в полости ВК ведется вакуумными датчиками Agilent IMG-100 (диапазон измерений $5\cdot10^{-9}$ - $1\cdot10^{-3}$ Торр). Параллельно с откачкой проводится омический прогрев элементов вакуумной камеры до температуры 180±10 °C для удаления адсорбированных паров воды [10].



а – фотография анода тлеющего разряда; б – схема введения анода в ВК КТМ

Рисунок 1. Электрод тлеющего разряда токамака КТМ

Завершающим этапом подготовки является обработка поверхности тлеющим разрядом с использованием газов: аргона, водорода и гелия. Ионы рабочего газа, ускоряясь в области катодного падения потенциала, бомбардируют внутреннюю поверхность камеры. Данный процесс обеспечивает десорбцию примесей, наличие которых ограничивает достижение предельных параметров плазмы. Для организации тлеющего разряда в верхнем патрубке токамака установлен вакуумный манипулятор, вводящий в камеру одиночный молибденовый электрод (анод) размером 25 × 20 см (см. рисунок 1). На анод подается высокий положительный потенциал относительно заземленных стенок камеры. При давлении газа порядка 10^{-3} Торр пробой наступает при напряжении 1,5 кВ. В дальнейшем горение разряда поддерживается при напряжении 300–600 В и токе 6 А.

Разработка системы боронизации

Исходя из опыта подготовки вакуумной камеры к экспериментам на установках термоядерного синтеза, боронизация плазмообращенных компонентов должна быть заключительным этапом кондиционирования вакуумной камеры. Для боронизации необходимо прогреть вакуумную камеру до 180 °С, зажечь тлеющий разряд в среде гелия. Во время тлеющего разряда необходимо открыть клапан тракта подачи паров карборана. Важно поддерживать соотношение паров гелия и карборана в пределах от 3/1 до 5/1 и давление $4–5 \cdot 10^{-3}$ Торр в вакуумной камере.

Контроль и мониторинг процесса боронизации и интенсивность осаждения пленки во время тлеющего разряда будут осуществляться с помощью квадрупольного масс-спектрометра ExTorr 200M, который необходим для регистрации всех присутствующих элементов внутри вакуумной камеры. Планируется снимать масс-спектры с периодичностью 30 мин для контроля паров карборана и определения масс 144 (молекулярная масса карборана $C_2B_{10}H_{12}$), 70 (соединения из карборана, образующиеся при диссоциации молекулы).

Система боронизации на комплексе токамака КТМ представляет собой прогреваемый контейнер и сильфонный тракт подачи паров карборана в ВК, оснащенные вакуумными клапанами. Принципиальная схема системы боронизации и фотографии сильфонного тракта с контейнером представлены на рисунке 3. Для обеспечения процесса сублимации (перехода порошка в газовую фазу), а также предотвращения конденсации паров карборана, система оснащена тремя нихромовыми нагревателями для независимого прогрева стенок контейнера, его днища и сильфонного тракта. При проведении боронизации система предварительно вакуумируется, стенки контейнера и сильфонный тракт прогреваются до 70 °С, а днище контейнера – до максимальной температуры 120 °С.

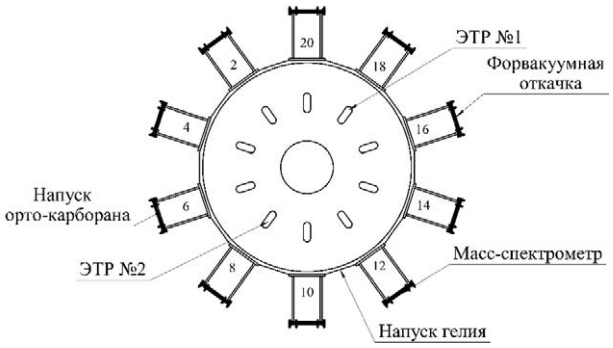
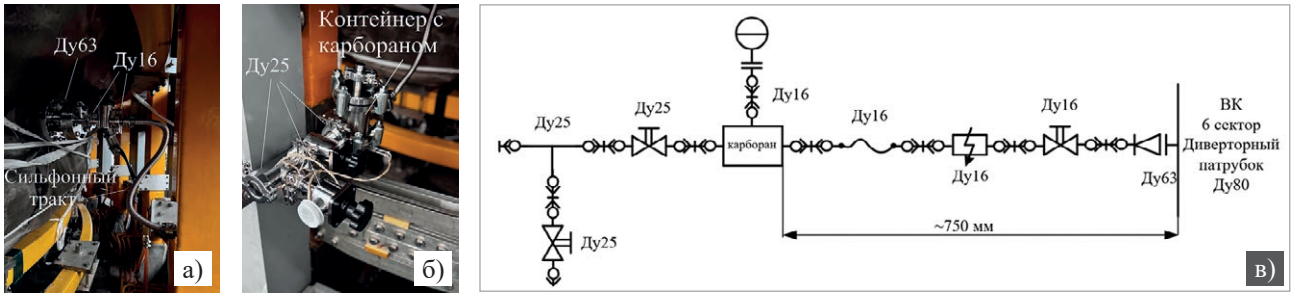


Рисунок 2. Тороидальное сечение вакуумной камеры КТМ



а – тракт подачи паров карборана; б – контейнер с порошком карборана; в – принципиальная схема системы боронизации.

Рисунок 3. Система боронизации токамака КТМ

Мониторинг результатов боронизации

Для оценки равномерности формирования боруглеродного покрытия на внутренней поверхности вакуумной камеры были изготовлены и будут размещены специальные диагностические образцы, представляющие собой молибденовые винты с предварительно нанесенным углеродным покрытием толщиной 300 нм [11], а также полированные графитовые образцы. Использование молибдена обусловлено его высокой химической инертностью, термической стойкостью и стабильностью свойств в условиях плазменного воздействия, благодаря чему он не взаимодействует с осаждаемой пленкой и позволяет проводить последующие измерения толщины покрытия с высокой точностью. Предварительное углеродное покрытие формирует хорошо различимую границу раздела между исходной поверхностью и осаждаемым в процессе боронизации боруглеродным слоем, что существенно повышает достоверность профилометрических измерений.

В качестве дополнительного диагностического материала будут использованы графитовые образцы с предварительно отполированной рабочей поверхностью, изготовленные из той же марки графита, который применяется для облицовки первой стенки вакуумной камеры токамака КТМ. Использование графитовых образцов позволяет оценить особенности формирования боруглеродного покрытия непосредственно на материале первой стенки вакуумной камеры, что обеспечивает получение результатов, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации токамака.

Внешний вид молибденового диагностического винта, графитовых образцов и держателя для их размещения внутри вакуумной камеры представлен на рисунке 4. Конструкция держателя обеспечивает надежную фиксацию диагностических образцов, при этом рабочие поверхности молибденового винта и графитовых вставок ориентированы в сторону внутреннего объема вакуумной камеры и непосредственно подвергаются воздействию плазмы тлеющего разряда и потока осаждаемых частиц.

Как можно заметить из рисунка 4, рабочая поверхность каждого диагностического образца частично закрыта графитовой пластиной на ~50% ее площади. Такое решение обеспечивает формирование на одном образце как области, подвергавшейся осаждению боруглеродного покрытия, так и области, сохранившей исходное состояние поверхности.

Использование частично закрытых образцов позволяет непосредственно после боронизации определить толщину осажденной пленки по перепаду высот между открытой и закрытой областями, оценить равномерность осаждения боруглеродного покрытия, а также исследовать характер его распределения по поверхности подложки.

Диагностические подложки будут установлены в двух тороидально разнесенных сечениях вакуумной камеры, соответствующих 8 и 18 секторам токамака КТМ (см. рисунок 2). Выбор именно этих точек обусловлен необходимостью оценки пространственной неоднородности процесса боронизации. В 18 секторе ВК КТМ расположен электрод тлеющего разряда, являющийся источником формирования плазмы при проведении боронизации. В связи с этим в данной области можно ожидать более интенсивного воздействия плазмы на поверхность образцов, что потенци-

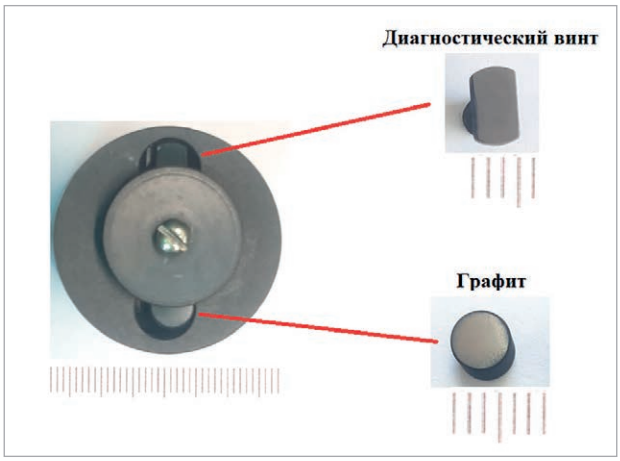


Рисунок 4. Фотография держателей с диагностическими образцами для измерения толщины покрытия

ально может привести к изменению скорости осаждения покрытия.

В свою очередь, 8 сектор расположен практически на противоположной стороне тороидальной камеры относительно электрода тлеющего разряда. Размещение диагностических образцов в данной области позволяет определить, насколько эффективно плазма и пары карборана распространяются по всему объему вакуумной камеры и обеспечивает ли выбранная технология формирование однородного боруглеродного покрытия на удаленных от источника разряда участках. Сравнение толщины и морфологии покрытий, сформированных на образцах, установленных в 8 и 18 секторах, позволит количественно оценить равномерность процесса боронизации по тороидальному направлению и определить влияние расположения относительно электрода тлеющего разряда на характеристики осаждаемой пленки.

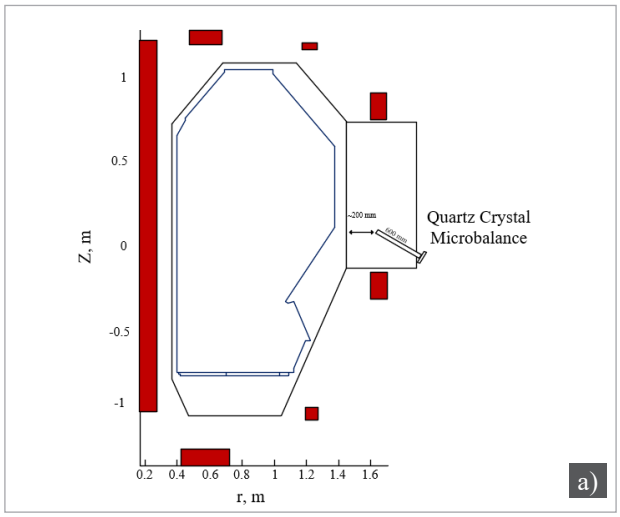
После проведения боронизации диагностические образцы будут извлечены из вакуумной камеры и подвергнуты комплексному анализу. Толщина сформированного покрытия будет определяться с использованием профилометра SJ-410 (Mitutoyo) методом измерения перепада высот между исходной поверхностью и областью осаждения. Для детального изучения морфологии поверхности и структуры нанесенного покрытия методы электронной микроскопии и элементного анализа будут применены ко всем типам извлеченных образцов.

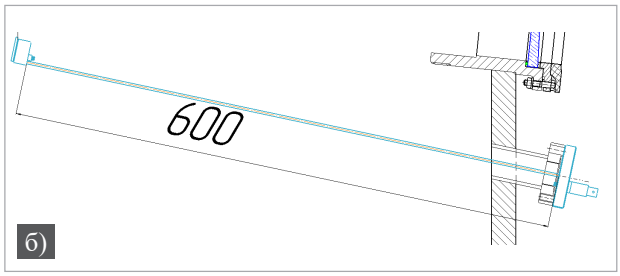
Дополнительно для in-situ определения толщины напыляемого покрытия разрабатывается система измерения на основе кварцевых микровесов (Quartz Crystal Microbalance). Данный метод измерения активно используется на токамаках, таких как EAST, ASDEX-U [12, 13]. Физический принцип работы QCM основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте, при котором переменное электрическое поле возбуждает в кварцевом резонаторе высокостабильные акустические колебания сдвига. Осаждение исследуемого вещества на поверхность кристалла увеличивает его эффективную массу, что приводит к строго пропорциональному снижению базовой резонансной частоты колебаний. Диапазон измерений такой системы обладает субнанограммовой чувствительностью по массе (с разрешением по толщине до 0,1 Å) и позволяет непрерывно регистрировать толщину наносимого покрытия в широком интервале от долей нанометра до нескольких микрометров. На рисунке 5 показана предполагаемая схема размещения QCM на токамаке КТМ.

Для косвенного контроля состояния защитной боруглеродной пленки внутрикамерных элементов планируется внедрить монитор излучения бора B II (линия однократно ионизованного бора) на длине волны 345,1 нм. Сразу после боронизации первая стенка полностью закрыта борсодержащим слоем, поэтому в первых рабочих разрядах интенсивность линии B II максимальна. По мере эрозии и уноса пленки интенсивность B II снижается, а интенсивность линий C III растет. Падение сигнала B II ниже порогового уровня служит сигналом о деградации покрытия и необходимости повторной боронизации.

Основными диагностическими преимуществами линии B II (345,1 нм) являются высокая чистота сигнала и ее доступность для стандартных оптических систем. Благодаря расположению в ближнем УФ-диапазоне, излучение беспрепятственно проходит через кварцевые окна, а отсутствие самопоглощения в плазме обеспечивает высокую надежность количественного анализа. Именно на этой длине волны проводятся измерения на токамаках EAST, ASDEX-U и KSTAR, что подтверждает практическую реализуемость метода на современных установках [14, 15, 16].

Для регистрации излучения бора в ультрафиолетовой области спектра плазмы выбран объектив COL-UV/VIS от Avantes с рабочим диапазоном 200–2500 нм. Передача сигнала осуществляется при помощи оптоволокна, работающего в широком спектре от УФ до видимой области. Используемый интерфе-

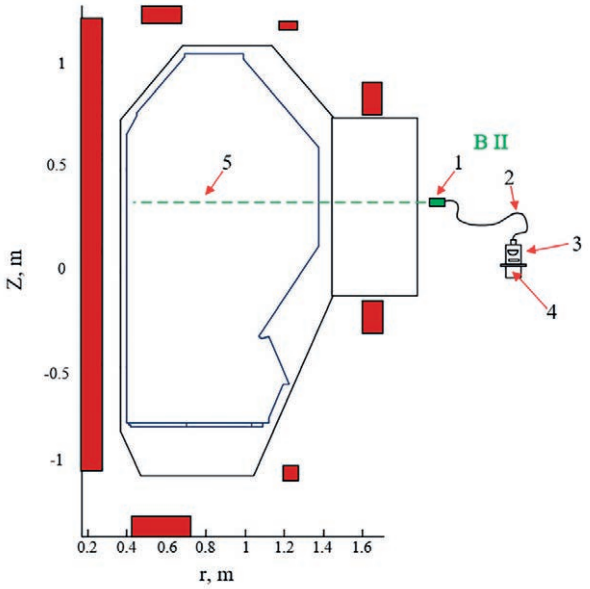




а) общий вид установки узла QCM на экваториальном патрубке ВК;
б) положение чувствительного кварцевого кристалла относительно внутреннего объема камеры

Рисунок 5. Размещение QCM для контроля процесса боронизации вакуумной камеры токамака КТМ

ренционный фильтр имеет центральную длину волны (CWL) 343 нм и ширину полосы пропускания на полувысоте (FWHM) 5 нм. Для усиления выходного сигнала будет использован фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H10722-210 со спектральной чувствительностью 230–700 нм. Схема мониторинга излучения линии бора, аналогичная монитору HαDα, который был собран ранее и показал свою работоспособность на токамаке КТМ, представлена на рисунке 6 [17].



1-объектив; 2-оптоволокно; 3-оптическая трубка с фильтром и линзой; 4-фотоэлектронный умножитель; 5-линия наблюдения монитора

Рисунок 6. Схема регистрации монитора излучения бора

Таким образом, предлагаемый диагностический комплекс обеспечивает комплексный контроль процесса боронизации на различных этапах. Кварцевые микровесы предназначены для непрерывного измерения скорости осаждения и толщины покрытия непосредственно во время боронизации, профилометр используется для последующего контроля толщины сформированной пленки на диагностических образцах, а монитор линии излучения B II позволяет оценивать сохранность и эффективность борсодержащего покрытия в процессе дальнейших плазменных экспериментов.

Заключение

В данной работе проведен литературный обзор и приведено обоснование проектирования и необходимости внедрения системы боронизации для комплекса токамака КТМ, которая выступит заключительным этапом кондиционирования первой стенки вакуумной камеры перед плазменными экспериментами. На основе детального анализа мирового опыта в качестве прекурсора был выбран нетоксичный и безопасный в эксплуатации твердый карборан, обеспечивающий формирование равномерных аморфных боруглеродных покрытий с высокой адгезией.

Для внедрения методики была успешно спроектирована и изготовлена система подачи паров, состоящая из контейнера-ресивера и сильфонного тракта, которые оснащены тремя независимыми нихромовыми нагревателями для обеспечения сублимации и предотвращения конденсации прекурсора. В ходе работы были четко определены и регламентированы оптимальные технологические параметры процесса, включающие омический прогрев элементов камеры до 180 ± 10 °C, зажигание тлеющего разряда в гелии при давлении 10^{-3} Торр и поддержание соотношения смеси гелия и паров карборана в диапазоне 3:1–5:1.

Для обеспечения всестороннего оперативного и последующего контроля разработан многокомпонентный диагностический комплекс, объединяющий масс-спектрометр ExTorr 200M для непрерывного анализа газовой среды, частично экранированные молибденовые и графитовые образцы-свидетели в тороидально разнесенных 8 и 18 секторах для профилометрических измерений на SJ-410, а также создаваемые системы кварцевых микровесов (QCM) для in-situ мониторинга толщины пленки и оптический монитор спектральной линии бора B II (345,1 нм).

Практическая реализация предложенных решений должна позволить в значительной степени снизить поступление легких примесей кислорода и углерода в плазменный шнур со стенок, минимизировать радиационные потери энергии и эффективно контролировать рециклинг водорода. В конечном итоге это обеспечит высокую стабильность и воспроизводимость плазменных разрядов, что критически важно для проведения контролируемых материаловедческих испытаний элементов первой стенки при экстремальных тепловых нагрузках до 20 МВт/м².

Данная исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования МНВО РК проекта AP26103385 по теме «Исследование влияния условий проведения экспериментов на параметры плазменного разряда токамака КТМ».

Литература / References:

1. J. Winter, H.G. Esser, L. Konen, V. Philipps, H. Reimer, J. von Seggern, J. Schlüter, E. Vietzke, F. Waelbroeck, P. Wienhold, T. Banno, D. Ringer, S. Veprek, Boronization in TEXTOR, J. Nucl. Mater. 162 (1989) 713–723, https://doi.org/10.1016/0022-3115(89)90352-8.
2. H. F. Dylla, M. G. Bell, R. J. Hawryluk, et al., J. Nucl. Mater. 176–177, 337 (1990).
3. Saidoh, M.; Ogiwara, N.; Shimada, M.; Arai, T.; Hiratsuka, H.; Koike, T.; Shimizu, M.; Ninomiya, H.; Nakamura, H.; Jimbou, R.Initial boronization of JT-60U tokamak using

decaborane. Jpn. J. Appl. Phys. 1993, 32, 3276–3281 J. Winter, et al., ”Bomntrimethyl B(CH3)3 - A less hazardous substance for boronization,” J. Nucl. Mater., 1768~177, pp 486-489, (1990).
4. Sharapov, V.M.; Mirnov, S.V.; Grashin, S.A.; Lebedev, S.V.; Kovan, I.A.; Krasilnikov, A.V.; Krupin, V.A.; Levin, L.S.; Romannikov,A.N.; Zakharov, A.P. Boronization of Russian tokamaks from carborane precursors. J. Nucl. Mater. 1995, 220–222, 730–735.
5. J. Winter, et al., ”Borontrimethyl B(CH3)3 - A less hazardous substance for boronization,” J. Nucl. Mater., 1768~177, pp 486-489, (1990).
6. F. L. Tabarés, E. de la Cal, D. Tafalla, R. Balbín, T. Estrada, I. García-Cortés, M. A. Ochando, M. A. Pedrosa, and B. Zurro, “Boronization of the TJ-I tokamak by trimethylboron and decaborane,” J. Nucl. Mater. 220–222, 688–692 (1995).
7. Skinner C.H., Bedoya F., Scotti F., Allain J.P., Blanchard W.,Cai D., Jaworski M. and Koel B.E. 2017 Nucl. Mater. Energy 12 744–8.
8. K. Kondo, et al., Impurity behavior in boronized Heliotron E, J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 1052–1056.
9. E.A. Azizov, et al., Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basis parameters, Fusion Eng. Des. 56-57 (2001) 831–835.
10. I.S. Obraztsov, D.V. Ryzhakov, B.Z. Chektybaev, et al., Preparation of vacuum chamber of the KTM tokamak for experiments, Phys. At. Nucl. 86 (Suppl 1) (2023), S53–S56, https://doi.org/10.1134/S1063778823130069.
11. Krat, S.A., Chektybayev, B.Z., Batyrbekov, E.G. et al. Diagnostics of Long-Term Erosion and Deposition of the Material of the First Wall in the KTM Tokamak: Testing and First Results. Phys. Atom. Nuclei 88 (Suppl 2), S186–S194 (2025). https://doi.org/10.1134/S1063778825140078.
12. Liu Y.M. et al 2025 Studies of material deposition during boronization using quartz crystal microbalance in EAST Nucl. Mater. Energy 44 101964.
13. Rohde V., Krieger K., Hohmann T.-O., Redl A., Hobirk J., AnS. and Sasidharan S. 2025 Nucl. Mater. Energy 45 102036.
14. Fu Jia et al 2012 Plasma Sci. Technol. 14 1048
15. Bortolon A. et al 2019 Nucl. Mater. Energy 19 384
16. Hanna Schamis et al 2025 Nucl. Fusion 65 086037
17. Жүнісбек С.А., Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Жаксыбаева А.А., Женіс Қ., Мадиянова Ә.Н. «Результаты спектроскопических измерений плазменных разрядов на Токамаке КТМ». Вестник НЯЦ РК. 2023;(3):193. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-193.

КТМ ТОКАМАГЫН БОР АТОМДАРЫМЕН ҚАНЫҚТЫРУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

А. Ж. Дуйсен[1*], Б. Ж. Чектыбаев[1,2], А. Г. Коровиков[1], Е. А. Кашикбаев[1,2], В. С. Полковников[1], Д. А. Ольховик[1], А. Т. Кусаинов[1], Қ. Женіс[1]

[1]ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2]Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: duysen@nnc.kz*

Бұл жұмыста токамак типті қондырғыларды бор атомдарымен қанықтыруды қолдану және оның ерекшеліктеріне әдеби шолу жасалды, сондай-ақ карборан негізіндегі боронизациялау жүйесін пайдалана отырып, КТМ токамагының вакуумдық камерасын плазмалық эксперименттерге дайындау әдістемесі негізделді. Солғын разряд жағдайындағы процестің техникалық жүзеге асырылуы, соның ішінде қыздырылатын ресивері бар бу беру жүйесінің және КТМ токамагындағы тасымалдау трактының конструкциясы сипатталған. Масс-спектрометрия мен бордың сәулелену сызығын оптикалық мониторингілеуді біріктіретін, орта тазалығын жедел бақылауға арналған әзірленіп жатқан диагностикалық кешен жобасы ұсынылды.

Түйін сөздер: *токамак, КТМ, бор атомдарымен қанықтыру, солғын разряд, бірінші қабырға.*

DEVELOPMENT OF BORONIZATION METHODOLOGY FOR THE KTM TOKAMAK

A.Zh. Duisen[1*], B.Zh. Chektybayev[1,2], A.G. Korovikov[1], Ye.A. Kashikbayev[1,2], V.S. Polkovnikov[1], D.A. Olkhovik[1], A.T. Kussainov[1], K. Zhenis[1]

[1]Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2]NP JSC “Shakarim University”, Semey, Kazakhstan

** E-mail for contacts: duysen@nnc.kz*

In this paper, a literature review on the application and features of boronization in tokamak-type devices is presented, and a methodology for preparing the vacuum chamber of the KTM tokamak for plasma experiments using a carborane-based boronization system is substantiated. The technical implementation of the process under glow discharge conditions is described, including the design of the vapor delivery system with a heated receiver and the transport line on the KTM tokamak. A project of the diagnostic complex under development for real-time monitoring of the environment purity, combining mass spectrometry and optical monitoring of the boron emission line, is presented.

Keywords: *tokamak, KTM, boronization, glow discharge, first wall.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-142-150
УДК 621.039.536

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ СОСТАВЛЯЮЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ ИГР

Д.Т. Женіс*, О.М. Жанболатов, Н.Е. Мухамедов, Р.А. Иркимбеков, Г.А. Витюк

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: zhengis@nnc.kz*

В работе представлены результаты исследования взаимосвязи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения в активной зоне импульсного исследовательского реактора ИГР при холодном состоянии активной зоны. С использованием программного кода MCNP6 выполнена серия расчетов мгновенного и запаздывающего энерговыделения с высокой статистической точностью, получены детальные данные о пространственном распределении энерговыделения по всем колоннам и блокам активной зоны и отражателя. Для количественной оценки взаимосвязи применен ранговый коэффициент корреляции Спирмена, значения которого для всех исследованных колонн превысили 0,98, что свидетельствует о наличии монотонной статистической зависимости между мгновенным и запаздывающим энерговыделением. Методом наименьших квадратов в логарифмическом масштабе определены параметры степенной зависимости запаздывающего энерговыделения от мгновенного энерговыделения для восьми типов колонн; коэффициент детерминации $R^2 > 0{,}97$ подтверждает адекватность моделей. При этом подчеркивается, что установленная корреляционная связь не является доказательством причинно-следственной связи между мгновенным и запаздывающим энерговыделением, а отражает влияние нейтронного поля на формирование обоих компонентов энерговыделения. В отличие от традиционного подхода, предполагающего прямой расчет запаздывающей компоненты, предложенный подход позволяет оценивать запаздывающее энерговыделение по значениям мгновенного энерговыделения с использованием полученных степенных зависимостей. Полученные результаты могут быть использованы для ускорения нейтронно-физических расчетов при многовариантном анализе экспериментальных конфигураций, а также при разработке сопряженных методик моделирования для реакторных исследований.

***Ключевые слова**: нейтронно-физическая модель, корреляционная связь, MCNP, активная зона ИГР, энерговыделение, мгновенные, запаздывающие компонента, коэффициент Спирмена.*

Введение

Точная оценка распределения энерговыделения в активной зоне реактора ИГР является ключевым элементом анализа его нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик, а также расчетной оценки безопасности при проведении экспериментов. Ранее для реактора ИГР был предложен метод расчета энерговыделения в материалах облучательного устройства с учетом запаздывающей компоненты [1], который в настоящее время используется при расчетном сопровождении испытаний экспериментальных устройств на реакторе ИГР.

Детализированная нейтронно-физическая модель реактора, реализованная в коде MCNP [4], обеспечивает воспроизведение пространственно-энергетического распределения энерговыделения с высоким уровнем достоверности. При стандартных настройках расчета в MCNP учитывается лишь мгновенная составляющая энерговыделения. Расчет запаздывающей компоненты в экспортируемой версии MCNP выполняется на одном процессорном ядре, что приводит к существенному увеличению времени счета. Снижение числа частиц для сокращения времени расчета, в свою очередь, повышает статистическую погрешность и снижает достоверность результатов. При этом систематический анализ взаимосвязи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения для реактора ИГР ранее не выполнялся.

В настоящей работе исследование корреляционных связей между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения выполнено для холодного состояния реактора ИГР – состояния нулевой мощности при комнатной температуре всех элементов активной зоны (топливо, графитовые блоки отражателя). Для холодного состояния нейтронно-физическая модель определена наиболее точно, поскольку ее параметры не осложнены эффектами теплового расширения конструкции и доплеровского уширения сечений. По результатам серии нейтронно-физических расчетов получены данные о пространственном распределении мгновенного и запаздывающего энерговыделения в активной зоне и отражателе с детализацией по колоннам и блокам, оснащенным экспериментальным устройством.

Для количественной оценки связи между компонентами выбран ранговый коэффициент корреляции

Спирмена. Такой выбор обусловлен особенностями анализируемых данных: широким диапазоном значений (порядка шести десятичных порядков), возможным отклонением распределения от нормального, а также нечувствительностью рангового коэффициента к форме зависимости и его устойчивостью к статистическим выбросам, характерным для расчетов методом Монте-Карло. Для дополнительной оценки соответствия полученной зависимости расчетным данным использован метод наименьших квадратов в логарифмическом масштабе.

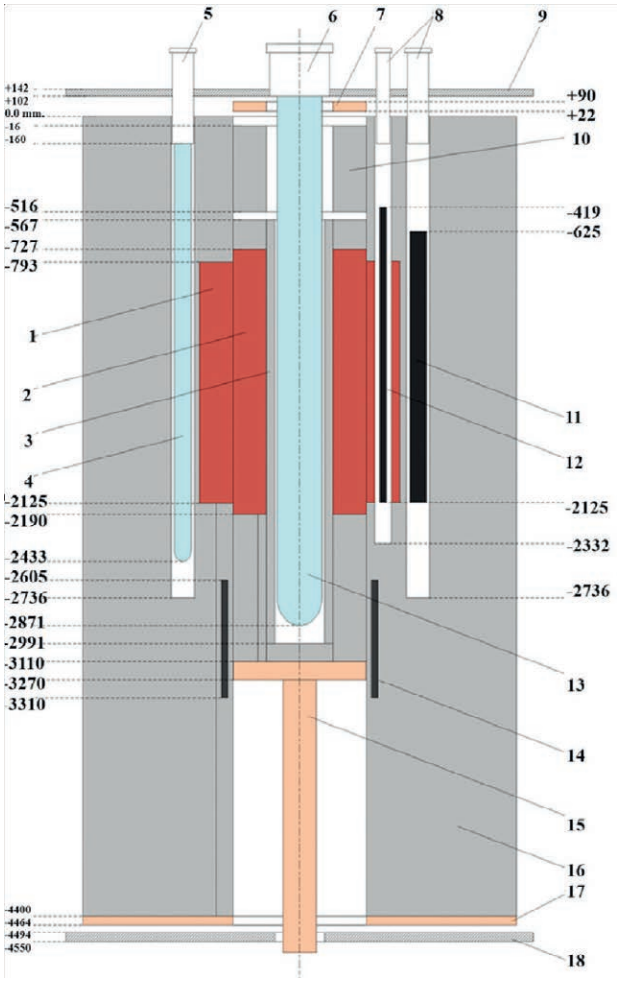
Установление степени корреляции позволяет количественно оценить взаимосвязь между мгновенной и запаздывающей компонентами и на основе полученных степенных зависимостей может быть разработан подход к оценке запаздывающего энерговыделения по значениям мгновенного энерговыделения без выполнения ресурсоемких прямых расчетов.

Объект исследования

Реактор ИГР – импульсный исследовательский ядерный реактор на тепловых нейтронах с гомогенной уран-графитовой активной зоной, являющийся самогасящимся по принципу ограничения импульса мощности. Конструктивно реактор представляет собой кладку из графитовых блоков, собранных в колонны высотой 4400 мм и размещенных в герметичном стальном цилиндрическом кожухе диаметром 3100 мм с гелиевой средой. Между кладкой и корпусом реактора установлены цилиндрические тепловые экраны, а сам корпус расположен в баке с охлаждающей водой [3].

Активная зона реактора имеет форму, близкую к кубической, с размерами 1400×1400 мм и объемом 1,89 м³. Она сформирована из 168 графитовых колонн, из которых 147 пропитаны раствором уранилдинитрата (азотнокислого уранила) и выполняют роль топливных элементов, а 21 колонна, не содержащая урана, служит замедлителем. Общее количество пропитанных (топливных) блоков составляет 1440, из них 1004 блока – в неподвижной части кладки и 436 – в подвижной части. В конструкции реактора предусмотрены центральный и боковые экспериментальные каналы; управление и защита осуществляются 16 графитовыми стержнями регулирования с поглотителем из окиси гадолиния, схема реактора приведена на рисунке 1.

Концентрация урана в пропитанных блоках распределена неравномерно: на границе активной зоны с отражателем установлены блоки с наименьшим содержанием топлива, что снижает термические напряжения, возникающие из-за перепада энерговыделения между центром и периферией активной зоны. Кроме того, в нижней части колонн размещены непропитанные (не содержащие урана) блоки, выполняющие функции отражателя нейтронов и тепловой изоляции



1 – активная зона (неподвижная часть кладки); 2 – активная зона (подвижная часть кладки); 3 – крестообразная втулка; 4 – неподвижная ампула НА-82; 5 – стояк бокового экспериментального канала (БЭК); 6 – стояк центрального экспериментального канала (ЦЭК); 7 – тепловой экран верхний; 8 – стояк стержня регулирования; 9 – плита верхняя; 10 – отражатель подвесной; 11 – стержень регулирования (УС); 12 – стержень регулирования (КС, ПС, АР, РР); 13 – неподвижная ампула НА-228; 14 – «борная отсечка»; 15 – колонна с водоохлаждаемой плитой («столик»); 16 – отражатель боковой; 17 – тепловой экран нижний; 18 – плита нижняя

Рисунок 1. Принципиальная схема реактора ИГР и высотные размеры основных элементов его конструкции

между активной зоной и опорными металлоконструкциями. В результате различные участки кладки – центральные топливные блоки, приграничные блоки с пониженным содержанием урана и непропитанные блоки нижней части колонн – находятся в существенно различных нейтронно-физических условиях, характеризующихся различиями в спектре нейтронов и плотности делений. Именно это структурное разнообразие обусловило необходимость проведения корреляционного анализа не для одной произвольной

колонны, а для представительной выборки колонн, расположенных в различных функциональных зонах реактора, типовые конфигурации которых показаны на рисунке 2.

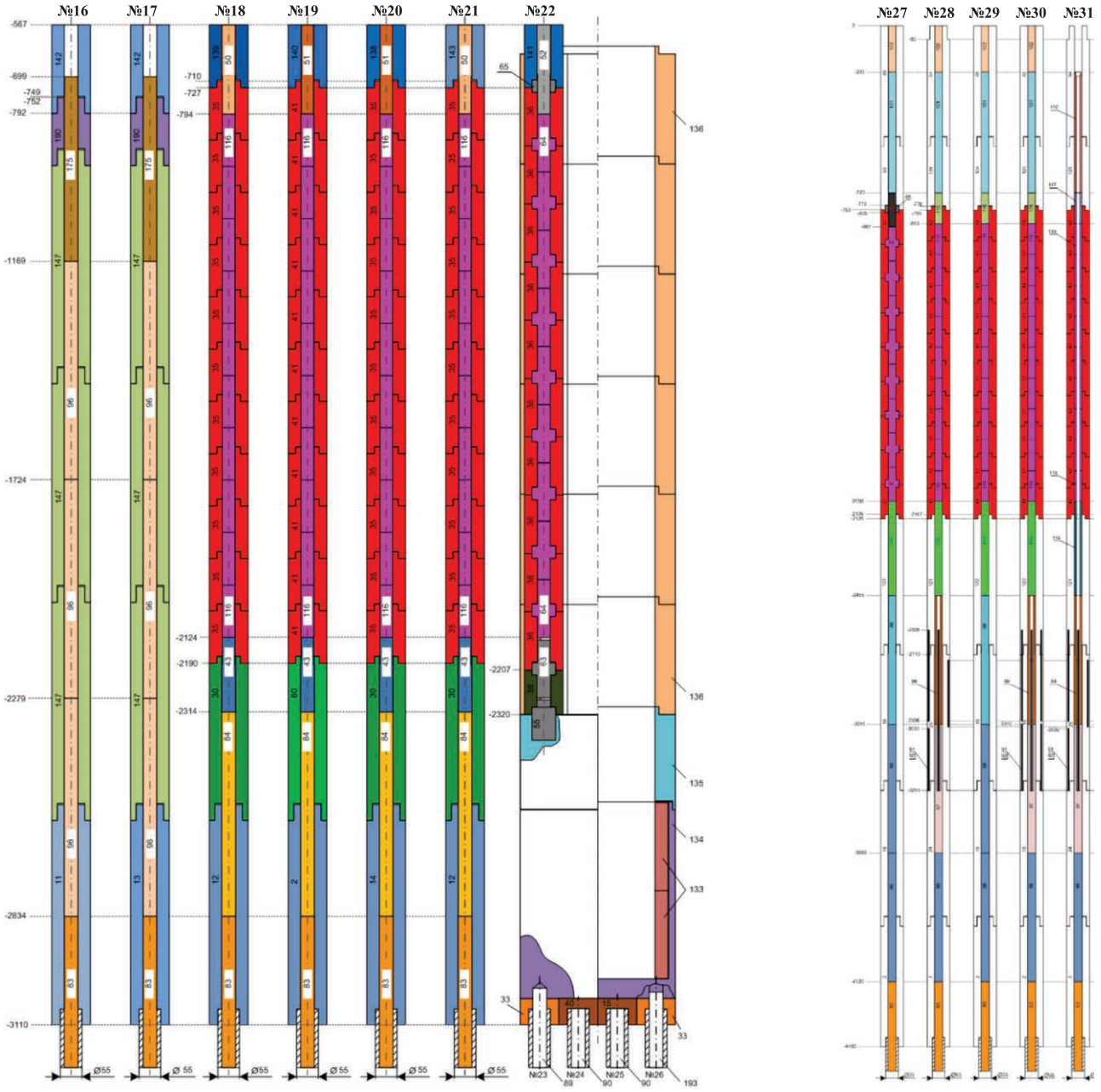
Корреляционный анализ проведен для референтных колонн №4, №5, №20, №22, №27, №28, №31 и №41.

Методика исследований

Нейтронно-физическое моделирование

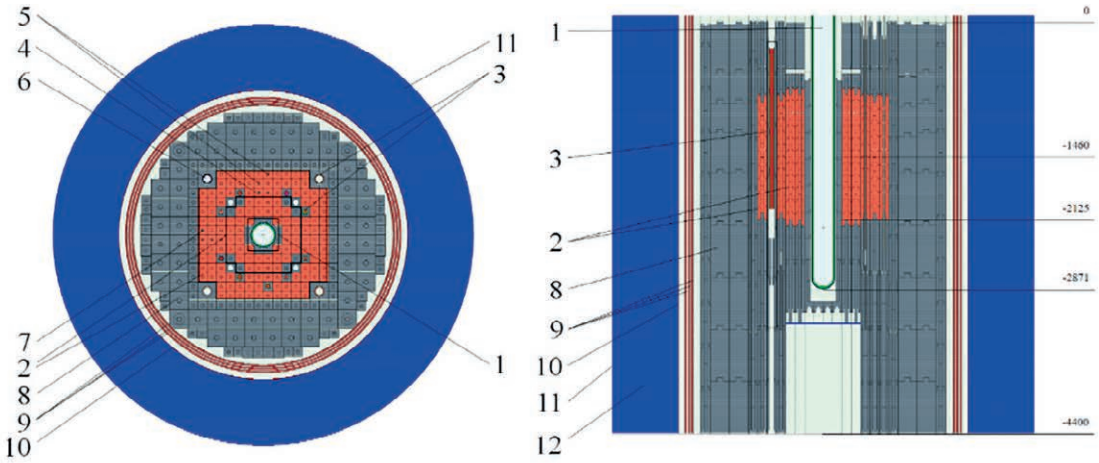
Для проведения нейтронно-физических расчетов активной зоны реактора ИГР использован программный код MCNP6.1, основанный на методе Монте-Карло [4], с библиотекой оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 [5]. При проведении расчетов использовалась модель реактора ИГР [2], детально описывающая реальную конструкцию и учитывающая неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны.

Графитовая кладка активной зоны моделируется с использованием 31 типа блоков. Геометрия каждого блока задана прямоугольным параллелепипедом. Материальный состав ячеек включает графит марок ГМЗ или 11-03 с учетом технологических примесей – меди, железа и изотопов бора ^{10}B и ^{11}B. Для графита, пропитанного ураном, дополнительно учитываются мар-



а) подвижная часть кладки б) неподвижная часть кладки

Рисунок 2. Типовые колонны активной зоны реактора ИГР



1 – центральный экспериментальный канал (ЦЭК); 2 – активная зона (подвижная и неподвижная части графитовой кладки); 3 – каналы управляющих стержней; 4 – канал физических измерений; 5 – канал термопары; 6 – боковой экспериментальный канал (БЭК); 7 – канал источника нейтронов; 8 – отражатель; 9 – боковая защита (трехслойная оболочка); 10 – кожух реактора; 11 – водяной бак; 12 – полость охлаждающей воды; 13 – ионизационные камеры (ИК); 14 –канал счетчика нейтронов; 15 – биологическая защита; 16 –верхняя защита

Рисунок 3. Вертикальное и горизонтальное сечения расчетной модели реактора ИГР

ганец, хром и никель. Для топливных блоков в состав материала также входит урановая компонента – уран, введенный в графит методом пропитки раствором уранилдинитрата, с учетом накопленных продуктов деления. Плотность пропитанного графита составляет 1,71 г/см³, непропитанного – 1,65 г/см³. Размеры основных топливных блоков составляют 97,6 × 97,6 × 133 мм. Блоки бокового, нижнего, верхнего и подвесного отражателей выполнены из непропитанного графита и также моделируются в виде прямоугольных параллелепипедов, но имеют другие геометрические размеры.

При построении геометрической модели учитывались конструктивные особенности графитовой кладки, включая вертикальные зазоры между колоннами величиной 2 мм и зазор 5 мм между неподвижной и подвижной частями кладки; горизонтальные зазоры между блоками внутри колонн отсутствовали. Расчетная модель также учитывала переменную концентрацию урана по топливным блокам, центральный и боковой экспериментальные каналы, элементы системы регулирования, отражатель и тепловые экраны**.** На рисунке 3 приведено вертикальное сечение модели реактора ИГР, используемой для расчетного сопровождения экспериментов

Расчеты мгновенной и запаздывающей составляющих энерговыделения выполнены методом Монте-Карло с контролем относительной статистической погрешности. В каждом расчете использовалось 1 000 000 историй на цикл; первые 20 циклов исключались из накопления статистики, после чего результаты 200 циклов использовались для формирования итоговых расчетных величин, что соответствует 200 млн учитываемых историй. По данным MCNP медианная относительная статистическая погрешность для мгновенной составляющей составила 0,44 %, а для запаздывающей – 0,82 %. Для 90 % расчетных значений погрешность не превышала 4,3 % для мгновенной и 10,0 % для запаздывающей составляющей. Более высокие значения относительной погрешности наблюдались преимущественно для областей с низким уровнем энерговыделения.

Корреляционный анализ методом Спирмена

Для количественной оценки связи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения применен коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ. Использование классического коэффициента корреляции Пирсона в данном случае нецелесообразно по нескольким причинам.

– широкий динамический диапазон значений мгновенной и запаздывающей компонент, охватывающий до-шести порядков (от $6{,}6\cdot10^{-8}$ до $7{,}3\cdot10^{-2}$), при котором параметрические методы становятся чрезмерно чувствительными к максимальным значениям и фактически игнорируют закономерности в областях с низким энерговыделением;

– нелинейный, степенной характер зависимости между компонентами, для выявления которого ранговый коэффициент подходит существенно лучше линейного коэффициента корреляции;

– устойчивость к стохастическому шуму, присущему результатам расчетов методом Монте-Карло, поскольку использование рангов минимизирует влияние локальных статистических выбросов в отдельных блоках.

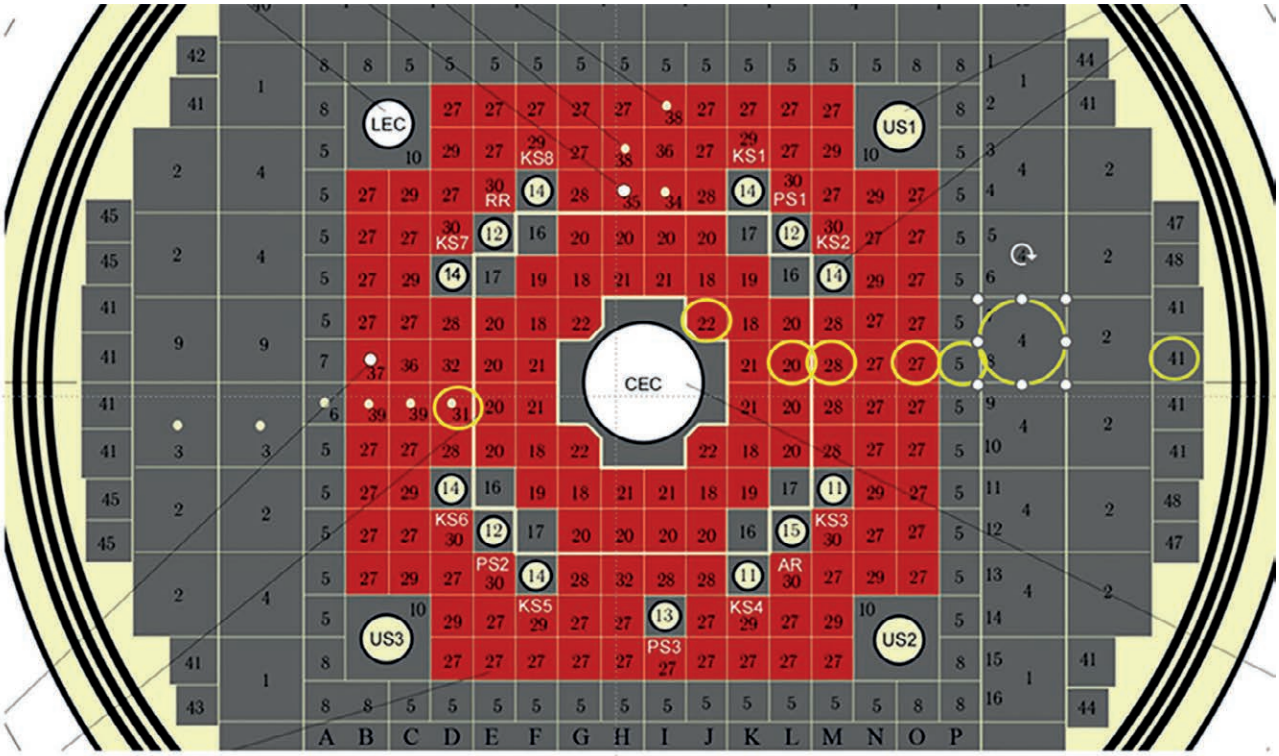


Рисунок 4. Выборочные колонны активной зоны (тип 27, 28, 20, 22, 31), отражателя (тип 41, 4, 5)

Для обеспечения достоверности анализа из 168 колонн активной зоны отобраны, как это было сказано выше, 8 референтных колонн (рисунок 4), представляющих различные функциональные зоны реактора: центральные топливные блоки с максимальными потоками нейтронов, блоки в области подвижных элементов системы управления и защиты, а также отражательные колонны на границе активной зоны.

Такой подход позволяет проверить устойчивость корреляционной связи в различных физических условиях, отличающихся спектром нейтронов и плотностью делений.

Расчет коэффициента ранговой корреляции выполнялся по классическому алгоритму [6]. Исходные значения мгновенной x и запаздывающей y компонент заменяются их рангами R_{x_i} и R_{y_i}, для каждой пары значений вычисляется разность рангов $d_i = R_{x_i} - R_{y_i}$, после чего коэффициент Спирмена определяется по формуле:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)}$$

где d_i – разность рангов мгновенной и запаздывающей компонент для i-го блока; n – число наблюдений (блоков) в колонне.

Результаты расчета коэффициента Спирмена для выбранных колонн представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции Спирмена по типам колонн

Тип колонны	Расположение блока	ρ (Спирмен)
Тип 41	Графитовый блок бокового отражателя	1,0000
Тип 4	Графитовый блок бокового отражателя	0,9880
Тип 5	Графитовый блок бокового отражателя	0,9983
Тип 27	Топливный блок НЧК	0,9993
Тип 28	Топливный блок НЧК	0,9979
Тип 20	Топливный блок ПЧК	0,9989
Тип 22	Топливный блок ПЧК	0,9982
Тип 31	Топливный блок НЧК	0,9978

Высокие значения коэффициента ($\rho \approx 1$) подтверждают, что пространственное распределение запаздывающей компоненты хорошо детерминировано полем мгновенных нейтронов, что обосновывает возможность перехода от прямого расчета запаздывающей компоненты к использованию аналитических моделей. Для центральных топливных колонн наблюдается практически идеальная корреляция, тогда как в периферийных областях отражателя значение коэффициента несколько снижается, что может быть связано с изменением спектра нейтронов и увеличением вклада рассеяния.

Физически такая корреляция объясняется тем, что обе компоненты энерговыделения являются

следствием одного и того же поля плотности делений: мгновенная составляющая непосредственно пропорциональна локальной скорости деления, тогда как запаздывающая связана с распадом предшественников запаздывающих нейтронов и продуктов деления, образующихся в тех же актах деления. Таким образом, высокая степень корреляции обусловлена общей нейтронно-физической природой формирования мгновенной и запаздывающей компонент энерговыделения.

Аппроксимация зависимости между компонентами энерговыделения

На основании установленной корреляционной связи между мгновенной (x) и запаздывающей (y) компонентами энерговыделения построена функциональная зависимость в виде степенной функции:

$$y = k \cdot x^a$$

Выбор данной формы обусловлен физической природой процессов энерговыделения, а также монотонным характером связи между рассматриваемыми величинами, установленным по результатам корреляционного анализа [7, 8]. Для определения параметров a и k выполнен переход к логарифмическим переменным:

$$u = \log_{10}(x), v = \log_{10}(y)$$

Исходная нелинейная зависимость приводится к линейному виду:

$$v = a \cdot u + b, \text{ где } b = \log_{10}(k)$$

Параметры a и b определены методом наименьших квадратов. Для выборки из 20 блоков колонны тип 41 получены средние значения $\bar{u} = -4{,}4875$, $\bar{v} = -4{,}4704$, коэффициент регрессии a = 1,00934 и свободный член b = 0,05910, откуда масштабный коэффициент $k = 10^b = 1{,}1458$. Итоговая аппроксимирующая зависимость для данной колонны имеет вид:

$$y = 1{,}1458 \cdot x^{1{,}00934}$$

Полученное значение показателя степени, близкое к единице, указывает на практически линейную зависимость между компонентами энерговыделения для данной колонны. В таблице 2 представлены параметры регрессионной зависимости для всех исследованных типов колонн.

Анализ данных показывает, что значения коэффициентов a и k существенно различаются в зависимости от типа колонны. Для колонн типов 41 и 5 показатель степени близок к единице, что соответствует практически линейной зависимости. Для колонн типов 4 и 27 наблюдается умеренное отклонение от линейности. Для колонн типов 20, 22, 28 и 31 значение показателя степени значительно меньше единицы, что свидетельствует о выраженной нелинейности зависимости. Коэффициент k уменьшается при переходе от центральных областей к периферийным, что отражает снижение относительного вклада запаздывающей компоненты энерговыделения.

Для оценки точности полученных зависимостей выполнена проверка на отдельных блоках. Для блока типа 41 (10108) при мгновенном значении $x = 1{,}713 \cdot 10^{-4}$ расчетное значение запаздывающей компоненты составило $y = 1{,}81 \cdot 10^{-4}$ при фактическом $y = 1{,}784 \cdot 10^{-4}$ (относительная погрешность около 1,5%). Для блока 10115 при $x = 5{,}7377 \cdot 10^{-5}$ расчетное значение $y = 6{,}00 \cdot 10^{-5}$ при фактическом $y = 6{,}17 \cdot 10^{-5}$ (погрешность около −2,7 %). Коэффициент детерминации R^2 для всех исследованных колонн превысил 0,97, что свидетельствует о высокой адекватности степенной модели.

Дополнительный анализ показал, что использование единой зависимости для всех колонн реактора приводит к снижению точности, поскольку параметры a и k существенно зависят от пространственного расположения колонны. В связи с этим все колонны разделены на две группы:

– активная зона – усредненные параметры: $a \approx 0{,}46$, $k \approx 0{,}18$. Зависимость: $y = 0{,}18 \cdot x^{0{,}46}$.

– отражатель – усредненные параметры: $a \approx 1{,}01$, $k \approx 1{,}76$. Зависимость: $y = 1{,}76 \cdot x^{1{,}01}$.

Различие параметров аппроксимации объясняется физическими особенностями зон реактора. В активной зоне наблюдается выраженная нелинейность, связанная с изменением спектра нейтронов и плотности делений. В отражателе зависимость близка к линей-

Таблица 2. Параметры регрессионной зависимости между мгновенными и запаздывающими компонентами для различных колонн

Тип колонны	Расположение блока	количество блоков в колонне	a	b	k
Тип 41	Графитовый блок бокового отражателя	20	1,0093	0,0591	1,1458
Тип 4	Графитовый блок бокового отражателя	20	0,9053	−0,2520	0,5592
Тип 5	Графитовый блок бокового отражателя	19	1,1053	0,5530	3,5683
Тип 27	Топливный блок НЧК	32	0,9180	−0,1810	0,6586
Тип 28	Топливный блок НЧК	36	0,4803	−1,4840	0,0328
Тип 20	Топливный блок ПЧК	28	0,1791	−1,8210	0,0151
Тип 22	Топливный блок ПЧК	30	0,2621	−1,7990	0,0159
Тип 31	Топливный блок НЧК	35	0,4599	−1,5390	0,0289

ной вследствие преобладания процессов рассеяния, что обусловливает иной характер соотношения между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения.

Возможное физическое объяснение состоит в том, что в отражателе, где собственное деление практически отсутствует, обе компоненты энерговыделения формируются переносом излучения из активной зоны и убывают с расстоянием сходным образом, что и дает близкое к линейному соотношение ($a \approx 1$). В топливных же колоннах локальная скорость деления меняется в широких пределах, а вклад запаздывающей компоненты дополнительно зависит от локального накопления и распада предшественников запаздывающих нейтронов, из-за чего связь между компонентами оказывается существенно нелинейной ($a \approx 0{,}46$). Это согласуется с конструкцией реактора: колонны типа 41 расположены в структуре бокового отражателя (колонны №1--9 и №40--49), физически обособленной от топливной решетки активной зоны и набранной целиком из непропитанных ураном графитовых блоков, тогда как колонны типов 27, 28, 20, 22, 31 входят непосредственно в топливную решетку. Данное объяснение носит предварительный характер и нуждается в дальнейшей проверке путем анализа вкладов отдельных групп предшественников.

Выводы

Проведенное исследование для холодного состояния реактора ИГР показало наличие устойчивой и воспроизводимой монотонной связи между мгновенной и запаздывающей компонентами энерговыделения, которая в первом приближении хорошо описывается степенной функцией. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для всех исследованных колонн превысил 0,98, а коэффициент детерминации степенной аппроксимации – 0,97, что подтверждает высокую адекватность предложенной модели.

При этом выявлено, что параметры аппроксимационной модели закономерно изменяются в зависимости от пространственного положения колонн, что отражает различия нейтронно-физических условий в активной зоне и отражателе. В центральной области активной зоны наблюдается практически линейный характер связи между компонентами, тогда как по мере перехода к периферийным областям и отражателю возрастает степень нелинейности зависимости, что связано с изменением спектрального состава и вкладом процессов рассеяния.

Полученные результаты подтверждают наличие устойчивых корреляционных связей между компонентами энерговыделения в холодном состоянии реактора ИГР и позволяют использовать мгновенную компоненту в качестве основы для реконструкции запаздывающей составляющей с приемлемой точностью. Такой подход позволяет упростить расчет запаздывающей компоненты и снизить вычислительные затраты за счет ее определения по результатам расчета мгновенной компоненты, без необходимости выполнения отдельного прямого расчета запаздывающего энерговыделения.

В целом предложенный подход может быть использован как элемент упрощенной оценки энерговыделения при нейтронно-физическом моделировании реактора ИГР, а также при проведении многовариантных расчетов и анализе экспериментальных конфигураций.

Исследование выполнено для холодного состояния реактора ИГР. Установленная корреляционная связь обусловлена пространственной топологией поля плотности делений, которая определяется прежде всего конструкцией активной зоны и распределением урана в ней. Переход к горячему (мощностному) состоянию изменяет сечения взаимодействия за счет доплеровского уширения, что может количественно сместить значения коэффициентов a и k, однако не меняет физического механизма формирования связи между мгновенной и запаздывающей компонентами. Соответственно, повторение анализа для горячего состояния целесообразно для уточнения численных коэффициентов аппроксимации, но не ожидается, что оно выявит качественно иной характер зависимости, и полученные для холодного состояния выводы можно считать физически устойчивыми к изменению теплового состояния реактора.

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования AP23490508 «Разработка концептуального проекта большого импульсного исследовательского реактора на тепловых нейтронах».

Литература:

1. Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на игр. *Вестник НЯЦ РК*. 2020;(2):55-60. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2020-2-55-60
2. Ruslan A. Irkimbekov, Vladimir A. Vityuk, Galina A. Vityuk, Olzhas M. Zhanbolatov, Artur S. Surayev, Yuri A. Popov, Andrey N. Kotlyar Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor // Nuclear Engineering and Design 2025, 443, 114278, 10.1016/j.nucengdes.2025.114278.
3. Vurim A.D., et al. The IGR reactor research capabilities // Annals of Nuclear Energy.– 2018.– Vol. 113.– P. 126–132.
4. MCNP-6.1 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory.
5. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nuclear Data Sheets. 2011. Vol. 112, No. 12. P. 2887–2996. DOI:10.1016/j.nds.2011.11.002.
6. Спирмен Ч. Доказательство и измерение связи между двумя вещами // Американский журнал психологии. – 1904. – Т. 15, № 1. – С. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Вильямс, 2016. – 912 с.
8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

References:

1. Zhanbolatov O.M., Irkimbekov R.A. Features of Power Calculation of Experimental Device Elements for Reactor Tests at the IGR Reactor. *Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan*. 2020;(2):55–60. DOI: 10.52676/1729-7885-2020-2-55-60.
2. Irkimbekov R.A., Vityuk V.A., Vityuk G.A., Zhanbolatov O.M., Surayev A.S., Popov Yu.A., Kotlyar A.N. Development of a New Computational Support Tool for Experiments in the Impulse Graphite Reactor. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 443. Article 114278. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2025.114278.
3. Vurim A.D., et al. The IGR Reactor Research Capabilities. *Annals of Nuclear Energy*. 2018. Vol. 113. P. 126–132.
4. *MCNP6.1 Monte Carlo N-Particle Transport Code*. Los Alamos National Laboratory.
5. Chadwick M.B., et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. Nuclear Data Sheets. 2011. Vol. 112, No. 12. P. 2887–2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.
6. Spearman C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*. 1904. Vol. 15, No. 1. P. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
7. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. 3rd ed. New York: Wiley, 1998.
8. Kobzar A.I. Applied Mathematical Statistics. Moscow: Fizmatlit, 2006. 816 p.

A STUDY OF THE CORRELATIONS AMONG THE COMPONENTS OF ENERGY RELEASE IN AN IGR REACTOR

D. T. Zhengis*, O. M. Zhanbolatov, N. Ye. Mukhamedov, R. A. Irkimbekov, G. A. Vityuk

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: zhengis@nnc.kz*

The paper presents the results of a study on the relationship between the prompt and delayed components of energy release in the core of the pulsed research reactor IGR at the cold state. Using the MCNP6 code, a series of high-precision prompt and delayed energy release calculations was performed, yielding detailed data on the spatial distribution of energy release over all columns and blocks of the core and reflector. The Spearman rank correlation coefficient, applied to quantify the relationship, exceeded 0.98 for all analyzed columns, indicating a monotonic statistical relationship between the components. Parameters of a power-law approximation were determined by the least-squares method in logarithmic coordinates for eight column types, with a coefficient of determination R^2 above 0.97 confirming the adequacy of the models. It is emphasized that the established correlation does not prove a cause-and-effect relationship, but reflects the joint influence of a single neutron field on the formation of both energy release components. Unlike the conventional approach requiring direct calculation of the delayed component, the developed reconstructive approach allows the delayed energy release to be estimated from the prompt component using the proposed approximating dependences. The results can be used to speed up neutronic calculations in multi-variant analysis of experimental configurations and in the development of coupled simulation methodologies for reactor studies.

Keywords: *neutronic modeling, correlation, MCNP, IGR reactor core, energy release, instantaneous and delayed components, Spearman's correlation coefficient.*

ИГР РЕАКТОРЫНДАҒЫ ЭНЕРГИЯ БӨЛІНУІНІҢ ҚҰРАУШЫ КОМПОНЕНТТЕРІ АРАСЫНДАҒЫ КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ БАЙЛАНЫСТАРДЫ ЗЕРТТЕУ

Д. Т. Жеңіс*, О. М. Жанболатов, Н. Е. Мухамедов, Р. А. Иркимбеков, Г. А. Витюк

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: zhengis@nnc.kz*

Мақалада ИГР импульстік зерттеу реакторының активті аймағындағы энергия бөлінудің лездік және кешігетін құрамдастары арасындағы байланысты зерттеу нәтижелері келтірілген. MCNP6 бағдарламалық кодын пайдаланып, лездік және кешігетін энергия бөлінудің жоғары статистикалық дәлдіктегі есептеулер сериясы орындалды. Активті аймақ пен рефлектордың барлық колонналары мен блоктары бойынша энергия бөлінудің кеңістіктік таралуы туралы егжей-тегжей деректер алынды. Құрамдастар арасындағы байланысты сандық бағалау үшін Спирменнің рангілік корреляция коэффициенті қолданылды. Оның мәні зерттелген барлық колонналар үшін 0,98-ден асып, құрамдастар арасында монотонды статистикалық байланыстың бар екенін көрсетті. Логарифмдік масштабта ең кіші квадраттар әдісімен сегіз колонна типі үшін дәрежелік аппроксимациялық тәуелділіктің параметрлері анықталды; детерминация коэффициенті R^2 0,97-ден жоғары болуы модельдердің дұрыстығын растайды. Анықталған корреляциялық байланыс себеп-салдарлық тәуелділіктің дәлелі емес, ол екі құрамдастың да қалыптасуына ортақ нейтрондық өрістің бірлескен әсерін көрсететіні атап өтіледі. Кешігетін құрамдасты тікелей есептеуді талап ететін дәстүрлі тәсілден айырмашылығы, әзірленген реконструктивті тәсіл ұсынылған аппроксимациялық тәуелділіктерді пайдалана отырып, кешігетін энергия бөлінуді лездік құрамдас бойынша бағалауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер эксперименттік конфигурацияларды көпнұсқалы талдау кезінде нейтрондық-физикалық есептеулерді жеделдету үшін, сондай-ақ реакторлық зерттеулерге арналған байланыстырылған модельдеу әдістемелерін әзірлеу үшін қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *нейтрондық-физикалық модельдеу, корреляциялық байланыс, MCNP, ИГР реакторының активті аймағы, энергия бөліну, лездік құрамдас, кешігетін құрамдас, Спирмен коэффициенті.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-151-157
UDC 621.039:621-03

STUDY OF THE STRUCTURAL EVOLUTION AND STRENGTHENING OF Li_2TiO_3-BASED CERAMICS DOPED WITH $LiNbO_3$

A.A. Khametova [1,2*], D. I. Shlimas [1,2]

[1] Laboratory of Solid State Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
[2] Engineering Profile Laboratory, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**E-mail for contacts: khametovaaa@gmail.com.*

Ceramic materials based on lithium metatitanate (Li_2TiO_3) modified with lithium niobate ($LiNbO_3$) in the concentration range of 0.05–0.25 M were studied. The synthesis was carried out by mechanical activation in a planetary mill at grinding speeds of 150…600 rpm with a step of 50 rpm, followed by thermal stabilization at 700 °C for 5 hours. The objective of the work was to determine the relationship between the dopant concentration, the energy of mechanical processing and the structural and mechanical properties of the obtained ceramics.

The phase composition and structural parameters were studied by X-ray diffraction, and the morphological features of the ceramics were studied using scanning electron microscopy. The formation of a two-phase system, including the monoclinic Li_2TiO_3 phase and the rhombohedral $LiNbO_3$ phase, can be seen. The increase in the dopant content occurs simultaneously with changes in the parameters of the crystal lattice and a decrease in the size of the coherent scattering regions. SEM analysis showed pronounced changes in the morphology of ceramics upon the addition of $LiNbO_3$, depending on the dopant concentration. Increasing the mechanical activation rate to 600 rpm and increasing the alloying additive concentration to 0.25 M lead to the creation of a fine-grained composite microstructure, where an improvement in the strength characteristics is observed compared to the unalloyed material.

The obtained data show that the combination of changing the $LiNbO_3$ content and mechanical activation parameters is one of the most effective tools for controlling the phases and strength of lithium-containing ceramic materials, which opens up enormous opportunities for optimization in high-temperature energy applications.

Key words: *lithium-containing ceramics; lithium metatitanate; lithium niobate; X-ray phase analysis; crystal structure.*

Introduction

The need for stable materials for tritium production is leading to increased attention to lithium-containing ceramics for inclusion in thermonuclear reactor blanket assemblies [1-2]. Among the promising breeder compounds, lithium metatitanate (Li_2TiO_3) occupies a special place, possessing high thermal stability, chemical inertness and good compatibility with the structural materials of reactor systems [3-4]. At the same time, Li_2TiO_3 is characterized by relatively low mechanical strength, grain growth during heat treatment, and brittleness, which limits its operation and requires targeted modification of the structure [5-6].

Lithium niobate ($LiNbO_3$), widely used in piezoelectric, acousto-optic and nonlinear optical devices due to its pronounced ferroelectric properties, is considered as a promising modifying additive [7-8]. The material is characterized by high chemical resistance and structural stability, but is also brittle and sensitive to microstructural defects [9-10].

The difference in the parameters of the crystal lattices of Li_2TiO_3 and $LiNbO_3$ contributes to the formation of internal stresses and interphase boundaries, which, when doping and mechanical activation are applied, provide dispersion strengthening and inhibition of grain growth [10-12]. Changing the speed of planetary grinding allows one to control the degree of particle grinding, the accumulation of defects and the distribution of the dispersed phase in the matrix, thereby most likely increasing the strengthening of interphase grain boundaries and crack resistance [13-15].

In this work, ceramics based on Li_2TiO_3, modified with $LiNbO_3$ additives in the concentration range up to 0.25 M, obtained by mechanochemical synthesis, were investigated. The aim of the study was to establish the patterns of the influence of lithium niobate concentration and mechanical activation modes on the phase composition, structural parameters and mechanical properties of ceramics. The research aims to develop reinforced lithium-containing ceramics with enhanced mechanical stability, thereby improving the reliability of breeder materials for fusion power systems. The scientific novelty of the study is to determine the relationship between the concentration of $LiNbO_3$, synthesis conditions, structural evolution and mechanical characteristics of the obtained Li_2TiO_3–$LiNbO_3$ ceramics.

Methods

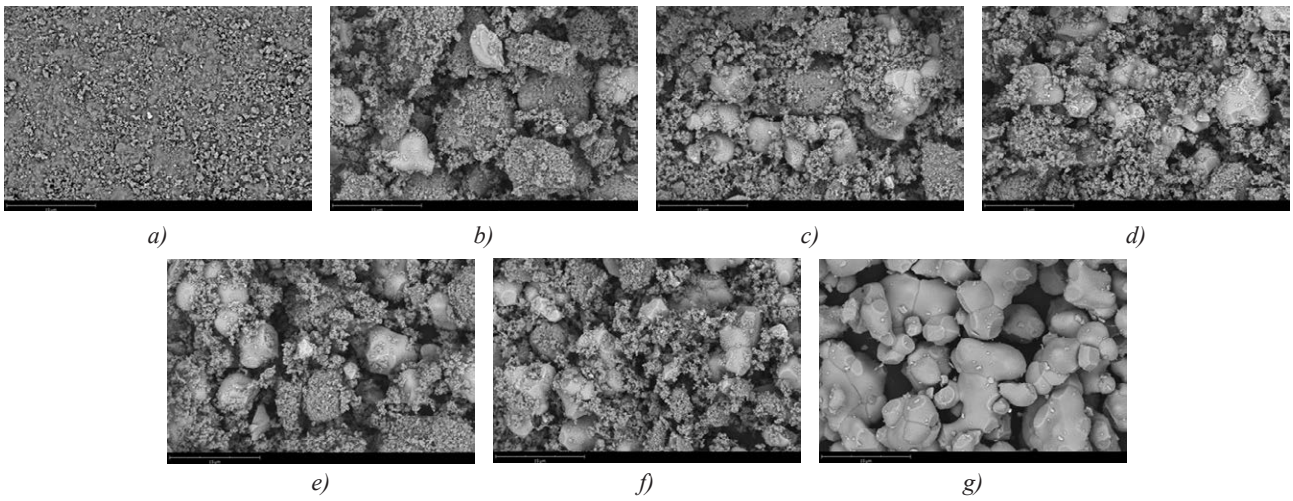
Ceramics based on lithium metatitanate (Li_2TiO_3 powder) with the addition of a dopant in the form of lithium niobate ($LiNbO_3$ powder) were selected as the initial samples. The dopant concentration ranged from 0.05 to 0.25 M in the composition. All starting components were purchased from Sigma Aldrich, with a stated chemical purity of approximately 99.95%. Mechanochemical solid-phase synthesis for the preparation of two-phase lithium-containing ceramics was used to mix the starting components and obtain a homogeneous and isotropic distribution of lithium-containing ceramics. Mixing was carried out in a PULVERISETTE 6 planetary mill (Fritsch, Berlin, Germany), at grinding speeds from 150 to 600 rpm in 50 rpm increments to obtain a finely dispersed fraction to initiate dispersion strengthening processes.

The resulting powders were then pressed into tablets of 10 mm diameter and 1 mm thickness, which were then used for structural characterization and mechanical strength for resistance to external influences under single compression. Tablet pressing was carried out using the standard method at a pressure of 250 MPa in a cylindrical press mold, with a pressing time of 30 minutes.

The pressed tablets were annealed at 700 °C for 5 hours in a Nabertherm LE 4/11/R6 furnace (Nabertherm, Lilienthal, Germany), followed by gradual cooling under furnace conditions until they reached room temperature. It was found that the addition of a dopant lithium niobate in ceramics based on lithium metatitanate results in an increase in the content of finely dispersed fraction in the composition, from which it follows that the grinding processes under mechanical impact action depend not only on the grinding speed but also on concentration of impurities, the presence of which leads to an intensification fragmentation processes of the main phase, as a result of which the grinding processes can be carried out at lower grinding speeds.

Microstructural characteristics were determined using scanning electron microscopy with a Phenom ProX microscope (Thermo Fisher Scientific, Eindhoven, Netherlands). The phase composition and structural parameters of the studied samples were estimated depending on variations in the percentage content of the components in the composition of the materials studied by X-ray diffraction method. The diffraction patterns were recorded using a D8 ADVANCE ECO X-ray diffractometer (Bruker, Karlsruhe, Germany) in the angular range of $2\theta = 20–80°$ in the Bragg-Brentano geometry, with a diffraction pattern recording time of 1 s at one point and a step of 0.03°. The interpretation of diffraction patterns was carried out using the DiffracEVA v.4.2 software; the determination of the phase composition, as well as the refinement of the parameters for all identified phases, was performed using card values from the PDF-2 database.

The determination of resistance to external influences, in particular resistance to single compression, was carried out using the testing machine LFM-L 10kH (Walter + Bai AG, Löningen, Switzerland). The experiments were carried out by compressing the samples in a special holder and recording the maximum load, under which cracking of the ceramic samples occured, indicating a loss of strength and resistance to external loads. Loading was applied at a constant rate of 0.05 mm/s. The critical failure load was determined by a reduction in pressure of at least 75% from the maximum value achieved. All obtained load values were averaged from at least four samples tested for each composition. All samples had identical geometry and similar linear dimensions, ensuring the accuracy of the test results.



a) Li_2TiO_3; b) 0.95 Li_2TiO_3 – 0.05 $LiNbO_3$; c) 0.90 Li_2TiO_3 – 0.10 $LiNbO_3$; d) 0.85 Li_2TiO_3 – 0.15 $LiNbO_3$; e) 0.80 Li_2TiO_3 – 0.20 $LiNbO_3$; f) 0.75 Li_2TiO_3 – 0.25 $LiNbO_3$; g) $LiNbO_3$

Figure 1. SEM images of the surface of Li_2TiO_3 based ceramics with different $LiNbO_3$ contents

Results and discussion

Figure 1 shows images of the surface of the studied ceramics with the addition of $LiNbO_3$.

Figure 1a) shows that Li_2TiO_3 ceramics are characterized by a finely dispersed structure with agglomerated particles of irregular shape. When a dopant is added to the ceramics (Figures 1b-f), a more heterogeneous structure is formed, with larger agglomerates with a finely dispersed structure distributed throughout the sample being observed with an increasing $LiNbO_3$ content. The obtained results demonstrate that the introduction of $LiNbO_3$ into the ceramic structure leads to a rearrangement of the morphology of Li_2TiO_3 ceramics depending on the dopant concentration. The formation of a morphologically inhomogeneous structure can contribute to the redistribution of local stresses and a change in the trajectory of crack propagation, which, along with other structural factors, can contribute to an increase in the mechanical stability of the ceramics.

The evolution of phases in the manufactured ceramic composites was studied using X-ray diffraction methods. The corresponding diffraction patterns are shown in Figure 2. The diffraction pattern data reflect a change in the ratio of 2 phases – Li_2TiO_3 with a monoclinic type of crystal structure (PDF-00-033-0831) and lithium niobate with a rhombohedral crystal structure (PDF-01-070-08452), an increase in intensity and weight fraction proportional to the weight fraction of the dopant used to modify lithium metatitanate. The data are presented for samples ground at a grinding speed of 600 rpm to assess the effect of variations in the variation of components in the composition of the material under study on its structural properties. The general appearance of the presented results of X-ray phase analysis indicates a high degree of structural ordering of the sample, regardless of the content of the alloying impurity in the ceramic composition. At the same time, such changes in the morphology of the primary Li_2TiO_3 phase, accompanying the increase in the concentration of the rhombohedral lithium niobate within the sample, lead to a reduction in the size of coherent scattering domains; this indicates the influence of the dopant on the degree of fragmentation of the primary phase while its degree of structural ordering is preserved.

Table 1 presents the structural parameters of the studied lithium-based ceramics depending on changes in concentration in the sample composition.

An analysis of the structural parameters of the studied ceramics, obtained using the Rietveld method, showed that changing the ratio of components in the ceramics leads to different effects on the structural distortion of the crystal lattices of both phases established in the ceramics. Thus, the addition of $LiNbO_3$ to the Li_2TiO_3 composition at concentrations of 0.05–0.15 M initially leads to a pronounced strain-induced distortion of the tensile type (as evidenced by an assessment of the changes in the parameters and volume of the crystal lattice of the Li_2TiO_3 phase), followed by ordering and partial removal of strain-induced distortions caused by mixing the two phases. At the same time, the parameters of the $LiNbO_3$ phase increase with an increase in concentration from 0.05 to 0.15 M while at higher concentrations stabilization of the $LiNbO_3$ phase is observed, characterized by a decrease in the parameters and volume of the crystal lattice, indicating a partial removal of strain-induced distortions and structural stresses. A decrease in the concentration of structural deformation-induced distortions is indicated by a change in the degree of structural ordering, the value of which is presented in Table 1. This value was assessed based on changes in the shape of diffraction reflections associated with the formation of structural distortions caused by mechanical stress and recrystallization processes occurring during sintering. According to the presented data, the increase in the $LiNbO_3$ concentration in the ceramics leads to an increase in the degree of structural ordering, which directly indicates the decrease in the concentration of deformation-induced distortions in the ceramics due to enhanced recrystallization processes.

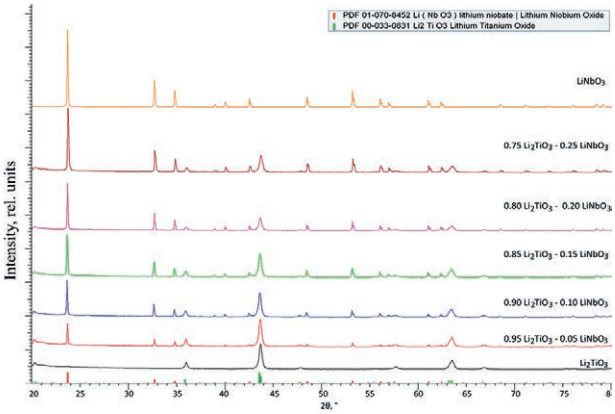


Figure 2. X-ray diffraction results of lithium-based ceramic materials with the addition of lithium niobate to the composition.

Table 1 also presents the results of the crystallite size assessment (coherent scattering regions), which were determined based on the intensity and shape changes of the diffraction lines for each phase using the Scherrer formula. According to the presented data, each phase has significant differences in crystallite size, as evidenced by the obtained assessment results. For the Li_2TiO_3 phase, the broadened shape of the diffraction reflections, which is preserved for all studied concentrations of the component ratios, the average crystallite size is approximately 25…35 nm with a pronounced decrease in size with the increase in the $LiNbO_3$ concentration in the ceramics, for which the crystallite size increases from 67±4 nm to 92±5 nm in the case of single-component ceramics. Such changes are associated with recrystallization processes that occur during sintering of ceramics, as a result of which structural ordering in the presence of different phases leads to more intense crystallization of the $LiNbO_3$ phase into larger agglomerates, while smaller grains of Li_2TiO_3 surround

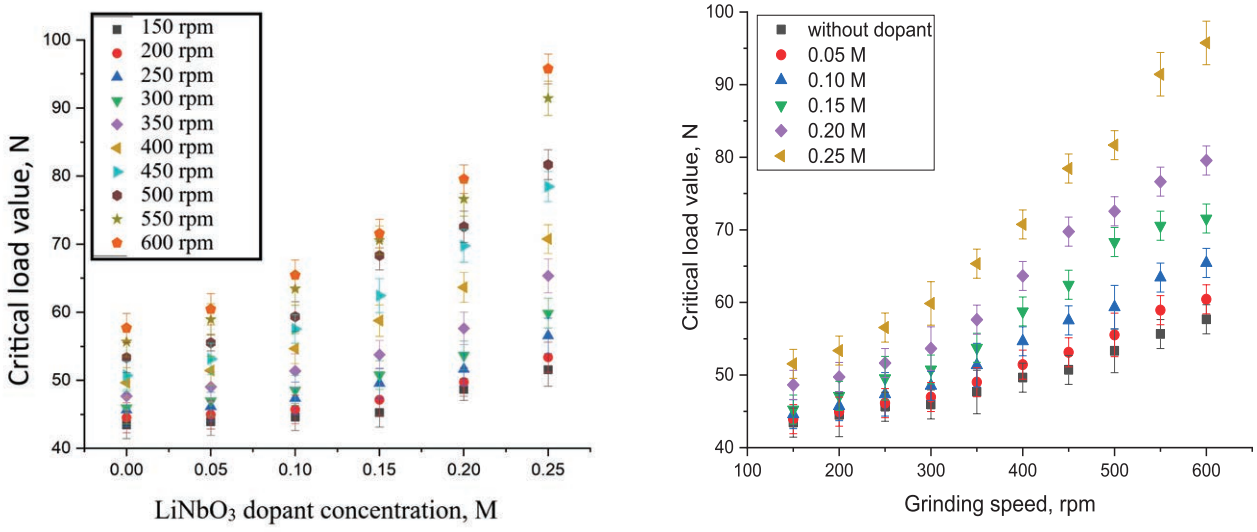
Table 1 – Structural parameters of the studied lithium-based ceramics depending on the change in concentration of $LiNbO_3$ in the sample composition

Phase	Crystal lattice parameters						
	Concentration of $LiNbO_3$ component, M						
	0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	1.0
Li_2TiO_3	a=5.0601 Å, b=8.7697 Å, c=9.6921 Å, β=100.534°, V=422.84 Å3	a=5.0799 Å, b=8.7697 Å, c=9.7341 Å, β=99.630°, V=427.54 Å3	a=5.0621 Å, b=8.8111 Å, c=9.7073 Å, β=99.905°, V=426.51 Å3	a=5.0501 Å, b=8.7731 Å, c=9.7456 Å, β=100.573°, V=424.45 Å3	a=5.0581 Å, b=8.7835 Å, c=9.7977 Å, β=100.062°, V=428.15 Å3	a=5.0581 Å, b=8.7801 Å, c=9.7303 Å, β=99.945°, V=425.63 Å3	-
$LiNbO_3$	-	a=5.1564 Å, c=13.8384 Å, V=318.64 Å3	a=5.1564 Å, c=13.8709 Å, V=319.99 Å3	a=5.1604 Å, c=13.8982 Å, V=320.52 Å3	a=5.1523 Å, c=13.8819 Å, V=319.14 Å3	a=5.1271 Å, c=13.8384 Å, V=315.04 Å3	a=5.1473 Å, c=13.8381 Å, V=317.52 Å3
Phase	Size of crystallites (coherent scattering regions), nm						
	Concentration of $LiNbO_3$ component, M						
	0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	1.0
Li_2TiO_3	35±2	32±3	32±2	30±3	29±2	25±3	
$LiNbO_3$		67±4	70±5	74±4	80±5	87±4	92±5
Phase	Degree of structural ordering, %						
	Concentration of $LiNbO_3$ component, M						
	0.0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	1.0
	84.3±2.3	86.7±2.5	88.3±2.4	89.8±2.1	91.1±2.3	91.9±2.5	92.3±3.2

larger particles of $LiNbO_3$ (see data shown in Figure 1), thereby forming structures with a large number of grain boundaries formed by different phases that have clearly expressed differences in size.

The critical load, which corresponds to the failure of the specimen under single compression, is shown in Figure 3.

The addition of lithium niobate to lithium metatitanate and an increase in the speed of grinding lead to a pronounced strengthening of the material due to several interrelated mechanisms. As the concentration of $LiNbO_3$ increases, the critical load on the failure of the samples increases, which may be associated with dispersion strengthening: lithium niobate particles and regions may be distributed throughout the Li_2TiO_3 matrix. The difference in the parameters of the crystal lattices of $LiNbO_3$ and Li_2TiO_3 may contribute to local elastic distortions and create additional obstacles to the movement of dislocations, increasing the resistance to deformation. The interfaces between phases may act as barriers to the initiation and propagation of cracks, thereby contributing to an



a) *b)*

a) Dependence on changes in dopant concentration; b) milling speed dependence

Figure 3. Results of the assessment of the strength properties of the studied ceramics depending on the variation of grinding conditions and dopant concentration

increase in fracture energy. At the same time, microstructural analysis confirms morphological changes following the introduction of the dopant. Depending on the dopant concentration, the compositions exhibit a finely dispersed fraction combined with coarse structures, which may further contribute to increased fracture resistance.

Increasing the milling speed enhances the strengthening effect by reducing the grain size of the main phase. The finer the grain, the greater the proportion of grain boundaries that impede plastic deformation, which is consistent with the possible contribution of the Hall-Petch mechanism. As the rotation speed (milling energy) increases, strong mechanical processes occur in the powder: intense particle refinement, defect accumulation, and surface activation. Higher speeds lead to the formation of smaller grains of the main Li_2TiO_3 phase and fine grinding of $LiNbO_3$ particles. The formation of a fine-grained structure can enhance the role of grain boundaries as obstacles capable of disrupting and dissipating localized mechanical effects.

The synergistic effect is particularly pronounced when combining high $LiNbO_3$ concentration with a high grinding speed. This mode creates a microstructure that produces maximum critical loads under mechanical stress. The increased mechanical resistance of the ceramics is likely due to the simultaneous influence of several factors: structural refinement, the formation of a two-phase system, and changes in the morphology of the samples. Consequently, the increase in strength with increasing alloying impurity concentration is enhanced by the high-energy refinement effect, facilitating the formation of a dense, stable, and mechanically strong composite structure.

The obtained results are confirmed by a number of studies of lithium-containing ceramics, where changes in the phase composition and microstructure of the material affect the mechanical properties of the ceramics. Thus, for two-phase ceramics of the Li_2TiO_3–Li_2ZrO_3 type it was confirmed that the formation of a homogeneous structure with agglomerations of different sizes leads to an increase in resistance to crack propagation and mechanical load [16]. A group of scientists showed a relationship between the formation of a finely dispersed structure and mechanical stability for $Li_2(Ti,Zr)O_3$–Li_4SiO_4 ceramics, for which a grain size of less than 2 μm was combined with a high critical failure load of more than 70 N [17]. Similarly, in a study of two-phase Li_2TiO_3–Li_2ZrO_3 ceramics high mechanical parameters were also obtained under certain synthesis conditions: during heat treatment at 1100 °C the critical failure load reached 67.6 N [5].

Conclusion

The study provided a comprehensive assessment of the effects of lithium metatitanate modification with lithium niobate and mechanical activation parameters on the structural and performance properties of the ceramics. The data obtained confirmed the effectiveness of combining phase alloying and high-energy milling as a tool for targeted microstructural control of lithium-containing materials. Thus, the volume of the unit cell of Li_2TiO_3 varies within the range of 422.8-428.2 Å3 depending on the concentration of $LiNbO_3$.

It has been shown that changing the $LiNbO_3$ concentration and milling rate is an effective technological factor that allows obtaining a stable controlled structure that provides increased mechanical stability without disturbing the phase ordering of the matrix, which indicates the contribution of structural factors to the strengthening of ceramics.

The proposed modification principles may be of interest for the future development of promising lithium-containing ceramics as breeder materials for fusion power plants. Further research should focus on the long-term thermal stability of the resulting compositions, their radiation resistance, and the kinetics of tritium release, which will expand our understanding of the mechanisms of structural evolution and confirm their potential for practical application.

This research was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Grant No. BR28712757.

References:

1. Ipponsugi A., Katayama K., Hoshino T. Tritium release behavior from neutron-irradiated $Li_{2+x}TiO_{3+y}$ with 20wt% Li_2ZrO_3 pebbles under different atmospheres //Fusion Engineering and Design. – 2023. – V. 194. – P. 113825. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113825
2. Peng J. et al. Lead molar fraction: A key factor influencing the phase composition and mechanical properties of lithium lead titanate tritium breeder via solid-state route // Ceramics International. – 2025. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.09.254
3. Panchal M., Patel H., Chaudhuri P. Study of effective thermal conductivity of compressed lithium metatitanate pebble beds at high temperature //Fusion Engineering and Design. – 2024. – V. 205. – P. 114573. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114573
4. Mukai K., Yasumoto M., Terai T. Lithium vapor chemistry of hyper-stoichiometric lithium metatitanate $Li_{2.12(2)}TiO_{3+y}$ //The Journal of Physical Chemistry. – 2020. – V. 124. – №. 20. – P. 10870-10877. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c02454
5. Tan G. et al. Scalable fabrication and deuterium release properties of Li_2TiO_3-Li_2ZrO_3 ceramic pebbles via centrifugal granulation //Journal of Nuclear Materials. – 2025. – V. 615. – P. 155933. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2025.155933
6. Guo H. et al. Synthesis, characterization and sintering of Li_2TiO_3 nanoparticles via low temperature solid-state reaction //Ceramics International. – 2020. – V. 46. – №. 2. – P. 1816-1823. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.157
7. Anikiev A. A. et al. Parametrization of nonstoichiometric lithium niobate crystals with different states of defectivity //

Optical materials. – 2021. – V. 111. – P. 110729. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110729
8. Weis R. S., Gaylord T. K. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure //Applied Physics A. – 1985. – V. 37. – №. 4. – P. 191-203. https://doi.org/10.1007/BF00614817
9. Zhang Y. et al. Lithium Niobate Crystal Preparation, Properties, and Its Application in Electro-Optical Devices // Inorganics. – 2025. – V. 13. – №. 9. DOI: 10.3390/inorganics13090278
10. Sánchez-Dena O. et al. Lithium niobate single crystals and powders reviewed—Part I //Crystals. – 2020. – V. 10. – №. 11. – P. 973. https://doi.org/10.3390/cryst10110973
11. Kataoka K. et al. Crystal growth and structure refinement of monoclinic Li_2TiO_3 //Materials Research Bulletin. – 2009. – V. 44. – №. 1. – P. 168-172. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.03.01
12. Palmero P. Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powders' synthesis methods //Nanomaterials. – 2015. – Т. 5. – №. 2. – С. 656-696. https://doi.org/10.3390/nano5020656
13. Zhou Q. et al. Effect of neutron dose on the tritium release behavior of Li_2TiO_3–$0.5Li_4SiO_4$ biphasic ceramic // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – V. 48. – №. 11. – P. 4363-4370. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.009
14. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling //Progress in materials science. – 2001. – V. 46. – №. 1-2. – P. 1-184. https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9
15. Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J. Mechanical properties of nanocrystalline materials //Progress in materials science. – 2006. – V. 51. – №. 4. – P. 427-556. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003
16. Shlimas D. I. et al. The influence of variation in the ratio of components in two-phase lithium-containing ceramics on defect formation processes //Nuclear Materials and Energy. – 2025. – P. 101980. https://doi.org/10.1016/j.nme.2025.101980
17. Guo S. et al. Development of fine-grained $Li_2(Ti,Zr)O_3$-Li_4SiO_4 biphasic ceramic pebbles via a solid solution-composite dual strategy //Ceramics International. – 2026. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.04.242

$LiNbO_3$ ҚОСПАСЫМЕН ЛЕГИРЛЕНГЕН Li_2TiO_3 НЕГІЗІНДЕГІ КЕРАМИКАНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІ МЕН БЕРІКТЕНУ МЕХАНИЗМДЕРІН ЗЕРТТЕУ.

А. А. Хаметова [1,2]*, Д. И. Шлимас [1,2]

[1] ҚР Атом энергиясы агенттігінің Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2] Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: khametovaaa@gmail.com.*

Литий ниобатымен ($LiNbO_3$) 0.05–0.25 М концентрациялар диапазонында модификацияланған литий метатитанаты (Li_2TiO_3) негізіндегі керамикалық материалдар зерттелді. Синтез 150–600 айн/мин аралығындағы ұнтақтау жылдамдығында, 50 айн/мин қадаммен планетарлық диірменде механикалық активтендіру әдісімен жүргізіліп, кейін 700 °С температурада 5 сағат бойы термиялық тұрақтандыру жүзеге асырылды. Жұмыстың мақсаты модификациялаушы қоспаның концентрациясы, механикалық өңдеу энергиясы және алынған керамиканың құрылымдық-механикалық қасиеттері арасындағы тәуелділікті анықтау болды.

Фазалық құрамы мен құрылымдық параметрлері рентгендік дифракция әдісімен, ал керамиканың морфологиялық ерекшеліктері сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен зерттелді. Моноклиндік Li_2TiO_3 фазасы мен ромбоэдрлік $LiNbO_3$ фазасынан тұратын екі фазалы жүйенің қалыптасуы модификациялаушы қоспа мөлшерінің өзгеруіне байланысты кристалдық тор параметрлерінің өзгеруімен және когерентті шашырау аймақтары өлшемдерінің азаюымен қатар жүретіні анықталды. Сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) нәтижелері $LiNbO_3$ қосылған кезде керамика морфологиясының қоспа концентрациясына байланысты айқын өзгеретінін көрсетті. Механикалық активтендіру жылдамдығын 600 айн/мин-ге дейін және модификациялаушы қоспа концентрациясын 0.25 М-ге дейін арттыру ұсақ түйіршікті композиттік микроқұрылымның қалыптасуына ықпал етіп, модификацияланбаған материалмен салыстырғанда беріктік сипаттамаларының жоғарылауына әкеледі.

Алынған нәтижелер $LiNbO_3$ мөлшері мен механикалық активтендіру параметрлерін өзгерту литийқұрамды керамикалық материалдардың фазалық-құрылымдық күйі мен механикалық қасиеттерін басқарудың тиімді тәсілдерінің бірі болып табылатынын көрсетті. Бұл тәсіл жоғары температуралы энергетикалық қолдану салалары үшін литийқұрамды керамикалардың қасиеттерін одан әрі оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *литийқұрамды керамика, литий метатитанаты, литий ниобаты, рентгендік фазалық талдау, кристалдық құрылым.*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЭВОЛЮЦИИ И УПРОЧНЕНИЯ КЕРАМИК НА ОСНОВЕ Li_2TiO_3, ДОПИРОВАННЫХ $LiNbO_3$.

А.А. Хаметова [1,2]*, Д.И. Шлимас [1,2]

[1] РГП «Институт ядерной физики» Агентства РК по атомной энергии, Алматы, Казахстан
[2] НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

**E-mail для контактов:khametovaaa@gmail.com.*

Были изучены керамические материалы на основе метатитаната лития (Li_2TiO_3), модифицированные ниобатом лития ($LiNbO_3$) в диапазоне концентраций 0,05–0,25 М. Синтез проводился методом механической активации в планетарной мельнице при скоростях измельчения 150–600 об/мин с шагом 50 об/мин, с последующей термической стабилизацией при 700 °C в течение 5 часов. Целью работы было определение зависимости между концентрацией легирующей примеси, энергией механической обработки и структурно-механическими свойствами полученной керамики.

Фазовый состав и структурные параметры изучались методом рентгеновской дифракции, а морфологические особенности керамики – методом сканирующей электронной микроскопии. Как видно, образование двухфазной системы, включающей моноклинную фазу Li_2TiO_3 и ромбоэдрическую фазу $LiNbO_3$, сопровождается увеличением вариации содержания легирующей примеси, одновременно с изменением параметров кристаллической решетки и уменьшением размера областей когерентного рассеяния. Анализ методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показал выраженные изменения морфологии керамики при добавлении $LiNbO_3$ в зависимости от концентрации допанта. Увеличение скорости механической активации до 600 об/мин и увеличение концентрации легирующей добавки до 0,25 М приводит к созданию мелкозернистой композитной микроструктуры, где наблюдается улучшение прочностных характеристик по сравнению с нелегированным материалом.

Полученные данные показывают, что сочетание изменения содержания $LiNbO_3$ и параметров механической активации является одним из наиболее эффективных инструментов контроля фаз и прочности литийсодержащих керамических материалов, что открывает огромные возможности для оптимизации в высокотемпературных энергетических приложениях.

Ключевые слова: *литийсодержащая керамика; метатитанат лития; ниобат лития; рентгенофазовый анализ; кристаллическая структура.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-158-167
УДК 676.16:661.728

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

С. З. Наурызова [1,2], А. Қ. Қаржаубаева [1,2], Н. Н. Сагиева [3*], Ж. Е Ибраева.[2,4], А. К. Батталова[2,3], Е. Шаймардан [1,2], М. А. Бейсебеков [1,2,5], А. К. Кабдрахманова [1,2,6], К. Ақатан [3], С. К. Кабдрахманова [1]

[1]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[2]Научный центр композиционных материалов, Алматы, Казахстан
[3]Восточно-Казахстанский университет имени Сәрсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан
[4]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан
[5]ТОО «ARMA LTD», Алматы, Казахстан
[6]ТОО «SciCom», Астана, Казахстан

**E-mail для контактов:sagieva_n@ukk.nis.edu.kz*

В обзоре систематизированы и обобщены современные представления о микрокристаллической целлюлозе (МКЦ) как о многофункциональном материале с высоким адаптивным потенциалом. Проведен сравнительный анализ сырьевой базы: от традиционных источников (древесина, хлопок) до альтернативных агропромышленных отходов (рисовая шелуха, багасса, солома, оболочки какао-бобов) и вторичного текстиля. Ключевой акцент сделан на установлении закономерностей в системе «структура сырья – параметры выделения – функциональные свойства МКЦ». Детально рассмотрены механизмы получения МКЦ, включая классический кислотный гидролиз, органосольвентные методы, газофазную деструкцию HCl и гидротермальные процессы. Показано, как специфика лигноцеллюлозной матрицы и условия ее обработки предопределяют степень полимеризации, индекс кристалличности, полиморфный состав и морфологию частиц, регулируя сорбционную способность и реакционную активность продукта. Особое внимание уделено стратегиям направленной химической и физической модификации – окислению, этерификации и прививочной полимеризации, расширяющим области применения МКЦ в фармацевтике – для прямого прессования, в биомедицине – для создания гидрогелей и раневых покрытий, в экологии – в качестве сорбентов, а также при создании биокомпозитов. Научная ценность работы заключается в обосновании перехода от концепции МКЦ как инертного наполнителя к ее пониманию как проектируемого функционального прекурсора с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: *микрокристаллическая целлюлоза, агроотходы, рисовая шелуха, лигноцеллюлозное сырье, кислотный гидролиз, органосольвентные методы, модификация поверхности, биокомпозиты, упаковочные материалы, гидрогели.*

Введение

Развитие технологий глубокой переработки возобновляемого растительного сырья и переход к созданию биомиметических материалов остаются приоритетными направлениями современной химии полимеров и материаловедения. В контексте рационального использования лигноцеллюлозной и аграрной биомассы данный переход приобретает стратегическое значение, позволяя снизить зависимость от нефтехимических ресурсов и трансформировать многотоннажные сельскохозяйственные отходы в продукты с высокой добавленной стоимостью. Согласно исследованиям последних лет, целлюлоза и ее функциональные производные выступают в качестве базовой платформы для конструирования устойчивых биокомпозитов, биосовместимых систем и инновационных упаковочных материалов [1–3].

В ряду производных целлюлозы особое фундаментальное и прикладное значение имеет микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ). Являясь продуктом частичной деполимеризации природного полимера, МКЦ сохраняет высокоупорядоченную надмолекулярную организацию, что обусловливает уникальное сочетание механической прочности, химической стабильности и биологической инертности [2, 4, 5]. Технологические преимущества МКЦ перед наноструктурированными формами целлюлозы включают стабильность при сушке и транспортировке, легкость дозирования и возможность интеграции в полимерные матрицы без энергоемкой инфраструктуры. Это позволяет рассматривать МКЦ не только как традиционный фармацевтический эксципиент, но и как полифункциональный структурный блок для создания активной упаковки, селективных сорбентов и гидрогелевых систем [5–7].

В последние годы вектор исследований сместился в сторону выделения МКЦ из нетрадиционных видов растительного сырья. В отличие от древесного или хлопкового волокна, агроотходы характеризуются выраженной гетерогенностью анатомического строения

и вариабельностью химического состава, включая повышенное содержание минеральных компонентов, кремнезема, пектинов и экстрактивных веществ [1, 4, 8]. Данная специфика отчетливо проявляется при переработке отходов рисоводства: высокая минерализация рисовой шелухи существенно влияет на выход и качественные характеристики целевого продукта. Исследования по переработке рисовой шелухи из различных регионов Казахстана подтверждают, что географическое происхождение сырья напрямую коррелирует с оптимальным гидромодулем и выходом МКЦ [9].

Несмотря на значительный объем исследований, имеющиеся литературные данные носят разрозненный характер. Взаимосвязь между составом исходной биомассы, параметрами химической деструкции и конечной надмолекулярной организацией МКЦ остается недостаточно раскрытой. Целью настоящего обзора является системный анализ методов получения и модификации МКЦ из вторичных растительных ресурсов с акцентом на формирование заданного профиля свойств материала и оценку экологической обоснованности технологий для условий Республики Казахстан.

Сырьевые источники МКЦ

Критерии отбора сырьевой базы для синтеза МКЦ выходят за рамки исключительно количественного содержания целлюлозного компонента. Определяющее значение имеет компонентный состав лигноцеллюлозного комплекса: соотношение целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина, степень минерализации, присутствие восков, пектинов и экстрактивных веществ, а также анатомо-морфологические особенности исходных растительных тканей [4, 8, 10]. Иерархическая организация целлюлозных волокон на примере рисовой шелухи схематически представлена на рисунке 1.

Традиционно основными источниками МКЦ служили древесина и хлопок [2, 5]. Однако в последние десятилетия наблюдается активный поиск альтернативных возобновляемых ресурсов. МКЦ эффективно получают из отходов переработки масличной пальмы [11], волокон розеллы [12], плодов помело [13], бамбука [14], семян финиковой пальмы [15], оболочек какао-бобов [16], соевой шелухи [17], листьев кукурузы [19], отходов овощепереработки [18] и иных видов биомассы [1, 8].

Особый интерес представляют остатки зерновых культур и сахарного производства. Багасса сахарного тростника сравнительно хорошо поддается щелочной делигнификации и является одним из наиболее перспективных источников МКЦ в рамках концепции биорефинерии [20, 21]. Рисовая солома и особенно рисовая шелуха сложнее в переработке из-за повышенного содержания золы и кремнезема, что требует тщательной отмывки минеральной фазы и примене-

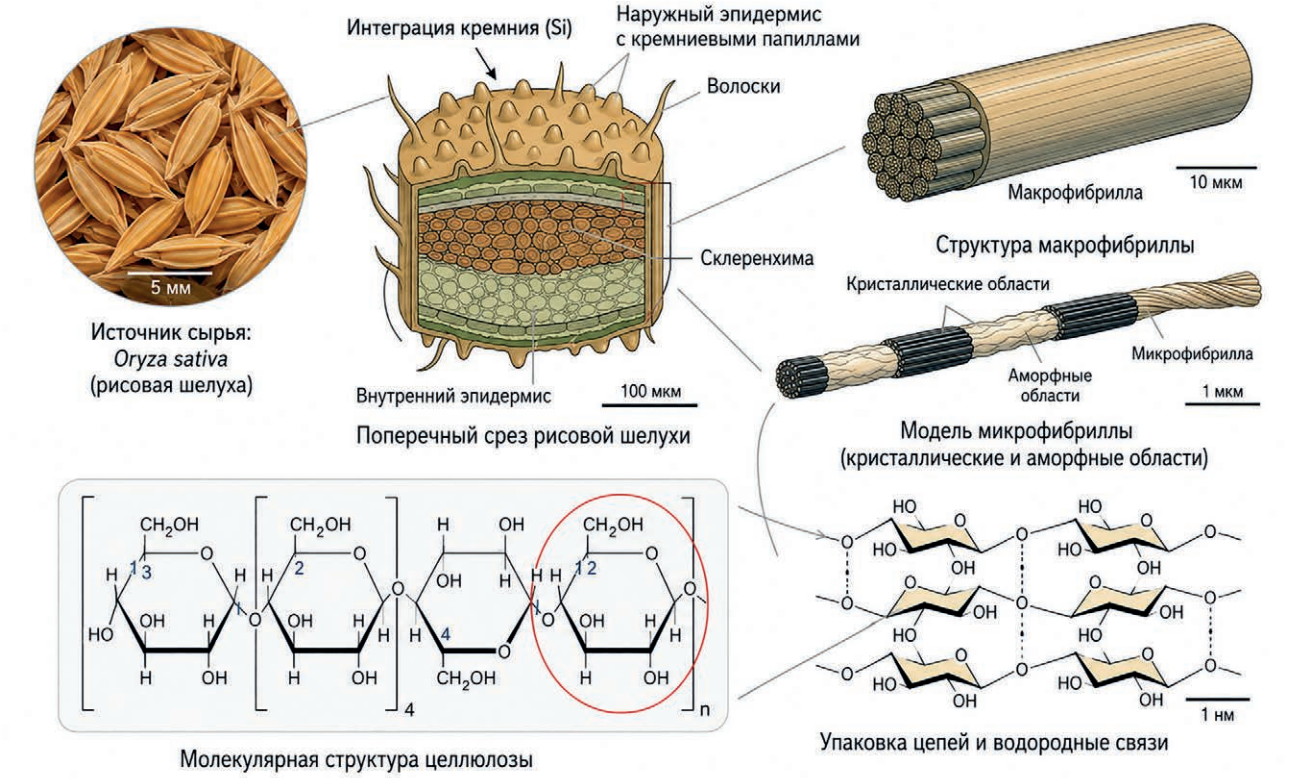


Рисунок 1. Иерархическая структура целлюлозы на примере рисовой шелухи (Oryza sativa): источник, поперечный срез с кремнеземными папиллами, макро- и микрофибриллы, молекулярная структура и водородные связи [8, 9, 24, 42]

ния комбинированных органосольвентно-окислительных маршрутов [8, 9]. Для стран с развитым рисоводством, включая Казахстан, это имеет принципиальное значение.

Плодово-овощные отходы характеризуются более рыхлой тканевой организацией и меньшим содержанием лигнина [13, 18, 22]. Текстильные отходы позволяют минимизировать химическую интенсивность процесса и обеспечить соответствие принципам циркулярной экономики [23], однако применимость в фармацевтике остается дискуссионной из-за требований к чистоте. Универсального сырьевого источника МКЦ не существует: выбор субстрата определяется функциональными требованиями целевого материала.

Строение и основные методы получения МКЦ

Микрокристаллическая целлюлоза представляет собой частично деполимеризованную целлюлозу с повышенной долей кристаллических областей, получаемую преимущественно путем селективной деструкции менее упорядоченных участков целлюлозных волокон. При кислотном гидролизе преимущественно деструктируются более доступные и менее упорядоченные участки целлюлозы, тогда как кристаллические домены характеризуются большей устойчивостью к гидролитическому воздействию [4, 12]. Процесс снижает степень полимеризации при почти неизменном выходе кристаллической матрицы. МКЦ характеризуется относительно высокой степенью структурной упорядоченности, развитой доступной поверхностью и термическими характеристиками, зависящими от природы сырья и условий выделения [8, 10].

В природной растительной целлюлозе молекулярные цепи объединяются в элементарные фибриллы и микрофибриллы с чередованием кристаллических и аморфных областей. Современные модели трактуют микрофибриллы как агрегаты приблизительно из 18 цепей [24]. Нативная целлюлоза существует преимущественно в форме целлюлозы I, регенерация и мерсеризация могут переводить ее в целлюлозу II [8, 24]. При правильно подобранном режиме гидролиза материал достигает предельной степени полимеризации - обычно 200–350 [2, 5, 10]. Получение МКЦ включает подготовку сырья, удаление экстрактивов, делигнификацию, отбеливание, контролируемый гидролиз аморфных областей, промывку, сушку, помол и классификацию [4, 8, 10]. Общая схема получения порошковой и коллоидной МКЦ из различных источников целлюлозы представлена на рисунке 2. Для рисовой шелухи Казахстана предложена органосольвентно-окислительная схема: выход МКЦ достигал 45,0–52,58% в зависимости от региона [9].

На стадии предварительного выделения целлюлозы распространены щелочные схемы с NaOH, окислительные методы отбеливания и органосольвентные подходы. Органосольвентный и комбинированные окислительные маршруты позволяют глубже разрушать лигнин без экстремальных концентраций минеральных кислот и интегрировать процесс в биорефинерийные схемы [9, 20, 21].

Классическим способом получения МКЦ остается кислотный гидролиз, преимущественно соляной кислотой. Соляная кислота предпочтительна для фармацевтических марок, так как не вызывает выраженного сульфатирования поверхности [2, 5, 10]. Серная кислота эффективнее для нанокристаллов, но для МКЦ может снижать термостабильность [4, 10]. Повышение концентрации кислоты, температуры и времени сопровождается ростом кристалличности лишь до определенного предела; далее начинается избыточная гидролитическая деструкция [4, 8].

Для сложного агросырья эффективны комбинированные схемы. Для рисовой шелухи Казахстана

Таблица 1. Сравнительная характеристика источников сырья для получения МКЦ

Вид сырьевого источника	Ключевые особенности состава и структуры	Технологические параметры выделения МКЦ	Источники
Древесина и хлопок	Высокая доля целлюлозы, низкая вариабельность, хорошо изученная морфология волокон	Стандартные щелочные и отбельные схемы; воспроизводимый кислотный гидролиз	[2, 5, 10]
Рисовая шелуха и рисовая солома	Большие объемы; повышенные зольность и кремнеземистая составляющая	Тщательное удаление зольных компонентов; органосольвентно–окислительные схемы	[8, 9]
Багасса сахарного тростника	Доступное волокнистое агросырье; интеграция в биорефинерию	Щелочная делигнификация, кислотный/газофазный HCl-гидролиз; LCA-оптимизация	[20, 21]
Пальмовые остатки, розелла, бамбук	Волокнистые субстраты с армирующей структурой	Классические щелочно-отбельные схемы и последующий гидролиз	[11, 12, 14]
Листья и оболочки кукурузы	Доступные отходы; умеренная лигнификация	Органосольвентный гидролиз; без щелочной обработки	[19]
Плодово-овощные и пищевые отходы	Рыхлая ткань; высокая влажность и сезонность	Удаление пектинов и сахаров; гидротермическая интенсификация	[13, 18, 22]
Оболочки какао, соевая шелуха, финиковые косточки	Агропромышленные остатки; состав зависит от сорта и обработки	Контроль очистки и дисперсности; оценка прессуемых свойств	[15, 16, 17]
Текстильные отходы и вторичная целлюлоза	Частично очищенная целлюлоза; возможны красители и аппреты	Очистка, растворение/набухание, контролируемый гидролиз	[23]

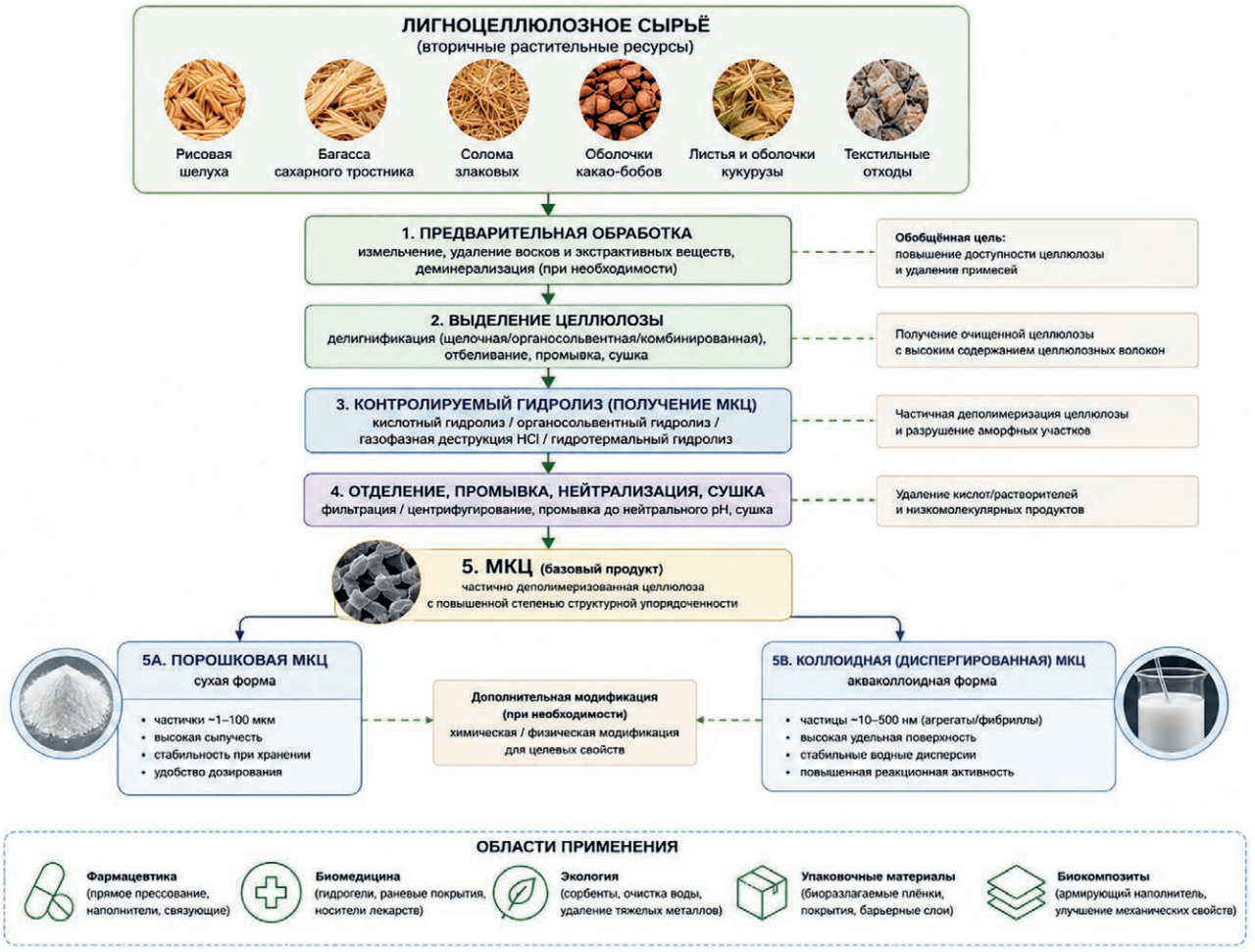


Рисунок 2. Схематическое представление основных этапов получения и модификации микрокристаллической целлюлозы из вторичного растительного сырья

предложена органосольвентно-окислительная схема; выход МКЦ достигал 45,0–52,58% в зависимости от региона [9]. Газофазный HCl-гидролиз позволяет существенно сократить водопотребление и объем кислых стоков при сохранении структурных характеристик продукта [21]. Гидротермическая интенсификация, ультразвук и механохимия также снижают кислотную нагрузку.

С точки зрения принципов «зеленой химии» и применимости для условий Республики Казахстан наиболее перспективными представляются органосольвентные и газофазные методы, а также комбинированные гидротермически интенсифицированные схемы. К основным критериям их перспективности относятся снижение расхода минеральных кислот и технологической воды, уменьшение объема кислых сточных вод, возможность регенерации и повторного использования органических растворителей, снижение химической нагрузки на процесс, а также возможность интеграции технологии в биорефинерийные и циркулярные производственные цепочки. Для Казахстана дополнительное значение имеет возможность переработки локально доступных агропромышленных отходов – рисовой шелухи и соломы, кукурузных остатков и других видов растительной биомассы – с учетом их региональной доступности и особенностей компонентного состава [9, 20–22].

Структурно-функциональные закономерности формирования свойств МКЦ

Свойства МКЦ формируются триадой «сырье – режим обработки – постобработка». Современные исследования показывают, что МКЦ представляет собой настраиваемую систему [8, 10, 15]. Целесообразно рассматривать ее в рамках схемы «сырье → структура → свойства → функция». Исходное сырье определяет морфологию, химический состав и гетерогенность матрицы. Сырье с высоким содержанием лигнина требует более жесткой предобработки. Агроотходы с пониженной лигнификацией легче деструктируются, но вариабельны [13, 18, 22]. Минерально-насыщенные субстраты (например, рисовая шелуха) требуют

Таблица 2. Методы получения и модификации МКЦ, их влияние на свойства и области применения

Метод / направление	Влияние на свойства МКЦ и ключевые параметры	Области применения	Источники
Жидкофазный кислотный гидролиз (HCl)	СП 200–350 (степень полимеризации); рост кристалличности; риск избыточной гидролитической деструкции	Фармацевтика: прямое прессование	[2, 4, 10]
Газофазный HCl-гидролиз	Сопоставимые структурные параметры; меньшее водопотребление	Промышленное производство: снижение водопотребления и объема стоков	[21]
Органосольвентно-окислительные схемы	Снижение лигнина и золы; высокая чистота; регенерация растворителей	Переработка сложного агросырья: рисовая шелуха и другие отходы	[8, 9, 20]
Гидротермическая интенсификация	Улучшение доступности аморфных областей; снижение расхода кислот	Переработка пищевых и растительных отходов: ресурсосберегающие схемы	[22]
Механохимическая / ультразвуковая обработка	Снижение размера частиц и кристалличности; рост реакционной способности	Предобработка сырья: снижение размера частиц и повышение реакционной способности	[8, 45]
Окислительная модификация	Введение –CHO/–COOH; повышение реакционной способности	Биомедицина: гидрогели, раневые покрытия, гемостатические материалы	[28, 29, 31]
Эстерификация / силанизация	Снижение гидрофильности; улучшение диспергирования в полиэфирах	Биокомпозиты и упаковка: PLA (полилактид)-композиты, пленочные материалы	[19, 25, 34]
N-halamine-модификация / прививочная полимеризация	Антимикробная активность; сохранение армирующего эффекта	Активная упаковка: антимикробные материалы	[5, 30]
Окисление + прививка / гибридизация	Рост сорбционной емкости и селективности	Экология: сорбенты красителей и ионов металлов	[6, 26]
Совместная технологическая обработка	Улучшение текучести и компактируемости	Фармацевтика: эксципиенты прямого прессования	[2, 17]
Минерально-кислотный гидролиз (H2SO4)	Ускоренная деполимеризация; рост поверхностного заряда	Получение наноразмерных целлюлозных продуктов	[4, 10]

деминерализации, поскольку неполное удаление золы снижает чистоту и увеличивает абразивность [8, 9].

Параметры гидролиза задают глубину деполимеризации. При достижении предельной СП (200–350) индекс кристалличности возрастает до 55–85%, морфология трансформируется к стержневидным или изометрическим микрочастицам. Избыточная жесткость приводит к гидролитической деструкции и агломерации [4, 8, 10].

Ключевые характеристики – степень полимеризации, индекс кристалличности, полиморфная форма, морфология и химия поверхности. Размер и форма частиц критичны для текучести и компактируемости: МКЦ из соевой шелухи показала улучшенные порошковые характеристики по сравнению с Avicel PH-101 [17]. Гидрофильность благоприятна для гидрогелей и сорбентов, но ухудшает совместимость с гидрофобными матрицами [19, 25]. Количественная оценка требует комплекса методов: SEM/TEM/AFM, XRD, FTIR, ζ-потенциал, TGA/DSC, лазерная дифракция.

Указанные методы являются взаимодополняющими. XRD позволяет оценивать степень кристаллической упорядоченности и полиморфное состояние целлюлозы; FTIR используется для выявления изменений функциональных групп и межмолекулярных взаимодействий, возникающих при выделении и модификации МКЦ; методы SEM, TEM и AFM дают информацию о форме, размерах частиц, состоянии поверхности и степени агрегации. Совместное применение этих методов обеспечивает улучшенную комплексную оценку взаимосвязи между структурой и функциональными свойствами МКЦ [43, 44].

При сопоставлении литературных данных по индексу кристалличности необходимо учитывать, что полученные значения существенно зависят от метода расчета, способа выделения аморфной составляющей и параметров обработки дифрактограмм. Поэтому значения индекса кристалличности, приведенные различными авторами, не всегда могут непосредственно сравниваться между собой без учета использованной методики [27].

Химические и физические методы модификации МКЦ

Исходная МКЦ редко обладает оптимальным набором свойств для всех применений. Высокая гидрофильность благоприятна для сорбентов и гидрогелей, но затрудняет совместимость с полиэфирами. Современная стратегия – управляемая функционализация без разрушения структурного каркаса [8, 10, 15].

Окислительная модификация вводит альдегидные и карбоксильные группы, повышая реакционную способность и позволяя создавать самовосстанавливающиеся гидрогели на основе окисленной МКЦ и карбоксиметилхитозана [28], а также гемостатические материалы с коллагеном [29]. Эстерификация, ацетилирование и силанизация снижают гидрофильность и улучшают диспергирование в расплавах по-

лимеров [8, 19, 25]. Прививочная полимеризация и N-галаминовая модификация открывают путь к активной антимикробной упаковке [30].

Физические методы (шаровой помол, ультразвук, холодная плазма, совместная технологическая обработка) позволяют направленно снижать кристалличность и размер частиц без агрессивных растворителей [8, 45]. При механическом воздействии снижение индекса кристалличности протекает интенсивнее, чем уменьшение степени полимеризации. Комбинированные подходы обеспечивают синергетический эффект и соответствуют принципам устойчивого развития.

Современные области применения МКЦ

Наиболее быстро развивающимся направлением является использование МКЦ как армирующего наполнителя в биоразлагаемых полимерных матрицах. МКЦ сочетает низкую плотность, возобновляемость и возможность химической адаптации поверхности [1, 8, 19, 25]. Применение coupling-agent (связующий агент) или поверхностной модификации существенно улучшает термомеханические свойства PLA/МКЦ-композитов и снижает водопоглощение [19, 25, 34].

В активных упаковочных системах МКЦ выступает носителем антимикробных и антиоксидантных функций [5]. PLA-пленки с N-halamine-модифицированной МКЦ одновременно усиливают матрицу и обеспечивают антимикробное действие [30]. В экологии окисленная и привитая МКЦ эффективно сорбирует красители и ионы тяжелых металлов [6, 26]. В биомедицине окисленная МКЦ использована для самовосстанавливающихся гидрогелей раневых покрытий [28]. Двусетчатые гидрогели перспективны для тканевой инженерии хряща [31].

Фармацевтическое применение остается наиболее стандартизованным. МКЦ – эффективный эксципиент прямого прессования благодаря пластической деформации и сухому связыванию [2, 10]. Альтернативные источники (какао-бобы, соевая шелуха, Ensete glaucum, листья кукурузы) демонстрируют свойства, позволяющие рассматривать их как устойчивую замену древесным маркам [16, 17, 19, 32]. В пищевой технологии МКЦ применяется как текстурообразователь и источник пищевых волокон [33].

Анализ литературы показывает, что наиболее перспективным является отход от универсализированного подхода к МКЦ. Для агроотходов принципиально важно учитывать не только массовую долю целлюлозы, но и зольность, минеральный состав и анатомию волокон. Именно эти факторы определяют выбор предварительной обработки и глубину гидролиза, а через них – степень кристалличности, морфологию частиц и технологическую пригодность МКЦ.

В биомедицинском направлении МКЦ может играть сразу несколько ролей: структурного армирующего компонента, регулятора водоудержания, носителя активных групп и биосовместимой твердой фазы. В отличие от наноцеллюлозы, МКЦ проще использовать в системах, где не требуется коллоидная прозрачность, но необходимы устойчивость формы, удобство стерилизации и хорошая воспроизводимость порошкового прекурсора [28, 31].

Структура МКЦ формируется как результат компромисса между степенью очистки, сохранением кристаллического каркаса и контролируемой деполимеризацией, причем оптимальные параметры процесса строго зависят от типа исходного сырья. МКЦ следует рассматривать как материал с настраиваемым профилем свойств, где изменение одного параметра неизбежно влечет за собой трансформацию всего комплекса характеристик. В композитах более удлиненные частицы способствуют эффективному армированию за счет увеличенной площади межфазного контакта. Для сорбентов и гидрогелей решающими оказываются доступность поверхности и возможность последующей функционализации. Термостабильность МКЦ зависит от способа получения: удаление гемицеллюлоз и пектинов повышает устойчивость к нагреву, тогда как наличие сульфатных или сильно окисленных поверхностных групп может снижать температуру начала разложения [4, 8]. Качество МКЦ формируется не только на стадии гидролиза, но и на этапе постобработки. Недостаточная промывка ведет к остаточной кислотности и изменению термического поведения. Выбор режима сушки определяет степень агрегации, насыпную плотность и диспергируемость; измельчение и классификация существенно влияют на потоковые и прессуемые свойства порошка [2, 17]. По этой причине сопоставление методов получения необходимо вести не по одному параметру выхода, а по целевому профилю материала.

Развитая система водородных связей обеспечивает способность МКЦ к пластической деформации и прочному межчастичному сцеплению при таблетировании [2]. Кристалличность и морфология частиц определяют модуль упругости и поведение в полимерной матрице [19, 25, 34]. Доступность поверхностных гидроксильных групп регулирует сорбцию воды, возможность химической функционализации и межфазные взаимодействия в гидрогелях, мембранах и сорбентах [6, 8, 26]. Поэтому при оценке МКЦ необходимо анализировать не отдельный параметр, а совокупность: полиморфную форму, степень кристалличности, размер и форму частиц, состояние поверхности и наличие остаточных нецеллюлозных компонентов.

В ближайшей перспективе особое значение будут иметь разработка более «зеленых» схем выделения МКЦ с уменьшением расхода минеральных кислот, воды и энергии, а также стандартизация методов оценки кристалличности, дисперсности и прикладных свойств, без чего трудно корректно сравнивать данные разных авторов [27]. Перспективность альтер-

нативных источников для фармацевтики подтверждена экспериментально. МКЦ из оболочек какаоплодов, соевой шелухи, биомассы Ensete glaucum и листьев кукурузы продемонстрировала свойства, позволяющие рассматривать ее как устойчивую замену или дополнение традиционным древесным маркам для твердых лекарственных форм и систем доставки [16, 19, 32].

Для мембранных и сорбционных применений агросырье особенно перспективно, поскольку требования к «фармакопейной» чистоте здесь ниже, а возможности последующей модификации и экономии на сырье, напротив, крайне важны. Современные эпоксидно-пористые материалы на основе МКЦ демонстрируют высокую эффективность по отношению как к анионным, так и к катионным красителям [26].

В фармацевтических системах влага может одновременно облегчать пластическую деформацию и ухудшать стабильность порошка, поэтому существует оптимальное окно содержания связанной воды [2]. В композиционных материалах избыточная гидрофильность МКЦ затрудняет ее совместимость с гидрофобными матрицами, повышает водопоглощение и ускоряет межфазную деградацию [19, 25]. Для фармацевтических применений предпочтительны частицы с узким распределением по размерам и хорошей текучестью, обеспечивающие высокую компактируемость и воспроизводимость дозирования. Показательно, что МКЦ из соевой шелухи, полученная по упрощенной схеме, продемонстрировала улучшенные физические характеристики и текучесть по сравнению с коммерческим Avicel PH-101 и меньшую чувствительность к смазке [17].

Заключение

Микрокристаллическая целлюлоза остается одним из немногих биополимерных материалов, в которых высокая технологическая зрелость сочетается с большим резервом дальнейшего развития. Исследования последних лет подтверждают переход МКЦ из категории вспомогательных веществ в разряд структурных основ для конструирования многофункциональных материалов [2, 5, 6, 8, 19]. Прикладная ценность МКЦ определяется точным соответствием между происхождением сырья, режимом выделения, структурой и требуемой функцией.

Для агроотходов и вторичной целлюлозы принципиально важно учитывать зольность, минеральный состав, анатомию волокон и наличие остаточного лигнина. Оптимальные условия процесса не могут быть механически перенесены с одного вида биомассы на другой [9, 17, 19, 20, 21, 23]. С точки зрения экологической и экономической обоснованности для условий Республики Казахстан предпочтительны органосольвентные схемы, газофазный HCl-гидролиз и гидротермически интенсифицированные маршруты, минимизирующие расход минеральных кислот и воды. В ближайшей перспективе особое значение будут иметь: (1) ресурсосберегающие схемы выделения МКЦ; (2) стандартизация методов оценки кристалличности и порошковых свойств [27]; (3) проектирование материалов под конкретную область применения; (4) интеграция производства МКЦ в биорефинерийные и циркулярные цепочки. С учетом рассмотренных технологических и структурных факторов наиболее перспективными направлениями практического использования МКЦ из агропромышленных отходов представляются биоразлагаемые полимерные композиты и активные упаковочные материалы, сорбенты для очистки воды, гидрогелевые и раневые материалы, а при обеспечении требуемых показателей чистоты, дисперсности и прессуемости – фармацевтические эксципиенты. Выбор конкретного направления должен определяться составом исходного сырья, морфологией и кристалличностью полученной МКЦ, состоянием ее поверхности и возможностью направленной функционализации. Реализация этих подходов позволит перевести МКЦ из категории «возобновляемого наполнителя» в категорию полноценных функциональных материалов нового поколения.

Авторы выражают благодарность Комитету науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан за финансовую поддержку исследования в рамках гранта № AP26103101.

Литература / References:

1. Ventura-Cruz S., Tecante A. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from agricultural waste: Review on isolation and application as reinforcement in polymeric matrices // Food Hydrocolloids. – 2021. – Vol. 118. – Art. 106771. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106771
2. Zhao H., Zhao L., Lin X., Shen L. An update on microcrystalline cellulose in direct compression: Functionality, critical material attributes, and co-processed excipients // Carbohydrate Polymers. – 2022. – Vol. 278. – Art. 118968. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118968
3. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications // Journal of Materials Science. – 2020. – Vol. 55, No. 3. – P. 829–892. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y
4. Haldar D., Purkait M.K. Micro and nanocrystalline cellulose derivatives of lignocellulosic biomass: A review on synthesis, applications and advancements // Carbohydrate Polymers. – 2020. – Vol. 250. – Art. 116937. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116937
5. Bangar S.P., Saini C.S., Nehra M. et al. Microcrystalline cellulose for active food packaging applications: A review // Food Packaging and Shelf Life. – 2023. – Vol. 36. – Art. 101048. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101048
6. Garba Z.N., Lawan I., Zhou W. et al. Microcrystalline cellulose (MCC) based materials as emerging adsorbents for the removal of dyes and heavy metals – A review // Sci-

ence of the Total Environment. – 2020. – Vol. 717. – Art. 135070. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135070
7. Poudel J., Bhattarai S., Nath N., Tanti B. An exclusive review of microcrystalline cellulose: Structure and applications, and limitations // Materials Today Communications. – 2025. – Vol. 45. – Art. 112247. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112247
8. Lupidi G., Pastore G., Marcantoni E., Gabrielli S. Recent developments in chemical derivatization of microcrystalline cellulose (MCC): Pre-treatments, functionalization, and applications // Molecules. – 2023. – Vol. 28, No. 5. – Art. 2009. https://doi.org/10.3390/molecules28052009
9. Battalova A., Ibraeva Z., Kabdrakhmanova S. et al. Comparative characteristics of microcrystalline cellulose obtained from the rice waste production of Kazakhstan // Chemical Bulletin of Kazakh National University. – 2024. – Vol. 113, No. 4. – P. 14–23. https://doi.org/10.15328/cb1386
10. Trache D., Hussin M.H., Chuin C.T.H. et al. Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application – A review // International Journal of Biological Macromolecules. – 2016. – Vol. 93, Part A. – P. 789–804. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.056
11. Xiang L.Y., Hassan M., Said M. et al. Characterisation of microcrystalline cellulose from oil palm fibres for food applications // Carbohydrate Polymers. – 2016. – Vol. 148. – P. 11–20. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.055
12. Kian L.K., Jawaid M., Ariffin H., Alothman O.Y. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from roselle fibers // International Journal of Biological Macromolecules. – 2017. – Vol. 103. – P. 931–940. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.135
13. Liu Y., Ahmed S., Sameen D.E. et al. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from pomelo peel // International Journal of Biological Macromolecules. – 2018. – Vol. 111. – P. 717–721. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.098
14. Abdul Khalil H.P.S., Tye Y.Y., Leh C.P. et al. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from sacred Bali bamboo as reinforcing filler in seaweed-based composite film // Fibers and Polymers. – 2018. – Vol. 19. – P. 423–434. https://doi.org/10.1007/s12221-018-7672-7
15. Abu-Thabit N.Y., Judeh A.A., Elessawy N.A. et al. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from date seeds (Phoenix dactylifera L.) // International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – Vol. 155. – P. 730–739. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.255
16. Adeleye O.A., Bamiro O.A., Albalawi D.A. et al. Characterizations of alpha-cellulose and microcrystalline cellulose isolated from cocoa pod husk as a potential pharmaceutical excipient // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 17. – Art. 5992. https://doi.org/10.3390/ma15175992
17. Alamdari N.E., Aksoy B., Babu R.J., Jiang Z. Microcrystalline cellulose from soybean hull as an excipient in solid dosage forms: Preparation, powder characterization, and tableting properties // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 270, Part 1. – Art. 132298. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132298
18. Suyambulingam I., Divakaran D., Manikandan M. et al. Isolation of microcrystalline cellulose from vegetable waste biomass and its potential as a high-performance green reinforcement in biocomposites // Bioresource Technology Reports. – 2025. – Vol. 32. – Art. 102337. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102337
19. Sagiyeva N., Akatan K., Battalova A. et al. Eco-friendly conversion of corn husk agro-waste into microcrystalline cellulose and cellulose nanofibers // Nano-Structures & Nano-Objects. – 2026. – Vol. 45. – Art. 101610. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2025.101610
20. Katakojwala R., Mohan S.V. Microcrystalline cellulose production from sugarcane bagasse: Sustainable process development and life cycle assessment // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 249. – Art. 119342. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119342
21. Hosseinzadeh J., Abdulkhani A., Ashori A. et al. Comparative study on liquid versus gas phase hydrochloric acid hydrolysis for microcrystalline cellulose isolation from sugarcane bagasse // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 264, Part 2. – Art. 130674. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130674
22. Holilah H., Paridah M.T., Juliana A.H. et al. Hydrothermal assisted isolation of microcrystalline cellulose from pepper (Piper nigrum L.) processing waste for making sustainable bio-composite // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 305. – Art. 127229. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127229
23. Işıtan M.A., Kırcı H., Yılmaz Z.A. et al. Sustainable production of microcrystalline and nanocrystalline cellulose from textile waste using HCl and NaOH/urea treatment // Polymers. – 2025. – Vol. 17, No. 1. – Art. 48. https://doi.org/10.3390/polym17010048
24. Pedersen G.B., Jørgensen B., Egsgaard H. et al. Cellulose synthesis in land plants // Molecular Plant. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – P. 206–231. https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.12.015
25. Gorgun E., Ali A., Islam M.S. Biocomposites of poly(lactic acid) and microcrystalline cellulose: Influence of the coupling agent on thermomechanical and absorption characteristics // ACS Omega. – 2024. – Vol. 9. – P. 11523–11533. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08448
26. Dai F., Zhang L., Liu X. et al. Adsorbents prepared from epoxy-based porous materials of microcrystalline cellulose for excellent adsorption of anionic and cationic dyes // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 260, Part 1. – Art. 129477. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129477
27. Salem K.S., Kasera N.K., Rahman M.A. et al. Comparison and assessment of methods for cellulose crystallinity determination // Chemical Society Reviews. – 2023. – Vol. 52. – P. 6417–6446. https://doi.org/10.1039/D2CS00569G
28. Yin H., Wang L., Qiao Y. et al. A self-healing hydrogel based on oxidized microcrystalline cellulose and carboxymethyl chitosan as wound dressing material // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – Vol. 221. – P. 1606–1617. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.060
29. Li H., Yang J., Hu X. et al. Reinforced collagen with oxidized microcrystalline cellulose shows improved hemostatic effects // Carbohydrate Polymers. – 2017. – Vol. 165. – P. 30–38. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.023
30. An L., Perkins P., Yi R., Ren T. Development of polylactic acid based antimicrobial food packaging films with N-halamine modified microcrystalline cellulose // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023.

– Vol. 242, Part 1. – Art. 124685. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124685
31. Yu X., Zhang Q., Yang C. et al. Double network microcrystalline cellulose hydrogels with high mechanical strength and biocompatibility for cartilage tissue engineering scaffold // International Journal of Biological Macromolecules. – 2023. – Vol. 238. – Art. 124113. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124113
32. Pachuau L., Dutta R.S., Hauzel L. et al. Evaluation of novel microcrystalline cellulose from Ensete glaucum (Roxb.) Cheesman biomass as sustainable drug delivery biomaterial // Carbohydrate Polymers. – 2019. – Vol. 206. – P. 336–343. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.013
33. Nsor-Atindana J., Chen M., Goff H.D. et al. Functionality and nutritional aspects of microcrystalline cellulose in food // Carbohydrate Polymers. – 2017. – Vol. 172. – P. 159–174. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.021
34. Zhu B., Zhao S., Guo J. et al. Enhancing the mechanical properties of polylactic acid (PLA) composite films using Pueraria lobata root microcrystalline cellulose // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 279, Part 4. – Art. 135579. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135579
35. Ren H., Xu Z., Gao M. et al. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose/polylactic acid biocomposite films and its application in Lanzhou lily bulbs preservation // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 18. – Art. 13770. https://doi.org/10.3390/su151813770
36. Akatan K., Kabdrakhmanova S., Kuanyshbekov T. et al. Highly-efficient isolation of microcrystalline cellulose and nanocellulose from sunflower seed waste via an environmentally benign method // Cellulose. – 2022. – Vol. 29, No. 7. – P. 3787–3802. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04527-4
37. Tarchoun A.F., Trache D., Klapötke T.M. et al. Ecofriendly isolation and characterization of microcrystalline cellulose from giant reed using various acidic media // Cellulose. – 2019. – Vol. 26. – P. 7635–7651. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02672-x
38. Zhao T., Chen Z., Lin X. et al. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose (MCC) from tea waste // Carbohydrate Polymers. – 2018. – Vol. 184. – P. 164–170. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.024
39. Alavi M. Modifications of MCC, CNF, and NCC for antimicrobial and wound healing applications // e-Polymers. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 103–119. https://doi.org/10.1515/epoly-2019-0013
40. Dong Y., Chaubal M.V., Gao Y. et al. Entangled and colloidally stable microcrystalline cellulose matrices in controlled drug release // International Journal of Pharmaceutics. – 2018. – Vol. 548, No. 1. – P. 113–119. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.06.022
41. Motaung T.E., Linganiso L.Z. Critical review on agro waste cellulose applications for biopolymers // International Journal of Plastics Technology. – 2018. – Vol. 22, No. 1. – P. 185–216. https://doi.org/10.1007/s12588-018-9219-6
42. Jarvis M.C. Structure of native cellulose microfibrils, the starting point for nanocellulose manufacture // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2018. – Vol. 376, No. 2112. – Art. 20170045. https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0045
43. Chakraborty I., Rongpipi S., Govindaraju I. et al. An insight into microscopy and analytical techniques for morphological, structural, chemical, and thermal characterization of cellulose // Microscopy Research and Technique. – 2022. – Vol. 85, No. 5. – P. 1990–2015. https://doi.org/10.1002/jemt.24057
44. Ju X., Bowden M., Brown E.E., Zhang X. An improved X-ray diffraction method for cellulose crystallinity measurement // Carbohydrate Polymers.– 2015. – Vol. 123. – P. 476–481. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.071
45. Lan L., Chen H., Lee D. et al. Effect of ball-milling pretreatment of cellulose on its photoreforming for H2 production // ACS Sustainable Chemistry & Engineering.–2022. Vol. 10. – P. 4862–4871. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c07301

ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗАЛЫҚ ШИКІЗАТТАН АЛЫНАТЫН МИКРОКРИСТАЛДЫ ЦЕЛЛЮЛОЗАНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ҚАЛЫПТАСУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

С. З. Наурызова [1,2], А. Қ. Қаржаубаева[1,2], Н. Н. Сағиева[3]*, Ж. Е. Ибраева[2,4], А. К. Батталова[2,3], Е. Шаймардан [1,2], М. А. Бейсебеков[1,2,5], А. К. Қабдрахманова [1,2,6], К. Ақатан[3], С. К. Қабдрахманова[1]

[1] Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан
[2] Композициялық материалдар ғылыми орталығы, Алматы, Қазақстан
[3] Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан
[4] Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан
[5] «ARMA LTD» ЖШС, Алматы, Қазақстан
[6] «SciCom» ЖШС, Астана, Қазақстан

**Байланыс үшін e-mail:sagieva_n@ukk.nis.edu.kz*

Бұл шолу жұмысында микрокристалды целлюлозаның бейімделу мүмкіндігі жоғары көпфункционалды материал ретіндегі қазіргі ғылыми тұжырымдары жүйеленіп, қорытындыланды. МКЦ өндіруге пайдаланылатын шикізат көздеріне салыстырмалы талдау жүргізіліп, дәстүрлі материалдармен (ағаш, мақта) қатар баламалы агроөнеркәсіптік қалдықтар (күріш қауызы, багасса, сабан, какао бұршағының қабықтары) және қайта өңделген тоқыма материалдары қарастырылды. Негізгі назар «шикізат құрылымы – бөліп алу параметрлері – МКЦ-ның функционалдық қасиеттері» арасындағы өзара байланысты анықтауға бағытталды. МКЦ алудың классикалық

қышқылдық гидролиз, органосольвенттік өңдеу, HCl қатысындағы газ фазалық деструкция және гидротермиялық өңдеу сияқты негізгі тәсілдерінің механизмдері жан-жақты қарастырылды. Лигноцеллюлозалық матрицаның ерекшеліктері мен оны өңдеу жағдайлары полимерлену дәрежесіне, кристалдылық индексіне, полиморфтық құрамға және бөлшектер морфологиясына әсер етіп, нәтижесінде алынған материалдың сорбциялық қасиеттері мен реакциялық қабілетін айқындайтыны көрсетілді. МКЦ-ның қолданылу мүмкіндіктерін кеңейтетін бағытталған химиялық және физикалық модификациялау стратегияларына, соның ішінде тотықтыруға, этерификацияға және жалғанған полимерленуге ерекше назар аударылды. Мұндай тәсілдер МКЦ-ны фармацевтикада тікелей престеу үшін, биомедицинада гидрогельдер мен жара жабындарын әзірлеуде, экологиялық мақсаттағы сорбенттер және биокомпозиттер алуда қолдануға мүмкіндік береді. Шолудың ғылыми маңыздылығы МКЦ-ны инертті толтырғыш ретінде қарастыратын дәстүрлі түсініктен бас тартып, оны қасиеттері мақсатты түрде реттелетін функционалдық прекурсор ретінде қарастырудың ғылыми негіздерін жүйелеумен айқындалады.

Түйін сөздер: *микрокристалды целлюлоза, агроқалдықтар, күріш қауызы, лигноцеллюлозалық шикізат, қышқылдық гидролиз, органосольвенттік әдістер, беткі қабатты модификациялау, биокомпозиттер, қаптама материалдары, гидрогельдер.*

FACTORS GOVERNING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE DERIVED FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS

S.Z. Nauryzova[1,2], A.K. Karzhaubayeva[1,2], N.N. Sagiyeva[3]*, Zh.Ye. Ibraeva[2,4], A.K. Battalova[2,3], E. Shaimardan[1,2], M.A. Beisebekov [1,2,5], A.K. Kabdrakhmanova[1,2,6], K. Akatan[3], S.K. Kabdrakhmanova [1]

[1] Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[2] Scientific Center of Composite Materials, Almaty, Kazakhstan
[3] Amanzholov University, Oskemen, Kazakhstan
[4] Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
[5] LLP "ARMA LTD", Almaty, Kazakhstan
[6] LLP "SciCom", Astana, Kazakhstan

**E-mail for contacts: sagieva_n@ukk.nis.edu.kz*

This review systematizes and critically summarizes current knowledge of microcrystalline cellulose as a multifunctional material with considerable potential for property tailoring. Particular attention is given to the diversity of cellulose feedstocks, ranging from conventional sources such as wood and cotton to alternative agro-industrial residues, including rice husk, bagasse, straw, cocoa bean shells, and recycled textile materials. The analysis is structured around the relationship between feedstock architecture, isolation conditions, and the resulting functional properties of MCC. Major MCC production routes are examined in detail, including conventional acid hydrolysis, organosolv processing, HCl gas-phase degradation, and hydrothermal treatment. The available evidence demonstrates that the characteristics of the initial lignocellulosic matrix, together with processing conditions, govern the degree of polymerization, crystallinity index, cellulose polymorphism, and particle morphology, thereby influencing the sorption behavior and chemical reactivity of the resulting material. Particular emphasis is placed on targeted chemical and physical modification strategies, including oxidation, esterification, and graft polymerization, which provide additional opportunities to tailor MCC performance. These approaches broaden its potential use in pharmaceutical formulations for direct compression, biomedical systems such as hydrogels and wound dressings, environmental sorbents, and advanced biocomposites. The scientific significance of this review lies in consolidating the transition from the conventional perception of MCC as a passive filler toward its consideration as an engineered functional precursor whose properties can be deliberately tailored for specific applications.

Keywords: *microcrystalline cellulose; agricultural waste; rice husk; lignocellulosic biomass; acid hydrolysis; organosolv methods; surface modification; biocomposites; packaging materials; hydrogels.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-168-175
УДК 539.16:631.42: 581.5 (574)

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ АРИДНОЙ ЗОНЫ КАЗАХСТАНА

Н.В. Ларионова[1*], А.В. Топорова[1], А.Е. Кундузбаева[1], А.М. Кабдыракова[2]

[1]Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2]РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан
** E-mail для контактов: larionova@nnc.kz*

Проведена оценка удельной активности естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове аридной зоны Казахстана вдоль 65 и 75 меридианов. Средние значения в почвах составили 580,7 Бк/кг для ^{40}K, 34,8 Бк/кг для ^{232}Th, 23,0 Бк/кг для ^{226}Ra и 16,9 Бк/кг для ^{137}Cs. В растениях средние значения, рассчитанные по количественно установленным значениям, составили 489,2 Бк/кг для ^{40}K, 2,5 Бк/кг для ^{232}Th, 14,3 Бк/кг для ^{226}Ra и 1,2 Бк/кг для ^{137}Cs. Удельная активность ^{241}Am количественно не определена. Наиболее высокая вариабельность значений Кн характерна для ^{137}Cs, тогда как относительно более интенсивное накопление растениями отмечается для ^{40}K и ^{226}Ra. Расчетная мощность дозы облучения растений составила 1,6…8,9 мкГр/сут вдоль 65 меридиана и 3,7…15,0 мкГр/сут вдоль 75 меридиана и находилась значительно ниже уровней, при которых ожидается проявление радиационных эффектов у референтных видов. Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных характеристик для радиационного мониторинга, оценки динамики радионуклидов и дозовых нагрузок на биоту, а также для последующего контроля радиологического состояния исследованной территории.

Ключевые слова: *удельная активность, естественные радионуклиды (^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra), искусственные радионуклиды (^{137}Cs, ^{241}Am), почвенно-растительный покров, дозовая нагрузка на биоту*

Введение

В последние годы в Республике Казахстан (РК) наблюдается активное развитие предприятий ядерно-топливного цикла, включающее расширение уранодобывающей отрасли, создание банка ядерного топлива и реализацию проектов по строительству атомных электростанций. Эксплуатация подобных объектов потенциально связана с поступлением техногенных радионуклидов в окружающую среду и может оказывать влияние на радиоэкологическое состояние территорий. В связи с этим особую актуальность приобретает получение достоверной информации о современных фоновых уровнях содержания естественных и искусственных радионуклидов в компонентах окружающей среды.

Основными источниками глобального поступления искусственных радионуклидов в биосферу являются атмосферные испытания ядерного оружия, проводившиеся в различных регионах мира в XX веке, а также крупные аварии на объектах атомной энергетики. Известно, что распределение техногенных радионуклидов на поверхности Земли имеет выраженную широтную зависимость, при этом максимальные уровни глобальных выпадений отмечаются в диапазоне 40–50° северной широты. Значительная часть территории Казахстана располагается в пределах данной зоны, что обусловливает необходимость проведения комплексных исследований радиоэкологической обстановки.

Ранее оценка радиоактивного загрязнения территории Республики была представлена в Атласе радиоэкологической обстановки Казахстана за период 1954–1994 гг. [1], а также в исследованиях, выполненных в 2018–2020 гг. в рамках бюджетной программы, направленной на развитие атомных и энергетических проектов [2]. Полученные результаты позволили охарактеризовать фоновое содержание наиболее распространенных естественных и искусственных радионуклидов в поверхностном слое почвы и атмосферном воздухе. Однако для более полного понимания современного радиоэкологического состояния территории необходимы данные о распределении радионуклидов в системе «почва–растение», отражающие процессы их миграции и биологического накопления. Целью настоящего исследования является оценка фонового уровня содержания естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове аридной зоны РК.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования – зональные почвы и растения степной части аридной зоны РК, которая занимает площадь более 800 тыс. кв. км, что составляет более четверти всей территории, и которая простирается более чем на 2200 км с запада на восток от 46° до 85° восточной долготы. Для более полного охвата степной зоны для исследования были выбраны 65 и 75 меридианы, расположенные ближе к западу и востоку (Рисунок 1). Вдоль каждого меридиана были за-

ложены по 15 исследовательских площадок – точек отбора проб почвы и растений. Протяженность исследованных участков меридианов составила в среднем 500 км, расстояние между точками – от 35 до 40 км. В соответствии со стандартными методиками [3], в каждой точке выполнялись измерения радиационных параметров – плотности потока β-частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД). Пробы растений представляли собой смешанные образцы надземной части степного разнотравья, отобранные с площади 1 м^2. Пробы почвы были отобраны методом «конверта» на глубину 0-5 см и состояли из 5 образцов, отобранных по 4 углам и в центре площадки отбора растений.

Для последующего лабораторного анализа отобранные пробы растений и почвы подвергали предварительной подготовке. Пробы растений предварительно измельчали секатором до фрагментов длиной 1…3 см, промывали дистиллированной водой 2–3 раза и высушивали в сушильном шкафу при температуре 80–100 ºС. После высушивания образцы дополнительно измельчали в лабораторной мельнице. Далее проводили термическое концентрирование: сухой растительный материал обугливали в муфельной печи или на электроплитах, не допуская воспламенения, до получения остатка чёрного цвета. После охлаждения образцы растирали и подвергали озолению при температуре до 200 ºС. Полученную золу охлаждали в эксикаторе, просеивали, взвешивали и определяли коэффициент озоления.

Пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 60–70 ºС. После удаления крупных камней и растительных остатков образцы взвешивали, тщательно перемешивали, порционно растирали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Растирание и просеивание проводили до полного удаления частиц почвенного скелета. Полноту просеивания контролировали встряхиванием сита над листом бумаги.

Удельную активность естественных и искусственных радионуклидов в образцах почвы и растений определяли с использованием поверенного оборудования в соответствии со стандартизированными методическими рекомендациями [4]. Для определения содержания радионуклидов ^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{137}Cs и ^{241}Am в образцах почвы и растений использовали гамма-спектрометр Canberra GX-2020 с твердотельным детектором относительной эффективностью регистрации гамма-излучения 20%, оснащенным сверхчистым германиевым кристаллом, многоканальным анализатором импульсов Canberra InSpector 1200 (США) и персональным компьютером с установленным программным пакетом Genie-2000 версии 3.1 производства Canberra. В образцах растений концентрацию радионуклидов определяли в зольном остатке с последующим пересчетом на сухую массу. Погрешность измерений не превышала 10–20%. Гамма-спектрометр был откалиброван по энергии и эффективности. Для калибровки использовались образцовые (эталонные) источники гамма-излучения с известной активностью радионуклидов.

Оценка радиационного воздействия на наземную биоту (растительность) проводится на основе расчета мощности дозы облучения. Мощность дозы облучения растения (Dj) складывается из мощности дозы

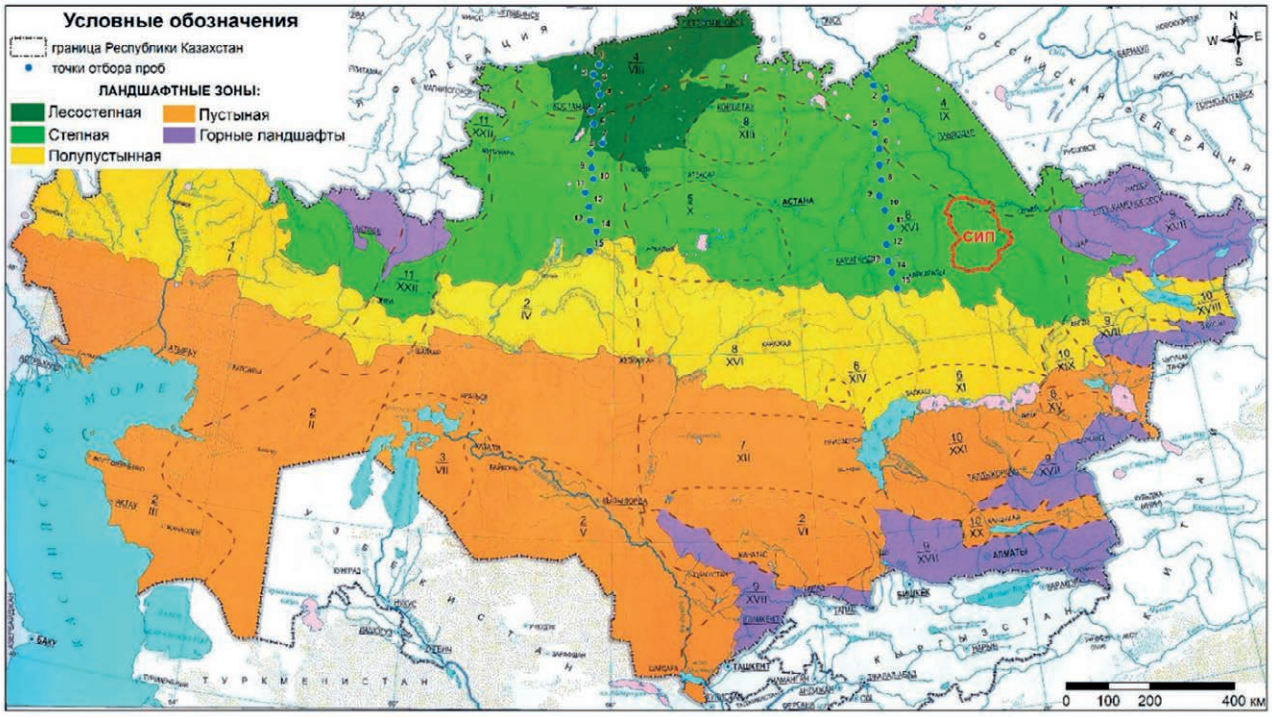


Рисунок 1. Расположение точек отбора проб на исследуемой территории

внутреннего и внешнего облучения Di,j от всех рассматриваемых радионуклидов i:

$$D_j = \sum_i D_{i,j}^{внутр} + D_{i,j}^{внеш}$$

Первая составляющая обусловлена радионуклидами, непосредственно содержащимися в растениях, вторая составляющая формируется за счет радионуклидов, находящихся в почве [5].

Мощность дозы внутреннего/внешнего облучения растения рассчитывается согласно выражению:

$$D = A \times d$$

здесь: A – удельная активность радионуклида в растениях или почве в случае расчета мощности дозы внутреннего и внешнего облучения соответственно, Бк/кг;

d – дозовый коэффициент внутреннего или внешнего облучения растения, (мкГр/сутки)/(Бк/кг) [6].

Значения дозовых коэффициентов табулируются в публикации Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) и представлены в таблице 1. Дозовые коэффициенты выбраны для объекта «дикая трава».

Таблица 1. Значения дозовых коэффициентов внутреннего и внешнего облучения растений

Радионуклид	Дозовый коэффициент, (мкГр/сут)/(Бк/кг)	
	внутреннего облучения	внешнего облучения
^{40}K	6,2×10–3	7,0×10–4
^{232}Th	5,5×10–2	2,6×10–6
^{226}Ra	3,4×10–1	8,0×10–3
^{137}Cs	3,4×10–3	2,7×10–3
^{241}Am	7,7×10–2	7,9×10–5

Результаты и обсуждение

Измерения радиометрических параметров показали, что полученные значения МЭД на исследуемой территории варьируют от нижнего предела обнаружения (<0,10 мкЗв/ч) до 0,16 мкЗв/ч. Значения плотности потока бета-частиц во всех точках обследования находятся ниже предела измерения используемой аппаратуры (<10 част/(см^2×мин)). По результатам проведенного спектрометрического анализа установлены значения удельной активности естественных (^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra) и искусственных (^{241}Am, ^{137}Cs) радионуклидов в почвах и растениях вдоль 65 и 75 меридианов (Таблица 2). Содержание радионуклида ^{241}Am и в почвах, и в растениях оказалось ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения.

Наиболее высокие значения отмечены для ^{40}K: от 350 до 690 Бк/кг вдоль 65 меридиана при среднем 541±98 Бк/кг и от 410 до 980 Бк/кг вдоль 75 меридиана при среднем 621±195 Бк/кг; коэффициент вариации (CV) составил 18,1% и 31,4% соответственно, что указывает на умеренную вариабельность. Для ^{232}Th значения изменялись от 17 до 52 Бк/кг при среднем 37±9 Бк/кг вдоль 65 меридиана и от 22 до 47 Бк/кг при среднем 32,5±7,7 Бк/кг вдоль 75 меридиана при коэффициенте вариации 24,3% и 23,6% соответственно. Удельная активность ^{226}Ra составила 13…34 Бк/кг при среднем 23±6 Бк/кг вдоль 65 меридиана и 14…32 Бк/кг при среднем 23±5 Бк/кг вдоль 75 меридиана; CV составил 26,1% и 22,4% соответственно. Наиболее выраженная вариабельность отмечена для ^{137}Cs: вдоль 65 меридиана значения составляли 3,7…55 Бк/кг при среднем 16,2±3,5 Бк/кг и CV 83,7%, а вдоль 75 меридиана – 6,3…33 Бк/кг при среднем 17,7±9,6 Бк/кг и CV 54,2%. Таким образом, среди исследованных радионуклидов наибольшей вариабельностью характеризуется ^{137}Cs, тогда как ^{40}K, ^{232}Th и ^{226}Ra отличаются преимущественно умеренной вариабельностью; статистически значимых различий между значениями удельной активности радионуклидов вдоль 65 и 75 меридианов не установлено.

В связи с отсутствием статистически значимых различий между значениями удельной активности исследуемых радионуклидов вдоль 65 и 75 меридианов в качестве средних значений для рассматриваемой территории могут быть приняты значения: 580,7 Бк/кг для ^{40}K, 34,8 Бк/кг для ^{232}Th, 23 Бк/кг для ^{226}Ra и 16,9 Бк/кг для ^{137}Cs. При этом полученные значения удельной активности естественных радионуклидов не превышают максимальные значения для почв Казахстана (^{40}K – 1200 Бк/кг, ^{232}Th – 220 Бк/кг, ^{226}Ra – 120 Бк/кг) [7], а среднее значение удельной активности ^{137}Cs сопоставимо со средней концентрацией данного радионуклида, установленной ранее для северной условно «фоновой» территории СИП [8].

Количественные значения удельной активности в растениях стабильно установлены лишь для радионуклида ^{40}K. Удельная активность ^{40}K в растениях вдоль 65 меридиана варьируется в широком диапазоне – от 130 до 500 Бк/кг, составляя в среднем 268±132 Бк/кг при медиане 220 Бк/кг; CV составляет 49,3%. Вдоль 75 меридиана значения ^{40}K изменяются от 200 до 1500 Бк/кг, при среднем значении 710±384 Бк/кг и медиане 620 Бк/кг; CV составляет 54,1%. В отличие от ^{40}K, удельная активность ^{232}Th в большинстве образцов растений находилась ниже предела обнаружения. Вдоль 65 меридиана количественно определяемые значения ^{232}Th составили 1,6…4,1 Бк/кг при среднем значении 2,97 Бк/кг по трем образцам. Вдоль 75 меридиана количественно определено только одно значение – 1,2±0,4 Бк/кг. Удельная активность ^{226}Ra характеризуется несколько более высокой частотой количественного определения. Вдоль 65 меридиана значения ^{226}Ra, превышающие предел обнаружения, составили 2,8 и 21 Бк/кг, вдоль 75 меридиана количественно определяемые значения ^{226}Ra варьировали от 3,3 до 31 Бк/кг, при среднем значении **15±9 Бк/кг**. Удельная активность ^{137}Cs в растениях также преимущественно находилась ниже предела обнаружения.

Таблица 2. Удельная активность ^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{241}Am и ^{137}Cs в почвах и растениях

Номер точки	Удельная активность, Бк/кг									
	почва					растения				
	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	^{241}Am	^{137}Cs	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	^{241}Am	^{137}Cs
65 меридиан										
1	500±100	30±6	16±3	<1,1	55±11	400±80	3,2±0,9	<0,9	<0,16	<0,30
2	600±120	38±8	22±4	<0,2	16±3	390±80	<1,6	<1,6	<0,17	<0,60
3	610±120	35±7	24±5	<0,4	23±4	300±60	4,1±0,9	<1	<0,15	<0,60
4	530±110	37±7	22±4	<0,4	6,8±1,3	135±25	<1,9	2,8±0,9	<0,17	<0,40
5	420±80	25±5	13±2	<1,0	5,4±1,1	410±80	<1,3	<0,7	<0,15	<0,50
6	540±110	40±8	21±4	<0,2	4,1±0,8	500±100	<1,6	<1,1	0,17	<0,30
7	690±40	42±8	24±5	<0,2	14±3	450±90	<1,1	<1	0,17	0,4±0,2
8	670±130	50±10	22±4	<0,7	24±5	140±30	<1,4	<1,2	0,19	<0,30
9	500±100	34±7	19±4	<0,3	22±4	160±30	1,6±0,7	<1,0	0,17	<0,20
10	430±80	52±10	34±7	<0,2	4,5±0,9	220±40	<0,7	<0,2	0,07	<0,20
11	640±130	43±8	30±6	<0,2	3,7±0,7	180±30	<0,9	<0,3	0,07	<0,30
12	590±120	40±8	29±6	<0,3	29±6	150±30	<1,5	<0,3	0,16	<0,30
13	460±90	31±6	24±5	<0,4	11±2	130±20	<1,7	<0,3	0,14	<0,30
14	580±120	41±8	31±6	<0,5	16±3	150±30	<1,7	21±4	0,16	<0,50
15	350±70	17±3	15±3	<0,2	7,8±1,5	310±60	<2	<1,8	0,15	<0,60
75 меридиан										
1	550±110	36±7	20±4	<0,2	19±4	260±50	<1,4	13±3	<0,20	<0,30
2	590±120	37±8	23±4	<0,2	14±3	400±80	<1,8	<1,5	<0,20	<0,40
3	560±110	38±8	23±4	<0,3	26±5	940±190	<1,7	<1,0	<0,20	<0,50
4	420±80	23±4	14±3	<0,2	6,3±1,2	620±120	<1,2	<0,9	<0,10	<0,30
5	460±90	23±4	16±3	<0,2	25±5	510±100	<1,4	3,3±0,7	<0,20	<0,40
6	500±100	23±4	16±3	<0,7	33±6	1500±300	<2	<1,6	<0,20	<0,70
7	450±90	27±5	23±4	<0,2	14±3	200±40	<1,7	20±4	<0,20	<0,40
8	410±80	29±6	24±5	<0,7	29±6	420±80	1,2±0,4	18±4	<0,10	<0,20
9	420±80	22±4	25±5	<0,3	31±6	410±80	<0,9	24±5	<0,10	1,0±0,2
10	630±120	33±6	32±6	<0,4	23±4	790±160	<2,4	8,9±1,8	<0,20	<0,50
11	820±160	33±6	22±4	<0,1	7,9±1,6	1200±300	<3,3	<2,4	<0,30	2,1±0,4
12	750±150	38±8	31±6	<0,1	7,2±1,4	740±150	<2,2	7,8±1,6	<0,30	<0,70
13	920±180	40±8	22±4	<0,3	7,2±1,4	600±120	<1,5	31±6	<0,10	<0,40
14	980±200	39±8	24±5	<0,1	6,7±1,3	760±150	<2,4	7,3±1,5	<0,30	<0,70
15	850±170	47±9	28±5	<0,2	16±3	1300±300	<3,9	<2,9	<0,60	<1,50

Вдоль 65 меридиана количественно определено только одно значение – **0,4±0,2 Бк/кг**, вдоль 75 меридиана количественно определены два значения – 1,0±0,2 и 2,1±0,4 Бк/кг.

Высокой вариабельностью значений в растениях характеризуется удельная активность ^{40}K, при этом CV составляет 49,3% вдоль 65 меридиана и 54,1% вдоль 75 меридиана, что значительно выше, чем в почвах (18,1% и 31,4% соответственно). Для ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{137}Cs оценка вариабельности в растениях ограничена большим числом результатов ниже предела обнаружения, однако в целом распределение этих радионуклидов также характеризуется большей неоднородностью по сравнению с почвами. Статистически значимых различий в значениях удельной активности радионуклидов между 65 и 75 меридианами не установлено. С учетом этого в качестве ориентировочных средних значений для растений можно принять 489,2 Бк/кг для ^{40}K, 2,5 Бк/кг для ^{232}Th, 14,3 Бк/кг для ^{226}Ra и 1,2 Бк/кг для ^{137}Cs, рассчитанных по количественно определенным результатам.

Для оценки параметров накопления радионуклидов в растениях из почвы рассчитаны коэффициенты накопления (Кн) – отношение удельной активности в растениях к удельной активности в почве (Таблица 3).

Таблица 3. Коэффициенты накопления (Кн) радионуклидов ^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra и ^{137}Cs

Радионуклид	Коэффициенты накопления (Кн)					
	n	min	max	Среднее ариф. ± ошибка	Медиана	CV,%
^{40}K	30	0,209	0,976	0,517±0,278	0,492	53,7
^{232}Th	4	0,041	0,117	0,078±0,039	0,077	50,4
^{226}Ra	11	0,127	1,409	0,557±0,399	0,650	71,7
^{137}Cs	3	0,029	0,266	0,109±0,136	0,032	124,8

Рассчитанные Кн ^{40}K изменяются от 0,209 до 0,976 при среднем значении 0,517±0,278 и медиане 0,492. Высокий CV (53,7%) свидетельствует о существенной вариабельности накопления ^{40}K растительностью. Для ^{232}Th рассчитанные Кн составляют 0,041…0,117 при среднем значении 0,078±0,039 и медиане 0,077; CV составляет 50,4%. Кн ^{226}Ra изменяется от 0,127 до 1,409 при среднем значении 0,557±0,399 и медиане 0,650; CV составляет 71,7%, что указывает на высокую вариабельность накопления. При этом в одной точке вдоль 75 меридиана Кн превышает 1. Кн ^{137}Cs варьируется от 0,029 до 0,266 при среднем значении 0,109±0,136 и медиане 0,032; CV составляет 124,8%, что обусловлено значительной неоднородностью определяемых значений. Таким образом, Кн для большинства радионуклидов не превышают 1, что указывает на отсутствие их выраженного накопления из почвы растениями; исключение составляет единичный случай накопления ^{226}Ra (Кн = 1,409) вдоль 75 меридиана. Наиболее высокая вариабельность характерна для накопления ^{137}Cs, тогда как относительно более интенсивное накопление отмечается для ^{40}K и ^{226}Ra. При этом полученные значения Кн в целом согласуются с международными данными [9].

На основании полученных результатов о содержании естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове проведена оценка дозовых нагрузок на биоту. Входными параметрами для расчета являлись содержания естественных и искусственных радионуклидов в почве и растениях (Таблица 2). Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs ^{241}Am и ^{232}Th в растениях находится на уровне ниже предела обнаружения, поэтому для консервативной оценки принималось значение предела. В таблице 4 приведены результаты оценки мощности дозы облучения растений естественными и искусственными радионуклидами при их максимальном содержании в почве и растениях на исследуемых меридианах 65 и 75.

Таблица 4. Мощность дозы облучения растений естественными и искусственными радионуклидами

Пути облучения	Мощность дозы, мкГр/сут				
	40K	232Th	226Ra	137Cs	241Am
65 меридиан					
Внешнее облучение	4,8×10-1	1,0×10-5	2,7×10-1	1,5×10-1	8,7×10-5
Внутреннее облучение	3,1	2,3×10-1	7,1	2,0×10-3	1,5×10-2
Сумма	3,6	2,3×10-1	7,4	1,5×10-1	1,5×10-2
75 меридиан					
Внешнее облучение	6,9×10-1	1,2×10-4	2,6×10-1	8,9×10-2	5,5×10-5
Внутреннее облучение	9,3	2,1×10-1	11	7,1×10-3	4,6×10-2
Сумма	10	2,1×10-1	11	9,6×10-2	4,6×10-2

В результате проведенных расчетов установлено, что мощность дозы облучения от естественных радионуклидов растений, произрастающих на 65 меридиане, находится в диапазоне от 1,5 до 8,8 мкГр/сут. Основной вклад в суммарную мощность дозы растений от естественных радионуклидов вносит доза внутреннего облучения, а основной дозообразующий радионуклид – ^{40}K (~66%) (Рисунок 2). Мощность дозы рас-

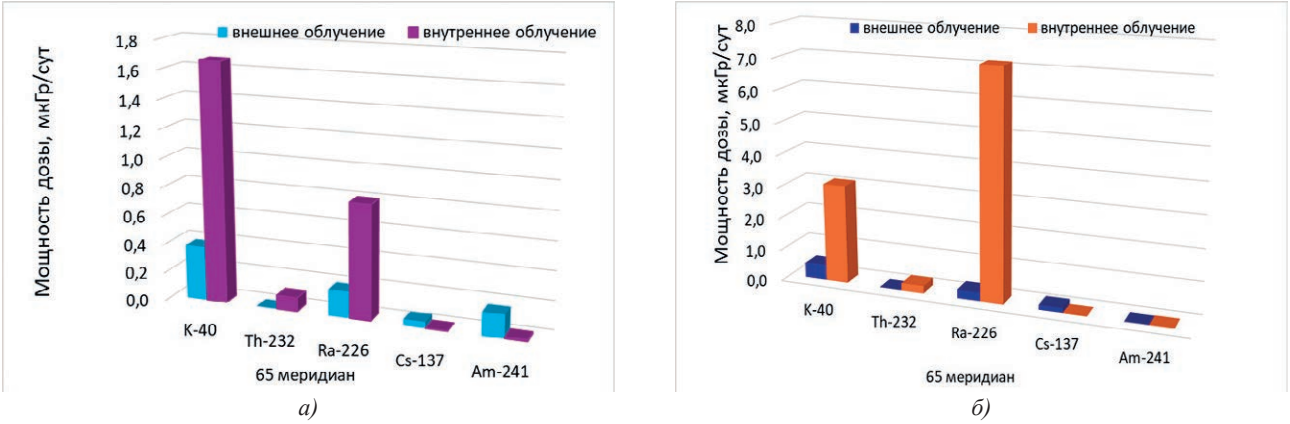
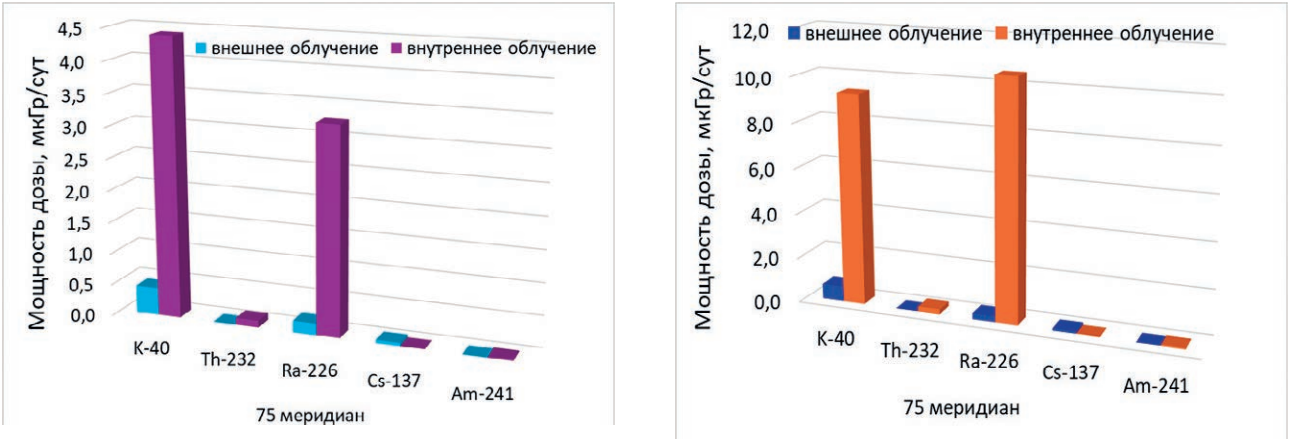


Рисунок 2. Вклад радионуклидов в суммарную мощность дозы облучения растений при средних (а) и максимальных (б) значениях их содержания в почве и растениях на 65 меридиане



а) *б)*

Рисунок 3. Вклад радионуклидов в суммарную мощность дозы облучения растений при средних (а.) и максимальных (б.) значениях их содержания в почве и растениях на 75 меридиане

тений, формируемая за счет внутреннего и внешнего облучения техногенных радионуклидов, варьируется от 0,016 до 0,16 мкГр/сут, при этом основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs (~91%). Следует отметить, что мощность дозы внутреннего облучения от техногенных радионуклидов формируется за счет ^{241} Am (~88%).

Мощность дозы облучения от естественных радионуклидов растений, произрастающих на 75 меридиане, находится в диапазоне от 3,7 до 15 мкГр/сут. Основной вклад в суммарную мощность дозы растений от естественных радионуклидов вносит доза внутреннего облучения, а основные дозообразующие радионуклиды – ^{40}K и ^{226}Ra (~48% и 51% соответственно) (рисунок 3). Суммарная мощность дозы растений от техногенных радионуклидов варьируется от 0,026 до 0,11 мкГр/сут, где основной дозообразующий радионуклид – ^{137}Cs (~66%).

Суммарная мощность дозы облучения растений от внешнего и внутреннего облучения при максимальных значениях на 65 и 75 меридианах составила 8,9 мкГр/сут и 15 мкГр/сут соответственно, что не превышает пороговых значений для хронического облучения наземных растений и находится на уровне естественного радиационного фона, согласно литературным данным [6, 10].

Заключение

Проведенный анализ показал, что удельная активность исследованных радионуклидов в почвенно-растительном покрове степной зоны РК вдоль 65 и 75 меридианов статистически значимо не различается. Средние значения удельной активности в почвах для рассматриваемой территории составляют 580,7 Бк/кг для ^{40}K, 34,8 Бк/кг для ^{232}Th, 23 Бк/кг для ^{226}Ra и 16,9 Бк/кг для ^{137}Cs. Наибольшей вариабельностью в почвах характеризуется ^{137}Cs. Содержание радионуклида ^{241}Am и в почвах, и в растениях количественно не установлено. В растениях средние значения удельной активности, рассчитанные по количественно определенным результатам, составляют 489,2 Бк/кг для ^{40}K, 2,5 Бк/кг для ^{232}Th, 14,3 Бк/кг для ^{226}Ra и 1,2 Бк/кг для ^{137}Cs. Распределение значений удельной активности всех исследуемых радионуклидов в растениях характеризуется большей неоднородностью по сравнению с почвами. Рассчитанные коэффициенты накопления преимущественно не превышают 1, что свидетельствует об отсутствии выраженного накопления радионуклидов растениями. Наиболее высокой вариабельностью характеризуется накопление ^{137}Cs, тогда как относительно более интенсивное накопление отмечается для ^{40}K и ^{226}Ra. Расчетные значения мощности дозы облучения растений от естественных и искусственных радионуклидов составляют 1,6–8,9 мкГр/сут вдоль 65 меридиана и 3,7–15 мкГр/сут вдоль 75 меридиана, что, согласно рекомендациям МКРЗ, находится значительно ниже уровня, при котором ожидается проявление радиационных эффектов у референтных видов.

Полученные средние значения могут быть использованы в качестве исходных фоновых характеристик для последующего радиационного мониторинга почвенно-растительного покрова, оценки пространственной динамики содержания природных и техногенных радионуклидов, а также для расчета дозовых нагрузок и оценки радиационного риска для биоты.

Сформированные показатели также могут применяться в качестве базовых значений при проведении повторных обследований территории и выявлении возможных изменений радиологической обстановки в результате природных или антропогенных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного гранта AP26194435 «Оценка фонового уровня и миграционной способности искусственных и естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове степной природной зоны Республики Казахстан».

Литература / References:

1. Сайбеков Т. С., Абылаев Ж. А. Радиационная обстановка на территории Республики Казахстан с 1954 по 1994 годы. Семипалатинская область. Атлас. – Алматы: Министерство экологии и биоресурсов РК, 1997. – Т. 16. – 400 с.
2. Исследование базовых характеристик радионуклидного загрязнения почвы и воздуха: отчет о НИР (заключительный) за 2020 г / Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК (ИРБЭ «НЯЦ РК»), рук. Кабдыракова А.М. – Курчатов, 2020. – 98 с. - № ГР 0118РК01139. – Инв. №0220РК00163.
3. Инструкция и методические указания по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. – М., 1989.
4. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91. – Введ. 1998-06-02. – Рег. № 5.06.001.98. − М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991. − 17 с.
5. Методические рекомендации Р52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2015. – 60 с.
6. ICRP. Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Annals of the ICRP, Vol. 38, 2008. – 242 p.
7. Учебно-методическое руководство по радиоэкологии и обращению с радиоактивными отходами для условий Казахстана: проект К-112 (МНТЦ). – Алматы: ОАО «Волковгеология», 2002. - 304 с.
8. Радиоэкологическое состояние «северной» части Семипалатинского испытательного полигона: монография/ под рук. С. Н. Лукашенко. – 2-е изд.// Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана/ Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Павлодар: ТОО «Дом печати», 2010. – Вып. 1. – 294 с.: ил. – Библиогр.: с. 281-290;115 назв. – 500 экз. – ISBN 978-601-7112-38-7 (рус., анг., каз.).
9. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments// IAEA TECDOC-1616.–Vienna: IAEA, 2009. – 163 p.
10. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // Радиация и риск. – 2013.– Т. 22, №1. – С. 47-61.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ АРИДТІ АЙМАҒЫНЫҢ ТОПЫРАҚ-ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫНДАҒЫ ТАБИҒИ ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚҰРАМЫ

Н. В. Ларионова[1*], А. В. Топорова[1], А. Е. Кундузбаева[1], А. М. Кабдыракова[2]

[1] ҚР ҰЯО «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2]Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: larionova@nnc.kz*

Қазақстанның аридтік аймағының топырақ-өсімдік жамылғысында 65 және 75 меридиан бойындағы табиғи және жасанды радионуклидтердің үлестік белсенділігіне бағалау жүргізілді. Топырақтардағы орташа мәндер ^{40}K үшін 580,7 Бк/кг, ^{232}Th үшін 34,8 Бк/кг, ^{226}Ra үшін 23,0 Бк/кг және ^{137}Cs үшін 16,9 Бк/кг құрады. Өсімдіктерде мөлшерлік белгіленген мәндер бойынша есептелген орташа мәндер ^{40}K үшін 489,2 Бк/кг, ^{232}Th үшін 2,5 Бк/кг, ^{226}Ra үшін 14,3 Бк/кг және ^{137}Cs Бк/кг үшін 1,2 Бк/кг болды. Жк мәндерінің ең жоғары өзгергіштігі ^{137}Cs-ке тән, ал өсімдіктердің салыстырмалы түрде қарқынды жинақталуы ^{40}K және ^{226}Ra үшін белгіленеді. Өсімдіктердің сәулелену дозасының болжамды қуаты 65 меридиан бойымен тәулігіне 1,6...8,9 мкГр және 75 меридиан бойымен тәулігіне 3,7...15,0 мкГр құрады және анықтамалық түрлерде радиациялық әсерлердің пайда болуы күтілетін деңгейден едәуір төмен болды. Алынған нәтижелер радиациялық мониторинг, радионуклидтер динамикасын және биотаға дозалық жүктемелерді бағалау, сондай-ақ зерттелген аумақтың радиологиялық жай-күйін кейінгі бақылау үшін бастапқы сипаттамалар ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *меншікті белсенділік, табиғи радионуклидтер (^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra), жасанды радионуклидтер (^{137}Cs, ^{241}Am), топырақ-өсімдік жамылғысы, биотаға түсетін дозалық жүктеме.*

ACTIVITY CONCENTRATIONS OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE SOIL–VEGETATION COVER OF THE ARID ZONE OF KAZAKHSTAN

N.V. Larionova[1*], A.V. Toporova[1], A.Ye. Kunduzbayeva[1], A.M. Kabdyrakova[2]

[1] Branch office "Institute of Radiation Safety and Ecology" of the RSE "NNC RK", Kurchatov, Kazakhstan
[2] RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: larionova@nnc.kz*

An assessment was made of the activity concentrations of natural and artificial radionuclides in the soil–vegetation cover of the arid zone of Kazakhstan along the 65th and 75th meridians. The mean activity concentrations in soils were 580.7 Bq/kg for ^{40}K, 34.8 Bq/kg for ^{232}Th, 23.0 Bq/kg for ^{226}Ra, and 16.9 Bq/kg for ^{137}Cs. In plants, the mean activity concentrations calculated from the quantitatively determined values were 489.2 Bq/kg for ^{40}K, 2.5 Bq/kg for ^{232}Th, 14.3 Bq/kg for ^{226}Ra, and 1.2 Bq/kg for ^{137}Cs. The activity concentration of ^{241}Am could not be quantified. The highest variability in concentration ratio (CR) values was observed for ^{137}Cs, whereas relatively greater uptake by plants was observed for ^{40}K and ^{226}Ra. The estimated absorbed dose rate to plants ranged from 1.6 to 8.9 μGy/day along the 65th meridian and from 3.7 to 15.0 μGy/day along the 75th meridian. These values were substantially below the levels at which radiation effects in reference species are expected. The results obtained can be used as baseline characteristics for radiation monitoring, assessment of radionuclide dynamics, and radiation dose burdens on biota, as well as for subsequent monitoring of the radiological status of the study area.

Keywords: *activity concentration, natural radionuclides (^{40}K, ^{232}Th, ^{226}Ra), artificial radionuclides (^{137}Cs, ^{241}Am), soil–vegetation cover, radiation dose burden to biota.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-176-185
УДК 621.039.7

ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В.В. Яковлев, Ю.Ю. Бакланова*, О.С. Букина, В.В. Бакланов, А.Г. Коровиков

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: basalai@nnc.kz*

В статье представлен обзор современных подходов к обращению с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), рассмотрены их основные свойства, классификация, химический и радионуклидный состав. Проанализированы основные проблемы переработки ЖРО, связанные с многообразием их состава, высоким солесодержанием, наличием органических примесей и необходимостью селективного извлечения радионуклидов. Выполнен анализ существующих технологий очистки и кондиционирования ЖРО, рассмотрен международный опыт переработки жидких радиоактивных отходов, а также приведена оценка современного состояния обращения с ЖРО в Республике Казахстан. Особое внимание уделено вопросам минимизации объемов образующихся отходов, внедрения технологий глубокой очистки и иммобилизации радионуклидов. Проведен анализ основных требований, предъявляемых к составу, структуре и физико-механическим свойствам матриц, используемых для кондиционирования радиоактивных отходов.

Обоснована целесообразность создания специализированных региональных комплексов по переработке ЖРО и внедрения единой системы государственного управления в данной области. Сделан вывод о необходимости комплексного применения современных технологий переработки, обеспечивающих снижение экологических рисков, повышение безопасности и соответствие обращения с радиоактивными отходами международным требованиям.

Ключевые слова: *жидкие радиоактивные отходы, переработка ЖРО, требования к матрицам, иммобилизация, критерии.*

Введение

Вопросы обращения с радиоактивными отходами (РАО) в Республике Казахстан регулируются Законом «Об использовании атомной энергии» [1], экологическим Кодексом Республики Казахстан [2], международными соглашениями и подзаконными актами. Эти нормативные правовые акты определяют основы государственной политики, регулирования и контроля в области использования атомной энергии. В настоящее время на заключительной стадии согласования находится проект Закона «Об обращении с радиоактивными отходами», направленный на усовершенствование системы государственного контроля, создание института национального оператора, внедрение единого учета отходов в Казахстане и конкретизацию финансовых обязательств для бизнеса.

В общем количестве образующихся РАО преобладают по объему жидкие радиоактивные отходы (ЖРО). При относительно невысоком удельном содержании радионуклидов они представляют значительную экологическую опасность вследствие их большого объема, возможности неконтролируемого распространения, различного химического и радиохимического составов, поэтому переработка ЖРО в современных технологиях предусматривает заключительную стадию – перевод в твердое состояние.

Образующиеся ЖРО в результате переработки полезных ископаемых, при эксплуатации, выводе из эксплуатации ядерных и радиационных установок и при реабилитации загрязненных территорий должны пройти все стадии обращения с радиоактивными отходами — от сбора до захоронения, включая их переработку, хранение и перевозку. [3,4,5].

В статье рассмотрены существующие проблемы обращения с ЖРО в стране, проведен обзор перспективных технических и организационных решений с целью поиска и обоснований подходов к сокращению количества образующихся ЖРО на территории Республики Казахстан, к выбору технологий переработки ЖРО, направленных на снижение их вредного воздействия на человека и окружающую среду. Рассмотрены технологии переработки ЖРО, рекомендации МАГАТЭ по вопросам иммобилизации жидких радиоактивных отходов [6,7,8]

Методология поиска

Для выработки предложений по технологиям переработки ЖРО в Казахстане был выполнен сравнительный анализ перспективных технических решений, принятых в зарубежной и отечественной практике для обращения с ЖРО, которые были наработаны в результате эксплуатации, вывода из эксплуатации ядерных и радиационных установок, а также при реабилитации загрязненных территорий.

Для проведения сравнительного анализа промышленных методов иммобилизации отходов (цементи-

рование, битумирование, остекловывание и полимерное компаундирование) выполнено многофакторное структурирование нормативных критериев приемлемости конечной формы отходов согласно нормативам Республики Казахстан.

На основе интеграции текущих скоростей образования ЖРО по отходоформирующим отраслям Казахстана (ядерная энергетика, исследовательские реакторы, уранодобывающее и нефтегазовое производство) выполнена прогнозная оценка накопления объемов ЖРО на долгосрочную перспективу до 2050 года.

Основная часть

Технические решения, принятые в зарубежной практике

Анализ современного состояния инфраструктуры объектов прошлых ядерных испытаний и производств показывает, что наиболее эффективным организационно-технологическим решением является создание региональных специализированных комбинатов по централизованной переработке РАО. Локализацию площадок для строительства подобных комплексов целесообразно осуществлять по принципу максимальной географической близости к действующим объектам генерации ЖРО и местам их долговременного хранения, что минимизирует логистические риски при транспортировке жидких радиоактивных сред.

В мире в настоящее время функционирует несколько крупных промышленных комплексов по переработке ядерного топлива и радиоактивных отходов, в технологических процессах которых образуются и перерабатываются ЖРО.

Во Франции, на крупнейшем заводе переработки ядерного топлива, расположенном в городе La Hague, переработка ЖРО осуществляется в рамках гидрометаллургического процесса **PUREX** (Plutonium Uranium Refining by Extraction), в котором жидкость проходит через серию экстракционных колонн, где уран и плутоний отделяются от радиоактивных побочных продуктов. Оставшиеся высокоактивные ЖРО концентрируются с помощью выпаривания, что значительно уменьшает их объем, и смешиваются с расплавленным стеклом. Полученную стекломассу разливают в специальные стальные контейнеры. После остывания образуется монолит, устойчивый к выщелачиванию и коррозии. Низко- и среднеактивные ЖРО для предотвращения утечки связываются цементом или битумом, после чего упаковываются в бочки для временного хранения.

В США в 2021 году был введен в эксплуатацию крупный завод по переработке солевых отходов Salt Waste Processing Facility (SWPF), построенный на площадке Национальной лаборатории Саванна-Ривер (SRS), на которой за несколько десятилетий накопилось около 120 миллионов литров ЖРО, 90% которых составляют именно солевые отходы.

В процессе переработки происходит разделение отходов на три фракции – более радиоактивую (содержащую, в частности, цезий, стронций, актиниды и др.); слаборадиактивный раствор и слаборадиоактивные твердые шламы.

Основные этапы технологии очистки солевых отходов состоят из таких ключевых шагов, как:

1. Удаление стронция и актинидов (Strontium and Actinide Removal): радиоактивный солевой раствор смешивается с титанатом мононатрия (MST – Monosodium Titanate). Этот реагент связывает тяжелые металлы (уран, плутоний, стронций), заставляя их оседать в виде шлама, который затем отделяется от жидкой фазы с помощью фильтрации.

2. Экстракция цезия (CSSX – Caustic-Side Solvent Extraction): отфильтрованный раствор подается на экстракционные центробежные контакторы. Там используется специализированный органический растворитель на основе краун-эфиров (каликс-краун), который селективно извлекает радиоактивный цезий.

3. Иммобилизация очищенного солевого раствора с использованием цементной матрицы, при этом концентрат цезия направляется для остекловывания, шлам с актиноидами и стронцием также включается в стеклоподобную матрицу.

В Великобритании на крупнейшем и старейшем комбинате «Селлафилд» (Sellafield) осуществляется переработка ОЯТ и очистка высокоактивных ЖРО. Технологический процесс переработки ЖРО включает два основных этапа, позволяющих удалить из воды более 99% радиоактивных изотопов:

1. ЖРО пропускаются через песчаные фильтры – емкости с песком, которые задерживают мельчайшие взвешенные твердые частицы. Для повышения эффективности фильтрации предварительно добавляется флокулянт – высокомолекулярные реагенты, предназначенные для укрупнения мелких взвешенных частиц в воде.

2. Очищенные от взвесей ЖРО направляются в резервуары с природным минералом клиноптилолитом (добывается в пустыне Мохаве, США). Этот материал служит мощным ионообменником, который улавливает растворенные радиоактивные изотопы цезия и стронция.

3. Для очистки низкоактивных ЖРО, образующихся при переработке топлива и операциях с историческими отходами, используются методы флокуляции и осаждения – в жидкие кислые отходы добавляется гидроксид аммония, в результате чего растворенные металлы, включая такие трансурановые элементы, как плутоний и америций, превращаются в осадок (флокулянт) в виде металлического гидроксида. Осадок извлекается, а очищенная вода контролируемо сбрасывается.

В Российской Федерации на старейшем и крупнейшем предприятии производственного объединения

«Маяк», расположенном в Озерске Челябинской области, осуществляется переработка ОЯТ и утилизация ЖРО. Технологический процесс переработки ЖРО, предусматривающий комплексный подход обращения с жидкими отходами, включая высокоактивные (ВАО) и среднеактивные (САО) отходы, состоит из следующих последовательных этапов:

1. ЖРО проходят через процессы микрофильтрации, отстаивания и осветления для отделения жидкой фазы от радиоактивных шламов.

2. Осветленные и очищенные от шламов ЖРО поступают на участок сорбционной очистки, на котором селективно извлекаются наиболее опасные долгоживущие радионуклиды цезий-137, стронций-90 и другие. Для этого применяются специфические селективные сорбенты такие, как резорцинформальдегидные смолы и ферроцианидные комплексы.

3. Очищенный раствор подвергается выпариванию для уменьшения физического объема отходов и перевода их в категорию кубовых остатков.

Общий коэффициент очистки (отношение исходной активности к активности после очистки) от основных продуктов деления доходит до значений 10^7–10^9. После глубокой очистки и концентрирования жидкие отходы переводятся в твердую, стабильную форму, исключающую их выщелачивание и попадание в окружающую среду методом остекловывания или цементирования.

Жидкие радиоактивные отходы Республики Казахстан

Казахстан занимает второе место после России среди стран СНГ по объемам добычи полезных ископаемых. Горно-металлургическая отрасль страны является одной из базовых в развитии экономического сектора государства. К крупным предприятиям данной отрасли страны можно отнести Eurasian Resources Group (ERG), ТОО Корпорация «Казахмыс», ТОО «Казцинк», АО «АрселорМиттал Темиртау», АО «НАК «Казатомпром», АО «Усть-Каменогорский титано-магниевый комбинат», ТОО «Темиртауский электрометаллургический комбинат», ТОО «Таразский металлургический комбинат», ТОО «KSP Steel», АО «Жайремский ГОК», АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», АО «Горно-металлургический концерн «Казахалтын», KAZ Minerals PLC и другие.

Добыча урана является одной из ведущих отраслей горнодобывающей промышленности Казахстана. Страна занимает первое место в мире по добыче урана и второе по его запасам, уступая лишь Австралии.

Основные массы отходов, связанных с уранодобывающей промышленностью, расположены в Мангистауской, Северо-Казахстанской, Акмолинской, Карагандинской, Жамбылской, Южно-Казахстанской, Кызылординской и Восточно-Казахстанской областях.

При добыче и переработке полезных ископаемых возникают проблемы утилизации сопутствующих природных радиоактивных изотопов, которые в большинстве случаев классифицируются как РАО. На горно-обогатительных комбинатах в местах добычи полезных ископаемых для хранения и захоронения радиоактивных, токсичных и других отходов создаются комплексы специальных сооружений – хвостохранилища.

Отходы обогащения полезных ископаемых (хвостов) при помощи средств гидромеханизации (перемещение материала движущимся потоком воды) поступают в хвостохранилище, где происходит постепенное оседание твердой фазы хвостов. По мере осветления, вода из хвостохранилища возвращается на технологические участки.

Жидкая фаза отходов, размещенных в хвостохранилищах, представляет собой рассол, образовавшийся за все время эксплуатации хвостохранилища в результате концентрации минеральных солей при постоянном испарении с поверхности накапливаемых промышленных, в том числе и радиоактивных отходов. При эксплуатации хвостохранилищ количество жидкой фазы в хвостохранилище не является постоянным, а зависит от природно-климатических условий, района расположения и производственной программы перерабатывающего предприятия, поэтому накопленное количество отходов, в основном, оценивается по твердым РАО. Хвостохранилища горно-обогатительных комбинатов на 80–90% заполнены твердой фазой отходов обогащения руд.

Нефтегазовая отрасль Республики Казахстан также является одной из ведущих отраслей промышленного производства. Значимую роль в развитии страны в нефтегазовом комплексе играют три крупнейших месторождения: «Тенгиз» и «Кашаган» в Атырауской области, «Карачаганак» в Западно-Казахстанской области.

На месторождениях «Каламкас» и «Жетыбай» в Мангистауской области созданы участки для очистки и дезактивации труб и оборудования. В Жетыбае и Жана-Озени введены в эксплуатацию пункты хранения радиоактивных отходов на 70 000 т и 100 000 т соответственно.

В нефтегазовой отрасли основными видами радиоактивных отходов являются осадки и отложения на трубах и технологическом оборудовании, пластовые воды и нефтешламы.

К потокам нефти и газа примешивается вода, содержащая растворенные неактивные сульфаты и карбонаты Cu, Sr и Ba, с которыми на стенках труб соосаждаются ^{226}Ra и его дочерние продукты. Главными загрязнителями нефти и газа, а также поступающих на поверхность вод являются ^{226}Ra, ^{210}Pb и ^{210}Po.

В Республике Казахстан имеется опыт эксплуатации четырех исследовательских реакторов разных

типов – импульсного графитового реактора (ИГР), импульсного высокотемпературного газоохлаждаемого ИВГ.1 и его модификации ИВГ1.М, исследовательского реактора для групповых исследований ТВЭЛ «ИРГИТ» и его модификации РА, казахстанского водо-водяного реактора ВВР-К и опытно-промышленного энергетического реактора на быстрых нейтронах БН-350. Три из них находятся в Институте атомной энергии РГП НЯЦ РК (ИГР, ИВГ1.М, РА), установка РА в настоящее время не эксплуатируется, один – в РГП ИЯФ (ВВР-К), и БН-350, остановленный в 1999 году, находится на территории «Мангистауского атомного-энергетического комбината» (МАЭК).

ЖРО, образующиеся в процессе эксплуатации исследовательского реактора ИГР, перевозятся в установленном порядке на площадку КИР «Байкал-1» (Майский район, Павлодарская область) и размещаются в специально предназначенном для ЖРО сооружении.

На реакторе ВВР-К РАО образуются в результате как эксплуатации и внутриреакторных испытаний, так и при производстве медицинских радиоизотопов и гамма-источников, нейтронного легирования кремния и нейтронно-активационного анализа. ЖРО и ТРО, наработанные на реакторе ВВР-К, цементируются и хранятся на площадке реактора в ПХРО поселка Алатау около города Алматы.

Для сбора и хранения ЖРО реакторной установки БН-350 используется хранилище (ХЖРО), в котором расположены 10 емкостей для длительного хранения ЖРО.

В 1993 году в рамках работы над «Концепцией захоронения радиоактивных отходов Республики Казахстан» был составлен кадастр радиоактивных отходов для всей территории Республики Казахстан по всем без исключения отходоформирующим отраслям народного хозяйства и военного ведомства. Основная доля накопленных РАО приходится на Восточный Казахстан. Это связано с деятельностью Семипалатинского испытательного полигона, АО «УМЗ» и ИХМЗ, при этом в настоящее время ЖРО нарабатываются только в процессе эксплуатации исследовательских реакторов ИГР и ИВГ1.М и деятельности АО «УМЗ».

Второй по количеству накопленных ЖРО является Мангистауская область, образовавшихся в процессе деятельности Прикаспийского горно-металлургического комплекса и эксплуатации реактора БН-350. Количество накопленных к настоящему времени ЖРО на реакторной установке БН-350 – 1675 м^3 [9].

Значительно большее количество РАО находится на ТОО Степногорского горно-химического комбината (ТОО «СГХК») – 178 000 м^3 и общей активностью 1,752 ГБк. [11].

Отходы АО «УМЗ», включающие стоки и шламы всех производств, размещаются в приемниках хвостохранилища АО «УМЗ». Приемники открытого типа, выполнены в виде прудов (карт). По данным на 2014 год общее количество РАО составило 6 411 667,7 м^3 с суммарной активностью 194,33 ГБк.

ЖРО, нарабатываемые в процессе деятельности исследовательского реактора ИВГ.1М, поступают в специальную канализацию. По системе специальной канализации ЖРО поступают в емкости сбора сточных загрязненных вод. Затем жидкие слабоактивные отходы концентрируются в специальных сооружениях путем выпаривания. Сооружение, предназначенное для сбора ЖРО, принимает отходы КИР «Байкал-1» и КИР ИГР РГП НЯЦ РК, имеет полезный объем – 46 000 м^3, а фактически в настоящее время объем заполнен до уровня замачиваемого слоя – 18000 м^3, т.е. заполнен на 40%.

ЖРО, нарабатываемые в результате деятельности ВВР-К, цементируются совместно с ТРО и поступают в пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО), при этом оценить весь объем ЖРО не представляется возможным. Общая активность захороненных с 1988 года на ПХРО жидких и твердых отходов на данное время составляет 328,011 ТБк [11].

Объемы ЖРО ежегодно увеличиваются за счет работы предприятий атомной отрасли – исследовательских реакторов, уранодобывающей промышленности и обогатительных фабрик для переработки руд.

Скорость образования ЖРО в ИЯФ составляет в среднем от 6 до 24 м^3/год [11].

Средняя скорость образования ЖРО на реакторных комплексах ИГР, ИВГ.1М – 2,0…3,0 м^3/год [11].

На выведенной из эксплуатации реакторной установке БН-350 в настоящее время ЖРО не образуются, но оценочное количество ЖРО от проведения работ, связанных с приведением РУ БН-350 в состояние безопасного хранения, может составить до 12 000 м^3 [12].

На АО «УМЗ» по данным на 2014 год ежегодно образуется около 50 000 тонн ЖРО, что составляет около 45 000 м^3/год (при средней плотности ЖРО 1120 кг/м^3) [11].

Учитывая динамику образования ЖРО к 2050 году, без учета переработки, в Казахстане будет накоплено около 18 350 тыс. м^3.

Таким образом, при обращении с ЖРО первым шагом является их сбор и сортировка. ЖРО подлежат раздельному сбору по видам в местах образования (п. 717–720 Санитарных правил [5]). Все действия – от сбора до хранения – должны быть документированы с использованием форм (журналы, паспорта, акты) согласно Правилам [10].

Емкости для накопления должны быть герметичными, устойчивыми к коррозионному и химическому воздействию, при обязательном обеспечении радиационного контроля (п. 718–719 Санитарных правил [5]).Временное хранение допускается только в специальных баках или хранилищах с системами вторичных барьеров, исключающих миграцию радионукли-

дов в окружающую среду (п. 724–725 Санитарных правил [5]).

Выбор метода переработки определяется физико-химическими характеристиками ЖРО (состав, активность и т.д.), свойствами матричных материалов и предполагаемым способом хранения или захоронения кондиционированных отходов.

Свойства ЖРО

В зависимости от источника образования ЖРО имеют различный химический и радионуклидный состав. Основой классификации радиоактивных отходов являются их агрегатное состояние, происхождение, уровень радиоактивности, период полураспада радионуклидов [2].

Естественные радионуклиды в составе ЖРО представлены α-излучающими радионуклидами урана (^{235}U, ^{238}U), тория (^{232}Th) и продуктами их радиоактивного распада (^{230,234}Th, ^{224,226,228}Ra, ^{210}Po, ^{228}Ac и др.). К естественным относится также β-излучающий радионуклид ^{40}K.

Компоненты отработавшего ядерного топлива представлены в ЖРО продуктами деления урана и других делящихся материалов и трансурановыми элементами (ТУЭ). К основным продуктам деления относятся: ^{90}Sr, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{99}Tc, ^{106}Ru, ^{125}Sb, ^{131}I, ^{134,137}Cs, ^{144}Ce, ^{152,154}Eu и др. ТУЭ в составе ЖРО представлены радионуклидами: ^{237}Np, ^{239}Pu, ^{241,243}Am, ^{244}Cm.

Продукты нейтронной активации теплоносителей и конструкционных материалов в ЖРО в основном представлены следующими радионуклидами: ^{3}H, ^{24}Na, ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{63}Ni, ^{65}Zn.

Основными формами существования радионуклидов в водных растворах являются: ионная (простые и комплексные положительно и отрицательно заряженные мономерные и полимерные ионы); коллоидная (истинные коллоиды); псевдоколлоидная (радионуклид сорбирован на коллоидных частицах с размером 0,001-0,1 мкм); грубодисперсная (радионуклид ассоциирован с частицами более 0,1 мкм).

Состав ЖРО определяется следующими основными показателями: общим солесодержанием; концентрацией неорганических катионов и анионов; концентрацией водородных ионов (pH); окисляемостью; концентрацией органических веществ; концентрацией взвешенных веществ; суммарной активностью и радионуклидным составом.

Общее солесодержание представляет собой сумму всех растворимых веществ, присутствующих в ЖРО. Солевой состав ЖРО определяется в основном присутствием неорганических соединений, образованных катионами Na^+, K^+, NH_4^+, Ca_2^+, Mg_2^+ и анионами Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, HCO_3^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}. Солесодержание ЖРО может значительно варьироваться в зависимости от источника образования, выделяют следующие группы ЖРО с общим солесодержанием:

- бессолевые (менее 0,01 г/дм^3);
- малосолевые (0,01–1,0 г/дм^3);
- среднесолевые (1–10 г/дм^3);
- высокосолевые (более 10 г/дм^3).

Кроме того, в ЖРО могут присутствовать примеси, которые условно можно разделить на четыре группы:

В первую группу входят нерастворимые в воде взвеси, песок, продукты коррозии (нерастворимые оксиды и гидроксиды), некоторые органические вещества, например, измельченные ионообменные смолы, а также сорбированные на частицах взвеси радионуклиды.

Во вторую группу объединяются примеси, находящиеся в коллоидном состоянии (тонкодисперсные образования), и высокомолекулярные вещества. К примесям этой группы относятся минеральные масла, различные моющие препараты, некоторые органические вещества, используемые для дезактивации, радиоколлоиды, а также органоминеральные частицы почв и грунтов.

В третью группу входят молекулярно-растворимые соединения – вещества, растворяющиеся в растворителе на уровне отдельных молекул, не распадаясь на ионы, растворенные газы (O_2, CO_2, N_2 и другие), некоторые органические соединения, молекулы которых обязательно содержат атомы углерода, связанные с водородом, кислородом, азотом и другими элементами.

В четвертую группу входят электролиты – вещества диссоциирующие в воде на ионы (сильные и слабые). Сильные электролиты – вещества, которые в водном растворе практически полностью распадаются на ионы, слабые электролиты – вещества, которые в растворе распадаются на ионы лишь частично.

Основная сложность переработки многокомпонентных ЖРО заключается в необходимости выделения радионуклидов, иногда селективного, из агрессивных химических растворов с высоким содержанием солей, в большинстве случаев, имеющих нерастворимые примеси и органические вещества.

При выборе метода очистки ЖРО определяющим фактором является форма нахождения радионуклидов в очищаемом растворе. Основными методами удаления радиоактивных примесей в зависимости от их фазово-дисперсного состояния в водных растворах являются.

Нерастворимая форма:

- грубодисперсные частицы (взвеси) с размером частиц >10^4 нм (>10 мкм), для удаления радионуклидов применяются методы отстаивания, механической фильтрации, коагуляции;

- мелкодисперсные частицы (микровзвеси) с размером частиц 10^2…10^4 нм (0,1–10 мкм), для удаления радионуклидов применяются методы микрофильтрации, коагуляции;

- коллоиды (псевдоколлоиды) с размером частиц с размером частиц 10…100 нм (0,01–0,1 мкм), для уда-

ления радионуклидов применяются методы ультрафильтрации, коагуляции.

Растворимая форма:

- молекулы с размером 1...10 нм (0,001–0,01 мкм), для удаления радионуклидов применяются методы адсорбции, нанофильтрации;

- ионы размером <1 нм (<0,001 мкм), применяются методы удаления ионного обмена, нанофильтрации, обратного осмоса, электродиализа, химического соосаждения.

Анализ подходов к переработке ЖРО

Одно из ключевых требований в системе обращения с ЖРО является их перевод в твердое состояние с целью обеспечения долговременной радиационной, химической и механической стабильности.

Этот процесс реализуется посредством выбора и применения подходящей матрицы, в которую отходы включаются или иммобилизуются. От свойств матрицы зависит способность кондиционированного продукта сохранять целостность, предотвращать миграцию радионуклидов и выдерживать внешние воздействия в течение всего времени хранения или захоронения. Краткая информация о методах отверждения на основании требований [3, 4, 5, 11, 12, 16, 17, 18] приведена в таблице 1.

Стандарт [18] устанавливает единый перечень показателей, которым должны соответствовать все кондиционированные ВАО по прочностным характеристикам, химической и радиационной стойкости, водоустойчивости и совместимости с упаковкой. В таблице 2 систематизированы основные требования к составу, структуре и физико-механическим свойствам матриц, используемых для кондиционирования ЖРО [10,13,14,15,16,17,18]

Ограничения по составу и допустимой нагрузке минимизируют возможность перенасыщения матрицы и обеспечивают сохранение ее прочности и стабильности в различных условиях внешней среды. Требования к однородности структуры направлены на предотвращение локальных зон повышенной миграции радионуклидов. Ограничения пористости продиктованы задачей минимизации путей фильтрации воды и выщелачивания радионуклидов.

Для обеспечения механической стабильности при транспортировке и хранении нормируются показатели прочности на сжатие. Морозостойкость обеспечивает сохранение прочностных характеристик в условиях сезонных колебаний температур. Водоустойчивость служит критерием ограничения выщелачивания радионуклидов в окружающую среду и гарантией стабильности структуры матрицы в условиях затопления подземных хранилищ подземными водами.

Радиационная стойкость является контрольным параметром, исключающим разрушение структуры под воздействием ионизирующего излучения. Тер-

Таблица 1. Сводная информация о применимости разных методов отверждения ЖРО

Тип отверждения	Ограничения	Преимущества	Недостатки
Цементирование	– удельная активность до 3,7 МБк/л, – содержание солей до 200 г/л, – химический состав: отсутствие значительных количеств органики, масел, ПАВ и комплексообразователей, – кислотность / щелочность: допускается pH в диапазоне 6...12 после нейтрализации, – газообразование: содержание нитратов/органики ограничивается во избежание выделения газов	технологическая простота, низкая температура процесса	выщелачивание солей при высокой минерализации, снижение прочности при наличии органических примесей
Битумирование	– минерализация: более 200 г/л, – солевая нагрузка в готовом компаунде ≤ 50%, – удельная активность: не выше 10^{10} Бк/кг (β-излучатели) и 10^{6} Бк/кг (α-излучатели), – не допускаются горючие органические примеси, окислители и нестабильные соединения, способные вызывать самонагрев или радиолиз	гидрофобность полученного компаунда. Допустимые компоненты: растворы с высоким содержанием солей	пожароопасность, возможность газообразования и радиолиза; необходимо применение систем вентиляции и контроля
Остекловывание (витрификация)	– минерализация: возможно введение солей до 15...20% масс. от стекломассы, – удельная активность: допустима для высокоактивных отходов (ВАО), включая продукты деления (Cs-137, Sr-90) и актиниды, – химический состав: наличие нитратов и сульфатов учитывается при подборе состава стекла (устойчивые боросиликатные или фосфатные системы), – органика должна быть предварительно удалена	обеспечивает высокую химическую и радиационную стойкость полученной матрицы	высокая энергоемкость процесса и необходимость подбора состава стекла
Полимерное компаундирование и иные методы	– минерализация: допустима умеренная; избыток солей может снижать долговечность компаунда, – активность: в основном низко- и среднеактивные ЖРО (НАО и САО). – химический состав: отходы с высоким содержанием органики, масел, эмульсий, где цемент и стекло неэффективны	допускаются как альтернатива при демонстрации соответствия Нормативам [11] и условиям размещения на ПХ/ПЗРО	Ограничения: радиационная стойкость полимеров ниже, чем у стекла и цемента, поэтому не применяются для ВАО

Таблица 2. Основные требования к составу, структуре и физико-механическим свойствам матриц, используемых для кондиционирования ЖРО

№ п/п	Требование	Тип матрицы		
		Цементная	Битумная	Стеклообразные
1	*Состав матрицы*			
1.1	Совместимость с отходами	Матрица должна обеспечивать химическую инертность по отношению к радионуклидам и солям, присутствующим в ЖРО		
1.2	Ограничение содержания отходов	Доля введенных ЖРО должна находиться в пределах, установленных нормативами:		
		≤ 30…40 масс.%	≤ 50 масс.% солей	≤ 15…20 масс.% солей
2	*Структура матрицы*			
2.1	Однородность	Матрица должна быть гомогенной, без трещин, пустот, слоистости и фазовых включений		
2.2	Пористость	≤ 10…15%	≤ 10…15%	≤ 5%
2.3	Распределение радионуклидов	Исключается локальная концентрация солей или зон повышенной активности		
2.4	Сохранение формы	Устойчивость к деформациям, усадке, растрескиванию и вспучиванию		
3	*Физико-механические свойства матрицы*			
3.1	Прочность на сжатие	≥ 4,9 МПа (50 кг/см^2)	устойчивость к нагрузкам и вибрациям без разрушения	≥ 30 МПа
3.2	Ударная вязкость и механическая стойкость	Компактные формы должны выдерживать механические воздействия при транспортировке		
3.3	Морозостойкость (термоциклирование)	≥ 25…30 циклов замораживания/оттаивания при сохранении ≥ 75…80% исходной прочности		
4	*Химическая стойкость матрицы*			
4.1	Допустимые скорости выщелачивания радионуклидов	Cs ≤ 1·10^{-3} г/см^2 сут	Cs ≤ 1·10^{-4} г/см^2 сут	Cs ≤ 1·10^{-5} г/см^2 сут; Sr ≤ 1·10^{-6} г/см2 сут
4.2	Коррозионная совместимость	Матрица не должна выделять агрессивные среды, вызывающие коррозию контейнеров		
4.3	Стабильность при контакте с подземными водами	Обеспечение долговременной изоляции радионуклидов, выдержка в воде 90 сут, при которой допускается снижение механической прочности ≤ 25%		
5	*Радиационная стойкость матрицы*			
5.1	Поглощенная доза ИИ, при которой снижение механической прочности менее 25%	до 10^7 Гр	до 10^7 Гр	до 10^8 Гр
5.2	Термостойкость	устойчивость до 200 °С	температура вспышки ≥ 250 °С, воспламенения ≥ 300 °С, самовоспламенения ≥ 400 °С	устойчивость до 1000 °С
		Матрица должна сохранять целостность при тепловыделении радионуклидов.		

мостойкость гарантирует устойчивость матрицы к тепловыделению радионуклидов и внешним температурным воздействиям. Для битумных компаундов параметр газовыделения критичен: его соблюдение предотвращает накопление горючих и взрывоопасных газов. Отсутствие коррозионного воздействия матрицы на материалы контейнеров обеспечивает сохранение целостности упаковки в течение всего срока хранения кондиционированных отходов.

Каждый из описанных методов иммобилизации зависит от состава ЖРО и свойств его компонентов, поэтому выбор метода или комплекса методов имеет свои специфики и ограничения. В каждом отдельном случае следует разработать индивидуальную технологическую схему очистки ЖРО, учитывая большое разнообразие в химическом и радионуклидном составе ЖРО.

Анализ применимости разных методов отверждения ЖРО (таблица 1) и требований к конечной форме отходов (таблица 2) показывает, что универсальной технологии для всех типов ЖРО не существует.

Максимальный объем отходов зафиксирован в Восточно-Казахстанской области на картах хвостохранилища АО «УМЗ», однако при оценке данных массивов необходимо разделять фазово-дисперсное состояние РАО. Около 80–90% этих открытых прудов-приемников заполнено твердой фазой отходов, а технологические растворы низкого уровня активности (НАО) находятся в постоянном динамическом цикле поверхностного испарения и восполнения солевого баланса. Жидкие РАО предприятия АО «УМЗ» представляют собой кислый раствор, содержащий высокие концентрации нитратов и фторидов, а также урановые радионуклиды (^{238}U, ^{235}U, ^{234}U). Наличие азотной и плавиковой кислот приводит к низкому pH и значительной коррозионной активности такого ЖРО. При подготовке к захоронению необходимо перевести эти отходы в стабильную твердую матрицу, нейтрализовав кислотность и прочно зафиксировав как токсичные анионы (NO_3^- и F^-) так и уран.

В отличие от этого, большая часть жидкой фазы отходов ТОО «СГХК» находится в виде пульпы (желеобразном состоянии). Переработка такого типа отходов возможна методами ультрафильтрации и обратного осмоса [19]. Образующийся в результате переработки

концентрат, содержащий радионуклиды, после обезвоживания захоранивается как твердые радиоактивные отходы (ТРО).

С радиохимической и инженерной точек зрения наиболее сложным объектом для кондиционирования являются кубовые остатки и щелочные эмульсии реакторной установки БН-350 (ТОО «МАЭК»). Несмотря на то, что их объем минимален в масштабах страны, данные отходы относятся к категории САО, характеризуются высокой минерализацией (до 530 г/л сухого остатка) и высокой удельной активностью основного долгоживущего нуклида-излучателя – ^{137}Cs (до $2{,}1 \cdot 10^8$ Бк/л). Для обеспечения надежной изоляции и безопасного длительного хранения высокосолевых жидких радиоактивных отходов рекомендуется внедрение комплексной многоступенчатой технологической схемы кондиционирования. Данный подход должен сочетать предварительную сорбционную очистку с использованием селективных неорганических сорбентов для избирательного извлечения и локализации доминирующих долгоживущих нуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr), последующее глубокое концентрирование остаточного макрокомпонентного солевого раствора с целью минимизации его физического объема, и финальный перевод полученных высокоактивных шламов и кубовых остатков в химически и радиационно-стойкую твердую матрицу (боросиликатное стекло или модифицированный цементный компаунд).

Обсуждение результатов

Рассматривая современные технологии переработки ЖРО в мире необходимо обратить внимание на ключевые аспекты и современные методы, базирующиеся на принципах минимизации объемов и глубоком кондиционировании.

При переработке полиметаллического минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ), образуются значительные объемы ЖРО, содержащие естественные радионуклиды – торий, уран и дочерние продукты их распада. В целом, действующие технологии обеспечивают соблюдение установленных норм, но имеют ряд существенных недостатков. Одним из них является то, что радиоактивные элементы разбавляются неактивными веществами, входящими в состав сырья, реагентов и других материалов, используемых в технологии. Это приводит к тому, что объем отходов, направляемых в хвостохранилища, неоправданно завышен из-за разубоживания нерадиоактивными веществами, что требует существенных некомпенсируемых и возрастающих капитальных вложений для строительства новых хранилищ. В целях минимизации образования отходов используются замкнутый водооборот и создание систем, базирующихся на дифференцированном сборе и переработке ЖРО в зависимости от химического состава и уровня активности.

При разработке технологических схем АЭС нового поколения предусматривается организация раздельного сбора и переработки теплоносителя первого контура и трапных вод. Перспективной для минимизации отходов является технология селективного выделения из ЖРО долгоживущих радионуклидов Cs и Co в небольшие объемы в форме труднорастворимых соединений. Для повышения эффективности очистки проводится предварительная обработка ЖРО по удалению масел, растворителей, механических примесей фильтрацией или другими методами, что приводит к сокращению общих объемов ЖРО.

На АЭС с ВВЭР получило распространение глубокое концентрирование кубового остатка ЖРО на прямоточных кожухотрубных выпарных аппаратах. В процессе охлаждения концентрата образуется монолитная масса, основу которой составляют кристаллогидраты полиборатных солей натрия. Осушенные отходы подвергают сухому цементированию, включению в полиэфирные смолы, битумные компаунды и т.д.

Мировая практика переработки ЖРО направлена на их концентрирование, очистку воды и перевод опасных компонентов в твердую, стабильную форму. Это достигается комбинацией технологических процессов, предусматривающих:

- предварительную обработку и концентрирование методами выпаривания (дистилляции), ультрафильтрации, обратного осмоса, ионного обмена;
- очистку от органических соединений методами коагуляции, сорбции, окисления;
- отверждение (кондиционирование) методами цементирования, битумирования, остекловывания (витрификации).

Заключение

Проведенный обзор показал, что жидкие радиоактивные отходы являются одним из наиболее сложных объектов обращения вследствие значительного разнообразия их химического и радионуклидного состава, различного уровня активности, наличия органических примесей и высокого солесодержания. Универсальной технологии переработки ЖРО не существует, поэтому выбор технологической схемы должен осуществляться с учетом происхождения отходов, формы нахождения радионуклидов и требований к конечному продукту переработки.

Мировая практика подтверждает, что наиболее эффективными являются комплексные технологии, сочетающие предварительную подготовку отходов, селективное извлечение наиболее опасных долгоживущих радионуклидов, концентрирование растворов и последующее кондиционирование радиоактивных концентратов методами цементирования, битумирования или остекловывания. Такой подход позволяет существенно уменьшить объемы отходов, направляе-

мых на долговременное хранение и захоронение, повысить экологическую безопасность и снизить затраты на создание новых объектов хранения.

Для Республики Казахстан совершенствование системы обращения с жидкими радиоактивными отходами приобретает особую актуальность в условиях развития атомной энергетики, реализации проекта по строительству первой атомной электростанции и дальнейшего развития предприятий ядерного топливного цикла. Принятие Закона Республики Казахстан «Об обращении с радиоактивными отходами», создание института национального оператора и внедрение единой системы учета радиоактивных отходов будет способствовать формированию необходимых организационно-правовых условий для повышения эффективности государственного регулирования в данной сфере.

Перспективными направлениями развития системы обращения с ЖРО в Казахстане являются внедрение технологий минимизации образования отходов, организация их раздельного сбора, применение современных методов глубокой очистки и селективного извлечения радионуклидов, а также создание специализированных региональных комплексов по переработке и кондиционированию радиоактивных отходов. Реализация указанных мероприятий позволит обеспечить безопасное обращение с ЖРО на всех этапах жизненного цикла, снизить экологические риски, оптимизировать затраты на их хранение и захоронение и привести национальную систему обращения с радиоактивными отходами в соответствие с современными международными требованиями и рекомендациями МАГАТЭ.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках ИРН BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».

Литература / References:

1. Об использовании атомной энергии: Закон Республики Казахстан от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК.
2. Экологический кодекс Республики Казахстан: Кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК.
3. Правила организации сбора, хранения и захоронения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива: утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 8 февраля 2016 года № 39.
4. Правила транспортировки ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов: утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 28 мая 2021 года № 183.
5. Санитарно-эпидемиологические требования к радиационно-опасным объектам: Санитарные правила: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 25 августа 2022 года № ҚР ДСМ-90.
6. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. – Вена: МАГАТЭ, 2005. – (IAEA-TCS-27).
7. Обращение с радиоактивными отходами низкого и среднего уровня активности перед их захоронением. – Вена: МАГАТЭ, 2005. – STI/PUB/1150. – ISBN 92-0-410705-7. – ISSN 1020-5845.
8. Обращение с радиоактивными отходами атомных электростанций и исследовательских реакторов перед захоронением: специальное руководство по безопасности № SSG-40. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
9. Национальный доклад Республики Казахстан по Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. – Астана, 2014. – 123 с.
10. Правила обеспечения промышленной безопасности при обращении с источниками ионизирующего излучения: утв. приказом исполняющего обязанности Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 26 декабря 2014 года № 301.
11. Нормативы на радиоактивные отходы: утв. приказом Министра энергетики РК от 16 июня 2021 года № 200.
12. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71.
13. Disposal of Radioactive Waste. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. – (IAEA Safety Standards Series No. SSR-5).
14. Классификация радиоактивных отходов: руководство по безопасности № GSG-1: Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и окружающей среды. – Вена: МАГАТЭ, 2014.
15. Predisposal Management of Radioactive Waste. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. – (IAEA Safety Standards Series No. WS-R-2).
16. СТ РК 3723–2021. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования. – Введ. 2021-11-04. – Нур-Султан: Госстандарт Республики Казахстан, 2021.
17. СТ РК 3722–2021. Отходы радиоактивные битумированные. Общие технические требования. – Введ. 2021-11-04. – Нур-Султан: Госстандарт Республики Казахстан, 2021.
18. СТ РК 3741–2021. Отходы высокоактивные отвержденные. Общие технические требования. – Введ. 2021-11-02. – Нур-Султан: Госстандарт Республики Казахстан, 2021.
19. Испытания мембранно-сорбционной очистки воды конечного водоема Теченского каскада / А. В. Савкин, С. А. Токарев, Ю. В. Глаголенко [и др.] // Атомная энергия. — 2008. — Т. 104, вып. 3. — С. 165–171. — URL: springer.com.

СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАР, ҚАСИЕТТЕРІ, ҚАЙТА ӨҢДЕУ ӘДІСТЕРІ. ПРОБЛЕМАЛАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ШЕШУ ЖОЛДАРЫ

В. В. Яковлев., Ю. Ю. Бакланова*, О. С. Букина, В. В. Бакланов, А. Г. Коровиков

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: basalai@nnc.kz*

Мақалада сұйық радиоактивті қалдықтармен (СРҚ) жұмыс істеудің қазіргі заманғы тәсілдеріне шолу беріліп, олардың негізгі қасиеттері, жіктелуі, химиялық және радионуклидтік құрамы қаралды. СРҚ-ны қайта өңдеудің олардың құрамының әртүрлілігіне, тұздың жоғары болуына, органикалық қоспалардың болуына және радионуклидтерді селективті алу қажеттілігіне байланысты негізгі проблемалар талданды. СРҚ тазарту және баптаудың қолданыстағы технологияларын талдау орындалды, сұйық радиоактивті қалдықтарды өңдеудің халықаралық тәжірибесі қаралды, сондай-ақ Қазақстан Республикасында СРҚ-мен жұмыс істеудің қазіргі жай-күйін бағалау келтірілді. Пайда болатын қалдықтардың көлемін азайту, радионуклидтерді терең тазарту және иммобилизациялау технологияларын енгізу мәселелеріне ерекше назар аударылды, сондай-ақ радиоактивті қалдықтарды баптау үшін пайдаланылатын матрицалардың құрамына, құрылымына және физикалық-механикалық қасиеттеріне қойылатын негізгі талаптарға талдау жүргізілді.

СРҚ қайта өңдеу жөніндегі мамандандырылған өңірлік кешендерді құрудың және осы салада мемлекеттік басқарудың бірыңғай жүйесін енгізудің орындылығы негізделген. Экологиялық тәуекелдерді төмендетуді, радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеу қауіпсіздігін арттыруды және халықаралық талаптарға сәйкестікті қамтамасыз ететін заманауи қайта өңдеу технологияларын кешенді қолдану қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: *сұйық радиоактивті қалдықтар, СРҚ-ны қайта өңдеу, матрицаларға қойылатын талаптар, иммобилизация, критерийлер.*

LIQUID RADIOACTIVE WASTE, PROPERTIES AND PROCESSING METHODS. PROBLEMS AND WAYS TO SOLVE THEM

V.V. Yakovlev, Yu.Yu. Baklanova*, O.S. Bukina, V.V. Baklanov, A.G. Korovikov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: basalai@nnc.kz*

The article provides an overview of modern approaches to the management of liquid radioactive waste (LRW), their basic properties, classification, chemical and radionuclide composition are considered. The main problems of LRW processing related to the diversity of their composition, high salinity, the presence of organic impurities and the need for selective extraction of radionuclides have been analyzed. The existing technologies for the LRW treatment and conditioning have been analyzed, the international experience in the processing of liquid radioactive waste has been reviewed, and an assessment of the current state of LRW management in the Republic of Kazakhstan has been given. Special attention is paid to the issues of minimizing the volume of the generated waste, the introduction of technologies for deep treatment and radionuclide immobilization, and the analysis of the basic requirements for the composition, structure and physico-mechanical properties of matrices used for conditioning radioactive waste.

The expediency of developing specialized regional LRW processing facilities and introducing a unified public management system in this area has been substantiated. It has been concluded that the integrated use of contemporary recycling technologies is necessary to reduce environmental risks, improve the safety of radioactive waste management and comply with international requirements.

Keywords: *liquid radioactive waste, LRW processing, matrix requirements, immobilization, criteria.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-186-195
УДК 502/504:539.16(574.41)

35 ЛЕТ ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА: РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Э.Г. Батырбеков[1], А.О. Айдарханов[2], Н.В. Ларионова[2*], А.В. Паницкий[2], А.К. Айдарханова[2], Л.В. Тимонова[2], А.Е. Кундузбаева[2], А.М. Кабдыракова[1], Д.В. Турченко[2], С.Б. Субботин[2]

[1]РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан
[2]Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
** E-mail для контактов: larionova@nnc.kz*

В статье обобщены данные о радиоактивном загрязнении основных объектов окружающей среды Семипалатинского испытательного полигона (СИП), включая почвенный и растительный покров, животный мир, поверхност-ные воды, атмосферный воздух и осадки (снег). Рассмотрены особенности содержания и распределения ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu, а также основные механизмы их переноса между компонентами экосистем. Выявлено, что загрязнение территории характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, а наиболее высо-кие уровни содержания радионуклидов приурочены к эпицентрам наземных испытаний, радиоактивным следам, приустьевым участкам скважин, водонаполненным воронкам и зонам воздействия загрязненных водотоков. В почвах основная часть ^{137}Cs, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu сохраняется в верхних горизонтах и связана с твердой фазой, тог-да как наибольшей вертикальной подвижностью характеризуется ^{90}Sr. Накопление радионуклидов растениями и животными определяется характером загрязнения местообитаний, свойствами радионуклидов и биологически-ми особенностями видов. Наиболее высокие уровни загрязнения поверхностных водных экосистем отмечены в техногенных водоемах, донных отложениях и водотоках площадки «Дегелен». Поступление радионуклидов в атмосферу связано с переходом ^{3}H из загрязненных вод и почвенной влаги, а также с пылевым переносом ча-стиц почвы. Показано, что современное радиоактивное загрязнение СИП преимущественно имеет локальный характер и определяется типом проведенных испытаний и последующим перераспределением радионуклидов в окружающей среде.

Ключевые слова: *Семипалатинский испытательный полигон (СИП), радиоактивное загрязнение, искусственные радионуклиды, объекты окружающей среды, миграция радионуклидов, тритий.*

Введение

С момента закрытия Семипалатинского испытательного полигона (СИП) казахстанскими учеными совместно с международным научным сообществом накоплен значительный объем данных о современной радиационной обстановке на его территории. Установлены основные участки радиоактивного загрязнения, а также пути и механизмы распространения радионуклидов в окружающей среде. Исследования охватывают почвенный и растительный покров, животный мир, поверхностные и грунтовые воды, воздух и осадки (снежный покров).

После поступления в почву радионуклиды перераспределяются по почвенному профилю, между размерными фракциями и различными физико-химическими формами. Особое место занимает ^{3}H, обладающий высокой подвижностью и участвующий в обмене между почвой, водой, атмосферным воздухом и растительностью. Изучение почв на СИП охватывает пространственное распределение искусственных радионуклидов, их вертикальную миграцию по почвенному профилю, количественное распределение по гранулометрическим фракциям и определение форм нахождения.

Исследования растительного покрова включают определение коэффициентов накопления (Кн) радионуклидов надземной частью растений и содержания ^{3}H в районах влияния загрязненных поверхностных, подрусловых и грунтовых вод. Изучение животного мира направлено на оценку переноса радионуклидов по пищевым цепям, их накопления в организмах животных и формируемых дозовых нагрузок.

Поверхностные воды СИП представлены природными озерами, водотоками и водоемами техногенного происхождения. К основным водотокам относятся ручьи площадки «Дегелен» и река Шаган. Загрязнение воздушного бассейна связано с поступлением радиоактивных частиц почвы и переходом ^{3}H из загрязненных вод и почвенной влаги. Снежный покров исследуется как объект, позволяющий выявлять локальные участки поступления ^{3}H.

Цель настоящей работы – обобщение ранее полученных данных о радиоактивном загрязнении основных объектов окружающей среды СИП.

Материалы и методы исследования

Работа выполнена в форме обзора опубликованных научных данных о радиоактивном загрязнении основных объектов окружающей среды СИП. В анализ включены исследования почвенного и растительного покрова, животного мира, поверхностных вод, атмосферного воздуха и снежного покрова. Рассматривались результаты определения содержания ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu, а при оценке воздушных аэрозолей – также ^{40}K, ^{228}Ac и ^{214}Bi.

Для почвенного покрова анализировались данные о пространственном и вертикальном распределении радионуклидов, формах их нахождения, распределении по гранулометрическим и микроагрегатным фракциям, а также о радиоактивных частицах. Отдельно рассмотрены результаты исследований ^{3}H на площадках «Опытное поле» и «Балапан». При обобщении данных по растительному покрову учитывались Кн радионуклидов в надземной части растений и содержание ^{3}H в растительности на территориях с различными типами загрязнения. Анализ животного мира включал сведения о биоразнообразии позвоночных, содержании радионуклидов в организмах грызунов, пресмыкающихся, копытных животных и рыб, а также результаты оценки дозовых нагрузок и радиоэкологических рисков.

Для поверхностных вод рассматривались данные о загрязнении воды и донных отложений природных и техногенных водоемов, реки Шаган и водотоков площадки «Дегелен». Оценка состояния воздушного бассейна основывалась на данных о содержании тритированной воды (НТО) и газообразного трития (НТ) в атмосферном и почвенном воздухе, радионуклидов в воздушных аэрозолях на радиационно-опасных объектах испытательных площадок СИП.

Результаты и обсуждение

Почвенный покров

Радиоактивное загрязнение почвенного покрова СИП сформировалось в результате различных видов ядерных испытаний. На участках наземных испытаний загрязнение сосредоточено в эпицентрах и на радиоактивных следах, а на площадках подземных испытаний – в приустьевых зонах штолен и скважин, а также на территориях, находящихся под воздействием загрязненных водотоков.

Вертикальное распределение радионуклидов исследовано на территории внутри границ СИП, за пределами площадок непосредственного проведения испытаний. Послойный отбор проводился в 169 точках до глубины 30 см с интервалом 5 см; всего было отобрано 1014 образцов почвы. Максимальные значения удельной активности большинства исследованных радионуклидов зарегистрированы в слое 0…5 см. На условно «фоновых» участках в этом слое в среднем находилось 83% общего содержания ^{137}Cs, 87% $^{239+240}$Pu и 38% ^{90}Sr. На радиоактивном следе 1953 года соответствующие значения составляли 92%, 83% и 73%, а на следе 1951 года – 93%, 93% и 59%. Минимальные значения содержания радионуклидов преимущественно отмечались на глубине 20…30 см. Для ^{241}Am численные значения в большинстве случаев регистрировались только в слоях 0…5 и 5…10 см, поэтому полное распределение этого радионуклида по профилю в исследовании не приводилось. По способности к перемещению в нижележащие слои почвы радионуклиды располагались в следующей последовательности: ^{90}Sr > ^{137}Cs > $^{239+240}$Pu > ^{241}Am. Наибольшая вертикальная подвижность установлена для ^{90}Sr, тогда как основная часть ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am сохранялась в верхней части почвенного профиля [1].

Исследование почв площадки «Опытное поле» показало, что основная часть искусственных радионуклидов находилась в прочно связанной форме. В среднем ее доля составляла около 98% для ^{137}Cs, 94% для ^{90}Sr, 89% для ^{241}Am и 98% для $^{239+240}$Pu. Для ^{90}Sr установлена связь содержания обменной, кислоторастворимой и прочно связанной форм с количеством карбонатов в почве. Для $^{239+240}$Pu отмечена связь прочно связанной формы с содержанием водорастворимых солей [2].

Распределение радионуклидов по размерным фракциям зависит от исследуемого объекта и характера формирования загрязнения. На двух радиоактивных следах СИП наиболее высокие значения удельной активности были зарегистрированы не в мелкодисперсных, а в крупных почвенных фракциях. На следе наземного ядерного испытания наибольшее обогащение радионуклидами установлено во фракции 1000…500 мкм; коэффициент обогащения составлял 1,2…3,8. На следе наземного неядерного эксперимента с незначительным энерговыделением наиболее обогащенной была фракция 500…250 мкм с коэффициентом обогащения 1,1…5,1. Распределение ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am и $^{239+240}$Pu по фракциям на каждом из исследованных следов имело сходный характер [3]. Иная картина установлена в почвах зоны водотока, выходящего из штольни площадки «Дегелен», где загрязнение формировалось при переносе радионуклидов водой. Среди тонких органоминеральных фракций размером менее 40 мкм преимущественное накопление всех исследованных радионуклидов наблюдалось во фракции менее 5 мкм. Средние коэффициенты обогащения изменялись в диапазонах 1,26…1,95 для ^{137}Cs, 1,17…1,44 для ^{241}Am, 1,26…1,47 для ^{90}Sr и 0,94…1,94 для $^{239+240}$Pu [4]. Таким образом, повышенное содержание радионуклидов нельзя однозначно связывать только с мелкими или только с крупными почвенными частицами. На радиоактивных следах наибольшее обогащение было установлено в крупных фракциях, а в почвах водотока площадки «Дегелен» – в наиболее тонкой части исследованных органоминеральных фракций.

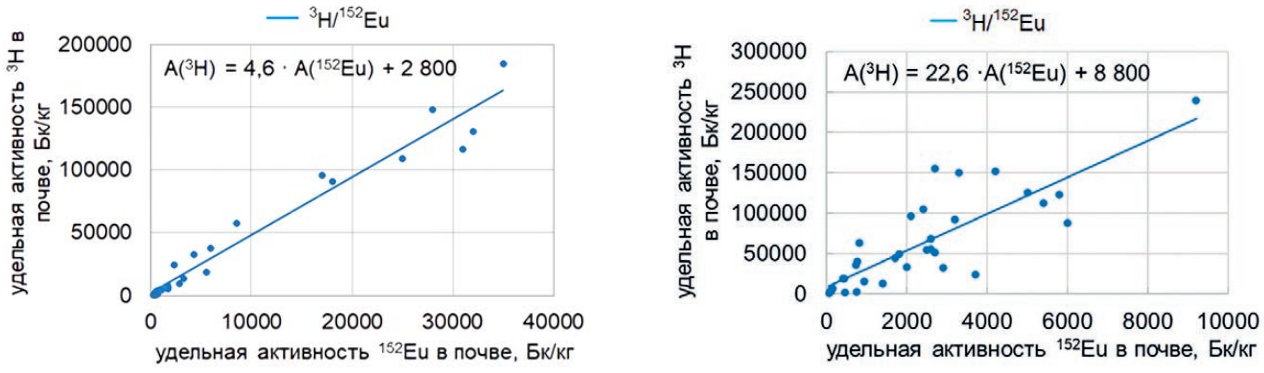
Почва также является одним из компонентов окружающей среды, в котором после ядерных испытаний был установлен радионуклид ^{3}H. На технической площадке П-1 «Опытного поля» удельная активность ^{3}H в поверхностном слое почвы достигала 185000 Бк/кг. Максимальные значения были зафиксированы в пределах эпицентров взрывов. Поверхностное распределение ^{3}H совпадало с распределением активационного продукта ^{152}Eu, что подтверждалось положительной зависимостью между удельными активностями этих радионуклидов (Рисунок 1). Полученные результаты свидетельствуют о преимущественной роли активационных процессов в формировании тритиевого загрязнения почвы на участках наземных испытаний [5]. В отличие от большинства других исследованных радионуклидов, ^{3}H обладает высокой подвижностью. Его распределение в почве определяется не только местом первоначального образования, но и перемещением поверхностных и подземных вод, содержанием почвенной влаги и формой нахождения ^{3}H в почве.

Растительный покров

Одним из наиболее распространенных параметров, используемых для количественной оценки накопления радионуклидов надземной частью растений из почвы, является Кн. Для СИП к настоящему времени значения Кн получены для естественных экосистем всех его территорий, характеризующихся различными типами радиоактивного загрязнения. Установлено, что в среднем минимальное накопление всех рассмотренных радионуклидов отмечается на площадке «Опытное поле». Далее значения Кн увеличиваются на территориях радиоактивных следов и условно «фоновых» территориях. Наибольшие значения Кн характерны для зон радиоактивных водотоков и мест испытания боевых радиоактивных веществ. Различия в значениях Кн для ^{137}Cs достигают 71 раза, для ^{90}Sr – 74 раз, для $^{239+240}$Pu – 14 раз, для ^{241}Am – 11 раз. При этом ряд убывания радионуклидов по способности к накоплению растениями имеет следующий вид: Кн ^{90}Sr > Кн ^{137}Cs > Кн $^{239+240}$Pu > Кн ^{241}Am. Значения Кн ^{90}Sr в среднем в восемь раз превышают Кн ^{137}Cs и до 16 раз – Кн $^{239+240}$Pu. Значения Кн $^{239+240}$Pu до трех раз выше Кн ^{241}Am [6].

Особенности накопления радионуклидов растениями были установлены в районе воронок, образовавшихся в результате экскавационных испытаний – мирных ядерных взрывов на площадке «Телкем». Диапазон значений Кн ^{90}Sr составлял 0,0077…1,5, а Кн $^{239+240}$Pu – 0,0012…0,84, охватывая по два порядка величин. Значения Кн ^{137}Cs изменялись в диапазоне 0,0040…0,70, а Кн ^{241}Am – 0,00060…0,73, охватывая по три порядка величин. Различия в Кн ^{137}Cs и ^{90}Sr для разных видов растений достигали 5-6 раз, а Кн ^{241}Am и $^{239+240}$Pu – 2 раза. Наибольшее содержание радионуклидов наблюдалось в полыни (*Artemisia sublessingiana*). Также установлено, что значения Кн ^{90}Sr постепенно снижаются с увеличением расстояния от зоны сброса. Все значения Кн значительно превышали значения, ранее полученные для эпицентров наземных ядерных испытаний, и были наиболее близки к значениям, установленным для условно «фоновых» территорий [7]. В местах проведения подземных ядерных испытаний в вертикальных скважинах на площадке «Сары-Узень» наиболее высокие значения Кн ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am наблюдались вблизи скважин без внешних физических нарушений почвенного покрова, а наиболее низкие – вблизи скважин с воронками, заполненными водой. Прибрежно-водные растения наиболее эффективно накапливали ^{90}Sr, тогда как у наземных растений наиболее высокие значения накопления были установлены для $^{239+240}$Pu [8].

Содержание ^{3}H в растениях определялось в свободной воде и в их органической составляющей. Высокие значения удельной активности ^{3}H в органической составляющей растений зафиксированы вблизи боевых скважин на площадке «Сары-Узень». Значения изменялись от 7,1 Бк/кг вблизи скважины № 106



а) *б)*

Рисунок 1. Зависимость удельной активности ^{3}H от удельной активности ^{152}Eu в почве: а - площадка «Опытное поле», техническая площадка П-1; б - территория «Атомного» озера [5]

до 200 000 Бк/кг вблизи скважины № 101. Фоновое содержание составляло 21,5 Бк/кг [9]. Удельная активность ^{3}H в свободной воде некоторых видов растений в зоне русла реки Шаган достигает приблизительно 200000 Бк/кг. Загрязнение растительности связано прежде всего с содержанием ^{3}H в поверхностных и подрусловых водах, являющихся основными источниками загрязнения. Для участков, характеризующихся отсутствием поверхностных водотоков, загрязненных ^{3}H, особого внимания заслуживают фреатофиты – растения, способные использовать грунтовые воды в качестве источника влаги. На территории СИП среди фреатофитов наиболее распространены чий (*Achnatherum splendens*) и чингил (*Halimodendron halodendron*). В результате исследований была установлена зависимость содержания ^{3}H в свободной воде растений-фреатофитов от его содержания в грунтовых водах (Рисунок 2) [10].

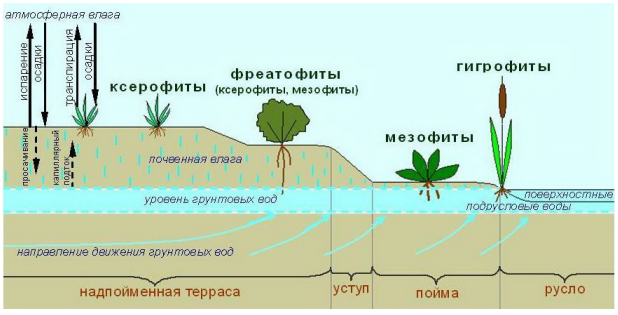
Животный мир

Территория СИП характеризуется высоким биоразнообразием и включает многочисленные виды млекопитающих, птиц, пресмыкающихся, земноводных, рыб и беспозвоночных. Одними из первых объектов радиоэкологических исследований стали мышевидные грызуны и пресмыкающиеся. Эти животные обладают небольшой площадью ареалов обитания и отражают локальные особенности радиоактивного загрязнения территории [11].

Установлено, что накопление радионуклидов в организме животных определяется характером радиоактивного загрязнения местообитаний, особенностями питания и биологией конкретного вида. Наиболее высокие уровни накопления наблюдались на локальных участках, связанных с эпицентрами наземных испытаний, площадками испытаний боевых радиоактивных веществ, радиоактивными водотоками массива Дегелен и радиационно опасным объектом «Атомное озеро». При удалении от участков загрязнения на расстояние, превышающее радиус активности животных, высокие значения удельной активности радионуклидов в их организме не фиксировались. Средние коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr были относительно невелики. Вместе с тем на отдельных локальных участках, загрязненных вследствие испытаний боевых радиоактивных веществ, концентрации ^{90}Sr в организме отдельных особей достигали чрезвычайно высоких значений. Был сделан вывод, что ящерицы могут участвовать во вторичном перераспределении загрязнения в природных экосистемах и использоваться в качестве биоиндикаторов локального загрязнения [11].

Наиболее интенсивное развитие получили радиоэкологические исследования крупных копытных животных, представляющих потенциальный интерес как объекты охоты и животноводства. Исследования проводились как на основании прямых измерений содержания радионуклидов в тканях и органах копытных животных, обитающих на территории СИП, так и посредством косвенной оценки возможного содержания радионуклидов в тканях по их удельной активности в фекалиях [12-13]. Результаты исследований показали, что ^{137}Cs преимущественно концентрируется в мышечной ткани, ^{90}Sr – в костной ткани, тогда как $^{239+240}$Pu и ^{241}Am локализуются главным образом в печени и костной ткани. На основании средних значений относительных концентраций радионуклидов, выраженных в долях от максимального значения, были построены нисходящие ряды, характеризующие способность тканей и органов накапливать радионуклиды. Для ^{137}Cs установлен следующий ряд: мышечная ткань> почки > легкие > селезенка > сердце > печень > костная ткань; для ^{90}Sr: костная ткань > печень > легкие > мышечная ткань > селезенка > сердце > почки [12]. Косвенная оценка показала, что даже при использовании консервативных сценариев ожидаемые концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в мясе домашних животных, выпасаемых на большинстве исследованных территорий СИП, не превышают действующих санитарных нормативов. Накопление трансурановых элементов остается крайне низким вследствие их слабой биологической доступности.

Для крупных копытных животных, обитающих на участках радиоактивного загрязнения СИП, были рассчитаны дозовые нагрузки и определены радиоэкологические риски на примере косули сибирской



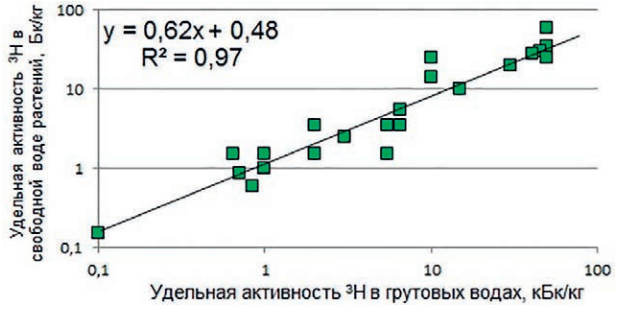


Рисунок 2. Зависимость содержания 3H в свободной воде растений-фреатофитов от содержания 3H в грунтовых водах [10]

Capreolus pygargus Pal., 1771. Расчетные дозовые нагрузки в основном оказались значительно ниже уровней, при которых могут наблюдаться радиобиологические эффекты на уровне популяций. По степени риска возникновения различных эффектов территории СИП располагались

в следующем убывающем ряду: площадки испытаний боевых радиоактивных веществ № «4» и «4А» > площадка «Опытное поле» > площадка «Дегелен» > площадка «Балапан» > площадка «Сары-Узень» > территории радиоактивных следов СИП > территории СИП без радиоактивных следов и испытательных площадок [13].

Отдельное направление исследований животного мира СИП посвящено водным экосистемам полигона. Исследования рыб показали, что распределение радионуклидов зависит от гидрохимических условий водоема, трофического статуса вида и возраста особей. Определение содержания ^{137}Cs, ^{90}Sr, $^{239+240}$Pu, ^{241}Am и ^{3}H проводилось в мышечной ткани, костях и внутренних органах рыб. Полученные данные использовались для оценки возможного поступления радионуклидов в организм человека при использовании водных биоресурсов. Наибольшие значения удельной активности техногенных радионуклидов были зарегистрированы в организме рыб, обитающих в воронке скважины № 101 на испытательной площадке «Сары-Узень». В других исследованных водоемах СИП – «Атомном озере», реке Шаган и озере Шаган – значимые значения удельной активности техногенных радионуклидов не фиксировались [14].

Таким образом, исследования животного мира показали, что содержание радионуклидов в организмах животных зависит от уровня и характера загрязнения среды, особенностей питания и биологических особенностей видов. Полученные результаты используются при оценке радиационной безопасности, разработке программ экологического мониторинга и обосновании использования территорий бывшего СИП.

Поверхностные воды

Поверхностные водные экосистемы СИП представлены природными озерами, водотоками и водоемами техногенного происхождения. Последние расположены на площадках «Опытное поле», «Балапан», «Телькем» и «Сары-Узень» и преимущественно представляют собой заполненные водой воронки, образованные в результате ядерных испытаний или проседания грунта. Природные озера СИП различаются по площади и в большинстве случаев характеризуются высокой минерализацией воды. Преимущественно это замкнутые водоемы, часть которых пересыхает к середине лета. Основным поверхностным водотоком является река Шаган, протекающая вдоль площадки «Балапан» и выходящая за пределы СИП. Основные водотоки площадки «Дегелен» представлены ручьями Узынбулак, Карабулак, Токтакушук, Байтлес и Актыбай, связанными с районами расположения штолен.

По результатам определения содержания радионуклидов в донных отложениях водоемов техногенного происхождения установлено, что наиболее загрязненными γ-излучающими радионуклидами ^{137}Cs и ^{241}Am являются пять участков площадки «Опытное поле», где проводились наземные ядерные испытания, участки проведения экскавационных взрывов, а также воронка скважины № 101, образовавшаяся в результате проседания грунта при внештатной ситуации во время проведения подземного ядерного испытания. По содержанию ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu наиболее загрязненными являются те же объекты, на которых зафиксированы максимальные значения содержания ^{137}Cs и ^{241}Am. По содержанию $^{239+240}$Pu в донных отложениях более n×10³ Бк/кг к наиболее загрязненным объектам также относятся «Тротиловое» озеро и воронка на технической площадке П-3, расположенные на площадке «Опытное поле», а также воронка скважины № 125 на площадке «Сары-Узень». При этом содержание остальных радионуклидов – ^{90}Sr, ^{137}Cs и ^{241}Am – на данных объектах находилось на уровне менее n×10³ Бк/кг. Вероятно, это связано с характером испытаний, проводившихся на данных объектах [15].

Содержание техногенных радионуклидов в донных отложениях большинства природных озер в среднем достигает 200 Бк/кг для ^{137}Cs и 20 Бк/кг для ^{241}Am, ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Максимальные значения содержания техногенных радионуклидов зафиксированы в донных отложениях Внешнего водоема, расположенного в непосредственной близости от «Атомного» озера: ^{137}Cs – 5000±500 Бк/кг; ^{241}Am – 250±25 Бк/кг; ^{90}Sr – 2300±200 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – 9800±900 Бк/кг. Радионуклидное загрязнение донных отложений Внешнего водоема, фиксируемое в непосредственной близости от «Атомного» озера, обусловлено экскавационным взрывом 1965 года. На расстоянии около 1,5 км и более от «Атомного» озера радионуклидное загрязнение имеет фоновые значения. Повышенные значения содержания техногенных радионуклидов зафиксированы в донных отложениях озера Жангылды, расположенного на площадке «Сары-Узень»: ^{137}Cs – 260±50 Бк/кг; ^{241}Am – 17±3 Бк/кг; ^{90}Sr – 170±26 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – 280±30 Бк/кг. В донных отложениях озера, расположенного на следе 1951 года, содержание ^{137}Cs составляло 87±9 Бк/кг, ^{241}Am – 38±4 Бк/кг, ^{90}Sr – 120±18 Бк/кг и $^{239+240}$Pu – 290±30 Бк/кг. В донных отложениях озера Кишкенсор зафиксировано только повышенное значение содержания ^{90}Sr – 890±130 Бк/кг [16].

Содержание ^{241}Am в воде всех водоемов техногенного и природного происхождения находилось ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения – менее 0,03 Бк/кг. В воде большинства водоемов техногенного происхождения

содержание ^{137}Cs находилось ниже предела обнаружения – менее 0,01 Бк/кг. Численные значения содержания ^{137}Cs зафиксированы в воде четырех водоемов: двух воронок на площадке «Опытное поле» и двух воронок на площадке «Сары-Узень». Численные значения содержания ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu в воде зафиксированы во всех водоемах техногенного происхождения и изменялись в следующих пределах: ^{90}Sr – от 0,01 до 400 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – от $6{,}1\times10^{-4}$ до 0,21 Бк/кг. Максимально загрязненными по содержанию ^{90}Sr на уровне $n\times10^{2}$ Бк/кг являются воды двух воронок площадки «Опытное поле», воронки «Телькем-2» и воронки скважины № 101 на площадке «Сары-Узень». Максимально загрязненными по содержанию $^{239+240}$Pu на уровне $n\times10^{-1}$ Бк/кг являются воды воронок «Телькем-1» и «Телькем-2» площадки «Телькем» [15].

В воде большинства природных озер содержание техногенных радионуклидов находилось ниже предела обнаружения – менее 0,01 Бк/кг для ^{137}Cs – или ниже уровня вмешательства (УВ) для ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Для ^{90}Sr содержание составляло $n\times10^{-1}$ – $n\times10^{1}$ Бк/кг, для $^{239+240}$Pu – $n\times10^{-3}$ Бк/кг. Исключением является озеро, расположенное на следе 1951 года, где содержание ^{137}Cs в воде составляло 0,07±0,01 Бк/кг, хотя данное значение на 4 порядка ниже уровня вмешательства (УВ) для воды УВ ^{137}Cs=11 Бк/кг. Повышенные значения содержания ^{90}Sr зафиксированы в воде озера Жангылды – 1,9±0,3 Бк/кг, и озера, расположенного на следе 1951 года – 2,6±0,3 Бк/кг. Данные значения не превышали УВ для ^{90}Sr, равный 4,9 Бк/кг. В воде озера Кишкенсор, расположенного в зоне влияния площадки «Балапан», зафиксировано содержание ^{90}Sr, равное 17±2 Бк/кг, что на порядок превышает УВ. По результатам гидрогеологических исследований установлено, что данное радионуклидное загрязнение связано с подтоком загрязненных грунтовых вод, вымывающих ^{90}Sr из полостей скважин площадки «Балапан» [17].

Концентрация ^{3}H в водах реки Шаган изменяется в широком диапазоне – от значений ниже минимально детектируемой активности до 320000 Бк/кг. Максимальная активность ^{3}H регистрируется на участке, расположенном в 5 км от «Атомного» озера, минимальная – на расстоянии 70 км. В месте впадения реки Шаган в реку Иртыш содержание ^{3}H составляет около 90 Бк/кг (Рисунок 3) [18]. Содержание остальных техногенных радионуклидов в воде реки Шаган находилось ниже предела обнаружения: ^{137}Cs – менее 1×10^{-2} Бк/кг; ^{90}Sr – менее 3×10^{-2} Бк/кг; $^{239+240}$Pu – менее 1×10^{-4} Бк/кг [19]. В воде водотоков из штолен площадки «Дегелен» содержание ^{3}H изменялось от $n\times10^{3}$ до $n\times10^{5}$ Бк/кг, ^{90}Sr – от $n\times10^{1}$ до $n\times10^{3}$ Бк/кг, ^{137}Cs – от менее 10^{-2} до $n\times10^{2}$ Бк/кг, $^{239+240}$Pu – от менее 1×10^{-4} до $n\times10^{2}$ Бк/кг. Содержание техногенных радионуклидов в воде ручьев составляло: ^{3}H – порядка $n\times10^{4}$ Бк/кг; ^{90}Sr – от менее 3×10^{-2} до $n\times10^{-2}$ Бк/кг; ^{137}Cs – менее 0,01 Бк/кг; $^{239+240}$Pu – около $n\times10^{-3}$ Бк/кг. При этом содержание ^{3}H в воде на порядок превышает УВ, составляющий 7600 Бк/кг [20].

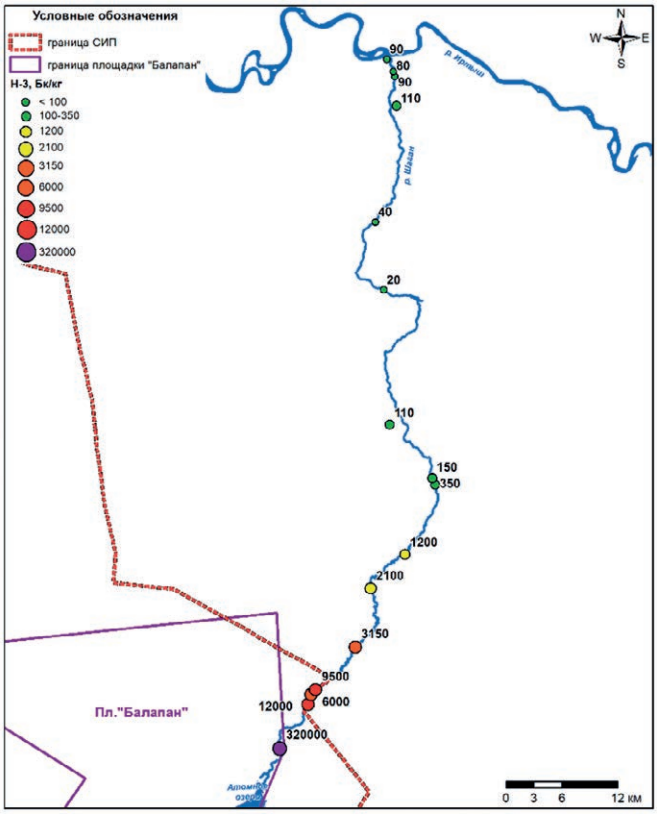


Рисунок 3. Результаты определения содержания ^{3}H в воде реки Шаган [18]

Воздушный бассейн, осадки

На радиационно-опасных объектах испытательных площадок СИП содержание техногенных радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs в воздушной среде составляет меньше предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. Численные значения концентрации были получены по радионуклидам ^{90}Sr и $^{239+240}$Pu. Максимальные концентрации радионуклида $^{239+240}$Pu в воздухе наблюдаются на технической площадке П-3 «Опытное поле» и скважине 1003 площадки «Сары-Узень», достигающие $1{,}6\times10^{-2}$ и $1{,}1\times10^{-2}$ Бк/м^3 соответственно, что в 6 раз превышает допустимую объемную активность для населения (ДОАнас) – $2{,}5\times10^{-3}$ Бк/м^3. Максимальное содержание радионуклида ^{90}Sr в воздушной среде, обнаруженное на площадке «4а», составляет $1{,}0\times10^{-3}$ Бк/м^3, что не превышает ДОАнас – 2,7 Бк/м^3. Однако на расстоянии 200…400 м от радиоактивно-загрязненного участка концентрация радионуклида $^{239+240}$Pu снижается в 100 раз, а на расстоянии 4…5 км снижается в 1000 раз [21-22]. Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным на расстоянии 400 м от радиоактивно-загрязненного участка концентрация радионуклидов в воздушной среде не превышает допустимой объемной активности для населения (ДОАнас), установленной гигиеническими нормативами [23].

Формирование тритиевого загрязнения воздушной среды на территории СИП связано с испарением загрязненных поверхностных вод, поступлением ^{3}H из почвенной влаги и миграцией радионуклида из подземных вод в районах проведения подземных и экскавационных ядерных испытаний [24]. В атмосфере ^{3}H присутствует преимущественно в двух формах – в виде тритированной воды и газообразного трития. На территориях проведения наземных и экскавационных ядерных испытаний зарегистрированы преимущественно невысокие значения объемной активности ^{3}H. На площадке «Опытное поле» содержание НТО и НТ в атмосферном воздухе находилось ниже предела обнаружения – менее 0,5 Бк/м^3. В почвенном воздухе объемная активность НТО не превышала 0,8 Бк/м^3, а НТ не был обнаружен. На площадке «Телькем» содержание НТО и НТ в атмосферном и почвенном воздухе в большинстве случаев также составляло менее 0,5 Бк/м^3. В районе «Атомного» озера на отдельных участках гребня воронки объемная активность НТО в атмосферном воздухе достигала 8 Бк/м^3, НТ – 3 Бк/м^3. В почвенном воздухе содержание НТО достигало 2,5 Бк/м^3, НТ – 6 Бк/м^3. На площадках проведения подземных ядерных испытаний установлены более высокие концентрации ^{3}H в воздухе. На площадке «Балапан» объемная активность НТО в атмосферном воздухе изменялась от 0,5 до 15 Бк/м^3, НТ – от 0,5 до 190 Бк/м^3. В почвенном воздухе объемная активность НТО составляла от 0,5 до 220 Бк/м^3, НТ – от 0,5 до 40 Бк/м^3. Максимальные значения зарегистрированы в районе устья скважины № 1010. На площадке «Сары-Узень» объемная активность НТО в атмосферном воздухе достигала 420 Бк/м^3, тогда как содержание НТ не превышало 2,0 Бк/м^3. В почвенном воздухе объемная активность НТО достигала 760 Бк/м^3, НТ – 1,3 Бк/м^3. На площадке «Дегелен» детальные исследования атмосферного воздуха проводились в районе штолен № 176 и 177, где наблюдались водопроявления. Максимальные значения концентрации ^{3}H в атмосферном воздухе в местах выхода штольневых ручьев на поверхность составляли соответственно 1400 и 700 Бк/м^3. На расстоянии около 400 м от начальных точек значения снижались до 100 Бк/м^3 в районе штольни № 176 и до 50 Бк/м^3 в районе штольни № 177. Концентрация ^{3}H также снижалась по мере удаления в стороны от русла водотока [24-25].

Исследования атмосферных осадков на территории СИП представлены преимущественно результатами определения ^{3}H в снежном покрове. На площадке «Дегелен» исследовалось распределение ^{3}H в снежном покрове русел Карабулака, Узынбулака и Актыбая. В поверхностном слое снега в центре русел содержание ^{3}H достигало 40000 Бк/кг, тогда как фоновые значения на участках, не связанных с руслами водотоков, составляли 40–50 Бк/кг. Одним из основных механизмов поступления ^{3}H в снежный покров являлась его эманация с поверхности льда и почвы [26]. Более поздние исследования снежного покрова были проведены на площадках «Балапан» и «Сары-Узень». На площадке «Балапан» повышенные значения содержания ^{3}H в снеге зарегистрированы в районе «Атомного» озера, месторождения «Каражыра» и озера Кишкенсор. На площадке «Сары-Узень» повышенные значения выявлены возле скважины № 101, объекта «Лазурит» и безымянного ручья, вытекающего из горного массива. Максимальная удельная активность ^{3}H в снежном покрове составляла 45 Бк/кг на площадке «Балапан» и 36 Бк/кг на площадке «Сары-Узень». На фоновых территориях СИП содержание ^{3}H в снеге изменялось от 4,6 до 12 Бк/кг. На отдельных участках повышенное содержание ^{3}H в снежном покрове было установлено при отсутствии загрязненных поверхностных водотоков. Присутствие ^{3}H в таких местах может косвенно свидетельствовать о загрязнении почвы и поступлении трития из подземных источников [27].

Заключение

Радиоактивное загрязнение объектов окружающей среды СИП характеризуется выраженной пространственной неоднородностью. Наиболее высокие уровни содержания искусственных радионуклидов приурочены к эпицентрам наземных испытаний, радиоактивным следам, приустьевым участкам скважин, водонаполненным воронкам и зонам воздействия загрязненных водотоков. В почвах основная часть ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu и ^{241}Am сохраняется в верхних

горизонтах и связана с твердой фазой, тогда как наибольшей вертикальной подвижностью характеризуется ^{90}Sr. Распределение радионуклидов между размерными фракциями зависит от происхождения загрязнения. Радионуклид ^{3}H выявлен в почвах бывших испытательных площадок; его распределение связано с эпицентрами испытаний, водонаполненными воронками, скважинами, водотоками и неглубоко залегающими подземными водами. Накопление радионуклидов в растениях происходит в последовательности ^{90}Sr > ^{137}Cs > $^{239+240}$Pu > ^{241}Am. Содержание ^{3}H в растениях связано с загрязненными поверхностными, подрусловыми и грунтовыми водами. Исследования животных подтвердили поступление радионуклидов в организмы грызунов, пресмыкающихся, копытных и рыб; уровни накопления зависят от загрязнения местообитаний, питания и биологических особенностей видов. Наиболее высокие уровни загрязнения поверхностных водных экосистем характерны для техногенных водоемов и донных отложений природных озер в зонах влияния испытательных площадок. Перенос ^{3}H за пределы СИП отмечается по реке Шаган, а загрязненные водотоки «Дегелена» способствуют миграции радионуклидов. Поступление радионуклидов в атмосферу связано с переходом ^{3}H из загрязненных вод и почвенной влаги, а также с пылевым переносом частиц почвы. В целом современное загрязнение СИП преимущественно имеет локальный характер и определяется типом проведенных испытаний, свойствами радионуклидов и механизмами их перераспределения между компонентами окружающей среды.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713)

Литература / References:

1. Panitskiy A.V., Syssoeva Y.S., Baigazy S.A., Kunduzbayeva A.Ye., Kenzhina L.B., Polivkina Y.N., Larionova N.V., Krivitskiy P.Ye., Aidarkhanova A.K. Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations // PLOS ONE. – 2023. – Vol.18(1). – DOI: 10.1371/journal.pone.0278581.
2. Kunduzbayeva A.Ye., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Larionova N.V., Magasheva R.Yu., Bakirova G.A. Speciation of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2022. – Vol. 249, 106867. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106867.
3. Kabdyrakova A.M., Lukashenko S.N., Mendubayev A.T., Kunduzbayeva A.Ye., Panitskiy A.V., Larionova N.V. Distribution of artificial radionuclides in particle-size fractions of soil on fallout plumes of nuclear explosions // J. Environ. Radioact. – 2018. – Vol.186. – P. 45–53. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.022.
4. Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Ye., Mendubayev A.T., Batyrbekov E.G., Lukashenko S.N., Vityuk V.A., Larionova N.V., Kabdrahmanova S.K. Mechanisms of the formation of radioactive soil contamination in the water-stream zone from the tunnel in the area of underground nuclear tests at the Degelen site, Semipalatinsk Test Site // Science of the Total Environment. – 2025. –Vol. 1000, 180443. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180443.
5. Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Айдарханов А.О., Сержанова З.Б. Тритиевое загрязнение почвы в местах проведения наземных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне // Радиация и риск. – 2020. – Vol. 29(4). – С.106–117. – DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-4-106-117.
6. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Y., Panitskiy A.V., Ivanova A.R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2018. – Vol. 186. – P.163–170. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.006.
7. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Aidarkhanova A.K., Kunduzbayeva A.Ye., Kabdyrakova A.M., Krivitskiy P.Y., Polevik V.V., Aidarkhanov A.O. Transfer parameters of radionuclides from soil to plants at the area of craters produced by underground nuclear explosions at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2021. – Vol. 237(1–2), 106684. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106684.
8. Krivitskiy P., Larionova N., Toporova A., Aidarkhanova A., Monayenko V., Kunduzbayeva A., Kabdyrakova A., Polevik V., Aidarkhanov A. Artificial radionuclides in soils and vegetations in the area of underground nuclear tests locations in the Sary-Uzen site of the Semipalatinsk Test Site // Journal of Hazardous Materials. – 2026. – Vol. 502, 141010. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.141010.
9. Larionova N.V., Krivitskiy P.Y., Aidarkhanova A.K., Polevik V.V., Timonova L.V., Monayenko V.N., Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Toporova A.V., Aidarkhanov A.O. Tritium content in vegetation cover at nuclear test locations at the “Sary-Uzen” site in the Semipalatinsk test site // Ecotoxicol Environ Saf. – 2024. – Vol. 288, 117387. – URL: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117387.
10. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Aidarkhanov A.O., Subbotin S.B., Yankauskas A.B. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2017. – Vol. 177. – P. 218–224. – URL: https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.032.
11. Panitskiy A.V., Lukashenko S.N., Kadyrova N.Zh. ^{137}Cs and ^{90}Sr in lizards of the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2017. – Vol. 166. – P. 91–96. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.034.
12. Panitskiy A., Bazarbaeva A., Baigazy S., Polivkina Y., Alexandrovich I., Abisheva M. Bioaccumulation of radionuclides in hoofed animals inhabiting the Semipalatinsk Test Site // PLoS ONE. – 2023. – Vol. 18(11). – DOI: 10.1371/journal.pone.0294632.
13. Panitskiy A., Bazarbaeva A., Baigazy S., Alexandrovich I., Larionova N. Radioecological characteristics of Siberian roe deer (Capreolus pygargus Pal., 1771) inhabiting locations of nuclear weapon tests // PLoS ONE. – 2024. – Vol. 19(9). – DOI: 10.1371/journal.pone.0308518.

14. Panitskiy A.V., Baigazinov Z., Baigazy S.A., Alexandrovich I.A., Polivkina Y.N., Salmenbayev S.E., Kozhabekova A.R., Mukhamediyarov N.Zh., Adjei-Kyereme S., Hegedűs M., Kovács T. Assessment of ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am, $^{239+240}$Pu, ^{3}H (HTO, OBT) in the fish from lakes, rivers, and nuclear shell craters of the Semipalatinsk Test Site // Scientific Reports. – 2026. – Vol. 16, 1802. – DOI: 10.1038/s41598-025-31374-7.
15. Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Дашук А.Л. Перераспределение радионуклидов в водных объектах техногенного происхождения Семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – Вып. 3 (79). – С.147–155.
16. Aidarkhanova A., Larionova N., Tleukanova Zh., Mamyrbaeva A., Ermakova R., Svetacheva Yu., Aktayev M., Panitskiy A. The character of radionuclide contamination of natural lakes at the territory of the Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2022. – Vol. 255, 107041. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.107041.
17. Aidarkhanova A., Timonova L., Aidarkhanov A., Monayenko V., Iskenov A., Subbotin S., Pronin S., Belykh N. The character of Lake Kishkensor contamination in the area of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk Test Site territory // Environmental Monitoring and Assessment. – 2024. – Vol. 196, 1068. – DOI: 10.1007/s10661-024-13227-4.
18. Toktaganov T., Mamyrbayeva A., Aidarkhanov A., Aidarkhanova A., Raimkanova A. Tritium contamination and hydrological transport in the Shagan River: an isotope hydrology study // PLoS ONE. – 2025. – Vol. 20(10). – DOI: 10.1371/journal.pone.0333260.
19. Айдарханов А.О., Лукашенко С.Н., Айдарханова А.К., Анисимов В.С. Радиоактивное загрязнение вод реки Шаган (по результатам 2011-го года) // Радиация и риск. – 2014. – Том 23, № 4. – С. 35-42.
20. Aidarkhanova A., Mamyrbayeva A., Nadeyeva A., Iskenov A., Aidarkhanov A., Larionova N., Yermakova R. Determining water resource formation at the “Delegen” Nuclear Test Site using stable isotope analysis // Water. – 2026. – Vol. 18, 99. – DOI: 10.3390/w18010099.
21. Турченко Д.В., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О., Паницкий А.В. Оценка состояния загрязненности воздушного бассейна на испытательной площадке «Опытное поле» при проведении сельскохозяйственных работ // Вестник НЯЦ РК. – 2013. – Вып. 4 (56). – С.59-65.
22. Turchenko D.V., Aidarkhanov A.O., Aidarkhanova A.K., Aktayev M.R., Dashuk A.L., Kruglykhin A.A. Research into the current radiological state of air and monitoring observations on STS and the adjacent territory // J. Environ. Radioact. – 2023. – Vol.264, 107199. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107199.
23. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71.
24. Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V., Tur Y.S. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2012. – Vol. 113. – P. 98–107. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
25. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Тимонова Л.В., Ларионова Н.В., Турченко Д.В. Оценка уровня концентрации газообразных соединений трития в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т.60. – С. 649–660. – URL: https://doi.org/10.31857/S086980312006020X.
26. Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Lyakhova O.N. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range // J. Environ. Radioact. – 2014. – Vol. 132. – P.115–120. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.01.017.
27. Turchenko D.V., Timonova L.V., Krivitskiy P.Ye., Aidarkhanova A.K., Abisheva M.T., Aidarkhanov A.O. Identification of tritium-contaminated areas using a tritium survey on the snow cover, the case of Semipalatinsk Test Site // J. Environ. Radioact. – 2024. – Vol. 278, 107487. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107487.

СЕМЕЙ ПОЛИГОНЫНЫҢ ЖАБЫЛҒАНЫНА 35 ЖЫЛ: РАДИОАКТИВТІ ЛАСТАНУ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫҢ НЕГІЗГІ КОМПОНЕНТТЕРІНДЕГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ТАРАЛУ ЖӘНЕ ӨЗГЕРУ ЗАҢДЫЛЫҚТАРЫ

Э. Г. Батырбеков[1], А. О. Айдарханов[2], Н. В. Ларионова[2*], А. В. Паницкий[2], А. К. Айдарханова[2], Л. В. Тимонова[2], А. Е. Кундузбаева[2], А. М. Кабдыракова[1], Д. В. Турченко[2], С. Б. Субботин[2]

[1]Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан
[2]ҚР ҰЯО «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: larionova@nnc.kz*

Мақалада Семей сынақ полигоны (ССП) жабылғаннан қоршаған ортаның негізгі объектілерінің, соның ішінде топырақ және өсімдік жамылғысы, жануарлар әлемі, жер үсті сулары, атмосфералық ауа және қар жамылғысының радиоактивті ластануы туралы деректер жинақталған. ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am және $^{239+240}$Pu құрамы мен таралу ерекшеліктері, сондай-ақ оларды экожүйе құрауыштары арасында тасымалдаудың негізгі механизмдері қарастырылған. Аумақтың ластануы айқын кеңістіктік гетерогенділікпен сипатталатыны анықталды, ал радионуклидтердің ең жоғары деңгейі жердегі сынақ эпицентрлеріне, радиоактивті іздерге, ұңғымалардың

сағалық учаскелеріне, су толтырылған қазаншұңқырларға және ластанған су ағындарының әсер ету аймақтарына сабақтастырылған. Топырақта жоғарғы көкжиекте ^{137}Cs, ^{241}Am және $^{239+240}$Pu негізгі бөлігі сақталады және қатты фазамен байланысты, ал ^{90}Sr тігінен аса үлкен қозғалғыштығымен сипатталады. Өсімдіктер мен жануарлардың радионуклидтердің жинақталуы тіршілік ету ортасының ластану сипатымен, радионуклидтердің қасиеттерімен және түрлердің биологиялық ерекшеліктерімен анықталады. Жер үсті су экожүйелерінің ластануының ең жоғары деңгейі «Дегелең» алаңының техногендік су қоймаларында, түптік шөгінділерде және ағын суларда байқалды. Радионуклидтердің атмосфераға түсуі ластанған сулар мен топырақ ылғалынан ^{3}H өтуімен, сондай-ақ топырақ бөлшектерінің шаңмен тасымалдануымен байланысты. Қазіргі уақыттағы ССП ластануы негізінен жергілікті сипатта екені және жүргізілген сынақтардың түрімен және кейіннен радионуклидтердің қоршаған ортаға қайта бөлінуімен анықталатыны көрсетілген.

Түйін сөздер: *Семей сынақ полигоны (ССП), радиоактивті ластану, жасанды радионуклидтер, қоршаған орта объектілері, радионуклидтердің жылыстауы, тритий.*

35 YEARS AFTER THE CLOSURE OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE: RADIOACTIVE CONTAMINATION AND PATTERNS OF RADIONUCLIDE BEHAVIOR IN THE MAIN ENVIRONMENTAL COMPONENTS

E.G. Batyrbekov[1], A.O. Aidarkhanov[2], N.V. Larionova[2*], A.V. Panitskiy[2], A.K. Aidarkhanova[2], L.V. Timonova[2], A.Ye. Kunduzbayeva[2], A.M. Kabdyrakova[1], D.V. Turchenko[2], S.B. Subbotin[2]

[1]RSE 'National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan', Kurchatov, Kazakhstan
[2]Branch office 'Institute of Radiation Safety and Ecology' of the RSE 'NNC RK', Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: larionova@nnc.kz*

The article summarizes data on radioactive contamination of the main environmental components of the Semipalatinsk Test Site (STS), including soil and vegetation cover, wildlife, surface waters, atmospheric air, and snow cover. The occurrence and distribution patterns of ^{3}H, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu, as well as the main mechanisms of their transfer among ecosystem components, are considered. The contamination of the territory is characterized by pronounced spatial heterogeneity, with the highest radionuclide levels associated with the epicenters of surface nuclear tests, radioactive fallout traces, areas around borehole outlets, water-filled craters, and zones affected by contaminated watercourses. In soils, most of the ^{137}Cs, ^{241}Am, and $^{239+240}$Pu remains concentrated in the upper horizons and is associated with the solid phase, whereas ^{90}Sr exhibits the greatest vertical mobility. Radionuclide accumulation in plants and animals is determined by the contamination characteristics of their habitats, radionuclide properties, and species-specific biological characteristics. The highest levels of contamination in surface aquatic ecosystems are observed in artificial water bodies, bottom sediments, and watercourses at the Degelen site. The release of radionuclides into the atmosphere is associated with the transfer of ^{3}H from contaminated waters and soil moisture, as well as with the resuspension and atmospheric transport of soil particles. The results demonstrate that present-day radioactive contamination of the STS is predominantly localized and is determined by the types of nuclear tests conducted and the subsequent redistribution of radionuclides in the environment.

Keywords: *Semipalatinsk Test Site (STS), radioactive contamination, artificial radionuclides, environmental components, radionuclide migration, tritium.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-196-203
УДК 539.14

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК АНАЛИЗА МАССОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ СОСТАВНОГО ЯДРА ^{241}Am, ПОЛУЧЕННОГО В РЕАКЦИИ ^{240}Pu(p,f) ПРИ ЭНЕРГИИ НАЛЕТАЮЩИХ ПРОТОНОВ 10 МэВ

Д.К.Алимов[1], А.Н. Пан[1,2*], К.В.Ковальчук[1], Н.Буртебаев[1,2], Д.М.Джансеитов[1], Р.К.Кошербаева[1]

[1]Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
[2]Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: a.pan@inp.kz*

Массово-энергетические распределения осколков деления образуются под действием большого количества макро- и микроскопических квантовых эффектов, связанных и с эффектами заряженной жидкой капли, и с образованием различных ядерных оболочек в зарождающихся осколках. Дополнительное влияние на конечное распределение оказывают энергия возбуждения составного ядра и вносимый угловой момент. Все это составляет вызов для анализа полученных данных на предмет присутствия/отсутствия различных оболочечных эффектов. Особенно это касается деформированных ядерных оболочек, которые по сравнению со сферическими оболочками обладают заметно меньшей энергетической выгодой образования и, как следствие, меньшим массовым вкладом. Поэтому выбор методики анализа оказывает значительное влияние на полученный результат. Для демонстрации этого мы анализируем массово-энергетические распределения осколков деления составного ядра ^{241}Am, полученного в реакции ^{240}Pu(p,f) при энергии налетающих протонов 10 МэВ, двумя методами. Первый метод – это более ранняя разработка, основанная на модели Брозы и учитывающая моды деления SL, S1, S2, S3 и использующая большое количество подбираемых параметров. Второй метод является модификацией первого, разработанной специально для выявления влияния деформированных ядерных оболочек с малыми вкладами. К его преимуществам относится сильное сокращение количества подбираемых параметров, что позволяет повысить его чувствительность. Применение второго метода позволяет выявить выходы отдельных оболочек Z50, N82 и отделить от них деформированные ядерные оболочки Z52, N84, несмотря на их близость по массовым выходам.

Ключевые слова: *массово-энергетические распределения; ^{241}Am; протоны; ^{240}Pu; моды деления; модальный анализ.*

Введение

Деление представляет собой один из наиболее сложных для исследования квантовых процессов. Во время этого процесса ядро подвергается воздействию большого количества квантовых и классических эффектов за короткий промежуток времени. В зависимости от энергии возбуждения составного ядра преобладать могут как оболочечные эффекты, так и эффекты заряженной жидкой капли. Для региона актинидных ядер Туркевичем и Нидаем [1] было замечено, что при низких энергиях возбуждения у разных ядер появляются очень схожие тяжелые осколки деления. Это породило гипотезу о независимых модах деления. Позднее, с развитием моделей ядерной структуры, Брозой [2] была представлена модель случайного разрыва нейтронной шейки, основываясь на которой в статье [3] выделялись три основные моды деления: SL (super-long или S – symmetric) – мода деления, образующаяся под действием эффектов заряженной жидкой капли и под действием которой образуются симметричные осколки деления; S1 – мода деления, которая образуется под действием оболочек Z50 и N82 в тяжелом осколке; S2 – мода деления, которая образуется под действием деформированной оболочки N88 в тяжелом осколке.

Позднее в экспериментальных работах было обнаружено проявление еще одной моды S3 [3], которую стали ассоциировать с ядерной оболочкой N50, образующейся в легком осколке. Это же исследование заложило основу метода разложения массово-энергетических распределений на вклады независимых мод деления, который получил развитие в [4]. Однако развитие направления расчета ядерных оболочек [5, 6, 7] показывает, что оболочки зависят от ядерной деформации. Но предложенный в [4] метод разложения требует подбора большого количества параметров, что уменьшает его чувствительность к вкладам от деформированных ядерных оболочек, которые, ввиду уменьшенной энергетической выгоды своего образования, имеют относительно малые выходы по сравнению с выходами сферических оболочек. Дополнительно позиция пика выхода асимметричных осколков, получаемая при использовании этого метода не соответствует позиции деформированной оболочки N88 из гипотезы о неизменности плотности заряда (unchanged charge density – UCD). Учитывая

все вышеперечисленное, была произведена модификация этого метода, направленная на уменьшение количества подбираемых параметров [8]. Для сравнения получаемых результатов анализа мы выбрали ранее опубликованные результаты экспериментальных измерений массово-энергетических распределений осколков деления составного ядра ^{241}Am*, полученного в реакции ^{240}Pu(p,f) при энергии налетающих протонов 10 МэВ [3]. Эти данные обладают хорошей статистикой (более 10^6). Энергия налетающих протонов ниже кулоновского барьера данной реакции и дает энергию возбуждения составного ядра около 14,4 МэВ. Столь низкая энергия позволяет сохранить преобладание асимметричного деления под действием оболочечных эффектов, что дает наилучший шанс обнаружения деформированных ядерных оболочек. Эффекты испускания нейтронов при столь низкой энергии возбуждения и особенности методики обработки экспериментальных данных, использованных в нашей статье, были детально обсуждены в [4]. Эффекты испускания нейтронов были признаны незначительными для данной реакции и энергии возбуждения. Применение модифицированного метода позволило выделить влияние оболочек Z50, Z52, N84, N88, N50.

Методы анализа

1.1. Метод анализа без задания жесткой формы массового выхода

Основным преимуществом более ранней методики анализа, представленной в [3, 4], является то, что она не накладывает ограничений на форму массового выхода отдельной моды деления. Эта методика основывалась на представлении двумерного массово-энергетического распределения $Y_{exp}(M, E_k)$ в следующем виде:

$$Y_{exp}(M, E_k) = Y_{exp}(M) * Y_{exp,M}(E_k) = \sum_i Y_i(M) * Y_{i,M}(E_k), \quad (2.1)$$

где: $Y_{exp}(M)$ – экспериментально измеренный (суммарный) относительный выход осколков с массой M; $Y_{exp,M}(E_k)$ – нормализированное распределение кинетических энергий осколков с массой M; индекс i обозначает моду деления; $Y_i(M)$ – выход масс i-й моды деления для массы M; $Y_{i,M}(E_k)$ – распределение полных кинетических энергий осколков i-ой моды деления для массы M.

Суммирование вкладов отдельных мод деления производится по следующим уравнениям:

$$Y_{exp}(M) = \sum_i Y_i(M), \quad (2.2)$$

$$\bar{E}_{k,exp}(M) = \sum_i \frac{Y_i(M)}{Y_{exp}(M)} * \bar{E}_{k,i}(M), \quad (2.3)$$

$$\sigma^2_{E,exp}(M) = \sum_i \left\{ \frac{Y_i(M)}{Y_{exp}(M)} * \sigma^2_{E,i}(M) + \sum_j \frac{Y_i(M) * Y_j(M)}{Y^2_{exp}(M)} * \left[\bar{E}_{k,i}(M) - \bar{E}_{k,j}(M)\right]^2 \right\}, \quad (2.4)$$

где: $\bar{E}_{k,exp}(M)$ – суммарное (экспериментально измеренное) распределение среднего значения полной кинетической энергии осколков деления; $\bar{E}_{k,i}(M)$ – распределение среднего полной кинетической энергии осколков деления i-ой моды деления для массы M; $\sigma^2_{E,exp}(M)$ – распределение суммарной дисперсии среднего полной кинетической энергии осколков деления; $\sigma^2_{E,i}(M)$ – распределение дисперсии среднего полной кинетической энергии осколков i-ой моды деления.

Для каждой моды деления среднее значение полной кинетической энергии и ее дисперсия определяются следующими формулами:

$$\bar{E}_{k,S}(M) = \bar{E}_{k,S}(A_{CN}/2) * (1 - \mu^2) * (1 + \lambda_S \mu^2), \quad (2.5)$$

$$\bar{E}^2_{k,S}(M)/\sigma^2_{E,S}(M) = const, \quad (2.6)$$

$$\mu = 1 - 2 * M/A_{CN}, \quad (2.7)$$

где: A_{CN} – масса составного ядра; λS – коэффициент отклонения распределения $\bar{E}_{k,s}$ от параболической формы.

Важно отметить, что в этом методе не применяется задание жесткой формы для $Y_i(M)$. Вместо этого распределение Шарли используется как форма энергетического распределения для каждой моды деления при каждой массе M:

$$\gamma_{1,S}(M) = \langle\left(E_k - \bar{E}_{k,S}(M)\right)^3\rangle / \sigma^3_{E,S}(M), \tag{2.8}$$

$$\gamma_{2,S}(M) = \langle\left(E_k - \bar{E}_{k,S}(M)\right)^4\rangle / \sigma^4_{E,S}(M) - 3, \tag{2.9}$$

$$Y_M(E_k) = \frac{f(u)}{\sigma_E(M)}\left[1 - \frac{\gamma_1}{6}(3u - u^3) + \frac{\gamma_2}{24}(u^4 - 6u^2 + 3)\right], \tag{2.10}$$

$$u = \frac{E_k - E_k(M)}{\sigma_E(M)}, f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \tag{2.11}$$

где: γ_1 – коэффициент асимметрии; γ_2 – коэффициент избытка (если оба этих коэффициента равны нулю, то распределение Шарли преобразуется в Гауссово распределение).

Для оценки точности разложения используется критерий χ^2:

$$\chi^2(M) = \sum_{E_k}\left\{\frac{1}{\delta^2(M,E_k)}\left[\sum_i Y_i(M) * Y_{i,M}(E_k) - Y_{exp}(M,E_k)\right]^2\right\}, \tag{2.12}$$

где $\delta^2(M,E_k)$ – погрешность экспериментальных измерений.

Этот критерий минимизируется, если следующее условие выполняется для всех мод деления:

$$\frac{\partial\chi^2(M)}{\partial Y_i(M)} = 2 * \sum_{E_k}\left\{\frac{Y_{i,M}(E_k)}{\delta^2(M,E_k)}\left[\sum_j Y_j(M) * Y_{j,M}(E_k) - Y_{exp}(M,E_k)\right]\right\} = 0. \tag{2.13}$$

В результате в этом методе для каждой точки распределения по массе идет разложение энергетического распределения на сумму нескольких распределений Шарли, по одному для каждой моды деления. Это позволяет очень хорошо описывать полученные экспериментальные данные, но уменьшает чувствительность метода из-за большого количества подбираемых параметров. Количество подбираемых параметров в этом методе зависит от ширины по массе исследуемого экспериментального распределения.

2.2. Метод анализа с повышенной чувствительностью

Основной идеей для повышения чувствительности метода разложения было сокращение количества подбираемых параметров. Для этого в новом методе, описанном в [8], был произведен переход от распределения Шарли для энергетических распределений осколков деления к распределению Гаусса для массовых распределений осколков деления. Большинство остальных формул осталось без изменения как в методе [3,4]:

$$Y_i(m) = A_{im} * e^{-\frac{(m-m_i)^2}{2*\sigma^2_{im}}},$$

$$< TKE >_i (m) = A_{iTKE} * (1 - \left(1 - 2 * \frac{m}{A_{cn}}\right)^2) * (1 + b_i * (1 - 2 * \frac{m}{A_{cn}})^2), \tag{2.15}$$

$$\sigma^2_{<TKE>_i}(m) = p_i * < TKE >^2_i (m), \tag{2.16}$$

где: m – массовое число; $Y_i(m)$ – массовый вклад моды деления; A_{im} – амплитуда в пике вклада моды деления; m_i – положение пика массового вклада моды деления; σ^2_{im} – ширина пика массового вклада моды деления; $<TKE>_i(m)$ – распределение среднего полной кинетической энергии моды деления; A_{iTKE} – амплитуда в пике выхода среднего полной кинетической энергии моды деления; A_{cn} – масса составного ядра; b_i – коэффициент отклонения распределения от параболического распределения (если этот коэффициент равен нулю, то получается чистое параболическое распределение); $\sigma^2_{<TKE>_i}(m)$ – распределение дисперсии среднего полной кинетической энергии моды деления; ρ_i – коэффициент пропорциональности распределения дисперсии среднего полной кинетической энергии моды деления и распределения среднего полной кинетической энергии моды деления.

Распределения отдельных мод складываются по следующим формулам:

$$Y_{tot}(m) = \sum_i Y_i(m), \tag{2.17}$$

$$< TKE >_{tot} (m) = \sum_i < TKE >_i (m) * \frac{Y_i(m)}{Y_{tot}(m)}, \tag{2.18}$$

$$\sigma^2_{<TKE>_{tot}}(m) = \sum_i \frac{Y_i(m)}{Y_{tot}(m)} * \sigma^2_{<TKE>_i}(m) + \sum_{i,j}\frac{Y_i(m) * Y_j(m)}{Y^2_{tot}(m)} * (< TKE >_i (m) - < TKE >_j (m))^2, i < j, \tag{2.19}$$

где: $Y_{tot}(m)$ – массовое распределение суммы разложенных мод деления; $<TKE>_{tot}$ – суммарное распределение среднего полной кинетической энергии мод деления; i, j – индексы мод деления; $\sigma^2_{<TKE>_{tot}}(m)$ – суммарное распределение дисперсии среднего полной кинетической энергии мод деления.

В качестве критерия достоверности полученного разложения была выбрана минимизация χ^2:

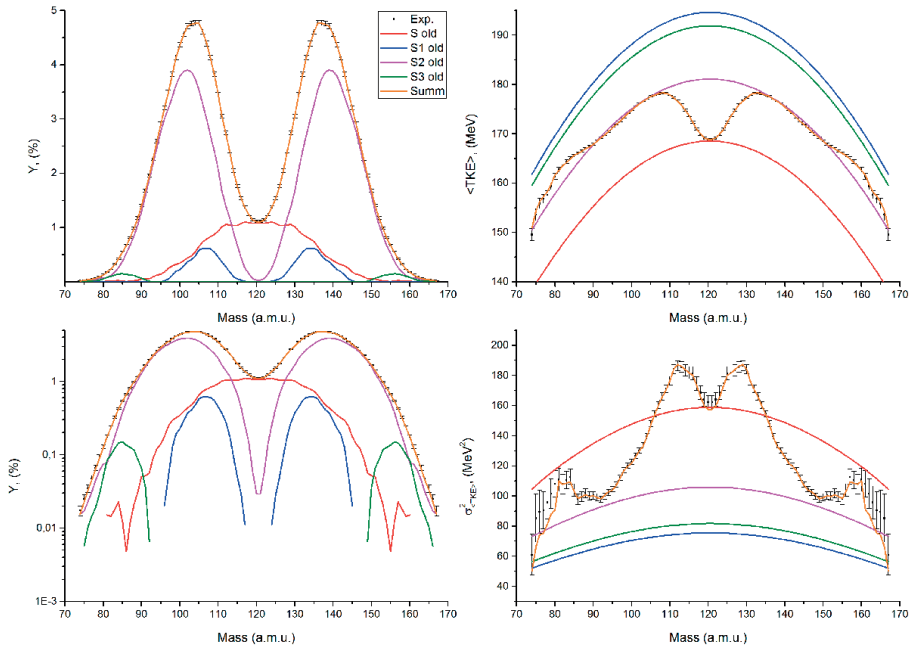
$$\chi^2 = \sum_m \frac{(Y_{exp}(m) - Y_{tot}(m))^2}{Y_{err}(m)^2} + \sum_m \frac{(< TKE >_{exp}(m) - < TKE >_{tot}(m))^2}{< TKE >_{err}(m)^2} + \sum_m \frac{(\sigma^2_{<TKE>_{exp}}(m) - \sigma^2_{<TKE>_{tot}}(m))^2}{\sigma^2_{<TKE>_{err}}(m)^2}, \quad (2.20)$$

где: $Y_{err}(m)$ – статистическая ошибка измерения экспериментальных массовых распределений осколков деления; $<TKE>_{err}(m)$ – статистическая ошибка экспериментально измеренного распределения среднего полной кинетической энергии осколков деления; $\sigma^2_{<TKE>_{err}}$ – статистическая ошибка экспериментально измеренного распределения дисперсий среднего полной кинетической энергии осколков деления.

Этот метод позволил значительно снизить количество подбираемых параметров. В нем нет зависимости этого количества от ширины массовых распределений – только зависимость от количества мод деления включаемых в анализ. При недостаточном количестве мод в анализе будет либо невозможно описать экспериментальные данные, либо полученные результаты не будут иметь физического смысла.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны результаты применения старого метода анализа. В массовом распределении вклад симметричной моды S по форме близок к плато от центра массового до массы ~130 а.е.м. Асимметричные моды S1 и S2 также имеют дополнительные «плечи» в выходе масс со стороны более асимметричных осколков.



Exp – экспериментальные данные со статистическими погрешностями; Summ – сумма полученных из разложения вкладов отдельных мод деления; S – вклад симметричной моды деления; S1 – вклад асимметричной моды деления; S2– вклад асимметричной моды деления;S3 – вклад асимметричной моды деления.

Рисунок 1. Разложение массово-энергетических распределений осколков деления составного ядра ^{241}Am, полученного в реакции ^{240}Pu(p,f) при энергии налетающих протонов 10 МэВ методом, описанным в [3,4], на вклады отдельных мод деления. В левом верхнем углу показано массовое распределение осколков в линейном масштабе, в левом нижнем углу оно представлено в логарифмическом масштабе. В правом верхнем углу показано распределение среднего полной кинетической энергии, в правом нижнем углу распределение его дисперсии. Черными точками показаны экспериментальные данные со статистическими погрешностями, оранжевой линией – сумма полученных из разложения вкладов отдельных мод деления, красной линией – вклад симметричной моды деления S, синей линией – вклад асимметричной моды деления S1, малиновой линией – вклад асимметричной моды деления S2, зеленой линией – вклад асимметричной моды деления S3, темно-красной линией – вклад от ядерной оболочки Z50.

Результаты применения нового метода показаны на рисунке 2. Мы приписываем ядерные оболочки пикам в массовом распределении, используя гипотезу о неизменной плотности заряда (UCD). То есть, к какому значению ядерной оболочки ближе позиция пика в массовом распределении, той оболочке оно и будет приписано. Для достижения соответствия результатов анализа с экспериментальными данными к стандартной модели Брозы [2,3] с 4 модами деления необходимо ввести изменения. Мода деления S1 представлена как сумма двух гауссовых распределений: деформированной оболочки Z52 (позиция пика из анализа 133 а.е.м., по UCD 131.92 а.е.м.) и сферической оболочки N82 (позиция пика из анализа 136 а.е.м., по UCD 135,36 а.е.м.). Ядерная оболочка Z50 (позиция пика из анализа 127.5 а.е.м., по UCD 126,84 а.е.м.) выведена отдельно. Мода деления S2 представлена как сумма двух гауссовых распределений: деформированной оболочки N84 (позиция пика из анализа 137.6 а.е.м., по UCD 138.66 а.е.м.) и деформированной оболочки N88 (позиция пика из анализа 145 а.е.м, по UCD 145.26 а.е.м.). Видно, что для почти всего диапазона данных этот метод дает хорошее соответствие экспериментальным данным с приемлемо малыми отклонениями на некоторых участках. Включение в анализ деформированной оболочки Z52 и выделение сферической оболочки Z50 в отдельную от S1 моду деления было продиктовано дисперсией среднего полной кинетической энергии осколков и большим удалением (по массе) пика Z50 от N82. Дополнительно, без этого разделения описать дисперсию этим методом было бы невозможно, так как ее пик приходится на ~ 129 а.е.м. Мы обосновываем включение деформированной оболочки Z52 и сферической оболочки N82 в одну моду деления близостью по массам пиков образуемых ими осколков. Также теоретические расчеты [6, 7] показывают, что размывание сферических оболочек не является одномоментным. Имеются регионы деформации, при которых деформированные ядерные оболочки могут сосуществовать со сферическими. Деформированная оболочка N84 включена в анализ, так как позиция пика асимметричных осколков приходится на 138. Из гипотезы о неизменной плотности заряда деформированная оболочка N84 должна приходиться на 138,6 а.е.м. для исследуемого составного ядра. Деформированная оболочка N88 по этой гипотезе должна приходиться на 145,3 а.е.м., что слишком далеко от позиции пика асимметричных осколков. При попытке полностью исключить N88 из анализа, невозможно одновременно описать центральную и краевую части массовых распределений.

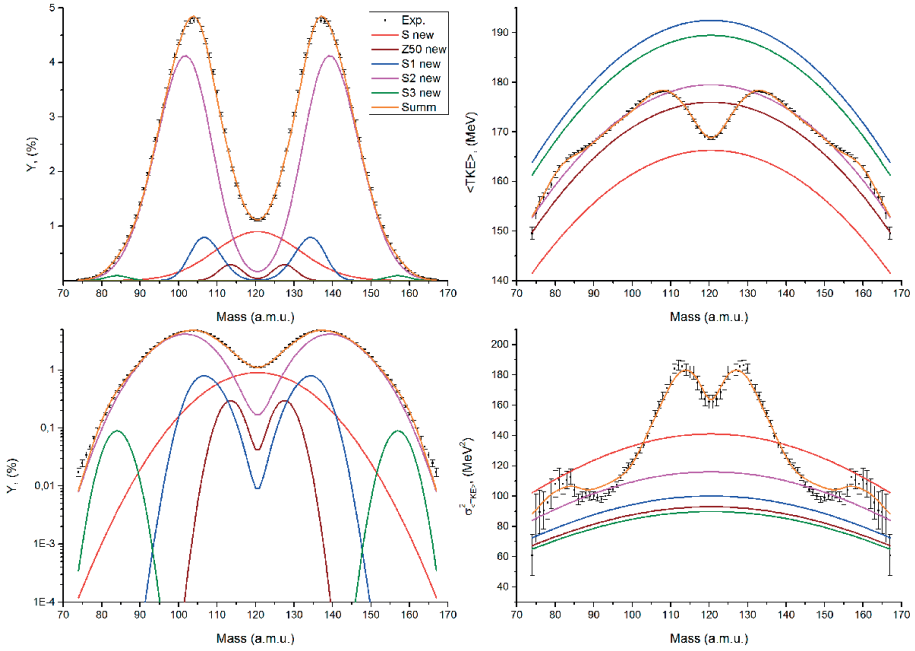
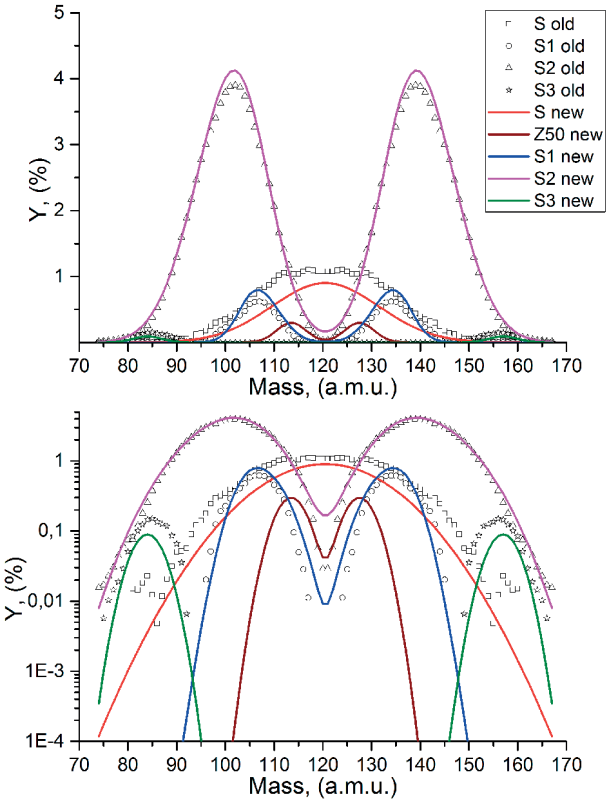


Рисунок 2. Разложение массово-энергетических распределений осколков деления составного ядра 241Am полученного в реакции 240Pu(p,f) при энергии налетающих протонов 10 МэВ методом, описанным в [8] на вклады отдельных мод деления. В левом верхнем углу показано массовое распределение осколков в линейном масштабе, в левом нижнем углу оно представлено в логарифмическом масштабе. В правом верхнем углу показано распределение среднего полной кинетической энергии, в правом нижнем углу распределение его дисперсии. Черными точками показаны экспериментальные данные со статистическими погрешностями, оранжевой линией – сумма полученных из разложения вкладов отдельных мод деления, красной линией – вклад симметричной моды деления S, синей линией – вклад асимметричной моды деления S1, малиновой линией – вклад асимметричной моды деления S2, зеленой линией – вклад асимметричной моды деления S3, темно-красной линией – вклад от ядерной оболочки Z50.

В обоих методах использовались разные критерии χ^2. Если использовать формулу 2.20, мы получим следующие цифры: для первого метода суммарное квадратичное отклонение разложений от экспериментальных данных составило 54,24, для второго метода это отклонение составляет 792. При этом в первом методе количество подбираемых параметров составляет 149, а во втором методе – 36. Резкое ограничение количества подбираемых параметров во втором методе не позволяет добиться схожих цифр квадратичного отклонения, но освобождает количество подбираемых параметров от зависимости от ширины по массе анализируемых данных.

На рисунке 3 показаны сравнения массовых распределений мод деления, полученных в результате анализа обоими методами. Можно заметить, что для моды S2 обе методики дают очень похожие данные на всем протяжении массовых распределений, немного отличаясь лишь в амплитуде пика и в центральном регионе массовых распределений. На краях массового распределения отличие в амплитуде вклада моды S3 объясняется большей долей вклада моды S2 за счет пика деформированной ядерной оболочки N88 в результате нового метода анализа. Вклад моды деления S1 также имеет относительно малые различия между методами анализа. В центральном регионе заметны наибольшие отличия между результатами анализа этими двумя методами. Вклад симметричной моды деления S, полученный старым методом, имеет выраженные «плечи», после которых идет заметный спад вклада этой моды. В новом анализе эти «плечи» переходят к сферической оболочке Z50. Ее сумма с вкладом моды деления S очень близко повторяет по форме вклад моды деления S из анализа старым методом, различаясь в основном только амплитудой вклада. В энергетических распределениях оба метода дают очень близкие друг к другу результаты.



методом [4] – символы; методом [8] – линии в линейном и логарифмическом масштабах.

Рисунок 3. Сравнение массовых выходов мод деления в линейном (верхний график) и логарифмическом (нижний график) масштабах.

Заключение

Массово-энергетические распределения осколков деления составного ядра ^{241}Am, полученного в реакции ^{240}Pu(p,f) при энергии налетающих протонов 10 МэВ, были разложены на вклады отдельных мод деления двумя методами. Оба метода дали близкие друг к другу результаты в энергетических распределениях. В массовых распределениях применение нового метода анализа, чувствительного к малым вкладам деформированных оболочек, благодаря меньшему количеству подбираемых параметров разложения, позволило разделить вклады отдельных ядерных оболочек Z50, Z52, N84, N88, N50. В отличие от результатов более старого метода, для получения удовлетворительного схождения анализа и экспериментальных данных сферическая ядерная оболочка Z50 была выделена отдельно от моды деления S1. Сама мода деления S1 была представлена деформированной оболочкой Z52 и сферической оболочкой N82 за счет их крайне близких, пересекающихся позиций в массовом распределении. По результатам анализа мода деления S2 была представлена в основном деформированной оболочкой N84 (так как позиция пика выхода асимметричных осколков находится рядом с расчетной позицией по гипотезе UCD) и, в значительно меньшей степени, деформированной оболочкой N88.

Данное исследование финансировалось Министерством энергетики Республики Казахстан. Программа BR23891530 «Развитие комплексных научных исследований в области ядерной и радиационной физики на базе казахстанских ускорительных комплексов».

Литература / References:

1. A. Turkevich and J.B. Niday, Radiochemical Studies on the Fission of Th232 with Pile Neutrons, Phys. Rev. volume 84, num. 1, 1951. https://doi.org/10.1103/PhysRev.84.52
2. U. Brosa, S. Grossmann and A. Muller, Nuclear Scission, Physics Reports 197, No. 4, 1990, p. 167-262. https://doi.org/10.1016/0370-1573(90)90114-H
3. S.I. Mulgin, V.N. Okolovich, S.V. Zhdanova, Observation of new channel in the proton-induced low-energy fission of nuclei from ^{233}Pa to ^{245}Bk, Phys. Lett. B 462, 1999, p. 29-33. https://doi.org/10.1016/S0370-2693(99)00859-X
4. S.I. Mulgin, S.V. Zhdanov, N.A. Kondratiev, K.V. Kovalchuk, A. Ya. Rusanov, The modal structure of fragment mass and energy yields from the 10.3-30.0 MeV proton induced fission of ^{232}Th and ^{235}U, Nucl. Phys. A 824, 2009, p.1-23. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2009.03.013
5. B.D. Wilkins, E.P. Steinberg and R.R. Chasman, Scission-point model of nuclear fission based on deformed-shell effects, Phys. Rev. C, vol. 14, No. 1, 1976. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.14.1832
6. S. Cwiok and W. Nazarewicz, Ground-state shapes and spectroscopic properties of Z~58, N~88 nuclei, Nucl. Phys. A 469, 1989, p. 367-384 https://doi.org/10.1016/0375-9474(89)90180-2
7. G. Scamps and C. Simenel, Impact of pear-shaped fission fragments on mass-asymmetric fission in actinides, Nature, vol. 564, 2018, p. 382-385 https://doi.org/10.1038/s41586-025-08882-7
8. A.N. Pan, N. Burtebayev, K.V. Kovalchuk, T.N. Kvochkina, Shell effects in the reaction ^{232}Th(α,f) at incident alpha particles energy of 29 MeV, Вестник НЯЦ РК, 2023, выпуск 2 https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-4-8

10 МэВ ЭНЕРГИЯСЫНДАҒЫ ПРОТОНДАРДЫҢ ^{240}Pu(p,f) РЕАКЦИЯСЫНДА АЛЫНҒАН ^{241}Am ҚҰРАМА ЯДРОСЫНЫҢ БӨЛІНУ ФРАГМЕНТТЕРІНІҢ МАССАЛЫҚ-ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТАРАЛУЫН ТАЛДАУ ӘДІСТЕМЕЛЕРІН САЛЫСТЫРУ

Д. К. Алимов[1], А. Н. Пан[1,2*], К. В. Ковальчук[1], Н. Буртебаев[1,2], Д. М. Джансеитов[1], Р. К. Кошербаева[1]

[1] Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: a.pan@inp.kz*

Бөліну фрагменттерінің масса-энергетикалық таралулары макро- және микроскопиялық кванттық эффектілердің үлкен жиынтығының әсерінен қалыптасады. Бұл эффектілер зарядталған сұйық тамшы эффектілерімен қатар, жаңадан түзілетін бөліну фрагменттерінде әртүрлі ядролық қабықшалардың қалыптасуымен де байланысты. Сонымен қатар, соңғы таралуға құрама ядроның қозу энергиясы мен оған енгізілетін бұрыштық момент те әсер етеді. Мұның барлығы алынған деректерді әртүрлі қабықшалық эффектілердің бар-жоғын анықтау тұрғысынан талдауды күрделі міндетке айналдырады. Бұл мәселе әсіресе деформацияланған ядролық қабықшаларға қатысты маңызды. Олар сфералық қабықшалармен салыстырғанда түзілу кезінде айтарлықтай төмен энергетикалық тиімділікке ие және соның нәтижесінде массаға қосатын үлесі де аз болады. Сондықтан талдау әдістемесін таңдау алынатын нәтижеге айтарлықтай әсер етеді. Осыны көрсету мақсатында біз 10 МэВ энергиядағы ұшып келетін протондардың ^{240}Pu(p,f) реакциясы нәтижесінде түзілген ^{241}Am құрама ядросының бөліну фрагменттерінің масса-энергетикалық таралуларын екі әдіспен талдаймыз. Бірінші әдіс – Брозаның моделіне негізделген және бөлінудің SL, S1, S2, S3 модаларын ескеретін, сондай-ақ көптеген параметрлерді іріктеуді қажет ететін бұрын әзірленген әдіс. Екінші әдіс – бірінші әдістің модификациясы болып табылады және аз үлесі бар деформацияланған ядролық қабықшалардың әсерін анықтау үшін арнайы әзірленген. Оның негізгі артықшылықтарының бірі – іріктелетін параметрлер санының айтарлықтай қысқартылуы, бұл әдістің сезімталдығын арттыруға мүмкіндік береді. Екінші әдісті қолдану жеке қабықшалардың Z=50, N=82 шығымдарын анықтауға және олардан шығымдары бойынша бір-біріне жақын орналасқан деформацияланған ядролық қабықшаларды Z=52, N=84 ажыратуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *массалық-энергетикалық таралулар, ^{241}Am, протондар, ^{240}Pu, бөліну модалары, модалық талдау.*

COMPARISON OF METHODS FOR ANALYZING THE MASS-ENERGY DISTRIBUTIONS OF FISSION FRAGMENTS USING THE EXAMPLE OF THE DISTRIBUTIONS OF FRAGMENTS OF THE COMPOUND NUCLEUS ^{241}Am OBTAINED IN THE REACTION ^{240}Pu(p,f AT AN INCIDENT PROTON ENERGY OF 10 MeV

D. K. Alimov[1], A. N. Pan[1,2*], K. V. Kovalchuk[1], N. Burtebayev[1,2], D. M. Dzhanseitov[1], R.K.Kosherbaeva[1]

[1] Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: a.pan@inp.kz*

The mass-energy distributions of fission fragments are formed by a large number of macroscopic and microscopic quantum effects associated with both charged liquid droplet effects and the formation of various nuclear shells in nascent fragments. Additionally, the final distribution is influenced by the excitation energy of the compound nucleus and the introduced angular momentum. All of this poses a challenge in analyzing experimental data for the presence/absence of various shell effects. This is particularly true for deformed nuclear shells, which, compared to spherical shells, have a significantly lower energy advantage for formation and, consequently, a smaller mass contribution. Therefore, the choice of analysis technique significantly influences the obtained result. To demonstrate this, we analyze the mass-energy distributions of fission fragments of the compound nucleus ^{241}Am produced in the ^{240}Pu(p,f) reaction at an incident proton energy of 10 MeV using two methods. The first method is an earlier development based on the Broza model and takes into account the SL, S1, S2, and S3 fission modes, using a large number of fit parameters. The second method is a modification of the first, developed specifically to identify the influence of deformed nuclear shells with small contributions. Its advantages include a significant reduction in the number of fit parameters, which increases its sensitivity. The second method makes it possible to identify the yields of individual Z50 and N82 shells and separate them from the deformed Z52 and N84 nuclear shells, despite their similar mass yields.

Keywords: *mass-energy distributions; ^{241}Am; protons; ^{240}Pu; fission modes; modal analysis.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-204-209
УДК 621.039.73

ЭКОНОМИКО-ПРАВОВАЯ МОДЕЛЬ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

А.О. Сиябеков*, А.Т. Торгаев

ТОО «Казахстанские атомные электрические стнции»

** E-mail для контактов: a.siyabekov@knpp.kz*

Разработана экономико-правовая модель принятия управленческого решения о внедрении рекомендательной системы искусственного интеллекта (ИИ) для предиктивной диагностики вращающегося оборудования атомной электростанции (АЭС). Модель объединяет функциональные ограничения, требования к данным, независимой валидации, компьютерной безопасности, человеческому контролю и управлению изменениями с затратами жизненного цикла и инвестиционными показателями проекта. Для оценки фактически реализуемого эффекта предложен интегральный коэффициент, учитывающий качество модели, охват оборудования, доступность данных и использование рекомендаций персоналом. Расчет выполнен для энергоблока с водо-водяным энергетическим реактором электрической мощностью 1200 МВт (ВВЭР-1200) в постоянных ценах 2026 года. В базовом сценарии чистая приведенная стоимость (NPV) проекта составляет 2,648 млн долл. США, внутренняя норма доходности (IRR) – 29,33%, дисконтированный срок окупаемости – 4,90 года. Порог реализованной результативности равен 43,32%. Снижение приведенной стоимости электроэнергии (LCOE) составляет 0,075 долл. США/МВт·ч и характеризует локальный эксплуатационный эффект, а не радикальное изменение конкурентоспособности АЭС. Обосновано поэтапное внедрение с решением о масштабировании только после подтверждения технических, правовых и экономических критериев на данных пилотной эксплуатации.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, АЭС, ВВЭР-1200, предиктивная диагностика, правовое регулирование, человеческий контроль, NPV, IRR, LCOE.*

Введение

Интеллектуальные системы все шире применяются для обработки эксплуатационных данных, выявления аномалий и поддержки технического обслуживания энергетического оборудования. Для атомной электростанции технологическая полезность алгоритма является необходимым, но недостаточным условием внедрения. Решение владельца должно одновременно учитывать допустимые функциональные границы, последствия ошибочных рекомендаций, качество исходных данных, компьютерную безопасность, ответственность участников, затраты жизненного цикла и подтвержденный экономический эффект. Иначе проект оценивается либо как абстрактная цифровая инициатива, либо как финансовая модель, в которой обязательные требования безопасности ошибочно принимаются за необязательную нагрузку.

Общие принципы применения ИИ в Республике Казахстан определены Законом «Об искусственном интеллекте», который предусматривает риск-ориентированный подход и обязанности участников жизненного цикла системы [1]. На объектах использования атомной энергии эти нормы должны применяться совместно с отраслевым законодательством [2], требованиями к персональным данным и информатизации [3, 4]. Документы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) рассматривают внедрение ИИ как управляемый процесс, охватывающий данные, верификацию и валидацию, взаимодействие человека с системой, киберзащиту и управление изменениями [5–8]. Однако в научной литературе правовые требования и инвестиционная эффективность часто анализируются раздельно. В результате отсутствует прозрачный механизм перевода требований в архитектуру, бюджет, сроки и критерии решения владельца АЭС.

Цель исследования – разработать экономико-правовую модель принятия решения о внедрении рекомендательной системы ИИ для предиктивной диагностики вращающегося оборудования условного энергоблока ВВЭР-1200. Научная новизна состоит в совместном учете нормативных ограничений, организационной реализуемости и приростного денежного потока, а также во введении порогового показателя фактически реализованной результативности. Практический результат представляет собой набор контрольных условий, при которых проект следует продолжить, доработать, остановить или масштабировать.

Материалы и методы

Объектом практической оценки является рекомендательная система предиктивной диагностики насосов, электродвигателей, турбинного и вспомогательного оборудования, не относящегося к систе-

мам безопасности. Система получает вибрационные, температурные, акустические и эксплуатационные данные, выявляет признаки развивающихся дефектов и формирует предупреждение специалисту. Она не управляет оборудованием, не изменяет технологические уставки, не выполняет ремонтные действия и не заменяет решение персонала. Окончательное эксплуатационное решение принимает уполномоченный работник, а исходные данные, версия модели, рекомендация, решение и результат проверки регистрируются. Такое ограничение снижает риск передачи алгоритму критических полномочий и формирует проверяемый причинный след.

Методология объединяет системный и сравнительно-правовой анализ, управление жизненным циклом цифровой системы, инвестиционный анализ и сценарное моделирование. Дополнительно использованы результаты авторского опроса 179 респондентов. Опрос имел разведывательный характер и не рассматривается как репрезентативная оценка всей отрасли: 50% участников полностью поддержали внедрение ИИ, еще 35% – при наличии ограничений; 60% назвали неопределенность ответственности основным правовым риском, а 55% поддержали строгий государственный контроль. Эти результаты подтверждают необходимость фиксировать полномочия человека, ответственность и процедуру допуска системы, но не заменяют производственную проверку модели.

Экономическая модель состоит из двух контуров. Первый контур оценивает приведенную стоимость электроэнергии условного энергоблока за жизненный цикл. Второй рассматривает ИИ как самостоятельный приростный проект на горизонте десяти лет. Все денежные показатели представлены в постоянных ценах 2026 года в миллионах долларов США. Инфляция, налоги, кредитное финансирование и проценты не учитываются; используется реальный денежный поток до финансирования и налогообложения. Реальная ставка дисконтирования принята равной 8% для LCOE энергоблока и 12% для проекта ИИ. Исходные значения являются авторским сценарным набором, а не данными конкретной АЭС.

Потенциальный эффект разделен на независимые каналы: предотвращенный простой; снижение стоимости аварийных ремонтов без повторного включения запасных частей и трудозатрат; сокращение расхода запасных частей; оптимизация разрешенных регламентом операций планового обслуживания; уменьшение трудозатрат на диагностику и снижение необоснованных ремонтных воздействий. При оценке простоя используется маржинальный доход, а не полная выручка. Затраты на проверку ложных предупреждений учитываются в OPEX. Предотвращение тяжелой ядерной или радиационной аварии не монетизируется: безопасность выступает обязательным нефинансовым ограничением.

Для связи технических характеристик системы с фактическим производственным результатом введен коэффициент реализованной результативности:

$$P = К \times О \times Д \times И \qquad (1)$$

где: К – подтвержденное качество диагностической модели; О – доля целевого оборудования, охваченного системой; Д – доступность и качество данных; И – фактическое использование обоснованных рекомендаций персоналом.

Мультипликативная форма отражает ограничивающий фактор: высокая точность модели не создает эффекта при недостатке данных, узком охвате или отсутствии действий со стороны персонала. Реализованный эффект определяется как произведение потенциального эффекта, Р и коэффициента освоения системы в соответствующем году.

$$CF_t = Эреал,_t - ИИИ,_t - ОИИ,_t - R_t, \qquad (2)$$

где: CF_t – приростный денежный поток; $Эреал,_t$ – подтвержденный эффект; $ИИИ,_t$ – первоначальные инвестиции; $ОИИ,_t$ – эксплуатационные расходы, включая проверку ложных предупреждений; R_t – повторные инвестиции в обновление инфраструктуры и валидацию.

По потоку рассчитаны NPV, IRR, индекс рентабельности, простой и дисконтированный сроки окупаемости. LCOE после внедрения определяется на той же базе, что и исходный LCOE: затраты и экономия отражаются в числителе, а дополнительная выработка от сокращения простоя – в знаменателе.

Правовые требования как параметры проекта

Правовое регулирование не должно ограничиваться проверкой наличия общих положений в договоре. Каждое требование необходимо преобразовать в управленческое действие, документ, ответственного участника, контрольную точку и статью затрат. В инвестиционной модели такие требования отражаются через капитальные затраты (CAPEX) и эксплуатационные расходы (OPEX). В противном случае обязательные мероприятия появляются после разработки модели и вызывают переработку архитектуры, задержку допуска и рост бюджета. Предлагаемая связь требований с инвестиционной моделью представлена в таблице 1.

Наиболее существенное решение – это сохранение рекомендательного режима. Оно не освобождает владельца от проверки системы, но отделяет аналитическую функцию от автоматического управления. Любая рекомендация должна сопровождаться идентификатором модели, исходными данными, уровнем уверенности и объяснением факторов, повлиявших на результат. Работник обязан иметь возможность отклонить рекомендацию с фиксацией основания. Это позволяет анализировать как ошибки алгоритма, так и причины неиспользования корректных предупреждений.

Таблица 1. Связь правовых требований с параметрами проекта

Требование	Управленческая реализация	Влияние на проект
Человеческий контроль	Рекомендательный режим; регламент решений; журналирование	Интерфейс, обучение и аудит
Независимая валидация	Программа испытаний; независимый отчет; критерии допуска	CAPEX и сроки
Качество и защита данных	Паспорт данных; контроль полноты; разграничение доступа	Инфраструктура и OPEX
Компьютерная безопасность	Сегментация; контроль обмена; мониторинг	CAPEX, OPEX и срок ввода
Управление изменениями	Реестр версий; оценка воздействия; повторная валидация	Повторные инвестиции
Распределение ответственности	Матрица распределения ответственности (RACI); договорные роли; порядок эскалации	Юридические затраты

Компьютерная безопасность должна проектироваться одновременно с архитектурой данных. Для рассматриваемой функции предпочтительна изолированная или строго сегментированная среда с контролируемым односторонним либо регламентированным обменом, управлением учетными записями, журналированием и проверкой обновлений. Подключение системы к технологическим сетям не может обосновываться удобством интеграции. Рекомендации МАГАТЭ требуют поддерживать компьютерную безопасность в течение всего жизненного цикла и учитывать риски поставщиков, разработчиков и интеграторов [7, 8].

Изменение модели после промышленного ввода рассматривается как изменение конфигурации, а не обычное обновление программного обеспечения. Переобучение на новых данных может изменить чувствительность к дефектам, частоту ложных сигналов и область применимости. Поэтому новая версия проходит оценку воздействия, регрессионные испытания и повторную валидацию в объеме, соответствующем характеру изменения. Эти действия формируют плановые OPEX и повторные инвестиции; предположение о неизменной эксплуатации одной модели в течение десяти лет признано недопустимым.

Результаты экономической оценки

Базовый расчет условного энергоблока выполнен при мощности брутто 1200 МВт, доле собственных нужд 7%, коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ) 90%, семилетнем строительстве, 60-летней эксплуатации и капитальных затратах 6,6 млрд долл. США. При реальной ставке 8% LCOE составляет 97,23 долл. США/МВт·ч, из которых 74,55 долл. США/МВт·ч, или 76,67%, приходится на капитальную составляющую. При ставке 5% LCOE снижается до 67,93 долл. США/МВт·ч, а при 10% возрастает до 120,15 долл. США/МВт·ч. Следовательно, влияние стоимости капитала и строительства существенно выше потенциального эффекта локальной диагностической системы.

Для проекта ИИ первоначальные инвестиции составляют 3,20 млн долл. США и распределяются по первым трем годам в размере 1,20, 1,10 и 0,90 млн долл. США. На шестой год предусмотрены обновление вычислительной инфраструктуры и повторная валидация стоимостью 0,50 млн долл. США. Полный ежегодный OPEX после промышленного ввода равен 0,75 млн долл. США. Освоение эффекта принято равным 0% в первый год, 15% во второй, 50% в третий и 100% с четвертого года.

Потенциальный годовой эффект до применения Р составляет 3,555 млн долл. США: 1,205 млн – предотвращенные потери маржинального дохода при сокращении простоя на 24 часа; 0,900 млн – снижение стоимости аварийных ремонтов; 0,450 млн – экономия запасных частей; 0,550 млн – оптимизация планового обслуживания; 0,250 млн – сокращение трудозатрат диагностики; 0,200 млн – снижение необоснованных ремонтных воздействий. Для базового сценария К = 0,90, О = 0,85, Д = 0,90 и И = 0,87, поэтому Р составляет 59,90%.

При указанных предпосылках NPV равна 2,648 млн долл. США, IRR – 29,33%, индекс рентабельности – 2,03. Простой срок окупаемости составляет 4,00 года, дисконтированный – 4,90 года от начала проекта. Положительный результат не является доказательством безусловной выгодности технологии: он справедлив только при достижении принятого уровня К, О, Д и И, соблюдении графика допуска и подтверждении независимых каналов экономии. Сопоставление консервативного, базового и оптимистичного сценариев приведено в таблице 2.

Таблица 2. Сценарные результаты проекта ИИ

Сценарий	Р, %	NPV, млн долл. США	IRR, %	Решение владельца
Консервативный	25,59	−4,478	–	Остановить или доработать
Базовый	59,90	2,648	29,33	Ограниченно внедрять при выполнении условий
Оптимистичный	81,45	7,632	68,03	Масштабировать после подтверждения данных

Консервативный сценарий учитывает снижение компонентов P, рост первоначальных и эксплуатационных расходов на 20% и более медленное освоение. Отрицательная NPV показывает, что точность алгоритма или сам факт внедрения не создают экономического эффекта. Оптимистичный сценарий допустимо использовать для масштабирования, но не для утверждения первоначального бюджета до завершения пилота. Базовый сценарий означает ограниченный промышленный ввод с контрольными условиями, а не автоматическое распространение системы на все оборудование.

Чувствительность к ставке дисконтирования умеренна: NPV снижается с 5,041 млн долл. США при 5% до 0,415 млн долл. США при 25%. Значительно сильнее влияет P: при 40% NPV равна −0,530 млн долл. США, при 50% – 1,067 млн долл. США. Точный порог безубыточности составляет 43,32%. Задержка промышленного ввода на один год снижает NPV до 1,011 млн долл. США, на два года – до −0,451 млн долл. США. Следовательно, своевременная валидация и киберприемка имеют не только правовое, но и прямое экономическое значение. Рассчитанные пороговые условия инвестиционного решения приведены в таблице 3.

Таблица 3. Пороговые условия инвестиционного решения

Пороговый показатель	**Значение**	**Управленческое применение**
Минимальный P	43,32%	Ниже порога масштабирование запрещается
Минимальный потенциальный эффект	2,571 млн долл. США/год	Проверка достаточности каналов экономии
Минимальный реализованный эффект	1,540 млн долл. США/год	Контроль фактического денежного результата
Минимальное сокращение простоя	4,40 ч/год	При сохранении остальных каналов эффекта
Максимальные первоначальные инвестиции	6,123 млн долл. США	Верхняя граница при неизменных OPEX и P
Максимальный полный OPEX	1,277 млн долл. США/год	Превышение требует пересмотра проекта

Пороговые значения должны использоваться как условия контрольных точек и договора, а не как показатели, которые поставщик подтверждает расчетным заявлением. Денежный эффект признается только при наличии причинной цепочки: предупреждение системы – инженерная проверка – решение уполномоченного работника – выполненное воздействие – подтвержденный результат – финансовая оценка. Экономия, не подтвержденная техническими и финансовыми подразделениями владельца, не включается в расчет масштабирования.

После полного ввода дополнительная годовая выработка вследствие сокращения простоя составляет 16 043 МВт·ч. LCOE снижается с 97,229 до 97,154 долл. США/МВт·ч; абсолютное изменение равно 0,075 долл. США/МВт·ч, относительное – 0,078%. Такой результат следует трактовать как локальное снижение эксплуатационных потерь. Он несопоставим по масштабу с влиянием ставки дисконтирования, капитальных затрат и срока сооружения и не подтверждает тезис о радикальном повышении конкурентоспособности АЭС за счет одной системы ИИ.

Обсуждение и управленческие рекомендации

Полученные результаты показывают двойственное влияние правовых требований. Независимая валидация, защита данных, сегментация, журналирование, обучение и управление версиями увеличивают CAPEX, OPEX и продолжительность проекта.

Рекомендуемая схема включает последовательные контрольные точки. На этапе обследования утверждаются перечень оборудования, базовая статистика отказов и методика подтверждения эффекта. После подготовки данных модель проверяется на исторических выборках и работает в теневом режиме. Ограниченная опытная эксплуатация начинается только после независимой валидации. Решение о промышленном вводе принимается при отсутствии недопустимых пропущенных дефектов, приемлемой частоте ложных сигналов, P выше 43,32% и положительной прогнозной NPV по фактическим данным. Масштабирование допускается после устойчивого выполнения критериев в нескольких контрольных периодах.

Распределение ответственности должно охватывать владельца, эксплуатирующую организацию, разработчика, интегратора, поставщика оборудования, подразделение технического обслуживания, подразделение информационной безопасности и юридическую службу. Владелец отвечает за инвестиционное решение, утверждение критериев эффективности и контроль полученных выгод; эксплуатирующая организация – за допуск системы и применение рекомендаций в установленных эксплуатационных границах; разработчик – за документированность, воспроизводимость и заявленные характеристики модели; интегратор – за корректность интерфейсов, конфигурации и передачи данных; поставщик оборудования – за достоверность передаваемых параметров и предоставление допустимых диапазонов эксплуатации; подразделение технического обслуживания – за инженерную проверку предупреждений и подтверждение результата выполненных воздействий; подразделение информационной безопасности – за сегментацию, управление доступом, мониторинг и реагирование на инциденты; юридическая служба – за соответствие договоров, обработки данных и распределения ответственности законодательству. Договор не должен

переносить ответственность за эксплуатационное решение на алгоритм или неопределенное «лицо, использующее ИИ».

Ограничением исследования является сценарный характер производственных и стоимостных параметров. Модель не учитывает налоги, финансирование и особенности рынка электроэнергии конкретного владельца. До утверждения инвестиций должны быть уточнены состав оборудования, статистика отказов, длительность простоев, стоимость ремонтных операций, запасных частей и трудозатрат, цена ложных сигналов и маржинальный доход. Авторский опрос также имеет разведывательный характер. Эти ограничения не отменяют результат, поскольку модель предназначена прежде всего для структурирования решения и замены сценарных значений подтвержденными данными предприятия.

Заключение

Разработанная экономико-правовая модель переводит требования к ИИ в контролируемые и количественно измеряемые параметры проекта: архитектуру, роли участников, документы, контрольные точки, CAPEX, OPEX, сроки и коэффициент реализованной результативности. Для базового сценария проекта рекомендательной предиктивной диагностики ВВЭР-1200 получены NPV 2,648 млн долл. США, IRR 29,33% и дисконтированный срок окупаемости 4,90 года. Порог P равен 43,32%, а двухлетняя задержка ввода делает NPV отрицательной.

Практически обоснован поэтапный подход: пилотирование на ограниченном перечне оборудования, независимая валидация, изолированная архитектура, обязательный человеческий контроль и регистрация причинного следа. Масштабирование допустимо только при положительной NPV по фактическим данным, выполнении требований безопасности и киберзащиты и устойчивом превышении пороговой результативности. Ядерная и радиационная безопасность остаются нефинансовыми ограничениями и не используются для искусственного увеличения экономического эффекта.

Литература / References:

1. Закон Республики Казахстан от 17 ноября 2025 года № 230-VIII ЗРК «Об искусственном интеллекте» (с изм. по состоянию на 24.06.2026) // ИПС «Әділет». URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2500000230.
2. Закон Республики Казахстан от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК «Об использовании атомной энергии» // ИПС «Әділет». URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1600000442.
3. Закон Республики Казахстан от 21 мая 2013 года № 94-V «О персональных данных и их защите» // ИПС «Әділет». URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1300000094.
4. Закон Республики Казахстан от 24 ноября 2015 года № 418-V ЗРК «Об информатизации» // ИПС «Әділет». URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1500000418.
5. International Atomic Energy Agency. Considerations for Deploying Artificial Intelligence Applications in the Nuclear Power Industry. Nuclear Energy Series No. NR-T-1.26. Vienna: IAEA, 2025. DOI: 10.61092/iaea.s6uy-wjt8.
6. International Atomic Energy Agency. Leadership and Management for Safety. Safety Standards Series No. GSR Part 2. Vienna: IAEA, 2016. DOI: 10.61092/iaea.cq1k-j5z3.
7. International Atomic Energy Agency. Computer Security Techniques for Nuclear Facilities. Nuclear Security Series No. 17-T (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2021.
8. International Atomic Energy Agency. Computer Security Approaches to Reduce Cyber Risks in the Nuclear Supply Chain. Vienna: IAEA, 2022.
9. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. URL: https://www.iso.org/standard/71194.html.
10. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 1: General guidelines. URL: https://www.iso.org/standard/63180.html.
11. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20. P. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
12. Lei Y. et al. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 104. P. 799–834. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.11.016.
13. OECD Nuclear Energy Agency, International Energy Agency. Projected Costs of Generating Electricity 2020. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_51110/projected-costs-of-generating-electricity-2020-edition.

АЭС ЖАБДЫҒЫНА ТЕХНИКАЛЫҚ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТІ ЕНГІЗУДІҢ ЭКОНОМИКАЛЫҚ-ҚҰҚЫҚТЫҚ МОДЕЛІ

А. О. Сиябеков*, А. Т. Торгаев

Қазақстандық атом электр станциялары

** Байланыс үшін e-mail: a.siyabekov@knpp.kz*

Атом электр станциясының (АЭС) айналмалы жабдығын болжамды диагностикалауға арналған жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі ұсынымдық жүйені енгізу жөніндегі басқарушылық шешімнің экономикалық-құқықтық моделі әзірленді. Модель функционалдық шектеулерді, деректерді басқару, тәуелсіз валидация, компьютерлік қауіпсіздік, адам бақылауы және өзгерістерді басқару талаптарын жүйенің өмірлік цикл шығындарымен және инвестициялық көрсеткіштермен байланыстырады. Модель сапасын, жабдықты қамтуды, деректердің қолжетімділігін және персоналдың ұсынымдарды пайдалануын ескеретін іске асырылған нәтижелілік коэффициенті ұсынылды. Есеп электр қуаты 1200 МВт су-сулы энергетикалық реакторы бар шартты энергоблок (ВВЭР-1200) үшін 2026 жылғы тұрақты бағамен орындалды. Базалық сценарийде жобаның таза келтірілген құны (NPV) 2,648 млн долларды, кірістіліктің ішкі нормасы (IRR) 29,33%-ды, дисконтталған өтелу мерзімі 4,90 жылды құрайды. Нәтижеліліктің залалсыздық шегі 43,32%-ға тең. Электр энергиясының келтірілген құнының (LCOE) төмендеуі 0,075 долл./МВт·сағ құрайды және бұл АЭС бәсекеге қабілеттілігінің түбегейлі өзгеруі емес, жергілікті пайдалану әсері ретінде бағаланады. Масштабтау пилоттық пайдалану деректері бойынша техникалық, құқықтық және экономикалық өлшемшарттар расталғаннан кейін ғана жүзеге асырылуы тиіс.

Түйін сөздер: *жасанды интеллект, атом электр станциясы, ВВЭР-1200, болжамды диагностика, құқықтық реттеу, адам бақылауы, NPV, IRR, LCOE.*

ECONOMIC AND LEGAL MODEL FOR IMPLEMENTING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NUCLEAR POWER PLANT EQUIPMENT MAINTENANCE

A. Siyabekov*, A. Torgayev

Kazakhstan Nuclear Power Plants, LLP

** E-mail for contacts: a.siyabekov@knpp.kz*

An economic and legal model is developed to support management decisions on implementing an artificial intelligence (AI)-based advisory system for predictive diagnostics of rotating equipment at a nuclear power plant (NPP). The model links functional boundaries, data governance, independent validation, computer security, human oversight and change management requirements with life-cycle costs and investment indicators. An integrated realized-performance coefficient is proposed to account for model quality, equipment coverage, data availability and personnel use of recommendations. The assessment is performed for a hypothetical water-water energetic reactor unit rated at 1200 MWe (VVER-1200) in constant 2026 prices. In the baseline scenario, the project's net present value (NPV) is USD 2.648 million, its internal rate of return (IRR) is 29.33%, and the discounted payback period is 4.90 years. The break-even realized-performance coefficient is 43.32%. The reduction in the levelized cost of electricity (LCOE) is USD 0.075/MWh and should be interpreted as a localised operational effect rather than a radical improvement in NPP competitiveness. A staged implementation approach is justified, with scaling allowed only after technical, legal, and economic criteria have been confirmed using pilot-operation data.

Keywords: *artificial intelligence, n uclear p ower p lant, V VER-1200, predictive d iagnostics, l egal regulation, human oversight, NPV, IRR, LCOE.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-210-219
УДК 621.039.51

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОБЪЕМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ СОПРЯЖЕНИЯ CFD- И MCNP-РАСЧЕТОВ

Д.М. Секен[1,2*], О.М. Жанболатов[1], А.С. Сураев[1,2], Р.А. Иркимбеков[1], Н.Е. Мухамедов[1,2]

[1]Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2]Шәкәрім университет, Семей, Казахстан

** E-mail для контактов: seken@nnc.kz*

В работе представлена методика моделирования динамики объемного распределения топлива на основе сопряжения теплофизических и нейтронно-физических расчетов. Разработан алгоритм автоматизированного преобразования результатов CFD-моделирования в расчетную модель MCNP. Методика позволяет учитывать изменение геометрии, фазового состава и пространственного распределения топлива и конструкционных материалов в процессе деградации и плавления топлива. Для этого разработано программное обеспечение, обеспечивающее обработку данных теплофизических расчетов, построение расчетных решеток различного типа, реализацию алгоритма углового дублирования и автоматическое формирование входных данных для нейтронно-физических расчетов. В отличие от традиционного подхода, основанного на создании набора отдельных нейтронно-физических моделей для фиксированных стадий деградации топлива, разработанная методика позволяет выполнять расчеты энерговыделения для любого состояния экспериментального устройства, полученного в результате теплофизического моделирования. Проведена валидация разработанной нейтронно-физической модели объекта испытаний с топливом в составе модели реактора ИГР путем сравнения расчетных результатов с данными спектрометрических исследований. Полученные результаты могут быть использованы при расчетном сопровождении экспериментов по исследованию процессов деградации и плавления ядерного топлива, а также при разработке сопряженных методик теплофизического и нейтронно-физического моделирования для реакторных исследований.

Ключевые слова: *нейтронно-физическое моделирование, облучательные устройства, ИГР, энерговыделение, MCNP, CFD, сопряженные расчеты, твэл.*

Введение

В настоящее время исследования поведения ядерного топлива в переходных и аварийных режимах являются одним из приоритетных направлений в работах по обоснованию безопасности атомной энергетики. Особый интерес представляют процессы деградации и плавления топлива, сопровождающиеся изменением его геометрии, перераспределением материалов и изменением нейтронно-физических характеристик системы. Для проведения подобных исследований в Национальном ядерном центре Республики Казахстан используется исследовательский импульсный графитовый реактор ИГР, позволяющий изучать быстропротекающие физические процессы, которые, согласно теоретическим предсказаниям, могут развиваться в активных зонах реакторных установок в случае нарушений баланса между теплосъемом и энерговыделением в реакторном топливе.

В ходе реакторных экспериментов происходит интенсивное изменение параметров исследуемого объекта, связанное с нагревом топлива, разрушением оболочек твэлов, плавлением конструкционных материалов и последующим перераспределением расплава. Изменение пространственного распределения материалов оказывает существенное влияние на нейтронное поле и энерговыделение в объекте испытаний. В связи с этим при подготовке экспериментов важной задачей является обеспечение заданных параметров испытаний и прогнозирование поведения топлива на различных стадиях деградации.

Традиционно решение данной задачи основывается на проведении серии вспомогательных реакторных экспериментов и разработке отдельных нейтронно-физических моделей для фиксированных состояний топлива. Такой подход требует значительных трудозатрат и не позволяет учитывать непрерывное изменение геометрии и состава материалов в процессе развития аварийных процессов.

В настоящее время для анализа поведения ядерного топлива широко применяются методы теплофизического моделирования, основанные на использовании CFD-кодов [1,2]. Данные методы позволяют получать распределения температуры, объемных долей материалов и фазового состава среды на различных этапах развития процесса. Однако применение только теплофизического моделирования не обеспечивает возможности детального анализа изменения нейтронно-физических характеристик системы, поскольку CFD-коды не предназначены для моделирования процессов переноса нейтронов и расчета энерговыделения.

Для решения данной задачи используются нейтронно-физические коды, основанные на методе Монте-Карло. Одним из наиболее распространенных инструментов является код MCNP, позволяющий выполнять высокоточные расчеты потоков нейтронов, энерговыделения и других нейтронно-физических характеристик [3]. Вместе с тем, непосредственное использование результатов CFD-моделирования в расчетах MCNP затруднено вследствие различий в способах представления геометрии, материалов и расчетных сеток. Это требует разработки специализированных алгоритмов преобразования данных, обеспечивающих корректный перенос результатов теплофизического моделирования в нейтронно-физическую модель.

В отличие от традиционного подхода, основанного на создании набора отдельных нейтронно-физических моделей для различных стадий деградации топлива, в настоящей работе реализована методика автоматизированного формирования расчетной модели MCNP непосредственно на основе результатов теплофизического моделирования [4,5]. Разработанный подход позволяет учитывать изменение пространственного распределения топлива и конструкционных материалов, полученное в ходе CFD-расчетов, и выполнять расчеты энерговыделения для любого состояния экспериментального устройства.

Целью работы является разработка и валидация методики автоматизированного преобразования результатов теплофизического моделирования в нейтронно-физическую модель MCNP для анализа энерговыделения на различных стадиях деградации и плавления топлива.

Методы сопряжения нейтронно-физических и теплофизических расчетов часто применяются при расчетных исследованиях исследовательских реакторов, в том числе ИГР [6]. Данные расчетные методики предназначены, в первую очередь, для исследования характеристик самого реактора. Однако на данный момент методика исследования изменения удельного энерговыделения топлива в экспериментальной сборке с помощью сопряжения двух различных расчетных программ недостаточно разработана и мало представлена в публикациях.

Следовательно, научная новизна работы заключается в разработке алгоритма автоматизированного преобразования результатов CFD-моделирования в трехмерную нейтронно-физическую модель MCNP, позволяющего выполнять расчеты энерговыделения для произвольного состояния экспериментального устройства без необходимости ручного построения отдельных расчетных моделей. В представленном методе моделируется изменение формы топлива экспериментального устройства с целью исследования непосредственно именно параметров самой сборки. Основной сложностью является изменение формы и пространственного расположения топлива, изменение материального состава топливо-стальной смеси в ходе эксперимента. Для построения геометрии в нейтронно-физической модели необходимо производить учет каждого элемента с его характеристиками. Основной идеей методики является наложение на определенную область экспериментальной сборки сетчатой структуры. С помощью разработанного алгоритма в каждой ячейке определяется основная материальная фракция, и таким образом строится определенное состояние топлива в конкретный момент времени.

Нейтронно-физическая модель

Разработка нейтронно-физической модели объекта испытаний с тепловыделяющей сборкой стандартной конструкции (ТВССК) проводилась в составе нейтронно-физической модели реактора ИГР для возможности проведения расчетов в программе MCNP [7]. В качестве основы использована верифицированная модель реактора ИГР [6], подробно описывающая его активную зону.

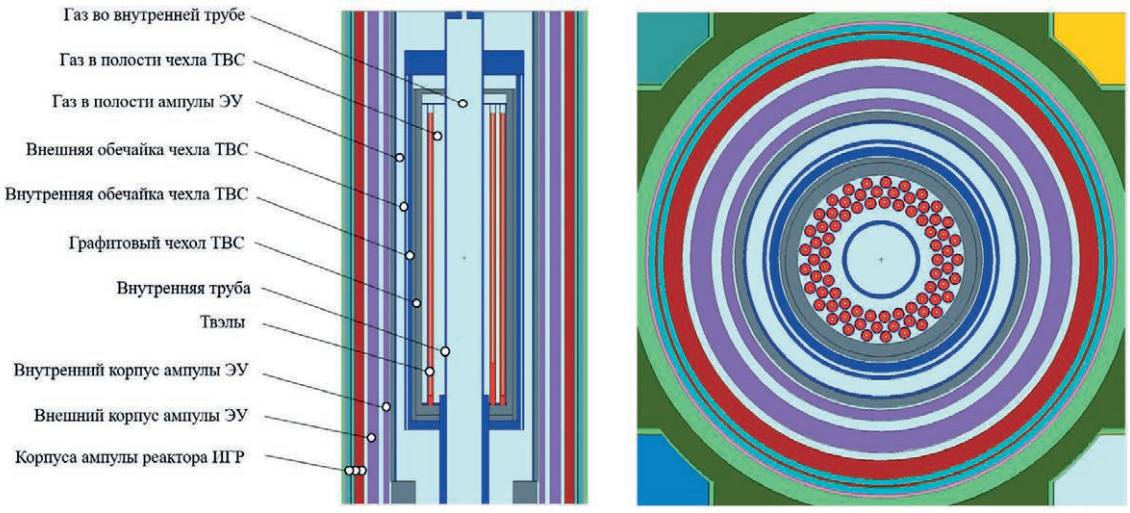


Рисунок 1. Объединенная расчетная модель «объект испытаний с ТВССК – реактор ИГР»

Нейтронно-физическая модель (рисунок 1) подробно описывает объект испытаний с ТВССК, с соблюдением всех размерно-материальных характеристик и свойств. Особенностью рассматриваемой задачи является локальный характер процессов плавления и перераспределения материалов. В ходе эксперимента деградации подвергаются только топливные элементы ТВССК, тогда как окружающие конструкционные элементы сохраняют свою геометрию и физические свойства.

Графитовый стакан, окружающий тепловыделяющую сборку, обладает высокой термостойкостью и в рассматриваемых режимах не достигает температур плавления. Вследствие этого его геометрические размеры и материальный состав остаются неизменными на протяжении всего эксперимента.

Расплав топлива и конструкционных материалов локализуется внутри ограниченной области, соответствующей расположению ТВССК, и не распространяется за пределы графитового стакана. По этой причине моделирование динамики перераспределения материалов выполнялось только для области размещения 75 твэлов тепловыделяющей сборки.

При построении модели выполнено упрощение геометрии: топливо, оболочка твэлов и внутренние полости представлены в виде концентрических колец с сохранением их геометрических объемов и высот. Это упрощение позволило сократить время расчета и повысить устойчивость сходимости.

Теплофизический расчет

Для получения информации о пространственном распределении топлива и конструкционных материалов в процессе деградации твэлов были выполнены теплогидравлические расчеты в среде ANSYS Fluent. Расчеты проводились для экспериментального устройства с ТВССК с использованием модели многофазного течения, позволяющей учитывать процессы плавления, перемещения и перераспределения материалов внутри исследуемой области [8].

В ходе расчета определялись объемные доли топлива (UO_2), стали и газовой фазы, а также распределение температуры в различные моменты времени. Полученные данные использовались в качестве исходной информации для последующего формирования нейтронно-физической модели.

На рисунке 2 представлены результаты теплофизического моделирования на временных шагах 25,2 с и 27,3 с. На начальном этапе наблюдается локальный нагрев топливной композиции с образованием областей повышенной температуры в центральной части твэлов. По мере развития процесса температура топлива достигает значений, соответствующих началу плавления, что сопровождается изменением распределения материалов внутри расчетной области.

Анализ распределения объемных долей показывает, что в процессе нагрева происходит перераспределение топливной композиции и конструкционных материалов. При этом максимальные температуры локализуются в области расположения топлива, тогда как окружающие конструкционные элементы и графитовый стакан сохраняют свою геометрию и не участвуют в процессе плавления.

Полученные поля температуры и объемных долей материалов экспортируются из CFD-модели и далее используются разработанным программным обеспечением для автоматического формирования расчетной решетки MCNP. Для каждой расчетной ячейки определяется доминирующий материал на основе объемных долей фаз, после чего формируется нейтронно-физическая модель, соответствующая текущему состоянию экспериментального устройства.

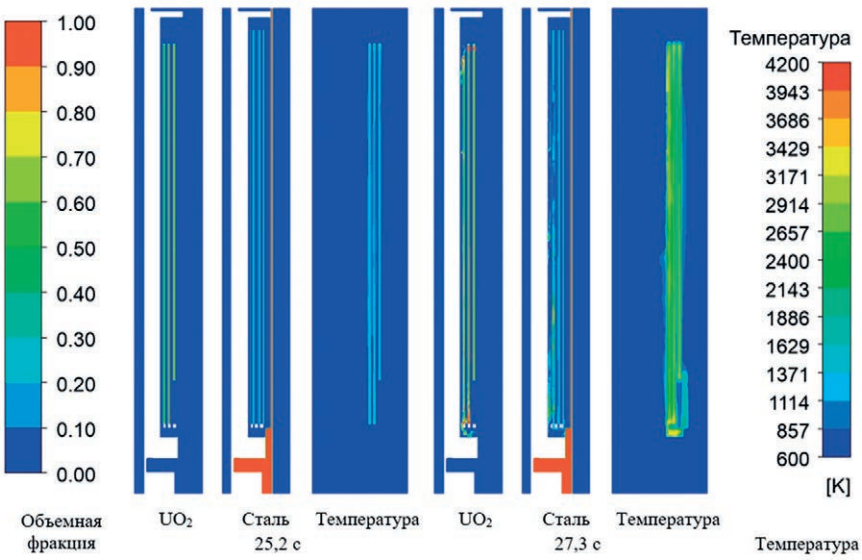


Рисунок 2. Распределение объемной фракции диоксида урана, стали и температуры

Методика моделирования деформации топлива

При проведении реакторных экспериментов, связанных с исследованием процессов плавления и деградации ядерного топлива, существенное значение имеет изменение пространственного распределения топлива и конструкционных материалов в процессе нагрева. По мере развития моделируемого аварийного процесса происходит разрушение оболочек твэлов, плавление топливной композиции и перераспределение расплава внутри экспериментального устройства, что приводит к изменению нейтронно-физических характеристик системы и, как следствие, распределения энерговыделения.

Традиционный подход к расчетному сопровождению подобных экспериментов основывается на разработке серии отдельных нейтронно-физических моделей MCNP, каждая из которых соответствует определенной стадии деградации топлива. Для анализа изменения энерговыделения выполняются расчеты для нескольких заранее заданных состояний экспериментального устройства: исходного состояния твэлов, разогретого состояния твэлов, состояния после разрушения оболочек твэлов, а также состояний с последовательным удалением отдельных рядов топлива. Данный подход довольно хорошо себя зарекомендовал на практике для оценки влияния отдельных стадий деградации на нейтронно-физические характеристики. Однако у него существуют определенные недостатки: значительные трудозатраты на подготовку расчетных моделей (до нескольких дней), человеческий фактор, и сложность обеспечения соответствия данных между различными состояниями экспериментальной сборки в процессе плавления.

В настоящей работе реализован новый подход, основанный на использовании результатов теплофизического моделирования для автоматизированного формирования нейтронно-физической модели. В процессе CFD-моделирования рассчитывается пространственное распределение топлива, конструкционных материалов и газовой фазы на различных этапах развития аварийного процесса [9]. Полученные данные экспортируются и обрабатываются разработанным программным обеспечением, которое автоматически формирует расчетную решетку MCNP, соответствующую текущему состоянию экспериментального устройства.

Программный алгоритм преобразования результатов численного моделирования представлен на рисунке 3. Основной задачей программы является построение расчетной решетки (lattice) с последующим определением материального состава каждой ячейки на основе данных о распределении фаз и термогидродинамических параметров. На первом этапе осуществляется считывание данных о расчетных элементах, полученных из теплофизического расчета на определенный момент времени в виде текстового файла. Данные включают в себя порядковый номер элемента, его координаты, температуру, плотность, объем, а также объемные доли материалов (VOF - Volume of Fluid). Эти данные формируют массив элементарных объемов, полученных в результате CFD-расчета. Следует отметить, что теплогидравлические данные считываются программой мгновенно.

Далее выполняется чтение геометрии расчетной области, представленной в виде решетки, параметры которой задаются пользователем. Сюда входят размеры сетки и ее тип (гексагональная и квадратная).

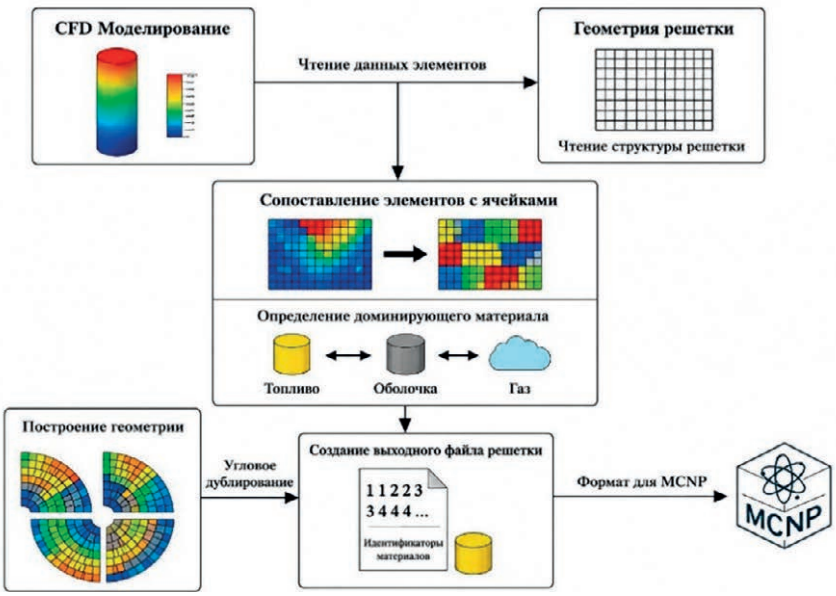


Рисунок 3. Схема алгоритма преобразования результатов CFD-моделирования ANSYS в расчетную решетку для нейтронно-физических расчетов в коде MCNP

Данные инструменты являются стандартными средствами для моделирования повторяющихся структур.

Следующим этапом является сопоставление элементов CFD с ячейками расчетной решетки. Для каждой ячейки определяется доминирующий материал. Для этого проводится перебор данных массива элементов, и с учетом геометрических размеров и расположения ячейки решетки определяется принадлежность данного элемента к ячейке. Затем определяется доминирующая материальная фракция данного элемента. Классификация материала в ячейке расчетной сетки осуществляется по максимальному значению количества элементов соответствующей фазы, что позволяет однозначно задать материал ячейки (например, топливо, оболочка или газ). Время работы в данной фазе зависит от выбранных пользователем размеров решетки.

Дополнительно реализован алгоритм углового дублирования (полярной симметрии), позволяющий восстановить полную геометрию системы на основе расчетов. Это существенно снижает вычислительные затраты при сохранении точности представления пространственного распределения материалов.

На заключительном этапе формируется выходной файл решетки, в котором каждой ячейке присваивается числовой идентификатор материала. Полученная структура используется в дальнейшем для задания геометрии и материального состава в расчетах с использованием кода MCNP.

Разработанный подход обеспечивает автоматизированный перенос результатов термогидродинамического моделирования в нейтронно-физическую постановку задачи. В данном исследовании рассматривалось общее представление расчетного метода, как потенциально возможного в будущей перспективе. Исследование сеточной сходимости является важной задачей и обязательно будет проводиться в последующих работах по данной тематике.

Типы используемых решеток

В рамках построения нейтронно-физической модели используются различные типы расчетных решеток, обеспечивающие дискретизацию пространственной области и задание геометрии системы. Выбор типа решетки определяется особенностями геометрии объекта исследования и требованиями к точности моделирования. В работе реализована поддержка двух основных типов решеток: прямоугольной и гексагональной (рисунок 4).

Прямоугольная (квадратная) решетка представляет собой регулярную структуру, основанную на декартовой системе координат. Ячейки такой решетки имеют форму параллелепипедов и равномерно распределены по пространству с заданным шагом по осям X, Y и Z. Основным преимуществом данного типа решетки является простота реализации и удобство индексации элементов, что делает ее эффективной при моделировании областей с регулярной геометрией. Однако в задачах, связанных с описанием плотной упаковки топливных элементов, прямоугольная решетка может приводить к дополнительным геометрическим приближениям.

Гексагональная решетка применяется для более точного описания структуры активной зоны ядерных реакторов. В поперечном сечении такая решетка имеет шестиугольную форму ячеек, что позволяет более адекватно моделировать плотную упаковку твэлов. При этом в трехмерной постановке каждая ячейка представляет собой призму, вытянутую вдоль оси Z, то есть по высоте ячейки сохраняют форму параллелепипеда, а гексагональная структура проявляется только в плоскости XY. Данный тип решетки обеспечивает более корректное воспроизведение геометрии и, как следствие, нейтронно-физических характеристик системы, однако требует более сложных алгоритмов определения принадлежности элементов и поиска соседних ячеек.

В разработанном алгоритме тип решетки определяется на этапе считывания входных данных по параметру lat. В зависимости от значения данного параметра осуществляется выбор соответствующего способа задания геометрии, вычисления границ ячеек и построения трехмерного массива решетки.

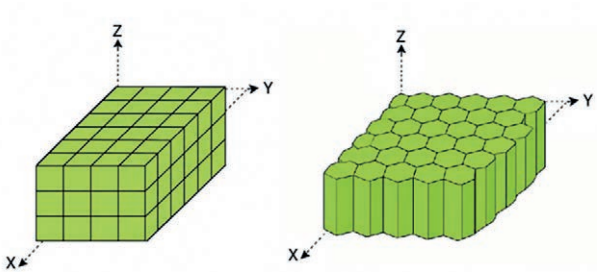


Рисунок 4. Типы используемых решеток

Отдельно стоит сказать о влиянии размера решетки на геометрическую интерпретацию расплава. Безусловно, с уменьшением размеров ячеек решетки улучшается качество воспроизведения расплава топлива.

Угловое дублирование

Теплофизическое моделирование выполнялось в двумерной постановке задачи в среде ANSYS Fluent. Для использования полученных результатов в нейтронно-физических расчетах методом Монте-Карло в коде MCNP, требующих трехмерного описания геометрии, реализован алгоритм углового дублирования. Данный алгоритм обеспечивает преобразование двумерного распределения материалов в трехмерную расчетную модель с сохранением пространственных характеристик исследуемой системы. Метод углового дублирования основан на использовании полярной симметрии объекта исследования. Каждый расчетный элемент исходного сектора характеризуется коорди-

натами центра ячейки и набором физических параметров. В данной работе рассматривается только применение квадратной расчетной решетки. Необходимо учитывать, что при использовании каждого типа решетки алгоритм дублирования имеет свои особенности, что будет рассмотрено в последующих работах. Следует отметить, что угловое дублирование применимо только в случае осесимметричной модели. В противном случае, необходимо строить непосредственно полноразмерную модель, поскольку угловое дублирование будет работать некорректно.

В данном теплогидравлическом расчете использовалась упрощенная геометрия, то есть топливо, оболочки твэлов и межтвэльные полости построены в виде колец, что продиктовано осевой симметрией модели. В случае квадратной решетки для формирования полной модели координаты элемента последовательно поворачиваются относительно центральной оси системы на заданный угол. В дальнейших исследованиях по развитию данной темы планируется реализовать подробное описание каждого вида решеточной структуры с алгоритмом дублирования ячеек.

Преобразование координат выполняется согласно выражениям:

$$x' = x \cdot \cos\varphi - y \cdot \sin\varphi$$
$$y' = x \cdot \sin\varphi + y \cdot \cos\varphi$$

где x и y - координаты исходного элемента, x’ и y’ - координаты после поворота, φ - угол поворота.

Количество операций дублирования определяется отношением полного угла окружности к угловому размеру расчетного сектора. Для каждого нового положения сохраняются все физические характеристики исходного элемента, что обеспечивает корректное восстановление пространственного распределения материалов.

После выполнения процедуры дублирования формируется полный массив расчетных элементов, который используется для построения трехмерной решетки нейтронно-физической модели. Применение данного подхода позволяет сформировать трехмерную нейтронно-физическую модель на основе результатов двумерного теплофизического расчета. Преобразование данных теплофизического расчета с данной геометрией при считывании данных и составлении нейтронно-физической модели составляет порядка 30 минут.

На основе полученных распределений объемных долей материалов выполняется автоматическое построение расчетной решетки MCNP, пример которой представлен на рисунке 5.

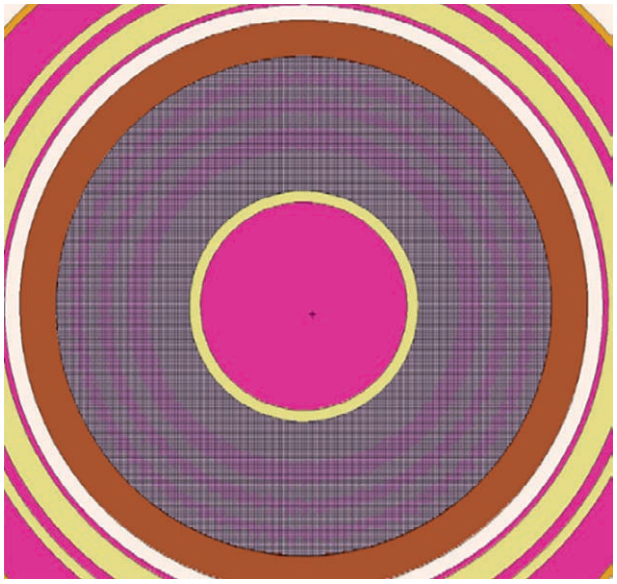


Рисунок 5. Моделирование топлива после обработки данных

Верификация и валидация модели

Валидация алгоритма преобразования производилась с использованием трехмерной теплофизической модели. Трехмерная теплофизическая модель представляла собой 1/16 часть устройства, поскольку топливная сборка является осесимметричной. Как показали расчеты, для достижения сходимости, временной шаг был задан равным 10^{-5} с. К сожалению, при имеющихся вычислительных мощностях на проведение теплофизического расчета потребовалось довольно длительное время, и расчеты с данной моделью не проводились. Однако, трехмерная модель подходит для верификации алгоритма.

Для верификации использовалась квадратная решетка с различным размером сетки (0,11 и 0,055 см). Результаты работы программы с различными размерами решетки в сравнении с трехмерной теплофизической моделью представлены на рисунке 6, сравнение масс между теплофизической моделью и решетчатой структурой представлено в таблице 1. Целью верификации являлась проверка способности алгоритма воспроизводить геометрию и распределение массы топлива, полученные в детализированной теплофизической модели. Для этого сравнивались форма топливной композиции и масса топлива в каждом ряду для различных размеров расчетной решетки.

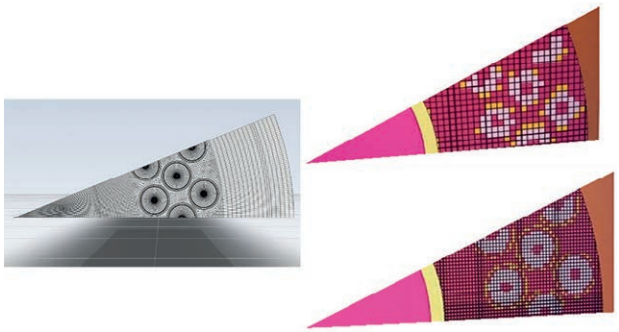


Рисунок 6. Верификация работы программы по данным трехмерной теплофизической модели

Таблица 1. Масса топлива в зависимости от размера решетки

	Масса в теплофизической модели, г	Масса при размере решетки 0,11 см, г	Масса при размере решетки 0,055 см, г
Внутренний ряд	155.1	161.4 (+4%)	157.7 (+2%)
Средний ряд	175.2	187.9 (+7%)	181.4 (+4%)
Внешний ряд	175.2	182.4 (+4%)	179.6 (+2%)

Валидация при использовании меньшей расчетной сетки по массе топлива составляет от 2% до 4% в различных рядах топлива.

Валидация нейтронно-физической модели объекта испытаний с ТВССК проводилась путем сравнения нейтронно-физических характеристик, полученных при проведении спектрометрических исследований топлива физического макета экспериментального устройства с ТВССК после его облучения в ИГР, с расчетными данными, полученными с помощью разработанной нейтронно-физической модели объекта испытаний с ТВССК [8]. Валидация проводилась для начального состояния экспериментального устройства.

Дополнительно проведена валидация разработанной методики преобразования результатов теплофизического моделирования в нейтронно-физическую модель. Для этого выполнено сопоставление распределений удельного энерговыделения, полученных для детализированной модели топливной композиции и модели, сформированной после обработки результатов теплофизического расчета.

Детализированная модель (расчет 1) включает явное описание 75 твэлов (по 25 твэлов в каждом из трех рядов). В модели, формируемой по результатам теплофизического расчета, пространственное распределение топлива представляется в виде трех кольцевых областей (расчет 2), соответствующих трем рядам расположения твэлов. При этом сохраняются основные интегральные характеристики топливной композиции, включая объем и массу топлива в каждом ряду.

Сравнение распределений удельного энерговыделения (рисунки 7-9) показывает, что модель, сформированная на основе результатов теплофизического расчета, в целом адекватно воспроизводит распределение энерговыделения, полученное для детализированной геометрии. Для расчета энерговыделения с погрешностью 1% в одной сетчатой ячейке требуется 7 суток расчетного времени. В данном случае это значительно больше, чем расчет с той же точностью при использовании стандартного метода. Работы по оптимизации методики будут включать в себя, в том числе, поиск возможностей сокращения вычислительного времени. В качестве одного из потенциальных решений предполагается использование вычислительного кластера, собранного из нескольких расчетных серверов.

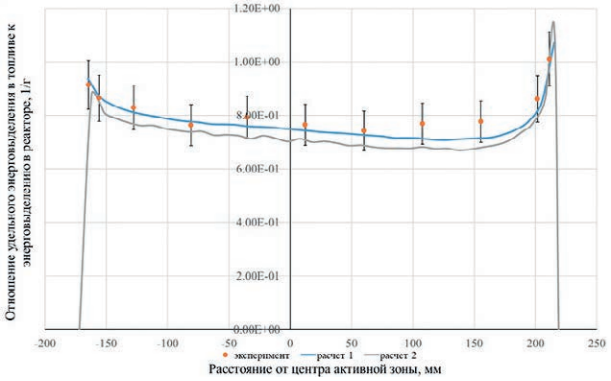


Рисунок 7. Отношение удельного энерговыделения в твэлах модели объекта испытаний с ТВССК 1 ряд

Небольшие расхождения наблюдаются преимущественно в периферийных областях модели, что может быть связано с заменой дискретного представления отдельных твэлов эквивалентным кольцевым распределением топлива. Полученное распределение энерговыделения качественно соответствует результатам

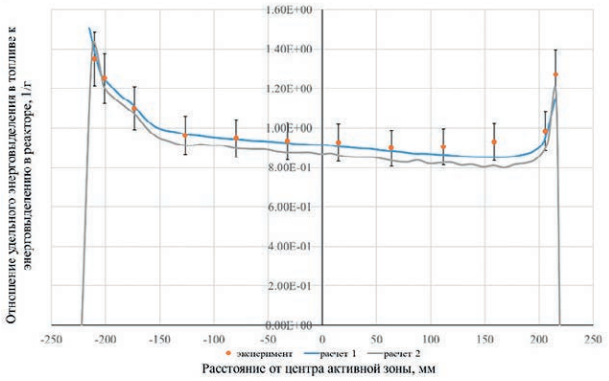


Рисунок 8. Отношение удельного энерговыделения в твэлах модели объекта испытаний с ТВССК 2 ряд

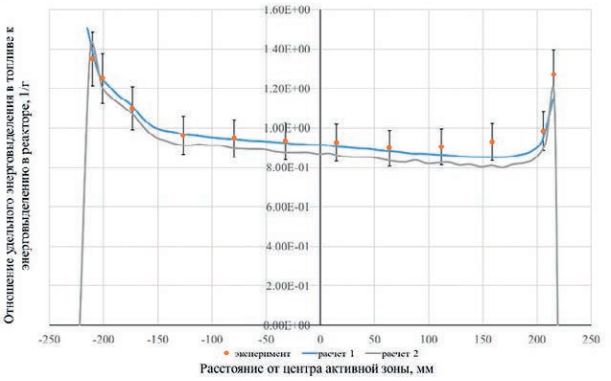


Рисунок 9. Отношение удельного энерговыделения в твэлах модели объекта испытаний с ТВССК 3 ряд

детализированной модели и воспроизводит основные закономерности изменения удельного энерговыделения по радиусу топливной композиции.

На рисунках 7-9 представлены профили относительного удельного энерговыделения в твэлах в зависимости от расстояния от центра активной зоны. Методическая погрешность определения энерговыделения при спектрометрических исследованиях на реакторе ИГР составляет около 10% и обусловлена методикой определения энерговыделения на основе спектрометрических измерений активности продуктов деления. Сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами показывает в целом удовлетворительное совпадение по всей высоте ТВС.

Ограничения предложенного метода моделирования

Несмотря на довольно высокую привлекательность предложенной методики, существуют определенные трудности ее применения.

Во-первых, для построения модели с решетчатой структурой необходима опорная детализированная нейтронно-физическая модель. Замена всей модели на решетчатую структуру нецелесообразна, поскольку изменение агрегатного состояния происходит лишь в месте локализации и движения расплава топливных элементов устройства. Конструкция рассмотренного экспериментального устройства подразумевает, что движение расплава топлива в течение эксперимента идет в направлении центра ТВС, где расположена стальная труба.. Место расположения топлива снаружи ограничено графитовым материалом, температура плавления которого выше температуры плавления топлива. Следовательно, лишь пространство внутри графитового цилиндра заменено сетчатой структурой. Остальные элементы экспериментального устройства описаны стандартными средствами, принятыми при MCNP-моделировании, взятыми из опорной модели. В случае необходимости моделирования достаточно большой геометрической области, вычислительная сложность наложения сетки будет неоправданно большой.

Во-вторых, большинство экспериментальных устройств, испытываемых на реакторе ИГР, являются осесимметричными. Поскольку трехмерная CFD-модель занимает большое количество памяти и требуются значительные вычислительные ресурсы для расчета характеристик с высокой точностью, использование в теплофизических расчетах кольцевой модели является оправданным шагом. В случае двумерной модели выходные файлы имеют небольшой объем, и считывание данных происходит быстро. Также в течение нескольких минут происходит заполнение решетчатой структуры. Использование трехмерных моделей, особенно несимметричных, значительно увеличит время работы программы.

Основной проблемой является продолжительность нейтронно-физического расчета состояния экспериментального устройства после выполнения программы. Традиционный подход к анализу состояний экспериментального устройства является более оптимизированным с точки зрения скорости получения результата на данный момент развития существующих методик. Стоит учитывать также, что в консервативных подходах расчета энерговыделения экспериментального устройства учитывается запаздывающее энерговыделение. При использовании сетчатой структуры для расчета энерговыделения с учетом запаздывающего энерговыделения длительность расчета будет несоизмеримо большой.

Несмотря на указанные сложности, развитие данного метода представляется перспективным для создания нового расчетного инструмента, который может быть использован при обосновании и подготовке экспериментов с топливом на реакторе ИГР.

Выводы

В рамках выполненной работы разработан и реализован подход к моделированию динамики объемного распределения топлива экспериментального устройства с использованием кода MCNP6 и программного обеспечения на базе VB.NET. Созданный алгоритм обеспечивает корректный перенос данных теплофизического моделирования (CFD) в нейтронно-физическую модель, что позволяет учитывать изменение геометрии и фазового состава деградирующего топлива в расчете.

Разработанный подход позволяет учитывать изменение формы и структуры топлива при его плавлении, что является важным фактором для повышения точности расчетов нейтронно-физических характеристик. В отличие от традиционного метода использование разработанного способа позволяет намного быстрее создавать нейтронно-физические модели при изменениях состояния топлива, при этом значительно сокращается количество ручных операций, вследствие чего снижается влияние человеческого фактора.

Приведены основные ограничения применения данного подхода. Тем не менее использование данной методики способствует более достоверной интерпретации экспериментальных данных и будет способствовать повышению качества расчетного сопровождения внутриреакторных испытаний. Время выполнения программы составляет 30 минут, что быстрее традиционного метода. Однако расчетное время в MCNP, полученной нейтронно-физической модели в 7 раз больше, нежели при расчете модели, разработанной традиционным способом. На данном этапе это является основным препятствием для широкого использования методики.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного программного инструмента для повышения эффективности и обоснования безопасности экспериментов на реакторе ИГР.

Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития методов сопряженного теплофизического и нейтронно-физического моделирования для анализа поведения ядерного топлива в аварийных режимах.

Работа выполнена в рамках РБП 036 «Развитие атомных и энергетических проектов», подпрограммы 105 «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики», мероприятие BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» на 2024-2026 годы по теме «Исследование возможности проведения облучательных экспериментов с топливом энергетического реактора на предельных параметрах работы реактора ИГР».

Литература:

1. ANSYS, Inc. Products Release 2021 R1. Academic research Mechanical and CFD.
2. Сураев А.С., Витюк Г.А., Пахниц А.В., Иркимбеков Р.А. Компьютерное моделирование тяжелых аварий на реакторе ИГР // X Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: тезисы докладов, Минск, 28-31 мая 2024 г.» – Минск: Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, 2024. – С. 50.
3. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk G., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy.– 2024.– Vol.204, art. no. 110532.– https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532.
4. Ivanov K., Avramova M. Challenges in coupled thermal–hydraulics and neutronics simulations for LWR safety analysis // Annals of Nuclear Energy – 2007. – Vol. 34, No. 6 – P. 501– 513 – https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.02.016
5. Avramova M., Ivanov K. Coupled Multiphysics Modeling for Nuclear Reactor Applications // Nuclear Engineering and Design – 2010.– Vol. 240.– P. 601-614. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.03.009
6. Ruslan A. Irkimbekov, Vladimir A. Vityuk, Galina A. Vityuk, Olzhas M. Zhanbolatov, Artur S. Surayev, Yuri A. Popov, Andrey N. Kotlyar (2025) Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor // Nuclear Engineering and Design, 443 (2025), 114278, doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114278
7. MCNP-6.1 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory.
8. Қабдылқақов Е.А., Сураев А.С., Жанболатов О.М., Витюк Г.А., Иркимбеков Р.А. Совершенствование методов моделирования плавления ТВС в условиях экспериментальных исследований на реакторе ИГР // Вестник НЯЦ РК.– 2025.– Вып. 2(102).– С. 151–164.– https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-151-164.
9. Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Solidification modeling with User defined function in Ansys Fluent //Progress in Applied CFD – CFD2017 Selected papers from 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries. – SINTEF Academic Press, 2017.

References:

1. ANSYS, Inc. Products Release 2021 R1. Academic research Mechanical and CFD.
2. Suraev A.S., Vityuk G.A., Pakhnits A.V., Irkimbekov R.A. Computer Modeling of Severe Accidents at the IGR Reactor. In: Proceedings of the 10th International Conference “Nuclear Energy, Nuclear and Radiation Technologies of the XXI Century”, Minsk, May 28-31, 2024. Minsk: Joint Institute for Power and Nuclear Research - Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, 2024. P. 50.
3. Kelsingazina R., Vityuk V., Vurim A., Vityuk G., Mukhamedov N., Tikhomirov G. Computational approaches for determining the nuclear heating value of structural materials during the irradiation at the IGR reactor // Annals of Nuclear Energy.– 2024.– Vol.204, art. no. 110532.– https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110532.
4. Ivanov K., Avramova M. Challenges in coupled thermal–hydraulics and neutronics simulations for LWR safety analysis // Annals of Nuclear Energy.– 2007.– Vol. 34, No. 6.– P. 501–513.– https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.02.016
5. Avramova M., Ivanov K. Coupled Multiphysics Modeling for Nuclear Reactor Applications // Nuclear Engineering and Design. – 2010.– Vol. 240.– P. 601-614. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.03.009
6. Ruslan A. Irkimbekov, Vladimir A. Vityuk, Galina A. Vityuk, Olzhas M. Zhanbolatov, Artur S. Surayev, Yuri A. Popov, Andrey N. Kotlyar (2025) Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor // Nuclear Engineering and Design, 443 (2025), 114278, doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114278
7. MCNP-6.1 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory.
8. Kabdylkakov E.A., Suraev A.S., Zhanbolatov O.M., Vityuk G.A., Irkimbekov R.A. Improvement of Methods for Modeling the Melting of Fuel Assemblies under Experimental Conditions at the IGR Reactor // NNC RK Bulletin.– 2025.– Issue 2(102).– P. 151–164.– https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-151-164.
9. Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Solidification modeling with User defined function in Ansys Fluent //Progress in Applied CFD – CFD2017 Selected papers from 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries. – SINTEF Academic Press, 2017.

MCNP БАҒДАРЛАМАСЫНДА ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫ ОТЫНЫНЫҢ КӨЛЕМДІК ТАРАЛУ ДИНАМИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Д. М. Секен[1,2*], О. М. Жанболатов[1], А. С. Сураев[1,2], Р. А. Иркимбеков[1], Н. Е. Мухамедов[1,2]

[1]Атом энергиясы институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан
[2]Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: seken@nnc.kz*

Жұмыста жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық есептеулерді байланыстыру негізінде отынның көлемдік таралу динамикасын модельдеу әдістемесі ұсынылған. CFD-модельдеу нәтижелерін MCNP есептік моделіне автоматтандырылған түрде түрлендіру алгоритмі әзірленді. Әдістеме отынның деградациясы мен балқуы барысында геометрияның, фазалық құрамның және отын мен конструкциялық материалдардың кеңістіктік таралуының өзгерістерін ескеруге мүмкіндік береді. Осы мақсатта жылуфизикалық есептеулер деректерін өңдеуді, әртүрлі типтегі есептік торларды құруды, бұрыштық қайталау алгоритмін жүзеге асыруды және нейтрондық-физикалық есептеулерге арналған кіріс деректерін автоматты түрде қалыптастыруды қамтамасыз ететін бағдарламалық жасақтама әзірленді. Отын деградациясының бекітілген сатылары үшін жеке нейтрондық-физикалық модельдер жиынтығын құруға негізделген дәстүрлі тәсілден айырмашылығы, әзірленген әдістеме жылуфизикалық модельдеу нәтижесінде алынған эксперименттік құрылғының кез келген күйі үшін энергия бөлінуін есептеуге мүмкіндік береді. ИГР реакторы моделінің құрамындағы отыны бар сынақ объектісінің әзірленген нейтрондық-физикалық моделіне верификация жүргізілді. Алынған нәтижелер ядролық отынның деградациясы мен балқу процестерін зерттеуге арналған эксперименттерді есептік сүйемелдеуде, сондай-ақ реакторлық зерттеулер үшін жылуфизикалық және нейтрондық-физикалық модельдеудің байланыстырылған әдістемелерін әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *нейтрондық-физикалық модельдеу, сәулелендіру құрылғылары, ИГР реакторы, энергия бөліну, MCNP, CFD, ТВССК, твэл.*

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR MODELING THE DYNAMIC VOLUMETRIC DISTRIBUTION OF FUEL IN AN EXPERIMENTAL DEVICE USING MCNP

D.M. Seken[1,2*], O.M. Zhanbolatov[1], A.S. Surayev[1,2], R.A. Irkimbekov[1], N.E. Mukhamedov[1,2]

[1]Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2]Shakarim University, Semey, Kazakhstan

** E-mail for contacts: seken@nnc.kz*

The paper presents a methodology for modeling the dynamics of volumetric fuel distribution based on the coupling of thermal-hydraulic and neutronic calculations. An algorithm was developed for the automated conversion of CFD simulation results into an MCNP computational model. The methodology makes it possible to account for changes in geometry, phase composition, and spatial distribution of fuel and structural materials during fuel degradation and melting processes. To achieve this, software was developed for processing thermal-hydraulic calculation data, generating computational lattices of various types, implementing an angular duplication algorithm, and automatically creating input files for neutronic calculations. Unlike the conventional approach, which relies on the development of a set of separate neutronic models corresponding to fixed stages of fuel degradation, the proposed methodology enables power distribution calculations for any state of the experimental device obtained from thermal-hydraulic simulations. Verification of the developed neutronic model of the test facility containing fuel within the reactor model of the IGR reactor was performed. The obtained results can be used for computational support of experiments investigating nuclear fuel degradation and melting processes, as well as for the development of coupled thermal-hydraulic and neutronic modeling methodologies for reactor research applications.

Keywords: *neutronic modeling, irradiation devices, IGR reactor, power generation, MCNP, CFD, TVSSK, fuel rod.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-220-225
УДК 621.039.6; 539.12.04; 669.017.164

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ И УДЕРЖАНИЯ D^+ В БЕРИЛЛИДЕ ТИТАНА $Be_{12}Ti$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.С. Диков[1], Е.А. Максимкина[1*], Т.В. Кульсартов[1,2]

[1]Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
[2]Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: yelizaveta.kostoussova@gmail.com*

В рамках разработки экспериментального метода оценки накопления и удержания ионов водорода для решения материаловедческих задач термоядерного синтеза выполнено облучение высокоэнергетичными ионами D^+ образцов бериллида титана ($Be_{12}Ti$) казахстанского производства. Выбор материала обусловлен существующими концепциями термоядерных установок, в которых предполагается использование $Be_{12}Ti$ в составе материалов первой стенки, например, JA DEMO. Исследуемые образцы были подвергнуты облучению ионами D^+ с энергией 14 МэВ в двух режимах, отличающихся временем облучения, плотностью потока и суммарным флюенсом. С целью исследования механизмов накопления и выделения газов в материале образцы облученного $Be_{12}Ti$ исследовались методом термодесорбционной спектроскопии. $Be_{12}Ti$, подвергнутый длительному воздействию потока ионов D^+ при относительно меньшей плотности частиц, продемонстрировал значительно большее накопление ионов D^+. В то же время, образец, облученный кратковременно, но потоком высокой плотности накопил значительно меньшее количество газа. Результаты показывают, что методика облучения ионами D^+ в высокоэнергетическом диапазоне может быть использована в качестве экспериментального подхода для оценки накопления и удержания водорода в материалах термоядерных установок.

Ключевые слова: *бериллид титана, D^+, термодесорбционная спектроскопия, режимы облучения, десорбция*

Введение

Термоядерная энергетика – это возможность для человечества сохранить текущий уровень энергопотребления при исчерпании углеводородного топлива и запасов U235. Одной из наиболее важных проблем работы современных термоядерных реакторов является взаимодействие плазмы с материалом бланкета. В условиях работы ТЯР предполагается, что бланкет подвергается воздействию ионов водорода и гелия, нейтронной и тепловой нагрузке, поэтому материал-кандидат должен отвечать ряду требований: обладать высокой атомной плотностью, характеризоваться высокой температурой плавления (выше 1000 °C), устойчивостью к окислению, а также иметь высокий показатель умножения нейтронов. С этой точки зрения, бериллий отвечает всем вышеописанным требованиям [1], в том числе как материал-умножитель нейтронов, который также может вырабатывать тритий.

Благоприятные свойства бериллия значительно усиливаются в соединениях. Наиболее перспективные бериллид ванадия $Be_{22}V$ и бериллид титана $Be_{12}Ti$ – имеют меньшую склонность к радиационному распуханию и окислению в присутствии воды, а также более высокую температуру плавления, в отличие от чистого металлического бериллия. При этом, хотя $Be_{22}V$ демонстрирует большую атомную плотность, его эффективность размножения трития ниже, чем у $Be_{12}Ti$ в среднем, на 30-40% [1], что существенно ограничивает потенциал выработки трития бланкетом. Таким образом, $Be_{12}Ti$ может частично преодолеть ограничения чистого бериллия и бериллида ванадия, однако его поведение в условиях радиационного воздействия, накопления дефектов и взаимодействия с изотопами водорода требует дополнительной экспериментальной проверки.

Поведение бериллида титана при радиационном воздействии особенно важно оценивать с учетом условий эксплуатации бланкета термоядерного реактора. В ходе реакции D-T образуется альфа-частица и нейтрон с энергией около 14 МэВ. При оказываемом нейтронном облучении материал бланкета испытывает радиационные деформации, которые распределяются по всей толщине материала. Эти деформации приводят к распуханию материала, охрупчиванию и эрозии, загрязняющей плазму. Исследования воздействия нейтронного облучения материала бланкета критически важно для эффективной и безопасной эксплуатации ТЯР, однако облучение быстрыми нейтронами, имитирующими выход нейтронов из плазмы, является трудно осуществимым процессом. Самостоятельного источника нейтронов, способного смоделировать такое воздействие, пока не существует, а облучение в ядерных реакторах с быстрыми нейтронами, требует длительного воздействия для набора необходимого флюенса [2]. При недоступности моделирования нейтронного облучения для решения задач

практического моделирования радиационных дефектов в материалах-кандидатах для составляющих ТЯР может использоваться ионное облучение [3]. Многие исследования [2, 4, 5] демонстрируют возможность использования ионного облучения, в частности, легкими ионами [4, 5], такими, как кремний, водород и его изотопы. Например, в экспериментах, направленных на оценку пригодности вольфрама как материала дивертора ITER [4], применяется облучение изотопами водорода и гелием с «высокими» (1кэВ) и «низкими» (0,3 кэВ) энергиями.

Облучение образцов ионами D^+ 14 МэВ в данной работе рассматривается как доступный экспериментальный подход к моделированию радиационного воздействия, оказываемого на материал в ходе эксплуатации в ТЯР [6]. Поскольку облучение быстрыми нейтронами является трудно осуществимым процессом, использование легких ионов с большой энергией представляет собой наиболее обоснованную альтернативу, что подтверждает мировой опыт. Следует учитывать, что характер воздействия нейтронов и легких ионов отличается и не может считаться прямым эквивалентом, однако полученные данные о радиационных дефектах, удержании и выходе газов из материала, а также о структурных и механических изменениях могут быть полезны при оценке пригодности материала для использования в конструкциях термоядерных установок.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента на Ульбинском металлургическом заводе методом порошковой металлургии (вакуумное горячее прессование) [7] были получены два образца $Be_{12}Ti$ в форме квадратных пластин размером 5*5 мм и толщиной около 2мм, плотностью 2,26 г/см^3. Состав сплава – Be 92,3 at. %, Ti 7,69 at. %. Металлы имеют естественный изотопный состав: 9Be – at. 100%, моноизотоп 46Ti – 7,95 at. %, 47Ti – 7,95 at. %, 46Ti – 7,3 at. %, 48Ti – 73,8 at. %, 49Ti – 5,5 at. %, 50Ti – 5,4 at. %. Предварительная подготовка образцов включала последовательную ручную шлифовку наждачной бумагой с размером зерен от P600 до P2500. Продолжительность каждого этапа составляла 5-20 минут. После шлифовки образцы отполированы на сукне с использованием пасты ГОИ на основе оксида хрома, затем проведена окончательная полировка алмазной пастой с размером частиц 1 мкм и суспензией 0,3 мкм. Микроструктура поверхности образцов, как показано на рисунке 1, в целом однородна, в то же время сохраняются отдельные продольные следы механической обработки, характерные для абразивного шлифования. Кроме того, наблюдаются единичные включения.

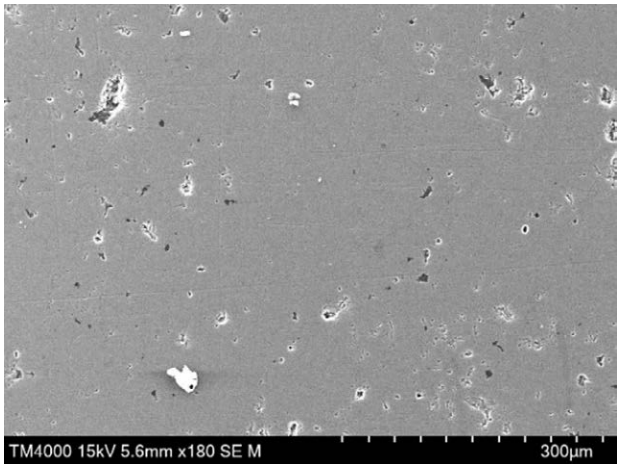


Рисунок 1. Исходная морфология образцов

Облучение подготовленных образцов производилось в циклотроне У-150М однородными пучками ионов D^+ с энергией 14 МэВ. Образцы были закреплены в мишени с помощью керамической маски, которая необходима для учета только тех частиц дейтерия, которые попали в образец. Маска представляет собой пластину с круглым отверстием диаметром 4,8 мм – непосредственный размер области облучения. Заряд пучка регистрировался цифровым интегратором тока (ORTEC Model 439, погрешность измерений прибора – около 5%). Образцы прислонены к алюминиевой подложке мишени, что обеспечивает необходимый отвод тепла. На рисунке 2 представлены фотографии образца, заключенного в мишень с теплоотводом, и мишени непосредственно в ускорителе во время фокусировки пучка.

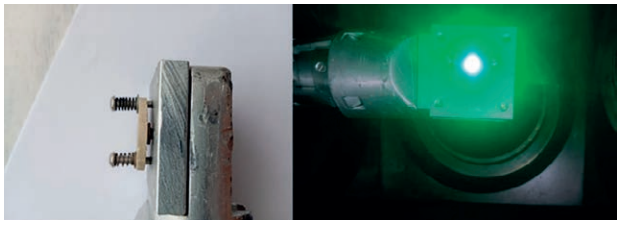


Рисунок 2. Внешний вид мишени с образцом внутри и в ускорителе

Параметры режимов облучения образцов представлены в таблице 1. Облучение проводилось в двух различных режимах для каждого из образцов: при стационарной плотности потока ионов $1{,}06\cdot10^{14}$ ион/(см^2·с) в течение 11 часов для БТ-2 и в комбинированном режиме для БТ-1, включавшем облучение при $7{,}8\cdot10^{14}$ ион/(см^2·с) в течение 22 мин с последующим снижением плотности потока до 0,7·1014 ион/(см^2·с) на 60 мин. Расчетная температура поверхности составляла около 470 К для БТ-2 и достигала 1000 К для БТ-1.Плотность потока ионов для каждого образца рассчитывалась из количества электрического заряда, переносимого пучком за единицу времени, с учетом

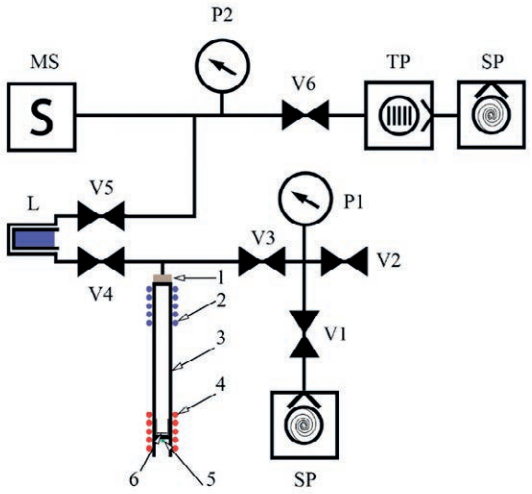
площади облучаемой поверхности. Флюенс, в свою очередь, определяется как произведение плотности потока ионов на продолжительность облучения. Как указано выше, плотность ионных пучков однородна по всей площади облучения, однако, значения различаются ввиду различия мощности потоков. Температурные условия облучения были смоделированы с применением программного комплекса Comsol Multiphysics с модулями Heat Transfer in Solids. Расчет выполнен методом конечных элементов (Finite Element Analysis). Данные о теплофизических параметрах материала взяты с портала THERPRO [8]. Результаты теплофизического моделирования также представлены в таблице 1. Теплопотери в облучательной камере не учитывались в расчетах, стенки камеры приняты за идеально изолированные. Температурная погрешность не превышает 5%.

Таблица 1. Параметры облучения образцов

	БТ-1		БТ-2
Время облучения	1 этап	2 этап	11 часов
	22 минут	60 минут	
Мощность потока	20 мкА	2 мкА	2,7 мкА
	280 Вт	28 Вт	37,8 Вт
Температура	1000K	420K	460K
Плотность потока	$7{,}84\cdot10^{14}$ i/(см$^2\cdot$с)	$0{,}786\cdot10^{14}$ i/(см$^2\cdot$с)	$1{,}06\cdot10^{14}$ i/(см$^2\cdot$с)
Флюенс	$1{,}02\cdot10^{18}$ i/см^2	$0{,}283\cdot10^{18}$ i/см^2	$4{,}2\cdot10^{18}$ i/см^2

После облучения образцы были исследованы методом термодесорбционной спектроскопии. Метод ТДС основан на контролируемом нагреве образца в вакуумной камере. В ходе этого процесса происходит высвобождение газов, удерживаемых в ловушках, образованных в материале: в вакансиях, пузырьках, и других дефектах. Выделяемые газы регистрируются масспектрометром в течение всего цикла нагрева, удержания температуры и охлаждения. Полученные температурные зависимости позволяют оценить характер накопления и десорбции газов из исследуемого материала. Схема установки ТДС представлена на рисунке 3.

Установка откалибрована по всем измеряемым газам. Коэффициенты калибровки приблизительно пропорциональны коэффициентам ионизации измеряемых молекул газа в пределах 10% погрешности. Перед проведением исследования на образцах БТ-1 и БТ-2 был проведен технический отжиг экспериментальной установки. Отжиг проводился в условиях откачки спиральным насосом при нагреве до температуры 900 °C со скоростью нагрева 10 °C/мин. Далее был выполнен стандартный бланковый эксперимент с пустым тиглем, чтобы определить фоновое газовыделение в установке и исключить его вклад из последующего анализа. Далее образцы поочередно помещались в загрузочный тигель. По достижению остаточного давления в 10^{-6} Торр начинался программируемый нагрев со скоростью 10 °C/мин до достижения температуры 900 °C. Выдержка при этой температуре составила 5 минут. Затем образцы охлаждались в естественном режиме со скоростью 20 °C/мин.



MS – квадрупольный масс-спектрометр,
TP – турбомолекулярный насос, SP – спиральный (форвакуумный) насос, L – азотная ловушка,
P1 – вакуумный датчик давления экспериментального устройства, P2 – вакуумный датчик давления в камере масс-спектрометра, V – вакуумные клапаны,
1 – загрузочный фланец экспериментального устройства, 2 – система охлаждения, 3 – экспериментальное устройство (ЭУ), 4 – нагревательный элемент,
5 – термопара, 6 – тигель с образцом [9].

Рисунок 3. Схема установки ТДС

Результаты

Анализ газовыделения проводился при скорости нагрева 10 °C/мин с регистрацией парциальных давлений по атомным массам. В библиотеке данных о расшифровке спектров для m=4 – могут быть только 2 газа: гелий и дейтерий. Бланковый эксперимент не выявил сигналов с массами, соответствующими D_2 и He, что позволяет связать их дальнейшее появление с высвобождением дейтерия из облученного $Be_{12}Ti$.

На рисунке 4 представлены спектры газовыделения D_2. Десорбция D_2 из образца БТ-1, который был подвергнут кратковременному, но крайне интенсивному облучению высокоэнергичными ионами D^+, слабо анализируется. Сигнал D_2 находятся на уровне порядка 10^{-7} Па и плавно повышается по достижении температуры около 600 К. При этом, десорбционные максимумы не прослеживаются. Газовыделение более выражено для образца БТ-2, который подвергался длительному облучению при относительно низкой плотности пучка, но при этом набравшего значитель-

но больший флюенс, чем БТ-1. На ТДС-спектре образца БТ-2 видно гораздо более объемное газовыделение после достижения температуры около 630-650 К. При этой температуре фиксируется резкий рост парциального давления с последующим широким максимумом в области около 750-850 К. Сигнал D_2 имеет четко выраженные «ступени» на 630-700 К и 720-800 К. Такой характер выхода дейтерия может указывать на наличие нескольких типов газовых ловушек. На удержание дейтерия могли также влиять исходная пористость и неоднородность поверхности образцов. Исследуемый материал был получен методом вакуумного горячего прессования порошков, а на исходной поверхности образцов наблюдались поры и несплошности. Открытые поры и развитая внутренняя поверхность могут облегчать проникновение дейтерия к внутренним поверхностям, его поверхностную рекомбинацию и последующий выход в виде D_2 и HD. Поэтому наличие взаимосвязанной открытой пористости может уменьшать остаточное содержание дейтерия после облучения. В то же время, закрытые поры, межчастичные границы и несплошности, не имеющие прямого сообщения с внешней поверхностью, могут действовать как области локального накопления молекулярного дейтерия. Заполнение таких областей способно приводить к повышению внутреннего давления, зарождению трещин и последующему скачкообразному выходу газа при ТДС-нагреве.

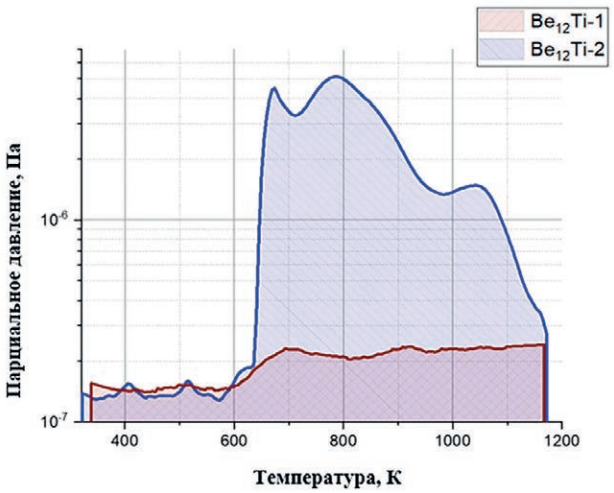


Рисунок 4. Спектры газовыделения по сигналу D_2 из образцов БТ-1 и БТ-2

Отношение интегрального выделения дейтерия, оцененное по площади под ТДС-кривыми парциального давления, для образцов БТ-2 и БТ-1 составляет ~12,4.

Для обоих образцов до температуры около 570…600 К сигнал D_2 низкий, приближен к бланковому. Далее, при достижении температуры около 650 К давление для БТ-1 повышается незначительно, и не изменяется до конца измерений, давление БТ-2 резко возрастает почти на порядок, и изменяется скачкообразно, как уже отмечено выше. Максимальная интенсивность десорбции дейтерия из БТ-2 наблюдается в интервале 650-800К, и постепенно снижается с дальнейшим повышением температуры. Это может быть связано с истощением накопленного объема дейтерия в образце. Разница в характере и объемах газовыделения напрямую связана с условиями облучения образцов: на первой стадии облучения БТ-1 плотность потока возрастала до $7{,}8 \cdot 10^{14}$ ион/(см^2·с), что приблизительно в 7,4 раза превышало значение для БТ-2 и вызывало разогрев поверхности до 1000 К. Увеличение скорости генерации дефектов при этом сопровождалось их термическим отжигом, повышением диффузионной подвижности дейтерия, его освобождением из ловушек и десорбцией непосредственно во время облучения. После снижения плотности потока температура уменьшалась приблизительно до 420 К, однако продолжительности второй стадии (60 минут) и ее флюенса было недостаточно для накопления количества дейтерия, сопоставимого с БТ-2. Таким образом, в исследованных условиях влияние вызванного высокой плотностью потока температурного разогрева преобладало над возможным увеличением удержания вследствие более интенсивного образования радиационных дефектов. Повышение плотности потока и, как следствие, температуры способствует более быстрому достижению концентрации дейтерия, необходимой для насыщения ловушек и развития кластерного механизма его удержания [10, 11].

Обсуждение

ТДС-анализ подтверждает, что удержание дейтерия в $Be_{12}Ti$ имеет дефектно-контролируемый характер. Оно определяется не только энергией падающих ионов, но и флюенсом, плотностью потока, временем облучения и температурным режимом [12, 13]. В образце БТ-1 температура во время облучения достигала около 1000 К, то есть находилась в диапазоне, достаточном для активации диффузии и выхода дейтерия из части ловушек еще на стадии облучения. Поэтому последующий ТДС-сигнал оказался слабым. Напротив, БТ-2 облучался при существенно более низкой температуре, не превышавшей ~480 К, что ограничивало подвижность дейтерия и способствовало его накоплению в радиационно-индуцированных дефектах. При облучении ионами D^+ с энергией 14 МэВ формировался глубоко распределенный профиль радиационно-индуцированной дефектной структуры.

Длительное облучение БТ-2, несмотря на меньшую плотность потока, способствовало накоплению дейтерия в объемных ловушках, связанных с вакансиями, их скоплениями, дислокационными структурами и дефектными комплексами. Резкий пик в диапазоне 630…650 К для БТ-2 можно рассматривать как открытие менее стабильных дефектных комплексов или

начало интенсивного высвобождения дейтерия из области накопления, тогда как широкий максимум при более высоких температурах может соответствовать высвобождению дейтерия из более энергетически стабильных ловушек. Для БТ-1 слабая десорбция может быть связана с тем, что при более интенсивном и термически нагруженном режиме часть дейтерия могла высвободиться еще во время облучения, и некоторые из первичных дефектов могли ослабеть. Такая интерпретация согласуется с общими представлениями о влиянии радиационных дефектов на удержание изотопов водорода и зависящем от температуры характере их высвобождения при проведении TDS-анализа [9, 14]. Следует отметить, что ТДС-измерения проводились при одной скорости нагрева 10 °C/мин. Поэтому в настоящей работе не определялись эффективные энергии активации десорбции и не проводилось однозначное отнесение отдельных максимумов к конкретным типам дефектов.

Заключение

Установлено, что длительное облучение при меньшей плотности потока и суммарно большем флюенсе приводит к значительно более выраженному накоплению дейтерия в $Be_{12}Ti$. Интегральное газовыделение из БТ-2 в 12,4 раза больше, чем в БТ-1. Многокомпонентный характер ТДС-спектров указывает на последовательную термическую активацию центров удержания дейтерия. Наличие высокотемпературных компонентов спектра может свидетельствовать о том, что при облучении высокоэнергетическими ионами (14 МэВ) формируются не только простые дефекты типа вакансий, но и глубокие ловушки: дислокационные структуры, вакансионные кластеры и объемно распределенные зоны повреждения.

Предлагаемая методика может быть использована как инструмент экспериментальной оценки способности материалов-кандидатов ТЯР накапливать и удерживать изотопы водорода в условиях высокоэнергичного облучения. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего применения данного подхода для исследования бериллидов и других перспективных материалов термоядерных установок.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR24993119).

Литература / References:

1. Hernandez-Gonzalez F. A., Pereslavtsev P. First principles review on the options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors //Fusion Engineering and Design. – 2018. – Т. 137. – С. 243-256.
2. Was G. S. et al. Emulation of reactor irradiation damage using ion beams //Scripta Materialia. – 2014. – Т. 88. – С. 33-36.
3. Roldán M. et al. Ion beam experiments to emulate nuclear fusion environment on structural materials at CMAM // Ion Beam Techniques and Applications. – IntechOpen, 2019.
4. Lee H. T. et al. Ion-driven permeation of deuterium through tungsten under simultaneous helium and deuterium irradiation //Journal of nuclear materials. – 2011. – Т. 415. – №. 1. – С. S696-S700.
5. Ogorodnikova O. V. et al. The influence of radiation damage on the plasma-induced deuterium retention in self-implanted tungsten //Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Т. 415. – №. 1. – С. S661-S666.
6. Ericsson G. Advanced neutron spectroscopy in fusion research //Journal of Fusion Energy. – 2019. – Т. 38. – №. 3. – С. 330-355.
7. Gaisin R. et al. Beryllium intermetallics: Industrial experience on development and manufacture //Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Т. 35. – С. 101444.
8. Thermo-Physical Materials Properties Database of LWRs and HWRs [Электронный ресурс] / International Atomic Energy Agency. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://nucleus.iaea.org/sites/therpro/SitePages/Basic-Search.aspx?web=1 (дата обращения: 21.02.2026).
9. Shaimerdenov A. et al. Kinetics of gas release from titanium beryllide irradiated to different neutron fluences //Fusion Engineering and Design. – 2025. – Т. 216. – С. 115069.
10. Poon M. et al. Flux dependence of deuterium retention in single crystal tungsten //Journal of nuclear materials. – 2002. – Т. 307. – С. 723-728.
11. Buzi L. et al. (2017). Surface modifications and deuterium retention in polycrystalline and single crystal tungsten as a function of particle flux and temperature. Journal of Nuclear Materials, 495, 211–219.
12. Fukumoto M. et al. Deuterium trapping in tungsten damaged by high-energy hydrogen ion irradiation //Journal of nuclear materials. – 2009. – Т. 390. – С. 572-575.
13. Wampler W. R., Doerner R. P. Deuterium retention in tungsten from exposure to plasma //Physica Scripta. – 2009. – Т. 2009. – №. T138. – С. 014037.
14. Sugimoto Y. et al. Deuterium retention properties and bubble behaviors of Be12Ti after irradiation with D+ at high temperature //Fusion Engineering and Design. – 2025. – Т. 218. – С. 115220.

ТИТАН БЕРИЛЛИДІ $Be_{12}Ti$-ДЕ ЖОҒАРЫ ЭНЕРГИЯЛЫ ИОНДЫҚ СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ӘРТҮРЛІ РЕЖИМДЕРІ КЕЗІНДЕ ДЕЙТЕРИЙДІҢ ЖИНАҚТАЛУЫ МЕН ҰСТАЛЫП ҚАЛУЫН ЭКСПЕРИМЕНТТІК БАҒАЛАУ

А. С. Диков[1], Е. А. Максимкина[1]*, Т. В. Кульсартов[1,2]

[1] Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: yelizaveta.kostoussova@gmail.com*

Термоядролық синтез материалтануының міндеттерін шешуге арналған сутегі иондарының жинақталуы мен ұсталып қалуын бағалаудың эксперименттік әдісін әзірлеу шеңберінде Қазақстанда өндірілген титан бериллиді ($Be_{12}Ti$) үлгілерін жоғары энергиялы дейтерий иондарымен сәулелендіру жүргізілді. Материалды таңдау $Be_{12}Ti$-ді JA DEMO сияқты термоядролық қондырғылардың бірінші қабырғасы материалдарының құрамында қолдану қарастырылатын қазіргі тұжырымдамалармен негізделеді. Зерттелетін үлгілер 14 МэВ энергиялы дейтерий иондарымен сәулелендірілді. Сәулелендіру екі режимде жүргізілді, олар сәулелендіру уақытымен, ағын тығыздығымен және жиынтық флюенспен ерекшеленді. Материалда газдардың жинақталу және бөліну механизмдерін зерттеу мақсатында сәулелендірілген $Be_{12}Ti$ үлгілері термиялық десорбциялық спектроскопия әдісімен зерттелді. Дейтерий ағынының салыстырмалы түрде төмен бөлшек тығыздығы жағдайында ұзақ уақыт әсеріне ұшыраған $Be_{12}Ti$ үлгісі D^+ иондарының едәуір көбірек жинақталуын көрсетті. Сонымен қатар, қысқа уақыт ішінде, бірақ жоғары тығыздықты ағынмен сәулелендірілген үлгіде газдың айтарлықтай аз мөлшері жинақталды. Алынған нәтижелер жоғары энергиялы диапазонда дейтерий иондарымен сәулелендіру әдістемесін термоядролық қондырғылар материалдарында сутегінің жинақталуы мен ұсталып қалуын бағалауға арналған эксперименттік тәсіл ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: *титан бериллиді, дейтерий, термиялық десорбциялық спектроскопия, сәулелендіру режимдері.*

EXPERIMENTAL EVALUATION OF DEUTERIUM ACCUMULATION AND RETENTION IN TITANIUM BERYLLIDE $Be_{12}Ti$ UNDER DIFFERENT MODES OF HIGH-ENERGY ION IRRADIATION

A.S. Dikov[1], Y.A. Maximkina[1] *, T.V. Kulsartov[1, 2]

[1]Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

E-mail for contacts: yelizaveta.kostoussova@gmail.com

As part of the development of an experimental method for evaluating the accumulation and retention of hydrogen ions to address materials science problems related to thermonuclear fusion, titanium beryllide ($Be_{12}Ti$) samples produced in Kazakhstan were irradiated with high-energy deuterium ions. The choice of material is justified by existing concepts of fusion facilities, in which $Be_{12}Ti$ is proposed for use as a first-wall material, for example, in JA DEMO. The investigated samples were irradiated with 14 MeV deuterium ions under two irradiation modes differing in irradiation time, particle flux density, and total fluence. To study the mechanisms of gas accumulation and release in the material, the irradiated $Be_{12}Ti$ samples were examined by thermal desorption spectroscopy. The $Be_{12}Ti$ sample exposed to a deuterium flux for a longer time at a relatively lower particle flux density demonstrated significantly higher accumulation of D^+ ions. At the same time, the sample irradiated for a shorter time but with a high-density flux resulted in significantly lower gas accumulation. The results show that the high-energy deuterium ion irradiation technique can be used as an experimental approach for evaluating hydrogen accumulation and retention in materials for fusion facilities.

Keywords: *titanium beryllide, deuterium, thermal desorption spectroscopy, irradiation modes.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-226-232
УДК 539.1.06

СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ ДЛЯ МНОГОКРАТНО ИОНИЗОВАННЫХ АТОМОВ МИШЕНИ И ВЫХОД РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ИОНАМИ КОБАЛЬТА

И. Д. Горлачев, А. В. Киреев, А. В. Платов*, К. Е. Попов

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

**E-mail для контактов:platov@inp.kz*

Были измерены сечения выхода K, L и M рентгеновского излучения для элементов от Ti до Bi при возбуждении ускоренными пучками ионов $^{59}Co^{12+}$ с энергией 94,4 МэВ. Полученные результаты сравнивались с предсказаниями ECPSSR и PWBA теорий, рассчитанными с помощью программы ISICS11.

Полученные данные показывают, что на общий спад сечения выхода рентгеновского излучения K-оболочки с увеличением атомного номера мишени Z_2 накладывается его рост в диапазоне от $Z_2 = 22$ приблизительно до $Z_2 = 41$ с максимумом приблизительно при $Z_2 = 29$. Это явление может быть объяснено тем, что при взаимодействиях, близких к симметричным, через образовавшиеся молекулярные орбитали возможно перемещение электронов между орбиталями сталкивающихся атомов. Следовательно, сечение образования рентгеновского излучения для выбранного химического элемента при анализе методом PIXE может быть селективным образом максимизировано путем подбора режима облучения – энергии и вида падающего иона.

Опираясь на смещения и уширения рентгеновских линий в полученных спектрах, рассчитаны выходы флуоресценции и сечения ионизации K-оболочек для элементов от титана до молибдена, модифицированные для многократной ионизации. Полученные результаты показывают, что отличия выходов флуоресценции с учетом многократной ионизации от одновакансионных выходов флуоресценции не превышают 35%. Следовательно, наблюдаемые отклонения экспериментальных данных от теоретических не могут быть объяснены только многократной ионизацией без привлечения эффектов, связанных с межорбитальными переходами электронов.

Ключевые слова: *сечение образования рентгеновского излучения; ионы кобальта; теория ECPSSR, теория PWBA, HIPIXE.*

Введение

В последнее время растет интерес к применению тяжелых ионов для анализа с помощью метода PIXE – HIPIXE-метод. Так, M.J. Ozafrán et al. использовали пучки ^{16}O и ^{12}C для анализа элементного состава образцов тяжелой воды, отобранных на атомной электростанции [1, 2]. При этом был получен предел определения менее 0,01 ppb (parts per billion) для элементов в диапазоне от Cr до Zn. В работах [3, 4] показана возможность анализа на пучках тяжелых ионов элементного состава воздушных аэрозолей. Эти работы продемонстрировали, что для получения точных результатов количественного анализа методом HIPIXE необходимо достоверное знание сечений выходов флуоресценции при взаимодействии тяжелых ионов с атомами мишеней.

Рентгеновское излучение, индуцированное тяжелыми ионами, должно обеспечить лучшие перспективы для одновременного многоэлементного следового анализа, чем при протонной или α-бомбардировке. Это наблюдение основано на модели, описывающей ион-атомные столкновения, из которой следует, что сечения образования K-рентгеновского излучения пропорциональны квадрату атомного номера снаряда. Выражение может быть записано в виде [5]:

$$\sigma_K = f\left[Z_1^2\left(\frac{E}{A_1}\right)^4 Z_2^{-12}\right],$$

где: Z_1 = атомный номер снаряда; Z_2 = атомный номер мишени; (E/A_1) = скорость снаряда. Иными словами, для пучков тяжелых ионов ($Z_1 > 5$) со скоростями от 0,2 до 10 МэВ/amu величина σ_X может стать очень большой (10^3–10^5 b) для широкого круга элементов. Таким образом, можно предложить обнаружения микроэлементов (10^{-10}–10^{-11} г) в микропробах (10^{-4}–10^{-5} г).

При этом особый интерес может представлять случай, когда Z_2 незначительно превышает Z_1: $Z_2 = Z_1 + (4–5)$. В этом случае наблюдается резкое увеличение сечений выхода рентгеновского излучения [6]. Еще в 1965 году Шпехт заметил, что поперечное сечение увеличивается всякий раз, когда энергия связи одной из оболочек падающего иона совпадает с энергией связи оболочки атома-мишени [7]. Хороший пример усиления медных L-рентгеновских лучей от падающих ионов меди был приведен Kavanagh et al. [8], когда различные атомы мишени в диапазоне от углерода (Z = 6) до тория (Z = 90) бомбардировали пучком меди с энергией 160 кэВ. В работах [5, 6] показано, что выходы рентгеновского излучения максимальны, когда энергии связи возбуждаемых электронов в партнерах по столкновению приблизительно совпадают. Следо-

вательно, производство рентгеновских лучей от анализируемого элемента может быть максимизировано путем выбора типа и энергии ускоренного иона. Это открывает возможности селективного анализа разных групп химических элементов методом PIXE с использованием пучка тяжелых ионов.

В представленных исследованиях были получены рентгеновские выходы для K-оболочек 12 тонких пленок Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, для L-оболочек мишеней Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ta, W, Pb, Bi и для M-оболочек мишеней Ta, W, Pb и Bi. В экспериментах использовались ускоренные ионы $^{59}Co^{12+}$ с энергией 94,4 МэВ. Полученные экспериментальные данные сравнивались с теоретическими значениями, рассчитанными в рамках Plane Wave Born Approximation (PWBA) [9] и ее усовершенствованной модели – ECPSSR [10]. Теоретические данные были рассчитаны нами с использованием программы ISICS11 [11 – 13].

Материалы и методы

Ускоренные ионы ^{59}Co были получены на ускорителе ДЦ-60 [14]. Экспериментальная мишенная камера, использованная в нашем исследовании, подробно описана в нашей более ранней работе [15]. Толщины используемых металлических пленок варьировались в диапазоне от 36,5 мкг/см^2 (титан) до 339 мкг/см^2 (сурьма). Для таких толщин энергетические потери ионов кобальта не превышают 10% (мишень-сурьма). Таким образом, все мишени, использованные в экспериментах, можно считать тонкими пленками.

Средний ток пучка на мишени в экспериментах составлял от 1 нА в зависимости от регистрируемой рентгеновской линии. Регистрация рентгеновского излучения осуществлялась Si(Li) детектором площадью 12 мм^2 и разрешением 135 эВ (Mn Ka), установленным под углом 135º к пучку. Для всех K-линий и высокоэнергетичных L-линий перед детектором располагалась майларовая фольга толщиной 0.1 мм.

Сечения выхода рентгеновского излучения рассчитывались, исходя из следующих выражений:

$$\sigma_X = \frac{N_X D_X M}{d\varepsilon_X N_P N_0} K_f K_t, \quad (1)$$

$$K_f = e^{\mu_f \rho_f x}, \quad (2)$$

$$K_t = \left[\frac{\mu_t t}{1 - e^{-\mu_t t}} \right], \quad (3)$$

где: N_X и N_P число измеренных рентгеновских фотонов и число ионов кобальта, достигших образца; M(g/mol) – молярный вес атомов мишени; d (g/cm^2) – толщина мишени; ε_X (E_X) эффективность детектора; N_0(1/mol) – число Авогадро; μ_f (cm^2/g); μ_t (cm^2/g) – массовые коэффициенты ослабления рентгеновского излучения в майларовом поглотителе и в облучаемой пленке, x (cm) t (g/cm^2) – толщины поглотителя и металлического образца, ρ_f (g/cm^3) – плотность поглотителя. Параметры K_f и K_t учитывают поглощение излучения в поглотителе и мишени соответственно.

Полученные результаты

Выход рентгеновского излучения

Таблицы 1, 2 и 3 содержат индивидуальные и полные сечения выхода рентгеновского излучения для ускоренных до 94,4 МэВ ионов $^{59}Co^{12+}$. Теоретические данные, указанные в таблицах, были рассчитаны из одно-вакансионных выходов флуоресценции в рамках ECPSSR и PWBA формализмов посредством кода ISICS11 [11 – 13].

Таблица 1. Сечения выхода K_α, K_β и K_{tot} (барны)

Мишень	Z_2	K_α	K_β	K_{tot}	K_{tot} PWBA	K_{tot} ECPSSR
Ti	22	6990±920	551±79	7540±930	114580	8427
Cr	24	6770±890	600±81	7670±900	73812	2679
Cu	29	5120±680	659±87	5780±680	23304	250
Zn	30	1590±210	227±30	1820±210	18380	168
Zr	40	26.2±3.5	3.26±0.73	29.5±3.6	1569	8.27
Nb	41	20.1±2.7	3.44±0.66	23.5±2.8	1229	6.60
Mo	42	7.8±1.1	1.25±0.26	9.1±1.1	969	5.34
Ag	47	1.34±0.24	0.39±0.17	1.73±0.30	299	2.09
Cd	48	0.66±0.22	0.167±0.089	0.82±0.24	238	1.78
In	49	1.23±0.26	0.167±0.085	1.39±0.27	189	1.52
Sn	50	0.517±0.091	0.080±0.041	0.60±0.10	151	1.31
Sb	51	0.391±0.074	0.069±0.010	0.460±0.074	138	1.13

Таблица 2. Сечения выхода L_α+L_l, L_β и L_γ (барны)

Мишень	Z_2	L_α+L_l	L_β	L_γ	L_{tot}	L_{tot} PWBA	L_{tot} ECPSSR
Zr	40	-	-	-	118000±21000	773780	232190
Nb	41	-	-	-	134000±23000	705820	186030
Mo	42	-	-	-	101000±18000	645320	149910
Ag	47	-	-	-	77000±13000	382800	50019
Cd	48	-	-	-	76000±13000	347980	40806
In	49	-	-	-	84000±14000	314450	33251
Sn	50	-	-	-	43200±7500	281390	26990
Sb	51	-	-	-	23800±4200	253430	22220
Ta	73	3680±500	2390±320	149±27	6220±590	28240	960
W	74	3170±430	1790±240	169±27	5130±490	25701	866
Pb	82	1640±220	561±75	42.3±8.3	2240±230	12095	406
Bi	83	1550±210	595±80	33±13	2180±220	10976	371

Таблица 3. Сечения выхода M_{tot} (барны)

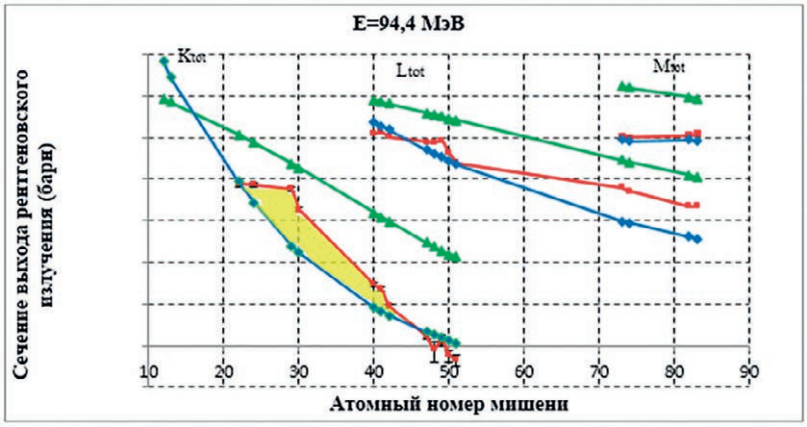
Мишень	Z_2	M_{tot}	M_{tot} PWBA	M_{tot} ECPSSR
Ta	73	104000±20000	1686100	86512
W	74	100000±17000	1579600	82100
Pb	82	110000±20000	926680	87195
Bi	83	122000±20000	855550	81204

Для низкоэнергетических рентгеновских линий значимыми являются ошибки коррекции эффекта самопоглощения. Для К-линий мишеней In, Sn, Sb, из-за малых значений сечений ионизации, параметр N_X (формула 1) является доминирующим при расчете погрешностей анализа.

Рисунок 1 демонстрирует зависимость сечений выхода рентгеновского излучения от атомного номера мишеней.

Из рисунка 1 можно заметить, что на общий спад сечения выхода рентгеновского излучения К-оболочки с увеличением атомного номера мишени, что соответствует прогнозу ECPSSR, накладывается его рост в диапазоне от Z2 = 22 до Z2 ≈ 41 с максимумом (сечение возрастает в 23 раза по отношению к прогнозу ECPSSR) при Z2 ≈ 29. Указанные на рисунке планки погрешностей демонстрируют, что наблюдаемая тенденция не может быть объяснена погрешностью измерения сечений. Измеренные нами ранее сечения выхода рентгеновского излучения на ионах N, O, Ne и C (Z налетающего иона меньше Z атома мишени [15 – 18]) показывают хорошее согласие с теоретическими значениями, рассчитанными в рамках подхода ECPSSR. Таким образом, наблюдаемые на рисунке 1 отклонения экспериментальных данных от теоретических указывают на наличие дополнительного механизма, приводящего к росту сечений по сравнению с прогнозом ECPSSR теории для мишеней с Z, близким к атомному номеру налетающего иона.

Подобное явление описано в статьях B. Cross et al. [5] и H. Cubo et al. [6]. В этих работах показано, что



На рисунке красные квадраты соответствуют полученным экспериментальным данным, синие ромбы – данные, полученные в рамках подхода ECPSSR и зеленые треугольники – данные, полученные в рамках модели PWBA

Рисунок 1. Зависимость сечений выхода рентгеновского излучения от атомного номера мишени

выходы рентгеновского излучения возрастают при сближении энергий связи электронов в партнерах по столкновению. При взаимодействиях, близких к симметричным, через образовавшиеся молекулярные орбитали возможно перемещение электронов между орбиталями сталкивающихся атомов (electron-promotion mechanism). В подтверждение этого эффекта на рисунке 2 показано отношение экспериментально измеренного сечения выхода рентгеновского излучения K-оболочки (Ktot) к теоретически рассчитанному в рамках подхода ECPSSR. Так как динамика спада экспериментального и теоретического сечений с увеличением Z схожа, их отношение позволяет более наглядно отразить эффект, обусловленный межорбитальными переходами электронов.

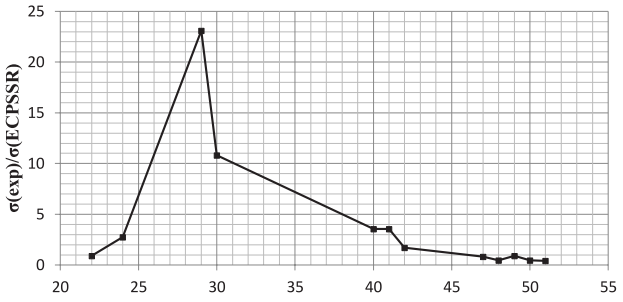


Рисунок 2. Отношение экспериментально измеренного выхода флуоресценции K-оболочки (K_{tot}) к теоретически рассчитанному в рамках подхода ECPSSR

Рисунок 2 показывает, что выходы рентгеновского излучения максимальны при близких Z иона и атома мишени, т.е. когда энергии связи электронов, возбуждаемых в партнерах по столкновению, приблизительно совпадают. Это наблюдение было сделано ранее несколькими авторами [6, 19]. Эти данные остаются практически неизменными при изменении ролей партнеров по столкновению, т.е. их также можно рассматривать как представляющие, например, выходы K_α-излучения Kr-мишени, бомбардируемой различными снарядами с одинаковой скоростью [5]. Следовательно, генерацию рентгеновского излучения от исследуемого элемента можно максимизировать, выбрав бомбардирующий ион с близко подобранной энергией связи K- или L-оболочки. Фактически, пиковые выходы рентгеновского излучения достигаются с использованием снарядов с несколько меньшими значениями Z_l, чем Z_2 мишени.

Тенденцию для последовательных максимумов, связанных с согласованием K-оболочек, можно описать членом в Z_2^{-12}, аналогичным тому, что происходит с рентгеновским излучением, индуцированным протонами [5]. Подводя итог, можно утверждать, что, согласно HIPIXE анализу, задача достижения максимального выхода рентгеновского излучения мишени с атомным номером Z_2 будет решена при снаряде с $Z_1 = Z_2$-(1÷5). Этот выход увеличивается с ростом энергии, но селективность возбуждения уменьшается.

Расчет сечений ионизации для многократно ионизованных атомов мишени

Программа ISICS11, используемая нами для расчета теоретических значений сечений выхода в рамках подходов ECPSSR и PWBA, позволяет рассчитывать выход флуоресценции и сечение ионизации, исходя из одновакансионного механизма [11 – 13]. При этом взаимодействие ионов с атомами мишеней может привести к одновременному удалению из внутренних оболочек атома мишени нескольких электронов. Вследствие этого изменяется энергия связи оставшихся электронов и вероятности переходов Костер-Кронига. Все эти эффекты приводят к изменению наблюдаемого выхода рентгеновского излучения и являются одной из причин отличия между экспериментальными и теоретически рассчитанными сечениями (рисунок 1). Поэтому важно оценить влияние многократной ионизации на атомные параметры, чтобы понять ее вклад в наблюдаемые на рисунке 1 отличия.

Доля доступных электронов в определенной оболочке для данного перехода напрямую связана с вероятностью ионизации этой оболочки, которую можно измерить экспериментально или рассчитать теоретически в соответствии с условиями эксперимента. При выбивании электрона из K-оболочки возможное наличие вакансий в L, M и других внешних оболочках вызывает энергетический сдвиг и изменения относительной интенсивности линий рентгеновского K-излучения. Pajek et al. [20] показали, что изменения положения и ширины пиков рентгеновского излучения являются наиболее надежными детерминантами вероятностей многократной ионизации внешних оболочек. Они объединили свои экспериментальные данные по сдвигам энергии и уширениям, чтобы извлечь эти вероятности.

В наших расчетах сечений ионизации на основе измеренных сечений выхода рентгеновского излучения мы использовали подход, описанный Дж. А. Танисом [21]. Отношение интенсивностей $I_{K\beta}/I_{K\alpha}$ и значения сдвигов энергии пиков K_α в этом случае использовались для оценки степени ионизации подоболочек 2p и 3p при испускании рентгеновского K-излучения и, как результат, для расчета выходов флуоресценции и сечений ионизации K-оболочки для многократно ионизированных атомов мишени.

В таблице 4 представлены измеренные нами сдвиги линий K_α и отношения выходов $I_{K\beta}/I_{K\alpha}$ для мишеней Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb и Mo. Поскольку сдвиг энергии рентгеновского излучения Kα обусловлен в основном вакансиями в L-оболочке, расчеты Хартри-Фока-Слэйтера [22] можно использовать для определения количества вакансий 2p, V_{2p}, при наблюдаемом сдвиге энергии. Зная среднее количество вакансий 2p в момент испускания K_α рентгеновского излучения, мож-

но оценить среднее количество вакансий 3_p, V_{3p}, по измеренному отношению $I_{K\beta}/I_{K\alpha}$ [21]:

$$\frac{I_{K\beta}}{I_{K\alpha}} = \frac{I^0_{K\beta}}{I^0_{K\alpha}} \left[\frac{1 - \frac{V_{3p}}{6}}{1 - \frac{V_{2p}}{6}} \right], \qquad (5)$$

где $\frac{I^0_{K\beta}}{I^0_{K\alpha}}$ – отношение интенсивностей для одновакансионного атома [22].

Полученные значения 2p (V_{2p}) и 3p (V_{3p}) вакансий представлены в таблице 4.

Таблица 4. Измеренные смещения линий K_α и отношения $I_{K\beta}/I_{K\alpha}$ и соответствующее им рассчитанное число 2_p и $3p$ вакансий при энергии ионов кобальта 94,4 МэВ

	Ti	Cr	Cu	Zn	Zr	Nb	Mo
Смещение энергии, эВ	114	139	156	145	217	221	212
Число 2_p вакансий	4,4	4,8	4,3	3,9	4,2	4,1	3,9
$I_{K\beta}/I_{K\alpha}$	0,217	0,173	0,138	0,138	0,104	0,122	0,163
$I^0_{K\beta}/I^0_{K\alpha}$	0,1355	0,1337	0,1379	0,1410	0,1913	0,1947	0,1981
Число 3p вакансий	3,4	4,.4	4,3	3,9	5,0	4,8	4,3

Изменения выхода флуоресценции, w_K, обусловленные наличием множественных 2_p и 3_p вакансий, можно рассчитать, используя процедуру статистического масштабирования Larkins [23].

Полученные выходы флуоресценции w_K в случае многократной ионизации и одновакансионные выходы флуоресценции w_K^0 [24] для мишеней Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb и Mo представлены в таблице 5. Как следует из таблицы 5, отличия выходов флуоресценции с учетом многократной ионизации от одновакансионных выходов флуоресценции не превышают 35% (для титановой мишени).

Таблица 6 содержит экспериментальные и рассчитанные в рамках ECPSSR формализма сечения ионизации K-оболочки. На рисунке 3 эти сечения представлены в виде зависимостей от атомного номера мишеней.

Таблица 5. Выходы флуоресценции, модифицированные для многократной ионизации при энергии ионов кобальта 94,4 МэВ

Мишень	w_K^0	$\frac{w_K}{w_K^0}$	w_K
Ti	0,214	1,35	0,290
Cr	0,275	1,32	0,362
Cu	0,44	1,23	0,543
Zn	0,474	1,21	0,572
Zr	0,730	1,10	0,803
Nb	0,747	1,09	0,816
Mo	0,765	1,08	0,828

Таблица 6. Экспериментальные и рассчитанные в рамках подхода ECPSSR сечения ионизации K-оболочки для ионов $^{59}Co^{12+}$ с энергией 94,4 МэВ

Мишень	Z_2	σ_i (exp)	σ_i (ECPSSR)
Ti	22	26000	39378
Cr	24	20400	9741
Cu	29	10600	568
Zn	30	3170	354
Zr	40	36.7	11.3
Nb	41	28.8	8.83
Mo	42	10.9	6.98

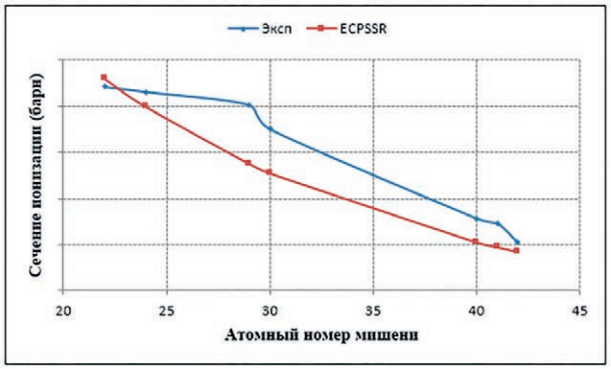


Рисунок 3. Зависимость сечений ионизации от атомного номера мишени

Рисунок 3 демонстрирует, что даже после учета влияния многократной ионизации на выходы флуоресценции и перехода от сечений выхода рентгеновского излучения к сечениям ионизации внутренних оболочек атомов мишени характер экспериментально измеренной зависимости сечений ионизации от атомного номера мишени не изменился по сравнению с рисунком 1. Следовательно, наблюдаемые на рисунке 1 отклонения экспериментальных данных от теоретических не могут быть объяснены только многократной ионизацией без привлечения эффектов, связанных с межорбитальными переходами электронов.

Выводы

В настоящей работе измерены сечения выхода рентгеновского излучения, индуцированного ионами кобальта, из мишеней с Z от 22 до 83 при энергии ускоренного пучка кобальта 94,4 MeV.

Экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими предсказаниями PWBA и ECPSSR моделей, рассчитанными с использованием программы ISICS.

Полученные данные показывают, что на общий спад сечения выхода рентгеновского излучения K-оболочки с увеличением атомного номера мишени, что соответствует ECPSSR прогнозу, накладывается его рост в диапазоне от $Z_2 = 22$ до $Z_2 \approx 41$ с максимумом (сечение возрастает в 23 раза по отношению к прогнозу ECPSSR) при $Z_2 \approx 29$. Это явление может

быть объяснено тем, что при взаимодействиях, близких к симметричным, через образовавшиеся молекулярные орбитали возможно перемещение электронов между орбиталями сталкивающихся атомов. Следовательно, генерацию рентгеновского излучения от исследуемого элемента можно максимизировать, выбрав бомбардирующий ион с близко подобранной энергией связи K- или L-оболочки. Фактически, пиковые выходы рентгеновского излучения достигаются с использованием снарядов Z_l, несколько меньшие, чем Z_2 мишени. Таким образом, согласно HIPIXE анализу, задача достижения максимального выхода рентгеновского излучения от мишени с атомным номером Z_2 будет решена при снаряде с $Z_1 = Z_2$-(1÷5).

Оценено также влияние многократной ионизации на характер зависимости сечений ионизации от атомного номера мишени, что важно, учитывая, что программа ISICS11 основана на одновакансионном механизме ионизации. Из-за многократной ионизации при выбивании электрона из K-оболочки возможное наличие вакансий в L и M-оболочках вызывает энергетический сдвиг и изменение относительной интенсивности линий рентгеновского K-излучения. Опираясь на эти данные, рассчитаны выходы флуоресценции и сечения ионизации K-оболочек для элементов от титана до молибдена, модифицированные для многократной ионизации. Полученные результаты показывают, что отличия выходов флуоресценции с учетом многократной ионизации от одновакансионных выходов флуоресценции не превышают 35% (для титановой мишени). Следовательно, наблюдаемые отклонения экспериментальных данных от теоретических не могут быть объяснены только многократной ионизацией без привлечения эффектов, связанных с межорбитальными переходами электронов.

Работа выполнена в рамках научно-технической программы Министерства энергетики «Развитие комплексных научных исследований в области ядерной и радиационной физики на базе казахстанских ускорительных комплексов».

Литература / References:

1. .J. Ozafrán, M.E. Vázquez, A.J. Kreiner, M.E. Debray, J.M. Kesque, A.S.M.A.Romo, C. Pomar, H. Somacal, M. Davidson, J. Davidson, PIXE analysis of heavy water from a nuclear power plant, Nucl. Instr. and Meth. B 74 (1993) 542.
2. M.J. Ozafrán, M.E. Vázquez, A.S.M.A. Romo, M.A. Cardona, M.E. Debray, D.Hojman, J.M. Kesque, A.J. Kreiner, J.J. Menendez, H. Somacal, J. Davidson, M.Davidson, Heavy ion induced X-ray emission work at the TANDAR laboratory in Buenos Aires, Nucl. Instr. and Meth. B 99 (1995) 384.
3. D. Morata, M. Polvé, A. Valdés, M. Belmar, M.I. Dinator, M. Silva, M.A. Leiva, T.Aigouy, J.R. Morales, Characterisation of aerosol from Santiago, Chile: anintegrated PIXE–SEM–EDX study, Environ. Geol. 56 (2008) 81.
4. M.I. Michelettia, L.G. Murruni, M.E. Debray, M. Rosenbusch, M. Graf, G. Ávila Cadena, P. Vitale, J. Davidson, H. Somacal, Elemental analysis of aerosols collected at the Pierre Auger Cosmic Ray Observatory with PIXE technique complemented with SEM/EDX, Nucl. Instr. and Meth. B 288 (2012) 10.
5. B. Cross, R. Zeisler and E. A. Schweikert, High energy heavy-ion induced x-ray emission analysis, Nucl. Instr. and Meth. 142 (1977) 111.
6. H. Kubo, F.C. Jundt, t and K.H. Purser, Target Z Dependence of Projectile *Ka* X-Ray Production Cross Sections in High-Energy, Heavy-Ion-Atom Collisions, Phys. Rev. Lett. Vol. 31 № 11 (1973) 674.
7. H.J. Specht, Ionisation innerer Elektronenschalen bei fast-adiabatischen Stößen schwerer Ionen, Z. Phys. 185 (1965) 301.
8. T.M. Kavanagh, M.E. Cunningham, R.C. Der, R.J. Fortner, J.M. Khan, E.J. Zoharis, and J.D. Garcia, X-Ray Production in Ion-Atom Collisions: The Influence of Level Matching, Phys. Rev. Lett. 25 (1970) 1473.
9. E. Merzbacher, H.W. Lewis, X-ray production by heavy charged particles,Encyclopedia of Physics, vol. 34, Springer, Berlin, 1958.
10. W. Brandt, G. Lapicki, Energy-loss effect in inner-shell Coulomb ionization by heavy charged particles, Phys. Rev. A 23 (4) (1981) 1717.
11. S. J. Cipolla, An improved version of ISICS: a program for calculating K-, L-, and M-shell cross sections from PWBA and ECPSSR theory using a personal computer, Comp. Phys. Comm. 176 (2007) 157.
12. S. J. Cipolla, The united atom approximation option in the ISICS program to calculate K-, L- and M-shell cross sections from PWBA and ECPSSR theory, Nucl. Instr. And Meth. B 261 (2007) 142.
13. S. J. Cipolla, ISICS2011, an updated version of ISICS: A program for calculation K-, L-, and M-shell cross sections from PWBA and ECPSSR theories using a personal computer, Comp. Phys. Comm. 182 (2011) 2439.
14. B. Gikal et al., Physics of Particles and Nuclei Letters. Vol. 5 № 7 (2008) 642.
15. I. Gorlachev. N. Gluchshenko. I. Ivanov. A. Kireyev. M. Krasnopyorova. A. Kurakhmedov. A. Platov. Y. Sambayev. M. Zdorovets. X-ray production cross sections induced by neon ions. Nucl. Instr. Method B 448 (2019) 19.
16. E. Batyrbekov, N. Gluchshenko, I. Gorlachev, I. Ivanov, A. Platov, "X-ray production cross section for K-, L- and M-shell by 14 MeV and 19.6 MeV nitrogen", Nucl. Instr. And Meth. B 330, p. 86-90 (2014).
17. I. Gorlachev, N. Gluchshenko, I. Ivanov, A. Kireyev, S. Kozin, A.Kurakhmedov, A. Platov, M. Zdorovets, K-, L- and M-shell X-ray productions induced by oxygen ions in the 0.8-1.6 MeV/amu range, Nucl. Instr. And Meth. Vol. 381, pp. 34-38 (2016).
18. I. Gorlachev, N. Gluchshenko, I. Ivanov, P. Kharkin, A. Kireyev, U. Koztayeva, A. Kurakhmedov, F. Pen'kov, A. Platov, Y. Sambayev, M. Zdorovets, X-ray production cross sections induced by carbon ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B– 2021. – B 499. – P. 100.

19. A. Cairns, A. D. Marwick and I. V. Mitchell, Thin Solid8 Films 19 (1973) 91; T. M. Kavanagh, R. C. Der, R. J. Fortner and M. E. Cunningham, Phys. Rev. A8 (1973) 2332.
20. M. Pajek, D. Banas, J. Semaniak, J. Braziewicz, U. Majewska, S. Chojnacki, T. Czyzewski, I. Fijal, M. Jaskola, A. Glombik, W. Kretschmer, D. Trautmann, G. Lapicki, T. Mukoyama, Phys. Rev. A 68 (2003) 022705.
21. J. A. Tanis, S. M. Shafroth, W. W. Jacobs, T. McAbee, K-shell x-ray production in ^{19}K, ^{22}Ti, ^{25}Mn, and ^{35}Br by 20–80-Mev ^{17}Cl ions, Phys. Rev. A 31 №2, 750 (1985).
22. H. Scofield, Phys. Rev. A9, 1041 (1974).
23. F. P. Larkins, J. Phys. 8 4, L29 (1971).
24. M. O. Krause, J. Phys. Chem. Ref. Data 8, 307 (1979).

КӨБЕЙТІЛГЕН ИОНДАЛҒАН НЫСАНА АТОМДАРЫ ҮШІН ИОНДАЛУ КӨЛДЕНЕҢ ҚИМАЛАРЫ ЖӘНЕ КОБАЛЬТ ИОНДАРЫМЕН ҚОЗДЫРЫЛҒАН РЕНТГЕН СӘУЛЕСІНІҢ ШЫҒУЫ

И. Д. Горлачев, А. В. Киреев, А. В. Платов*, К. Е. Попов

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: platov@inp.kz*

94,4 МэВ $^{59}Co^{12+}$ иондарының үдемелі сәулелерімен қоздырылған Ti-ден Bi-ге дейінгі элементтер үшін K-қабықша, L-қабықша және M-қабықша рентген сәулесінің көлденең қималары өлшенді. Нәтижелер ISICS11 бағдарламасын пайдаланып есептелген ECPSSR және PWBA теорияларының болжамдарымен салыстырылды. Алынған деректер нысана атомдық санының артуымен K-қабықша рентген сәулесінің көлденең қимасының жалпы төмендеуі Z_2 = 22-ден $Z_2 \approx 41$-ге дейінгі диапазонның артуымен, $Z_2 \approx 29$-да максимуммен бірге жүретінін көрсетеді. Бұл құбылысты симметриялы жақын өзара әрекеттесулер электрондардың пайда болған молекулалық орбитальдар арқылы соқтығысатын атомдардың орбитальдары арасында қозғалуына мүмкіндік беретінімен түсіндіруге болады. Демек, берілген химиялық элемент үшін рентген сәулесінің өндірісінің көлденең қимасын PIXE талдауы кезінде сәулелену режимін – түсетін ионның энергиясы мен түрін таңдау арқылы таңдамалы түрде барынша арттыруға болады. Алынған спектрлердегі рентген сызықтарының ығысуы мен кеңеюіне сүйене отырып, титаннан молибденге дейінгі элементтер үшін флуоресценция өнімділігі және K-қабықша иондану көлденең қималары есептелді, олар көптік иондану үшін өзгертілді. Нәтижелер көптік иондануды ескеретін флуоресценция өнімділігі мен бір бос флуоресценция өнімділігі арасындағы айырмашылықтар 35%-дан аспайтынын көрсетеді. Демек, эксперименттік деректердің теориялық деректерден байқалған ауытқуларын орбитальды электронды ауысулармен байланысты әсерлерді ескермей, тек көптік иондану арқылы түсіндіруге болмайды.

Түйін сөздер: *рентгендік өндіріс қимасы, кобальт иондары, ECPSSR теориясы, PWBA теориясы, HIPIXE.*

IONIZATION CROSS SECTIONS FOR MULTIPLY IONIZED TARGET ATOMS AND THE X-RAY PRODUCTION EXCITED BY COBALT IONS

I.D. Gorlachev, A.V. Kireev, A.V. Platov*, K.E. Popov

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: platov@inp.kz*

The K, L, and M X-ray yield cross sections were measured for elements from Ti to Bi excited by accelerated beams of 94.4 MeV $^{59}Co^{12+}$ ions. The results were compared with the predictions of the ECPSSR and PWBA theories, calculated using the ISICS11 program. The obtained data show that the overall decrease in the K-shell X-ray yield cross section with increasing atomic number of the target is accompanied by an increase over the range from Z_2 = 22 to $Z_2 \approx 41$, with a maximum at $Z_2 \approx 29$. This phenomenon can be explained by the fact that near-symmetric interactions allow electrons to move between the orbitals of colliding atoms through the resulting molecular orbitals. Consequently, the X-ray production cross section for a given chemical element can be selectively maximized by selecting the irradiation mode – the energy and type of the incident ion – during PIXE analysis. Based on the shifts and broadening of X-ray lines in the obtained spectra, fluorescence yields and K-shell ionization cross sections were calculated for elements from titanium to molybdenum, modified for multiple ionization. The results show that the differences between fluorescence yields accounting for multiple ionization and single-vacancy fluorescence yields do not exceed 35%. Consequently, the observed deviations of experimental data from theoretical ones cannot be explained solely by multiple ionization without invoking effects associated with interorbital electron transitions.

Keywords: *x-ray production cross section; cobalt ions; ECPSSR theory, PWBA theory, HIPIXE.*

СПИСОК АВТОРОВ

Aitkulov M.M., 63
Arkhangelsky E.E., 71
Baimenov A.A., 71
Bayev V.M., 113
Chektybayev B.Zh., 113
Coruh A.A., 46
Getman D.V., 113
Gubin A.M., 113
Gulkin A.V., 113
Hamidova S.N., 15
Kamal A.A., 71
Kashikbayev Ye.A., 113
Khametova A.A., 151
Kotov S.V., 113
Kulsartov T.T., 63
Kusainov A.T., 113
Mammadov V.U., 15
Mekebayeva Y.Y., 71
Mukeneva S.A., 113
Nurakhmet D.D., 71
Olkhovik D.A., 113
Podoinikov M.M., 63
Sairanbayev D.D., 63
Satayeva A.A., 71
Savkin V.I., 113
Shadiyar Z.Z., 71
Shaimerdenov A.A., 63
Shlimas D.I., 151
Zhenis K.K., 113
А.Бейсебеков М.А., 158
Абулгазинова Д.И., 81
Айдарханов А.О., 186
Айдарханова А.К., 186
Ақатан К.К., 158
Алимов Д.К., 196
Амангельдиева Ю.Ю., 46
Аманжулов Б.С., 40
Бакланов В.В., 176
Бакланова Ю.Ю., 176
Балтабаева Д.Э., 46
Батырбеков Э.Г., 186
Баятанова Л.Л., 46
Бихерт Е.В., 40
Букина О.С., 176
Буртебаев Н.Н., 196
Витюк Г.А., 142
Горлачев И.Д., 226
Дерябина Л.П., 81
Джансеитов Д.М., 196
Диков А.С., 220
Дүйсен А.Ж., 134
Дюсембаева М.Т., 15
Дюсембаева М.Т., 28
Е Ибраева Ж.Е, 158
Жанболатов О.М., 56, 103, 142, 210
Женіс Д.Т., 142
Женіс Қ.Қ., 134
Жуматаева И.З., 122
Иванов И.А., 40
Иркимбеков Р.А., 56, 103, 142, 210
Исағали Ә.А., 90
К Батталова А.К, 158
К.Кабдрахманова А.К., 158
К.Кабдрахманова С.К., 158
Кабдыракова А.М., 168, 186
Какимова Г.Г., 56
Кашикбаев Е.А., 134
Киреев А.В., 226
Ковальчук К.В., 196
Козловский А.Л., 122
Коровиков А.Г., 81, 134, 176
Кошербаева Р.К., 196
Кульсартов Т.В., 220
Кундузбаева А.Е., 168, 186
Курбанбеков Ш.Ш., 46
Кусаинов А.Т., 134
Қаржаубаева А.Қ., 158
Ларионова Н.В., 15, 168, 186
Максимкина Е.А., 220
Михайлова Н.Н., 90
Мухамедов Н.Е., 56, 103, 142, 210
Н Сагиева Н.Н, 158
Наурызова С.З., 158
Нургайсинова Н.К., 15
Нургайсинова Н.К., 28
Ольховик Д.А., 134
Пан А.Н., 196
Паницкий А.В., 186
Платов А.В., 226
Полковников В.С., 134
Попов К.Е., 226
Поспелов В.А., 81
Садыков К.С., 81
Сальменбаев С.Е., 15, 28
Сапар А.Д., 40
Сейтбаев А.С., 40
Секен Д.М., 103, 210
Сиябеков А.О., 204
Смирнов С.Д., 15, 28
Субботин С.Б., 186
Сураев А.С., 56, 103, 210
Ташекова А.Ж., 15, 28,
Темір А.М., 40
Тимонова Л.В., 186
Тлеубай И.К., 40
Топорова А.В., 168
Торгаев А.Т., 204
Турченко Д.В., 186
Тынышбаев К.М., 122
Унгарбаев Е.О., 40
Чектыбаев Б.Ж., 134
Шаймардан Е.Е., 158
Шульга М.В., 90
Яковлев В.В., 176

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи для публикации в журнале отправляются авторами после регистрации на веб-сайте журнала в электронном виде в формате MS WORD (.docx).

Текст печатается **в одну колонук** на листах формата А4 (210 × 297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (600–2400 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используйте шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов. Пожалуйста, используйте встроенные стили заголовков (Заголовок 1, 2…) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных подписей.

В левом верхнем углу первой страницы **должен быть указан индекс УДК.** Название статьи печатается ниже заглавными буквами, в одном абзаце. После этого печатается текст краткой аннотации на языке статьи (100–3000 символов), и отдельной строкой (после фразы Ключевые слова:) – ключевые слова (5–10). Далее, со следующего абзаца – основной текст, содержащий разделы: Введение, Основную часть, Результаты (возможно, с подразделами) и Заключение. После текста статьи приводится список литературы (на языках оригиналов) и блоки «название статьи, аннотация, ключевые слова» на двух оставшихся языках.

Обратите внимание, что Ф.И.О. авторов и представляемые организации в статье указывать не нужно, т.к. статьи проходят двойное «слепое» рецензирование. **Эту информацию НЕОБХОДИМО заполнить на трех языках (русском, казахском, английском) в форме на веб-сайте журнала при подаче статьи.** *Рекомендуем заранее подготовить ее в виде отдельного документа с таблицами по образцу (см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице) и приложить к статье.*

Для текста статьи используйте одинарный межстрочный интервал, между абзацами не нужно вставлять пустые абзацы и строки.

Не используйте таблицы для расположения иллюстраций и подрисуночных подписей, а также средства рисования MS Word поверх иллюстраций.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Окончательная редакция статьи, прошедшая рецензирование и допущенная к публикации, должна содержать блоки на трех языках – казахском, английском и русском, с указанием названия статьи, фамилий, имен, отчеств авторов, полного названия организаций, городов и стран местонахождения, которые они представляют, аннотации (объемом 100–3000 символов, включая знаки препинания и пробелы), и ключевых слов (5–10).
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных […] скобках по мере упоминания. Список литературы приводится по ГОСТ 7.1-2003.
- Не допускается использование механизма автоматической нумерации (поля) MS Word для нумерации ссылок на литературу, списков, рисунков и таблиц – используйте обычный текст;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см). Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. Файлы рисунков должны быть представлены отдельно в одном из растровых – .tif, .png (для схем и рисунков с надписями), .jpg (для фото) с разрешением 300 dpi (~1000 px для рисунков шириной 8 см и ~1800 px для рисунков шириной 14 см) или векторных – .svg, .wmf, .emf форматах. Названия файлов должны соответствовать положению в статье (напр. Рисунок 1-a.tiff). Для надписей на рисунках предпочтительно использовать шрифт Arial Narrow или аналогичный (узкий шрифт без засечек).
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как уравнения MS Word или формулы MathType. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.
- Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. Бумажная версии статьи должна быть в конце подписана авторами.

К статье прилагаются следующие документы:

Сопроводительное письмо от авторов, в котором должны содержаться сведения о том, что статья может быть опубликована в открытой печати, ранее не была опубликована, не находится на рассмотрении на предмет публикации в других изданиях, статья не содержит информации, способной привести к конфликту интересов.

Файлы рисунков.

Название статьи, аннотация, ключевые слова, а также сведения обо всех авторах статьи и представляемых организациях заполняются ***на 3-х языках (русском, казахском, английском) в форме на сайте при подаче статьи*** (эту информацию также желательно приложить к статье в виде отдельного файла – см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице).

Дополнительную актуальную информацию по оформлению, подготовке статей, авторским правам, регистрации можно получить на веб-сайте журнала в разделе **Правила для авторов** (https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

ОБРАЗЕЦ

Название статьи (на русском языке)

Таблица 1. Авторы (на русском языке)

Порядковый номер автора статьи	Фамилия	Имя полностью	Отчество полностью (если имеется)	Должность	Ученая степень	Телефон (без скобок, пробелов и дефисов)	Электронная почта	Номера организаций, которые представляет автор (из таблицы 2)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зав. лаб.	к.ф.-м.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на русском языке)

Порядковый номер организации	Наименование	Полный почтовый адрес (индекс, страна, город, улица, дом)	Официальный веб-сайт (если имеется)
1	Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2	www.enu.kz
2	Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Абылай хана, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на казахском языке)

Таблица 1. Авторы (на казахском языке)

Мақала авторының реттік нөмірі	Тегі	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық поштасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана меңгерушісі	ф.-м.ғ.к.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на казахском языке)

Ұйымның реттік нөмірі	Атауы	Толық пошталық мекенжайы (индекс, ел, қала, көше, үй)	Ресми веб-сайт (болса)
1	Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Сәтпаев көшесі, 2	www.enu.kz
2	ҚР ЭМ Ядролық физика институтының Астана филиалы	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Абылай хан даңғылы, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на английском языке)

Таблица 1. Авторы (на английском языке)

Order number of author's article	Surname	Full Name	Full Middle Name (if any)	Position	Academic degree	Telephone (free of brackets, gaps and hyphens)	E-mail	Numbers of organizations representing by author (from Table 2)
1	Ivanov	Ivan	Ivanovich	Associate professor	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Petrov	Peter	Petrovich	Chief of laboratory	Cand. of Phys. and Math. Sc.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на английском языке)

Order number of organization	Title	Full post address (zip code, country, city, street, house)	Official web-site (if any)
1	L.N. Eurasian National University	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpayev st. 2	www.enu.kz
2	Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics ME RK	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, ave. Abylai Khan, 2/1	www.inp.kz

Примечание: если информация отсутствует – оставляйте соответствующие ячейки таблицы пустыми.

Собственник:
РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. +7 (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. +7 (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 180010, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
https://journals.nnc.kz/jour

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2026

Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г.
Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

Журнал издается при поддержке
Национальной академии наук Республики Казахстан
при Президенте Республики Казахстан (НАН РК)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ПРЕЗИДЕНТІНІҢ ЖАНЫНДАҒЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ
АКАДЕМИЯСЫ

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии
ТОО «Шаңырақ-Медиа»
г. Астана, ул. Кокарал, 2/1
тел.: 87027674341

