



ISSN 1563-0315 • eISSN 2663-2276



ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛҒ-ФАРАБИ AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

ХАБАРШЫ

ФИЗИКА СЕРИЯСЫ

ВЕСТНИК

СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ

RECENT CONTRIBUTIONS
TO PHYSICS

2(97)2026

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ХАБАРШЫ

Физика сериясы

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЪ-ФАРАБИ

ВЕСТНИК

Серия физическая

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

RECENT CONTRIBUTIONS TO PHYSICS

№2 (97)

Алматы
«Қазақ университеті»
2026



ISSN 1563-0315; eISSN 2663-2276

ХАБАРШЫ

ФИЗИКА СЕРИЯСЫ №2(97) маусым



04.05.2017 ж. Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінде тіркелген

Күәлік № 14498-Ж

*Журнал жылына 4 рет жарыққа шығады
(наурыз, маусым, қыркүйек, желтоқсан)*

Редакциялық алқа

Нұрзада Әбдібекқызы Бейсен – ғылыми редактор, физика-математика ғылымдарының кандидаты, проф., әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан
Ақмарал Каримовна Иманбаева - Ассистент-профессор, жауапты редактор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Лу Гуолян - Профессор, Бас редактордың орынбасары, Физикалық ғылымдар және технологиялар мектебі, Синьцзян университеті, Қытай

Әбдірахман Уәлиұлы Алдияров – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің профессоры, Қазақстан
Бобомұрат Ахмедов – Өзбекстан Ұлттық университетінің теориялық физика институтының профессоры, Өзбекстан

Медеу Ержанұлы Әбішев – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің профессоры, Қазақстан
Басудеб Дасгунта - Үндістанның Тата іргелі зерттеулер институтының профессоры, Үндістан

Буфенди Лайфа - Орлеан университетінің плазма физикасы профессоры, Франция

Эрнандо Кеведо - Мексиканың Ұлттық автономиялық университетінің Ядролық ғылымдар институтының профессоры, Мексика

Жарқын Есімбек - Синьцзян астрономиялық обсерваториясының профессоры, Қытай

Марғұлан Қасенұлы Ибраимов - PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Владимир Дмитриевич Ивашук - профессор, Ресей Халықтар достығы университеті, Ресей

Эцуо Ишицука - PhD, Жапония атом энергиясы агенттігі, Мурамацу, Жапония

Владимир Николаевич Косов - профессор, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан

Эллина Лунарска - Профессор, Физикалық химия институты, Польша

Павел Шафарик - PhD, Прагадағы Чех техникалық университеті, Чехия

Нұржан Орынбасарұлы Садуев - PhD, Ядролық физика институты, Қазақстан

Жексенбек Токтарбай - PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Алуа Мақсұтова - Техникалық редактор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан

Физика сериясы – физика саласындағы іргелі және қолданбалы зерттеулер бойынша бірегей ғылыми және шолу мақалаларды жариялайтын ғылыми басылым.



Жоба менеджері

Гульмира Шаккозова

Телефон: +77017242911

E-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

ИБ №18094

Пішімі 60x84/8. Көлемі 12,3 б.т. Тапсырыс №3578.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Қазақ университеті» баспа үйі.

050040, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71.

Баспа журналдың ішкі мазмұнына жауап бермейді.

© Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, 2026

Теориялық физика
Ядро және элементар бөлшектер физикасы
Астрофизика

Theoretical Physics
Nuclear and Elementary Particle Physics
Astrophysics

Теоретическая физика
Физика ядра и элементарных частиц
Астрофизика

А. Мұратхан^{1,2} , Н. Шыңғысхан¹ , Ә.С. Тәукенова¹ , К. Дәуітхан² ,
А.Т. Оразымбет^{1,2*} 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Ашық типтегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана, Алматы, Қазақстан

*e-mail: ayazhan.ozymbet@kaznu.edu.kz

КВАДРУПОЛЬДІК ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН ЫҚШАМ ОБЪЕКТІЛЕР МАҢЫНДАҒЫ ЖҰҚА АККРЕЦИЯЛЫҚ ДИСКІЛЕРДІҢ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМЫ ЖӘНЕ ОПТИКАЛЫҚ КЕСКІНІ

Бұл жұмыста q -метрикамен сипатталатын ықшам объектілер айналасындағы геометриялық жұқа аккрециялық диск сақиналарының бақыланатын пішіні зерттелген. Қарастырылатын кеңістік-уақыт Шварцшильд геометриясының статикалық әрі осьтік симметриялы деформациясы, мұнда өлшемсіз q параметрі гравитациялық өрістері квадрупольдік үлесті сипаттайды. Фотондардың қозғалысы Гамильтондық түрде жазылып, алыстағы бақылаушыдан экваторлық диск жазықтығына қарай сәулелерді кері қадағалау әдісі арқылы сандық түрде есептелді. Кескіндер төрт бекітілген сәуле шығару радиусы үшін құрылып, Шварцшильд шегімен салыстырылды. $q = 0$ үшін есептеу көлбеу Шварцшильд дискісі үшін изо-радиалды қисықтардың күтілетін ретін қайталайды. Бірдей бақылаушы позициясы және бірдей координаталық сәулелену радиустары үшін оң деформация көрінетін қисықтарды сәл үлкенірек етеді, ал теріс деформация оларды ықшам етеді. Бұл айырмашылық дискінің ішкі сақинасы үшін айқынырақ байқалады, себебі сәйкес фотондар ықшам объектіге анағұрлым жақын аймақтар арқылы өтеді. Алынған нәтижелер тіпті орташа квадрупольдік деформацияның өзі жұқа диск кескінінде байқалатын геометриялық із қалдыра алатынын көрсетеді. Сонымен қатар біз осы анықтамалық сақиналар үшін гравитациялық қызыл ығысуды бағалап, ақ ергежейлінің ықшамдылық параметрін пайдалана отырып, беттік қызыл ығысудың салыстырмалы бағалауын ұсынамыз. Бұл салыстыру квадрупольдік параметрдің бірлікке жуық мәндерінде де әлсіз ықшам жұлдыздық конфигурациялар үшін беттік қызыл ығысуға енгізілетін түзету өте аз болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: q -метрика, жұқа аккрециялық диск, ықшам нысандар, гравитациялық линзалау, сәуле трассалау, квадрупольдік деформация, нөлдік геодезиялық сызықтар.

A. Muratkhan^{1,2}, N. Shyngyskhan¹, A.S. Taukenova¹, K. Dauitkhan²,
A.T. Orazymbet^{1,2*}

¹Farabi University, Almaty, Kazakhstan

²National nanotechnology laboratory of open type, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: ayazhan.ozymbet@kaznu.edu.kz

Geometrical structure and optical appearance of thin accretion disks around quadrupole-deformed compact objects

In paper, we study the apparent shape of geometrically thin accretion-disk rings around compact objects described by the q -metric. The spacetime is a static and axially symmetric deformation of the Schwarzschild geometry, where the dimensionless parameter q controls the quadrupole contribution to the gravitational field. Photon motion is written in Hamiltonian form and integrated by backward ray tracing from a distant observer to the equatorial disk plane. The images are constructed for four fixed emission radii and are compared with the Schwarzschild limit. For $q = 0$, the calculation reproduces the expected ordering of iso-radial curves for an inclined Schwarzschild disk. For the same observer position and the same coordinate emission

radii, positive deformation makes the apparent curves slightly larger, while negative deformation makes them more compact. The change is most visible for the inner disk ring, because the corresponding photons pass closer to the compact object. The results show that even a moderate quadrupole deformation can leave a visible geometrical imprint on thin-disk images. We also estimate the gravitational redshift of the same reference rings and include an illustrative surface-redshift comparison using a white-dwarf-like compactness. This comparison shows that a solar-order quadrupole coefficient produces only a very small correction to the surface redshift in a weakly compact stellar configuration.

Keywords: q -metric, thin accretion disk, compact objects, gravitational lensing, ray tracing, quadrupole deformation, null geodesics

А. Муратхан^{1,2}, Н. Шынғысхан¹, А.С. Таукенова¹, К. Дауитхан^{1,2}, А.Т. Оразымбет^{1,2*}

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, Алматы, Казахстан

*e-mail: ayazhan.ozayymbet@kaznu.edu.kz

Геометрическая структура и оптическое изображение тонких аккреционных дисков вокруг квадрупольно-деформированных компактных объектов

В работе исследованы наблюдаемая форма колец геометрически тонкого аккреционного диска вокруг компактных объектов, описываемых q -метрикой. Рассматриваемое пространство-время представляет собой статическую и осесимметричную деформацию геометрии Шварцшильда, где безразмерный q -параметр характеризует квадрупольный вклад в гравитационное поле. Движение фотонов записывается в гамильтоновой форме и численно рассчитывается методом обратного трассирования лучей от удалённого наблюдателя к экваториальной плоскости диска. Изображения строятся для четырёх фиксированных радиусов излучения и сравниваются с пределом Шварцшильда. При $q = 0$ расчёт воспроизводит ожидаемую последовательность изорадиальных кривых для наклонённого Шварцшильдовского диска. При одном и том же положении наблюдателя и одинаковых координатных радиусах излучения положительная деформация делает наблюдаемые кривые несколько более протяжёнными, тогда как отрицательная деформация приводит к их более компактному виду. Это различие наиболее заметно для внутреннего кольца диска, поскольку соответствующие фотоны проходят через области, расположенные значительно ближе к компактному объекту. Полученные результаты показывают, что даже умеренная квадрупольная деформация может оставлять наблюдаемый геометрический след в изображении тонкого диска. Кроме того, мы оцениваем гравитационное красное смещение для тех же опорных колец и, используя параметр компактности белого карлика, приводим сравнительную оценку поверхностного красного смещения. Данное сравнение показывает, что даже при значениях квадрупольного параметра порядка единицы поправка к поверхностному красному смещению для слабо компактных звёздных конфигураций остаётся весьма малой.

Ключевые слова: q -метрика, тонкий аккреционный диск, компактные объекты, гравитационное линзирование, трассировка лучей, квадрупольная деформация, нулевые геодезические.

Кіріспе

Аккрециялық дискілер күшті гравитациялық өріс аймағында орналасқан астрофизикалық объектілерді зерттеудің маңызды құралдарының бірі болып табылады. Жұқа дискілердің стандартты теориясы және оның релятивистік кеңейтулері қара құрдымдар мен басқа да ықшам

астрофизикалық объектілерге жақын аймақтағы диск құрылымын сипаттаудың негізгі теориялық базасы ретінде қолданылады [1–4]. Дискінің ішкі бөлігінде фотондар түзу траектория бойынша таралмайды. Олардың траекториясы қоршаған кеңістік-уақыт геометриясының әсерінен иіледі,

ал алыста орналасқан бақылаушы тіркейтін кескін сәуле шығаратын аккрециялық ортаның қасиеттеріне де, фотондар таралатын геометрияға да тәуелді болады. Сондықтан релятивистік диск кескіндері гравитациялық модельдерді тексеру және стандартты қара құрдым кеңістік-уақытынан мүмкін болатын ауытқуларды түсіндіру үшін кеңінен қолданылатын әдістердің бірі ретінде қарастырылады [5–10].

Шварцшильд шешімі айналмайтын релятивистік астрофизикалық объект маңындағы фотондардың таралуын және дөңгелек орбиталық қозғалысты сипаттауға арналған базалық салыстырмалы шешім ретінде қарастырылады. Ал айналатын қара құрдымдар, әдетте, Керр метрикасы шеңберінде сипатталады [11–13]. Дегенмен статикалық, сфералық симметриядан ауытқыған метрикалар да теориялық тұрғыдан маңызды, себебі олар айналу параметрін енгізбей-ақ жоғары ретті мультипольдік моменттердің әсерін зерттеуге мүмкіндік береді. Нақты астрофизикалық жағдайда гравитациялық объектінің құрылымы міндетті түрде дәл сфералық симметрияға ие бола бермейді. Сфералық симметрия бұзылған кезде монопольдік мүшеден кейінгі алғашқы түзету ретінде квадрупольдік момент пайда болады. Тіпті шағын квадрупольдік деформацияның өзі күшті өріс аймағындағы геодезиялық қозғалыстың динамикасына елеулі ықпал етуі мүмкін. Сондықтан квадруполь параметрі бар дәл метрикалар сфералық емес гравитациялық өрістердің бөлшектер орбитасына, жарықтың иілуіне және аккрециялық дискінің бақыланатын пішініне әсерін жүйелі теориялық талдау жүргізуге мүмкіндік береді [14–19].

Осы жұмыста квадрупольдік метрика, яғни q -метрика қолданылады. Бұл метрика статикалық, осьтік симметриялы вакуумдық кеңістік-уақыт геометриясын сипаттайтын Ципой–Вурхис метрикаларының тобына жатады [14–17, 20, 21]. q -параметр сфералық симметриядан ауытқу дәрежесін көрсетеді. Егер $q = 0$ болса, q -метрика Шварцшильд метрикасына өтеді. Ал $q \neq 0$ жағдайында кеңістік-уақыт сфералық симметриядан ауытқыған гравитациялық объектінің сыртқы өрісін сипаттайды. Төменде қолданылатын белгілеулерге сәйкес нөлден өзгеше алғашқы массалық мультипольдік моменттер келесі түрде жазылады:

$$M_0 = M(1 + q), \quad (1)$$

және

$$M_2 = -\frac{M^3}{3} q(1 + q)(2 + q). \quad (2)$$

Осылайша, q -параметрі гравитациялық өрістің квадрупольдік құраушысын сипаттайды. $M > 0$ болғанда, $q > -1$ шарты толық массаның оң мәнін қамтамасыз етеді. Осы белгілеу жүйесінде $-1 < q < 0$ аралығы ось бойымен созылған деформацияны, ал $q > 0$ мәндері экваторлық бағытта сығылған деформацияны білдіреді.

q -метрика жалаң сингулярлықтың гравитациялық өрісіндегі массалы және массасыз сынақ бөлшектерінің қозғалысын зерттеу үшін қолданылған [22]. Сонымен қатар квадрупольдік параметрдің дөңгелек орбиталардың тұрақтылық шарттарын өзгертетіні және сынақ бөлшектер ансамблі ретінде модельденетін аккрециялық дискінің ықтимал ішкі құрылымына әсер етуі мүмкін екені көрсетілген [23]. Осы бағыттағы зерттеу салаларына қара құрдымға ұқсас объектілердің қасиеттерін, квадрупольдік деформациясы бар ықшам гравитациялық денелерді, жарықтың гравитациялық сынуын, қызыл ығысуды, радиолокациялық сигналдың кідіруін және Галактика орталығындағы құбылыстарды теориялық тұрғыдан талдау мәселелері жатады [24–27]. Атап айтқанда, шекті тұрақты дөңгелек орбитаның радиусы тек Шварцшильд метрикасына сәйкес мәнмен анықталмайды. q -параметрінің оң мәндері тұрақты орбиталар аймағын сыртқа қарай ығыстырса, оның теріс мәндері Шварцшильд метрикасындағы шекті тұрақты дөңгелек орбитаның ішкі аймағында да тұрақты дөңгелек орбиталардың қалыптасуына ықпал етуі мүмкін. Мұндай орбиталық қасиеттер аккрециялық дискінің геометриялық құрылымы орталық объектінің квадрупольдік деформациясы жөнінде ақпарат бере алатынын көрсетеді.

Дегенмен, дискінің бақыланатын кескіні тек дөңгелек орбиталардың радиустарымен ғана анықталмайды. Оған жарықтың гравитациялық иілуі, гравитациялық қызыл ығысу, гравитациялық линзалық ұлғаю және күшті гравитациялық өріс аймағындағы нөлдік геодезиялық сызықтар бойымен қалыптасатын көп кескінділік те әсер етеді [28–32]. Дискіден шыққан фотондар бақылаушыға жеткенге дейін қисық кеңістік-уақыт геометриясы арқылы таралады. Осы жұмыста негізгі назар дәл осы таралу есебіне аударылады. Біз q -метрикадағы нөлдік геодезиялық сызықтарды есептеп, бақылаушы экранында жұқа экваторлық диск сақиналарының бақыланатын кескіндерін құрамыз. Шварцшильд жағдайы сандық әдістің дұрыстығын тексеру үшін пайдаланылады, ал $q \neq 0$ кезіндегі шешімдер квадрупольдік деформацияның геометриялық әсерін талдауға

мүмкіндік береді. Бұл мәселе қазіргі кезде қара құрдым бейнелері мен фотондық сақина құрылымын күшті гравитациялық өріс жағдайындағы гравитацияны тексеру мүмкіндігімен де тікелей байланысты, әсіресе Оқиғалар көкжиегі телескопы арқылы M87* және Sgr A* нысандары бойынша алынған бақылау нәтижелерінен кейін [33–35].

Бұл есепті шешуде сәуле жолын сандық қадағалау әдісі табиғи тәсіл болып табылады. Қазіргі есептеуде біз модельді әдейі қарапайым түрде құрамыз: диск бекітілген координаталық

радиустардағы дөңгелек сақиналар жиынтығы ретінде бейнеленеді және сәуле шығару заңы енгізілмейді. Мұндай таңдау диск жазықтығының геометриялық бейнеленуін сәуле шығару физикасына қатысты қосымша болжамдардан бөліп қарастыруға мүмкіндік береді. Гравитациялық-линзалық модельдеу бойынша соңғы жұмыстар, соның ішінде CPU және GPU енгізулерін салыстыру, осы типтегі есептер үшін тікелей сандық сәулелік бақылау әдістерін қолданудың орынды екенін көрсетеді [36].

Әдістер

q - метрикуны келесі түрде қарастырамыз:

$$ds^2 = f^{1+q} dt^2 - f^{-q} \left[A(r, \theta) \left(\frac{dr^2}{f} + r^2 d\theta^2 \right) + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right], \quad (3)$$

мұндағы

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r}, \quad (4)$$

және

$$A(r, \theta) = \left[1 + \frac{M^2 \sin^2 \theta}{r^2 - 2Mr} \right]^{-q(2+q)}, \quad (5)$$

мұнда M – массалық масштаб, ал q – өлшемсіз деформация параметрі. Берілген метрика статикалық және осьтік симметрияға ие. (t, r, θ, ϕ) координаталары уақыт тәрізді және осьтік Киллинг векторларына сәйкес таңдалған.

Метрикалық тензордың нөлден өзгеше коварианттық компоненттері мына түрде жазылады:

$$g_{tt} = f^{1+q}, \quad (6)$$

$$g_{rr} = -f^{-q} \frac{A(r, \theta)}{f}, \quad (7)$$

$$g_{\theta\theta} = -f^{-q} A(r, \theta) r^2, \quad (8)$$

$$g_{\phi\phi} = -f^{-q} r^2 \sin^2 \theta. \quad (9)$$

Егер $q = 0$ болса, онда $A(r, \theta) = 1$ болады, ал (3)-теңдеу төмендегі түрге келеді:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r} \right) dt^2 - \left(1 - \frac{2M}{r} \right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2, \quad (10)$$

бұл Шварцшильд метрикасы. Демек, Шварцшильд кеңістік-уақыты $q = 0$ шегінде дәл қалпына келеді.

Ал $q \neq 0$ болған жағдайда $r = 2M$ беті Шварцшильд шешіміндегі оқиға көкжиегі ретінде қарастырылмайды. Бұл бет q -метрика үшін сыртқы қисықтық сингулярлығы болып табылады.

Сондықтан бұл аймақ арқылы фотондардың траекториялары жүргізілмейді.

Сандық есептеулерде интегралдау $r = 2M$ -ге жақын маңда тоқтатылады және біз тек экваторлық дискіге жететін немесе ішкі тоқтау шекарасына жақындайтын сәулелерді ғана қарастырамыз.

Гамильтондық түрдегі нөлдік геодезиялар
Бақыланатын диск кескіні кеңістік-уақыттағы нөлдік геодезиялық сызықтармен анықталады. Гамильтондық формализм және бірінші ретті геодезиялық теңдеулер релятивистік сәуле жолын қадағалау есептеулерінде кеңінен қолданылады [37, 38]. Фотон траекториялары:

$$ds^2 = 0. \quad (11)$$

теңдеуін қанағаттандырады. Осыған эквивалентті түрде қозғалысты Гамильтониан арқылы төмендегідей жазуға болады:

$$H = \frac{1}{2} g^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = 0, \quad (12)$$

мұндағы p_μ – фотонның төртөлшемді импульсі, ал $g^{\mu\nu}$ – кері метрикалық тензор. Метрика диагональ түрінде берілгендіктен, кері компоненттер $g^{\mu\mu} = 1/g_{\mu\mu}$ түрінде қосындылаусыз анықталады.

(3) теңдеу үшін Гамильтониан келесі түрде жазылады:

$$H = \frac{1}{2}(g^{tt}p_t^2 + g^{rr}p_r^2 + g^{\theta\theta}p_\theta^2 + g^{\phi\phi}p_\phi^2) = 0. \quad (13)$$

t және ϕ координаталары циклдік. Сондықтан:

$$p_t = \text{const}, \quad p_\phi = \text{const}. \quad (14)$$

Бұл шамаларды былай белгілейміз:

$$E = -p_t, \quad L = p_\phi, \quad (15)$$

мұндағы E – шексіздіктегі фотон энергиясы, ал L — бұрыштық импульстің осьтік компоненті.

Гамильтон теңдеулері төмендегідей өрнектеледі:

$$\frac{dx^\mu}{d\lambda} = \frac{\partial H}{\partial p_\mu}, \quad \frac{dp_\mu}{d\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x^\mu}, \quad (16)$$

мұндағы λ — аффиндік параметр. Сандық интегралдау барысында келесі айнымалылар қарастырылады:

$$r(\lambda), \quad \theta(\lambda), \quad \phi(\lambda), \quad p_r(\lambda), \quad p_\theta(\lambda), \quad (17)$$

ал p_t және p_ϕ тұрақты шамалар ретінде сақталады. Ашық түрде теңдеулер жүйесі былай жазылады:

$$\frac{dr}{d\lambda} = g^{rr}p_r, \quad (18)$$

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = g^{\theta\theta}p_\theta, \quad (19)$$

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = g^{\phi\phi}p_\phi, \quad (20)$$

$$\frac{dp_r}{d\lambda} = -\frac{1}{2}\frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial r}p_\alpha p_\beta, \quad (21)$$

$$\frac{dp_\theta}{d\lambda} = -\frac{1}{2}\frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial \theta}p_\alpha p_\beta. \quad (22)$$

Интегралдау процесінде нөлдік шектеуді бақылау үшін H шамасының мәні қадағаланады. Бұл тексеру метрикалық функциялар тез өзгеретін ішкі шекараға жақын жерде ерекше маңызды.

Жұқа аккрециялық диск моделі

Біз дискіні экваторлық жазықтықта орналасқан геометриялық жұқа сәуле шығаратын бет ретінде модельдейміз:

$$\theta = \frac{\pi}{2}. \quad (23)$$

Бұл таңдау q -метрикаға тән айна симметриясымен үйлеседі және экваторлық жазықтықтағы геодезиялық қозғалысты бірмәнді түрде анықтауға мүмкіндік береді.

Қарапайым геометриялық сипаттауда жұқа аккрециялық диск орталық объектіні айнала қозғалатын сынақ бөлшектерінің шеңберлік орбиталар жиыны ретінде қарастыруға болады[2–4]. q -метрика жағдайында экваторлық уақыт тәрізді қозғалысты эффективті потенциал арқылы сипаттауға болады. Массивтік бөлшектер үшін мына түрде жазуға болады:

$$V_{\text{eff}}^2(r, q) = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{q+1} \left[\frac{l^2}{r^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^q + \epsilon \right], \quad (24)$$

мұндағы l — меншікті бұрыштық импульс, ал уақыт тәрізді геодезиялар үшін $\epsilon = 1$.

Шеңберлік орбиталар мына шартты қанағаттандырады:

$$\frac{\partial V_{\text{eff}}^2}{\partial r} = 0, \quad (25)$$

ал шекті тұрақтылық шарты келесі түрде беріледі:

$$\frac{\partial^2 V_{\text{eff}}^2}{\partial r^2} = 0. \quad (26)$$

Осылайша, сынақ бөлшектерінен тұратын дискінің радиалдық шегі шеңберлік геодезиялардың тұрақтылығымен тікелей байланысты болады.

Экваторлық дөңгелек орбиталар үшін квадрат бұрыштық импульстің квадраты мынаны құрайды:

$$l^2 = \frac{M(1+q)r^2 \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-q}}{r - M(3+2q)}. \quad (27)$$

Дөңгелек уақыт тәрізді қозғалыстың болуы үшін мына шарт орындалуы қажет:

$$r > r_c, \quad r_c = M(3+2q). \quad (28)$$

Сол радиус экваторлық дөңгелек фотон орбитасын береді:

$$r_\gamma = M(3 + 2q), \quad (29)$$

мұндағы $q = 0$ болған жағдайда $r_\gamma = 3M$ -ге дейін азаяды.

Экваторлық жазықтықтағы соңғы тұрақты шеңберлік орбита төмендегі формуламен өрнектеледі:

$$r_{\text{isco}}^\pm = M \left(4 + 3q \pm \sqrt{5q^2 + 10q + 4} \right). \quad (30)$$

Шварцшильд шегінде тиісті тармақ $r_{\text{isco}} = 6M$ мәнін береді. Нөлден тыс q үшін соңғы тұрақты орбитаның орны өзгереді. q -дің оң мәндері тұрақты диск аймағын сыртқа қарай ығыстырады, ал теріс мәндері Шварцшильд жағдайындағы мәннен кіші радиустарда да тұрақты шеңберлік қозғалысқа мүмкіндік бере алады. $q \approx -0.5$ маңында бұдан да күрделі орбиталық құрылымдар пайда болуы мүмкін, алайда мұндай үлкен теріс деформациялар төменде келтірілетін кескіндерде пайдаланылмайды.

Бұл мақала аккрецияның гидродинамикалық теңдеулерін шешпейді. Жұмыстың мақсаты шектеулі біз кеңістік-уақыт таңдалған диск радиустарын бақылаушының кескін жазықтығына қалай бейнелейтінін зерттейміз. Сондықтан диск геометриялық сәуле шығаратын бет ретінде қарастырылады. Бұл есептеуді линзалауға бағыттайды және температура, сәуле шығару қабілеті, магнит өрістері немесе плазма динамикасы туралы қосымша болжамдардан бас тартуға мүмкіндік береді.

Бұл жұмыста төрт бекітілген сәуле шығарғыштық радиустарын қолданамыз:

$$r_{\text{em}} = 6M, \quad 10M, \quad 20M, \quad 30M. \quad (31)$$

Бұл радиустар экваторлық диск жазықтығындағы дөңгелек сақиналарды анықтайды. Олардың кескіндері бақылаушы экранында изорадиустық қисықтар түрінде көрінеді. $r_{\text{em}} = 6M$ таңдауы Шварцшильд метрикасындағы шекті тұрақты дөңгелек орбитаға сәйкес келеді. q -метрикада физикалық ішкі шекара, әдетте, q -параметріне тәуелді және (30) теңдеумен анықталады. Біз q -ның барлық мәндері үшін бірдей координаталық радиустарды сақтаймыз, сондықтан салыстыру негізінен фотондардың таралу әсерін көрсетеді және дискінің ішкі шекарасының өзгерісімен шатастырылмайды.

Әрбір сәуле үшін экваторлық жазықтықпен алғашқы қиылысу нүктесі тіркеледі. Егер бұл $\lambda = \lambda_{\text{hit}}$ кезінде орындалса, онда

$$r_{\text{hit}} = r(\lambda_{\text{hit}}), \quad \theta(\lambda_{\text{hit}}) = \frac{\pi}{2}. \quad (32)$$

Кескін келесі бейнелеу арқылы құрылады:

$$(X, Y) \rightarrow r_{\text{hit}}(X, Y), \quad (33)$$

мұндағы (X, Y) — кескін жазықтығындағы декарттық координаталар. Сонда изорадиустық қисықтар:

$$r_{\text{hit}}(X, Y) = r_{\text{em}}, \quad (34)$$

шартымен анықталады. Толық радиациялық модельді құру үшін сәуле шығару заңын, сәуле шығарушы заттың төрт-жылдамдығын, Доплер әсерлерін және гравитациялық линзалық ұлғаюды ескеру қажет. Мұндай модельде бақыланатын және шығарылатын меншікті қарқындылықтар келесідей өрнектеледі:

$$I_{\text{obs}} = g^3 I_{\text{em}}, \quad (35)$$

мұндағы $g = v_{\text{obs}}/v_{\text{em}}$ жалпы жиілік ығысу коэффициенті. Бұл жұмыста біз толық қарқындылық картасын құрмаймыз. Дегенмен, статикалық эмитенттер мен статикалық бақылаушы үшін жиілік ығысуының гравитациялық бөлігі q -уақыттық компонентінен тікелей анықталады:

$$1 + z = \frac{v_{\text{em}}}{v_{\text{obs}}} = \left(\frac{g_{tt}^{\text{obs}}}{g_{tt}^{\text{em}}} \right)^{1/2} = \left[\frac{1 - 2M/r_{\text{obs}}}{1 - 2M/r_{\text{em}}} \right]^{(1+q)/2}. \quad (36)$$

Бұл өрнек кейінірек сәуле жолын сандық қадағалау есебінде қолданылатын сол тірек сақиналар үшін бағаланады. Қызыл ығысу мен радиолокациялық сигналдың кідіруі кезіндегі деформацияның рөлі де сәйкес ықшам объект модельдері үшін талқыланды [26].

Тірек сақиналардың гравитациялық қызыл ығысуы

Диск кескінінің геометриялық пішінінен бөлек, сол тірек сақиналарды олардың гравитациялық қызыл ығысуы арқылы да сипаттауға болады. Біз (36) теңдеуді сәулелік бақылау есептеуіндегідей бақылаушы позициясы және бірдей бекітілген сәулелену радиустары үшін қолданамыз:

$$r_{\text{obs}} = 1000M, r_{\text{em}} = 6M, 10M, 20M, 30M. \quad (37)$$

Осы жағдайда қызыл ығысу мына түрде есептеледі:

$$z = \left[\frac{1 - 2M/r_{\text{obs}}}{1 - 2M/r_{\text{em}}} \right]^{(1+q)/2} - 1. \quad (38)$$

Нәтижесінде алынған мәндер 1-кестеде келтірілген. Қызыл ығысу сәуле шығару радиусы артқан сайын азаяды. Қызыл ығысу сәулелену радиусы артқан сайын азаяды, бұл үлкен радиустардан шығарылған фотондар әлсіз гравитациялық өріс аймақтарында пайда болатындықтан күтіледі. Тұрақты сәулелену радиусы үшін оң квадрупольді деформация Шварцшильд жағдайына қарағанда үлкенірек қызыл ығысу береді, ал теріс деформация кішірек қызыл ығысу береді.

1-кесте. Квадрупольдік параметрдің әртүрлі мәндері үшін тірек сақиналардың гравитациялық қызыл ығысуы. Бақылаушы $r_{\text{obs}} = 1000M$ радиусында орналасқан.

q	$z(6M)$	$z(10M)$	$z(20M)$	$z(30M)$
-0.2	0.175	0.092	0.042	0.027
0	0.224	0.117	0.053	0.034
0.2	0.274	0.142	0.064	0.041

Ең үлкен айырмашылық ең ішкі тірек сақина үшін, яғни $r_{\text{em}} = 6M$ радиусында байқалады, осы сақина кескін жазықтығындағы морфологиялық өзгерістер айқынырақ байқалатын аймақ болып табылады. Қызыл ығысудың радиусқа тәуелділігі мен сәуле жолын қадағалау нәтижесінде алынған кескіндер арасындағы бұл сәйкестік квадрупольдік параметрдің геометриялық әсері ең алдымен дискінің ішкі аймағында айқынырақ көрінетінін көрсетеді.

Атап айтқанда, 1-кестеде статикалық сәуле шығарушылар үшін қызыл ығысудың тек гравитациялық құраушысы ғана берілгенін. Толық бақылаулық модель құру үшін диск материалының орбиталық жылдамдығын, Доплерлік ығысуларды, гравитациялық линзалық ұлғаюды және сәуле шығарудың физикалық заңын ескеру қажет. Бұл әсерлер осы жұмыста қарастырылмайды, өйткені зерттеудің негізгі мақсаты — квадрупольдік деформацияның геометриялық ықпалын жеке бөліп талдау.

Ақ ергежейліге ұқсас ықшам объект үшін беттік қызыл ығысуды бағалау

Қызыл ығысуды есептеуді диск сақинасын емес, сәуле шығаратын бетті қарастыру арқылы ықшам жұлдыз модельдерімен тікелей

байланыстыруға болады. q -метрика сыртқы вакуумдық шешім болғандықтан, жұлдыз беті метриканың өзінен анықталмайды. Сондықтан біз алдын ала берілген беттік радиусты R_* енгіземіз және алынған нәтижені толық ішкі-сыртқы сәйкестендіру есебі ретінде емес, феноменологиялық сыртқы бағалау ретінде түсіндіреміз [39].

Салыстыруды ақ-ергежейлі конфигурацияға жақын ету үшін біз орталық тығыздығы $\rho_c = 10^{11} \text{ г/см}^3$ болатын изотропты модельдің ықшамдығын қолданамыз

$$C_* \equiv \frac{2M_*}{R_*} = 6.28533 \times 10^{-3}. \quad (39)$$

Шварцшильд сыртқы шешімі үшін сәйкес беттік қызыл ығысу келесідей:

$$z_{\text{Schw}} = (1 - C_*)^{-\frac{1}{2}} - 1 = 3.15756 \times 10^{-3}. \quad (40)$$

q -метрика үшін монопольдік масса төмендегі түрде жазылады:

$$M_0 = m(1 + q). \quad (41)$$

Физикалық жұлдыз массасын тұрақты сақтау үшін $M_0 = M_*$ деп аламыз. Осыдан:

$$m = \frac{M_*}{1 + q} \quad (42)$$

орнатамыз. Бұл жағдайда беттік қызыл ығысу келесі өрнекпен анықталады:

$$z_*(q) = \left[1 - \frac{C_*}{1 + q} \right]^{\frac{1+q}{2}} - 1. \quad (43)$$

Шынайы шағын квадрупольдік деформацияны бағалау үшін Ньютон типті квадрупольдік коэффициент J_2 енгізіледі:

$$Q \simeq -J_2 M_* R_*^2. \quad (44)$$

Физикалық монополь M_0 арқылы жазылған q -метриканың өлшемсіз квадрупольдік моменті мына түрде беріледі:

$$\frac{M_2}{M_0^3} = -\frac{q(2 + q)}{3(1 + q)^2}. \quad (45)$$

(44) және (45) теңдеулерін сәйкестендіру нәтижесінде:

$$J_2 \left(\frac{R_*}{M_*} \right)^2 = \frac{q(2+q)}{3(1+q)^2} \quad (46)$$

қатынасы аламыз. Иллюстрациялық мән ретінде $J_2 = 2 \times 10^{-7}$ алынған жағдайда:

$$q \approx 0.0318 \quad (47)$$

2-кесте. $\rho_c = 10^{11}$ г/см³ кезіндегі изотропты ақ-ергежейлі модельдің ықшамдығын пайдалана отырып, беттік-қызыл ығысуды иллюстрациялық салыстыру. Квадрупольдік коэффициент $J_2 = 2 \times 10^{-7}$ деп есептеледі.

Модель	$2M_*/R_*$	J_2	q	z_*
Шварцшильд беті	6.28533×10^{-3}	0	0	3.15756×10^{-3}
q -метрика беті	6.28533×10^{-3}	2×10^{-7}	0.0318	3.15725×10^{-3}

2-кестедегі мәндерді q -метрикасына сәйкес келетін өзіндік үйлесімді жұлдыздық модель ретінде түсіндіруге болмайды. Олар тек физикалық масса мен радиус ақ ергежейлі тәрізді тығыздыққа бекітілген жағдайда сыртқы квадрупольдік деформацияның беттің қызыл ығысуын қалай өзгертетінін көрсетеді. Бұл әлсіз тығыздық режимінде қызыл ығысу 10^{-3} шамасында қалады, ал 1-кестеде диск сақиналары үшін алынған қызыл ығысулар едәуір үлкен, себебі ішкі сақиналар орталық объектіден бірнеше ғана гравитациялық радиус қашықтығында орналасқан.

Осы өрнекті q -метриканың сипаттамалық радиустарында да есептеуге болады. Атап айтқанда, экваторлық шеңберлік фотондық орбита мына радиуста орналасады:

$$r_\gamma = M(3 + 2q), \quad (48)$$

ал сыртқы соңғы тұрақты дөңгелек орбита төмендегі түрде анықталады:

$$r_{\text{isco}}^+ = M(4 + 3q + \sqrt{5q^2 + 10q + 4}). \quad (49)$$

Осыған сәйкес гравитациялық қызыл ығысулар 3-кестеде келтірілген.

3-кестедегі мәндер екі өзара толықтырушы әсерді көрсетеді. Біріншіден, дөңгелек фотон орбитасындағы қызыл ығысу үлкен болып қалады, себебі бұл радиус күшті өріс аймағына жақын орналасқан. Екіншіден, сыртқы соңғы тұрақты дөңгелек орбитадағы қызыл ығысу мұнда қарастырылған q орташа диапазонында аздап өзгереді. Бұл оң q қызыл ығысу коэффициентіндегі экспонентті арттыратындықтан, сонымен қатар тұрақты орбита радиусын

мәнін береді. Сәйкес беттік қызыл ығысудың бағалауы 2-кестеде көрсетілген. Бұл кіші квадрупольдік коэффициентпен жасалған түзету өте әлсіз болады. Бұл күтілетін нәтиже, себебі мұнда қолданылған ақ ергежейлі моделінің ықшамдылық параметрі ішкі диск сақиналарына сәйкес келетін ықшамдылық масштабынан едәуір кіші.

сыртқа жылжытатындықтан болады. Осы екі әсер бірін-бірі ішінара өтейді.

3-кесте. q -метриканың сипаттамалық радиустарындағы гравитациялық қызыл ығысу. Мұнда $r_\gamma = M(3 + 2q)$ — экваторлық шеңберлік фотондық орбита, ал r_{isco}^+ — сыртқы соңғы тұрақты шеңберлік орбита. Бақылаушы $r_{\text{obs}} = 1000M$ қашықтықта орналасқан.

q	r_γ/M	$z(r_\gamma)$	r_{isco}^+/M	$z(r_{\text{isco}}^+)$
-0.2	2.6	0.796	4.883	0.234
0	3.0	0.730	6.000	0.224
0.2	3.4	0.701	7.090	0.219

$z(r_\gamma)$ мәнін тек фотон орбитасының жанындағы q -метрикасының сипаттамалық гравитациялық қызыл ығысуы ретінде түсіндіру керектігін атап өтеміз. Бұл фотон орбитасы нөлдік орбита болғандықтан, материалдық дөңгелек орбитадан сәулеленуге сәйкес келмейді. Керісінше, $z(r_{\text{isco}}^+)$ мәні сынақ бөлшектері дискісінің мүмкін болатын ішкі жиегімен тікелей байланысты.

Сәулелік бақылау әдісі және сандық есептеу сұлбасы

Диск кескіні кері сәулелік бақылау арқылы құрастырылады. Бұл әдіс релятивистік бейнелеуде стандартты болып табылады, себебі ол тек бақылаушыға келетін фотондарды бақылайды [9,10,37,38]. Мұндай әдіс сандық тұрғыдан тиімді, өйткені кеңістік-уақыттың барлық бағыттарындағы сәулелерді емес, бақылаушы экранынан кері бағытта жіберілген фотондарды ғана интегралдауға мүмкіндік береді. Ықшам объектілерге арналған сандық линзалау модельдері де осы бағыттағы еңбектерде

карастырылған, оның ішінде сәулелік бақылау есептеулерінің тиімділігін талдауға арналған зерттеулер де бар [36].

Статикалық бақылаушы төмендегі координаталық нүктеде орналастырылады:

$$r_{\text{obs}} = 1000M, \theta_{\text{obs}} = 80^\circ, \phi_{\text{obs}} = 0, \quad (50)$$

мұндағы $r_{\text{obs}} = 1000M$ шарты бақылаушының орталық ықшам объектіден жеткілікті алыс орналасқанын көрсетеді. Сондықтан фотондардың бастапқы бағыттарын бақылаушы маңындағы жуық жазық экранда беруге болады. Осы мақсатта кескін жазықтығында (X, Y) декарттық координаталары енгізіледі. Экран координаталарының есептеу аймағы мына аралықтармен шектеледі:

$$-40M \leq X \leq 40M, \quad -10M \leq Y \leq 20M. \quad (51)$$

Көрсетілген экран аймағы 81×61 өлшемді торға бөлінеді. Тордың әрбір нүктесі бақылаушы экранындағы жеке бір сәулеге сәйкес келеді. Әрбір нүктеден фотон кері бағытта жіберіліп, оның траекториясы q -метрикадағы нөлдік геодезия теңдеулері бойынша сандық түрде интегралданады. Интегралдау процесі төмендегі төрт жағдайдың бірі орын алғанға дейін жалғасады: сәуле экваторлық жазықтықпен қиылысады, $r = 2M$ маңындағы ішкі шекараға жетеді, интеграциялық аймақтан шығады немесе белгіленген интеграциялық интервалда жарамды соңғы нүктеге жете алмайды.

Ішкі шекара ретінде q -метрикадағы күшті өріс аймағына жақын радиус алынады. Интеграция келесі мәнге жақын жерде тоқтатылады:

$$r_{\text{min}} = 2.0001M. \quad (52)$$

Бұл таңдау $r = 2M$ маңындағы сингулярлық аймаққа тым жақын өтетін сәулелерді сандық тұрғыдан тұрақсыз интегралдаудан сақтайды. Сонымен қатар аффиндік параметр үшін максималды аффиндік интервал:

Нәтижелер және талқылау

Шварцшильд шегі және сандық әдісті тексеру

Алдымен $q = 0$ деп аламыз. Бұл шекте q -метрика Шварцшильд кеңістік-уақытына айналады, ал сәулелік бақылау есептеуі көлбеу жұқа диск кескінінің күтілетін сапалық құрылымын қайталауы керек.

$$\lambda_{\text{max}} = 2500M \quad (53)$$

құрайды. Егер фотон траекториясы осы аралық ішінде экваторлық дискіге жетпесе, ішкі шекараға түспесе немесе есептеу аймағынан шықпаса, онда ол жарамды соңғы күйге жете алмаған сәуле ретінде тіркеледі.

Деформация параметрі төмендегі мәндерде қарастырылады:

$$q = -0.2, 0, 0.2, \quad (54)$$

мұндағы $q = 0$ жағдайы Шварцшильд кеңістік-уақытына сәйкес келеді және сандық әдістің дұрыстығын тексеруге арналған эталондық нұсқа ретінде қолданылады. Ал $q = 0.2$ және $q = -0.2$ мәндері квадрупольдік деформацияның фотон траекторияларына және дискінің бақыланатын кескініне ықпалын салыстырмалы түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Сәулелердің сандық статистикасы 4-кестеде жинақталған. $q = 0$ болған жағдайда есептеу торында жалпы саны 4941 сәуле қарастырылады: олардың 4854-і экваторлық дискпен қиылысады, 52-сі ішкі тоқтату шекарасына жетеді, ал 35 сәуле жарамды соңғы нүктеге жете алмайды. $q = 0.2$ үшін 4828 сәуле дискке түседі, 78 сәуле ішкі шекараға жетеді және 35 сәуле бойынша интегралдау сәтсіз аяқталады. Ал $q = -0.2$ жағдайында 4872 сәуле дискпен қиылысады, 33 сәуле ішкі шекараға жетеді, ал 36 сәуле сандық тұрғыдан сәтсіз болып тіркеледі.

Барлық үш жағдайда да сәтсіз аяқталған сәулелер саны есептеу торындағы сәулелердің жалпы санының бір пайызынан аз. Бұл сандық нәтижелер қолданылған сандық интегралдау әдісінің жеткілікті тұрақты екенін көрсетеді. Сәтсіз интегралданған сәулелер негізінен кескіннің күшті өріс аймағына жақын шекаралық бөліктерінде пайда болады. Сондықтан олар төменде талданатын бірдей радиустық көрінерлік контурлардың жалпы құрылымына және диск кескінінің негізгі морфологиялық ерекшеліктеріне елеулі әсер етпейді.

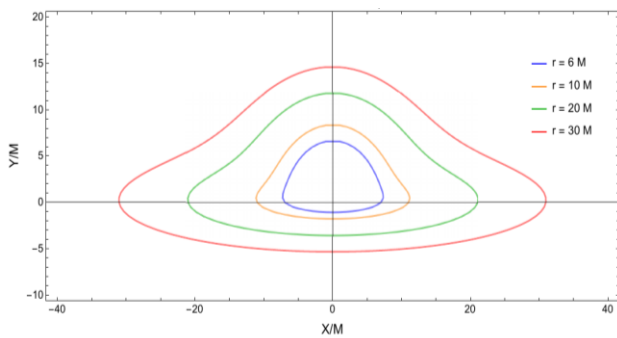
1-суретте келесі сәуле шығару радиустары үшін көрінерлік бірдей радиустық изо-радиалды қисықтар көрсетілген:

$$r_{\text{em}} = 6M, \quad 10M, \quad 20M, \quad 30M. \quad (55)$$

4-кесте. Кескін жазықтығы торы үшін сәулелік бақылау статистикасы

q	Жалпы сәулелер саны	Дискпен қиылысқан сәулелер	Ішкі шекараға жеткен сәулелер	Сәтсіз сәулелер
-0.2	4941	4872	33	36
0	4941	4854	52	35
0.2	4941	4828	78	35

Бақылаушының көлбеулік бұрышы $\theta_{\text{obs}} = 80^\circ$. Қисықтар көлденеңінен созылған, себебі диск шетіне жақын қаралады. Ең ішкі қисық $r_{\text{em}} = 6M$ радиусына сәйкес келеді, ал көрінетін өлшем сәулелену радиусы артқан сайын өседі. Бұл реттілік физикалық тұрғыдан күтіледі және диск жазықтығынан бақылаушы экранына дейінгі сандық бейнелеудің дұрыс құрылғанын тексеруге мүмкіндік береді.



1-сурет. $q = 0$ Шварцшильд шегіндегі изорадиалды диск қисықтарының сәуле жолын сандық қадағалау арқылы алынған кескіні. Қисықтар $r_{\text{em}} = 6M, 10M, 20M$ және $30M$ сәуле шығару радиустарына сәйкес келеді. Бақылаушының еңкею бұрышы $\theta_{\text{obs}} = 80^\circ$.

Осылайша, Шварцшильд жағдайы геодезиялық теңдеулерді интегралдау алгоритмі мен бейне жазықтығын құру тәсілінің шектік геометрияда өзара үйлесімді жұмыс істейтінін растайды.

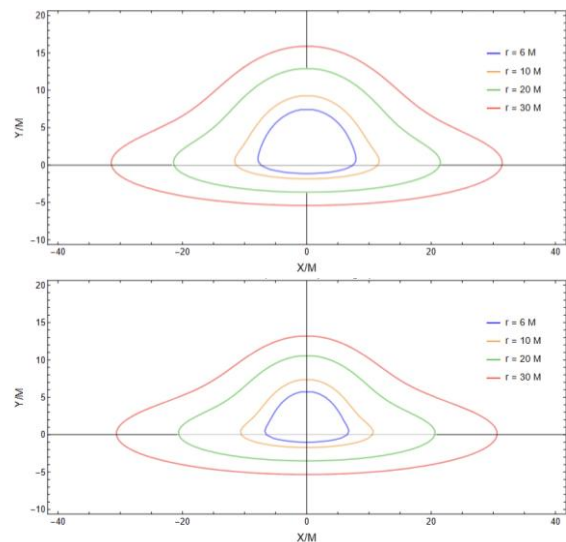
Квадрупольдік параметрдің диск кескініне әсері

Әрі қарай q -ның нөлден тыс мәндерін қарастырамыз. 1-суреттегі Шварцшильд кескіні сілтеме ретінде пайдаланылады. 2-суретте екі типтік жағдай көрсетілген, $q = 0.2$ және $q = -0.2$. Бақылаушы позициясы және сәулелену радиустары тұрақты сақталады, сондықтан салыстыру кеңістік-уақыт деформациясының фотондардың таралуына әсерін окшаулайды.

Деформацияланған екі жағдайда да изорадиалды қисықтардың реттілігі сақталады: сәуле

шығару радиусы үлкен болған сайын, соған сәйкес бақыланатын қисықтың өлшемі де үлкен болады. Деформация қисықтардың өлшемі мен пішінін өзгертеді, бірақ олардың радиалды реттілігін өзгертпейді. Шварцшильд кескінімен салыстырғанда, $q = 0.2$ жағдайында дискінің бақыланатын кескінінен сәл үлкенірек береді. Бұл өзгеріс қисықтардың жоғарғы бөлігінде және дискінің ішкі аймағына жақын тұста айқынырақ байқалады. Ал $q = -0.2$ болғанда ескін ықшамдала түседі. Осы жұмыста қарастырылған q -параметрінің орташа мәндері үшін айырмашылық аса үлкен болмаса да, ол барлық төрт сәуле шығару радиусы үшін бірізді түрде байқалады.

Ішкі қисықтар, әсіресе $r_{\text{em}} = 6M$ және $r_{\text{em}} = 10M$, сыртқы қисықтарға қарағанда деформацияға айқын жауап береді. Бұл күтілетін нәтиже, себебі ішкі дискімен байланысты фотондар бақылаушыға жеткенге дейін күштірек гравитациялық өріс арқылы өтеді. Ал сыртқы сақиналар, $r_{\text{em}} = 20M$ және $r_{\text{em}} = 30M$, жалпы морфологиясын негізінен сақтайды, дегенмен олардың бақыланатын өлшемі де q -параметріне байланысты аздап өзгереді.



2-сурет. Квадрупольдік деформация параметрінің нөлден өзгеше екі мәні үшін дискінің көрінерлік бірдей радиустық кескіндері. Жоғарғы панельде $q = 0.2$, ал төменгі панельде $q = -0.2$ жағдайы көрсетілген. Эталондық Шварцшильд жағдайы, яғни $q = 0$, 1-суретте берілген. Екі панельде де бекітілген сәуле шығару радиустары $r_{\text{em}} = 6M, 10M, 20M$ және $30M$ мәндеріне тең, ал бақылаушы $r_{\text{obs}} = 1000M$ қашықтықта және $\theta_{\text{obs}} = 80^\circ$ еңкею бұрышында орналасқан.

Бұл нәтижелер q -метрикасындағы дөңгелек сынақ бөлшектерінің қозғалысының бұрынғы зерттеулерін кеңейтеді. Квадруполь параметрі дөңгелек орбиталардың орнықтылық аймақтарын және сынақ бөлшектері дискісінің мүмкін ішкі радиусын өзгертетіні белгілі [22, 23]. Қазіргі есептеу дәл сол параметр дискінің оптикалық көрінісіне нөлдік геодезиялық таралу арқылы да әсер ететінін көрсетеді.

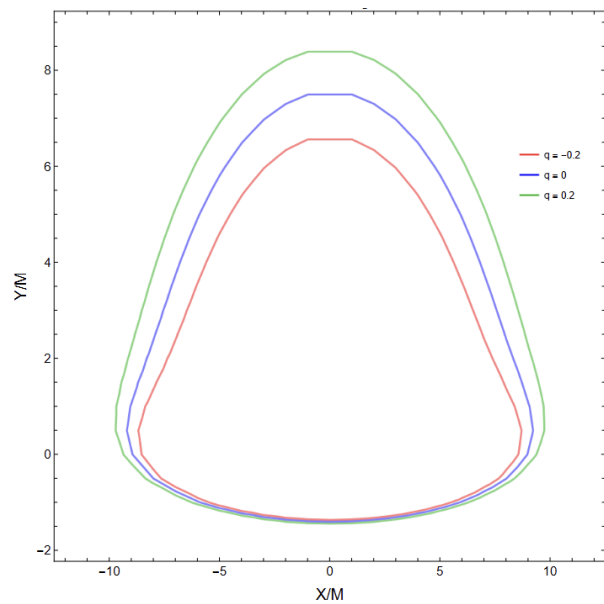
Ішкі сақинаның реакциясы

Деформацияның әсерін ең ішкі эталондық сақинаны, яғни $r_{em} = 6M$ радиусын жеке бөліп қарастырғанда анағұрлым айқын байқалады. 3-суретте осы қисық $q = -0.2$, $q = 0$ және $q = 0.2$ жағдайлары үшін салыстырылған. Бұл салыстыру толық диск кескіндерінде байқалған үрдісті растайды. Шварцшильд жағдайымен салыстырғанда, оң деформация кезінде ішкі сақина сәл ұлғаяды, ал теріс деформация кезінде сәл ықшамдалады. Өзгеріс шамасы жағынан үлкен емес, алайда ол белгілі бір реттілікпен байқалады және толық контурлар жиынында көрінген бағытпен сәйкес келеді. Аталған сақина ықшам объектіге жақын аймақтан өтетін фотон траекториялары арқылы қалыптасатындықтан, сыртқы диск сақиналарымен салыстырғанда квадрупольдік деформация әсерінен айқынырақ өзгеріске ұшырайды.

Қорытынды

Бұл жұмыста q -метрикамен сипатталатын квадрупольдік деформацияланған ықшам объектілер маңындағы геометриялық жұқа аккрециялық диск сақиналарының бақыланатын кескіндік құрылымы зерттелді. Фотон қозғалысы Гамильтондық формализм аясында сипатталып, диск кескіні алыста орналасқан бақылаушыдан экваторлық жазықтыққа қарай жүргізілген кері сәуле жолын қадағалау әдісі арқылы есептелді.

Шварцшильд шегі сандық әдісті тексеруге арналған бақылаулық жағдай ретінде қолданылды. болғанда, q -метрика Шварцшильд кеңістік-уақытына өтеді, ал сандық процедура бақылаушының көлбеулік бұрышында көрінетін жұқа диск үшін изорадиустық қисықтардың күтілетін реттілігі мен пішінін дұрыс қайта береді. Бұдан кейін квадрупольдік деформацияның екі орташа мәні, $q = 0.2$ және $q = -0.2$, қарастырылды. Осы жұмыста қолданылған бақылаушы орны мен бекітілген координаталық сәуле шығару радиустары жағдайында оң деформация бақыланатын



3-сурет. $q = 0$ және $q = 0.2$ мәндері үшін $r_{em} = 6M$ ішкі тірек сақинасының бақыланатын кескіндерін салыстыру. Бұл сақина квадрупольдік деформация әсерін неғұрлым анық көрсетеді, өйткені оған сәйкес фотон траекториялары күшті гравитациялық өріс аймағынан өтеді.

қисықтардың өлшемін сәл ұлғайтатыны, ал теріс деформация оларды ықшамдайтыны анықталды. Салыстырмалы өзгеріс фотон траекториялары күшті гравитациялық өріс аймағы арқылы өтетін ішкі диск сақиналарында айқынырақ байқалады.

Қызыл ығысуды бағалау диск кескінінің морфологиясын толықтыратын қосымша диагностикалық сипаттама береді. Бекітілген диск сақиналары үшін оң квадрупольдік деформация гравитациялық қызыл ығысуды арттырса, теріс деформация оны азайтады. Сонымен қатар ақ ергежейліге ұқсас ықшамдылық параметрін қолдану арқылы феноменологиялық беттік қызыл ығысу бағалауы да қарастырылды. Әлсіз ықшам режимде шағын квадрупольдік коэффициент Шварцшильд беттік қызыл ығысуына тек өте әлсіз түзетумен ғана шектеледі. Мұндай масштабтық айырмашылық табиғи нәтиже болып табылады: ақ ергежейліге ұқсас объектінің беттік қызыл ығысуы кіші ықшамдылықпен анықталса, осы жұмыста қарастырылған диск сақиналарының қызыл

ығысуы әлдеқайда күшті гравитациялық өріс аймағына сәйкес келетін радиустардан туындайды.

Жүргізілген талдау жұқа дискінің оптикалық морфологиясы сфералық симметриядан туындайтын квадрупольдік ауытқулардың геометриялық әсерін бейнелей алатынын көрсетті. Осы жұмыста қарастырылған параметр мәндері үшін бұл әсер айтарлықтай үлкен емес, алайда барлық сақиналық кескіндерде бірдей бағытта көрініс береді. Бұл қорытындыны қазіргі геометриялық есептеу сұлбасы шеңберінде түсіндіру қажет: мұнда сәуле шығару радиустары бекітілген, бақылаушының бір ғана көлбеулік бұрышы алынған және q -параметрінің

орташа мәндері қарастырылған. Алдағы зерттеулерде дискінің q -ге тәуелді ішкі шекарасын, физикалық сәуле шығару профилін, қызыл ығысу ескерілген қарқындылық карталарын, бақылаушының көлбеулік бұрыштарының кеңірек диапазонын және сыртқы квадрупольдік метриканы ықшам жұлдыздың ішкі шешімімен үйлесімді сәйкестендіру мәселесін ескеру қажет.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен орындалды, грант № AP23489541.

Авторлардың үлесі:

А. Мұратхан және **А.С. Таукенова** зерттеуге ғылыми жетекшілік жасауға, зерттеу тұжырымдамасын қалыптастыруға, әдіснамалық негізін әзірлеуге, алынған нәтижелерді валидациялауға және қолжазбаны ғылыми редакциялауға үлес қосты. **Н. Шыңғысхан** және **К. Дәуітхан** зерттеуді орындауға, деректерді талдауға, бағдарламалық есептеулер жүргізуге және нәтижелерді визуализациялауға қатысты. **А.Т. Оразымбет** сандық модельдеуге, формалды талдауға және қолжазбаның бастапқы нұсқасын дайындауға үлес қосты.

Әдебиеттер

1. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, Black holes in binary systems. Observational appearance, *Astron. Astrophys.* **24**, 337–355 (1973).
2. D. Novikov and K. S. Thorne, Astrophysics of black holes, in *Black Holes (Les Astres Occlus)*, edited by C. DeWitt and B. S. DeWitt (Gordon and Breach, New York, 1973), pp. 343–450.
3. D.N. Page and K.S. Thorne, Disk-accretion onto a black hole. Time-averaged structure of accretion disk, *Astrophys. J.* **191**, 499–506 (1974). <https://doi.org/10.1086/152990>
4. M.A. Abramowicz and P. C. Fragile, Foundations of black hole accretion disk theory, *Living Rev. Relativ.* **16**, 1 (2013). <https://doi.org/10.12942/lrr-2013-1>
5. C.T. Cunningham and J. . Bardeen, The optical appearance of a star orbiting an extreme Kerr black hole, *Astrophys. J. Lett.* **173**, L137–L142 (1972).
6. C.T. Cunningham, The effects of redshifts and focusing on the spectrum of an accretion disk around a Kerr black hole, *Astrophys. J.* **183**, 237–264 (1973).
7. C.T. Cunningham, The effects of redshifts and focusing on the spectrum of an accretion disk around a Kerr black hole, *Astrophys. J.* **202**, 788–802 (1975). <https://doi.org/10.1086/154033>
8. C.T. Cunningham, Returning radiation in accretion disks around black holes, *Astrophys. J.* **208**, 534–549 (1976). <https://doi.org/10.1086/154636>
9. J.-P. Luminet, Image of a spherical black hole with thin accretion disk, *Astron. Astrophys.* **75**, 228–235 (1979).
10. C. Fannon, M. Calvani, F. de Felice, and A. Čadež, Detecting accretion disks in active galactic nuclei, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **49**, 159–169 (1997). <https://doi.org/10.1093/pasj/49.2.159>
11. B. Carter, Global structure of the Kerr family of gravitational fields, *Phys. Rev.* **174**, 1559–1571 (1968). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.174.1559>
12. J.M. Bardeen, W.H. Press, and S.A. Teukolsky, Rotating black holes: Locally nonrotating frames, energy extraction, and scalar synchrotron radiation, *Astrophys. J.* **178**, 347–370 (1972). <https://doi.org/10.1086/151796>
13. J.M. Bardeen, Timelike and null geodesics in the Kerr metric, in *Black Holes (Les Astres Occlus)*, edited by C. DeWitt and B. S. DeWitt (Gordon and Breach, New York, 1973), pp. 215–239.
14. D.M. Zipoy, Topology of some spheroidal metrics, *J. Math. Phys.* **7**, 1137–1143 (1966). <https://doi.org/10.1063/1.1705005>
15. B.H. Voorhees, Static axially symmetric gravitational fields, *Phys. Rev. D* **2**, 2119–2122 (1970). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.2.2119>
16. H. Quevedo, Exterior and interior metrics with quadrupole moment, *Gen. Relativ. Gravit.* **43**, 1141–1152 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0974-5>
17. H. Quevedo, S. Toktarbay, and Y. Aimuratov, Quadrupolar gravitational fields described by the q -metric, *arXiv:1310.5339* (2013). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1310.5339>

18. S. Toktarbay, H. Quevedo, M. Abishev, and A. Muratkhan, Gravitational field of slightly deformed naked singularities, *Eur. Phys. J. C* **82**, 382 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10230-2>
19. M. Abishev, N. Beissen, F. Belissarova, K. Boshkayev, A. Mansurova, A. Muratkhan, H. Quevedo, and S. Toktarbay, Approximate perfect fluid solutions with quadrupole moment, *Int. J. Mod. Phys. D* **30**, 2150096 (2021). <https://doi.org/10.1142/S0218271821500966>
20. N. Beissen, D. Utepova, M. Abishev, H. Quevedo, M. Khassanov, and S. Toktarbay, Gravitational refraction of compact objects with quadrupoles, *Symmetry* **15**, 614 (2023). <https://doi.org/10.3390/sym15030614>
21. K. Boshkayev, H. Quevedo, S. Toktarbay, B. Zhami, and M. Abishev, On the equivalence of approximate stationary axially symmetric solutions of the Einstein field equations, *Gravit. Cosmol.* **22**, 305–311 (2016).
22. K. Boshkayev, E. Gasperin, A. C. Gutiérrez-Piñeres, H. Quevedo, and S. Toktarbay, Motion of test particles in the field of a naked singularity, *Phys. Rev. D* **93**, 024024 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.024024>
23. M. Abishev, K. Boshkayev, H. Quevedo, and S. Toktarbay, Accretion disks around a mass with quadrupole, in *Gravitation, Astrophysics, and Cosmology: Proceedings of the Twelfth Asia-Pacific International Conference*, edited by J. Luo, Z. Li, V. I. Ferronsky, and C.-H. Lee (World Scientific, Singapore, 2015), pp. 185–190.
24. A. Muratkhan, M. Orazymbet, M. Zhakipova, Assylbek, and S. Toktarbay, Shadows from the static black hole mimickers, *Int. J. Math. Phys.* **13**, 44–49 (2023).
25. N.A. Beissen, D. Utepova, A. Muratkhan, A. Orazymbet, M. Khassanov, and S. Toktarbay, Application of GBT theorem for gravitational deflection of light by compact objects, *Recent Contrib. Phys.* **84**, 15–21 (2023). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v84.i1.02>
26. N.A. Beissen, D.S. Utepova, V.N. Kossov, S. Toktarbay, M. K. Khassanov, T. Yernazarov, and M. Seydalieva, The influence of deformation in compact objects on redshift and radar echo delay, *Recent Contrib. Phys.* **88**, 4–11 (2024).
27. F. D. Lora-Clavijo *et al.*, The q-metric naked singularity: A viable explanation for the nature of the central object in the Milky Way, *Class. Quantum Grav.* **40**, 245012 (2023).
28. K.P. Rauch and R.D. Blandford, Optical caustics in a Kerr spacetime and the origin of rapid X-ray variability in active galactic nuclei, *Astrophys. J.* **421**, 46–68 (1994).
29. H. Falcke, F. Melia, and E. Agol, Viewing the shadow of the black hole at the Galactic Center, *Astrophys. J. Lett.* **528**, L13–L16 (2000). <https://doi.org/10.1086/312423>
30. S.E. Gralla, A. Lupasca, and A. Strominger, Observational signature of high spin at the Event Horizon Telescope, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **475**, 3829–3853 (2018). <https://doi.org/10.1093/mnras/sty039>
31. S.E. Gralla, D.E. Holz, and R. M. Wald, Black hole shadows, photon rings, and lensing rings, *Phys. Rev. D* **100**, 024018 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.024018>
32. M.D. Johnson, A. Lupasca, A. Strominger, G. N. Wong, S. Hadar, D. Kapec, R. Narayan, A. Chael, C. F. Gammie, P. Galison, D. C. M. Palumbo, S. S. Doeleman, L. Blackburn, M. Wielgus, D. W. Pesce, J. R. Farah, and J. M. Moran, Universal interferometric signatures of a black hole's photon ring, *Sci. Adv.* **6**, eaaz1310 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1310>
33. D. Psaltis, Testing general relativity with the Event Horizon Telescope, *Gen. Relativ. Gravit.* **51**, 137 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10714-019-2611-5>
34. K. Akiyama *et al.* (Event Horizon Telescope Collaboration), First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole, *Astrophys. J. Lett.* **875**, L1 (2019). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>
35. K. Akiyama *et al.* (Event Horizon Telescope Collaboration), First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way, *Astrophys. J. Lett.* **930**, L12 (2022). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674>
36. N.A. Beissen, D.S. Utepova, V.N. Kossov, S. Toktarbay, M.K. Khassanov, T. Yernazarov, and A.K. Imanbayeva, Comparing the efficiency of GPU and CPU in gravitational lensing simulation, *Int. J. Math. Phys.* **15**, 49–56 (2024). <https://doi.org/10.26577/ijmph.2024v15i1a6>
37. J. Dexter and E. Agol, A fast new public code for computing photon orbits in a Kerr spacetime, *Astrophys. J.* **696**, 1616–1629 (2009). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/696/2/1616>
38. F.H. Vincent, T. Paumard, E. Gourgoulhon, and G. Perrin, GYOTO: A new general relativistic ray-tracing code, *Class. Quantum Grav.* **28**, 225011 (2011). <https://doi.org/10.1088/0264-9381/28/22/225011>
39. Orazymbet, A. Muratkhan, D. Utepova, N. Beissen, G. Baimbetova, and S. Toktarbay, Numerical solutions and stability analysis of white dwarfs with a generalized anisotropic factor, *Galaxies* **13**, 69 (2025). <https://doi.org/10.3390/galaxies13030069>

Авторлар туралы мәлімет:

Арай Мұратхан – PhD, аға оқытушы, Теориялық және ядролық физика кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: muratkhan.aray@kaznu.kz).

Нұркамал Шыңғысхан – «8D05306 – физика» мамандығының 3-курс докторанты, Теориялық және ядролық физика кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: Nurkamal8503@gmail.com).

Әлия Тәукенова – PhD, қауымдастырылған профессор, Теориялық және ядролық физика кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: aliya_tauken@mail.ru).

Қуанышбек Дәуітхан – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхананың ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: dkuansh38@gmail.com).

Аяжан Оразымбет (автор-корресподент) – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, оқытушы, Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхананың ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: ayazhan.oralymbet@kaznu.edu.kz).

Information about authors:

Aray Muratkhan – PhD, Senior Lecturer, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: muratkhan.aray@kaznu.kz).

Nurkamal Shyngyskhan – 3rd-year PhD student in «8D05306 – Physics», Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Nurkamal8503@gmail.com).

Aliya Taukenova – PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aliya_tauken@mail.ru).

Kuanyshbek Dauitkhan – Master of Science, Researcher at the National Nanotechnology Laboratory of Open Type, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dkuansh38@gmail.com).

Ayazhan Oralymbet (corresponding author) – Master of Science, Lecturer, Researcher at the National Nanotechnology Laboratory of Open Type, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ayazhan.oralymbet@kaznu.edu.kz).

Сведения об авторах:

Муратхан Арай – PhD, старший преподаватель, кафедра теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: muratkhan.aray@kaznu.kz).

Шынгысхан Нуркамал – докторант 3-го курса по специальности «8D05306 – Физика», кафедра теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: Nurkamal8503@gmail.com).

Таукенова Алия – PhD, ассоциированный профессор, кафедра теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: aliya_tauken@mail.ru).

Дауитхан Қуанышбек – магистр естественных наук, научный сотрудник Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: dkuansh38@gmail.com).

Оразымбет Аяжан (автор-корресподент) – магистр естественных наук, преподаватель, научный сотрудник Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: ayazhan.oralymbet@kaznu.edu.kz).

Мақала тарихы: түсті: 04 наурыз 2026; қабылданды: 19 мамыр 2026.

Article history: received: 04 March 2026; accepted: 19 May 2026.

История статьи: поступила: 04 марта 2026; принята: 19 мая 2026.

Sh.T. Nurmakhmetova , N.L. Vaidman* , S.A. Khokhlov , A.T. Agishev 

Fesenkov astrophysical institute, Observatory, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: nva1dmann@gmail.com

EFFECTIVE TEMPERATURE CALIBRATION OF GALACTIC BA-TYPE SUPERGIANTS

This study aims to establish a homogeneous effective temperature scale for a large sample of Galactic blue supergiants by combining medium-resolution spectroscopy with multi-band spectral energy distribution analysis. The sample includes about 140 stars in the B7-A0 spectral range. As the main spectroscopic diagnostic, the equivalent-width ratio of the temperature-sensitive He I $\lambda 4471$ and Mg II $\lambda 4481$ lines was used. An empirical calibration was constructed from standard supergiants with reliably determined atmospheric parameters, and the resulting polynomial relation was applied to derive effective temperatures for the full sample. To verify the spectroscopic estimates, spectral energy distributions were compiled from ultraviolet, optical, near-infrared, and mid-infrared photometry and compared with theoretical stellar atmosphere models. The obtained results show that the adopted line-ratio index provides an efficient observational temperature indicator across the studied range and allows all program stars to be placed on a single internally consistent temperature scale. The spectral energy distribution analysis supports the spectroscopic results and serves as an independent consistency check of the derived parameters. The scientific novelty of the work lies in the development and application of a uniform calibration framework suitable for a large observational sample without requiring full detailed atmospheric modeling for each object. The results enlarge the empirical basis for the study of blue supergiants and provide a practical reference for future Galactic and extragalactic stellar investigations.

Keywords: BA supergiants, Galactic supergiants, temperature calibration, equivalent width ratio, spectroscopic diagnostics, spectral energy distribution.

Ш.Т. Нұрмахметова, Н.Л. Вайдман*, С.А. Хохлов, А.Т. Агишев

Фесенков атындағы астрофизикалық институт, Обсерватория, Алматы, Қазақстан

*e-mail: nva1dmann@gmail.com

Галактикалық BA аса алып жұлдыздардың тиімді температурасын калибрлеу

Бұл зерттеудің мақсаты орташа айырымдылықтағы спектроскопия мен көпжолқты спектрлік энергия таралуын талдауды біріктіру арқылы галактикалық көк аса алып жұлдыздардың үлкен таңдауы үшін біртекті тиімді температура шкаласын құру болып табылады. Таңдама B7-A0 спектрлік аралығындағы шамамен 140 жұлдызды қамтиды. Негізгі спектроскопиялық диагностикалық көрсеткіш ретінде температураға сезімтал He I $\lambda 4471$ және Mg II $\lambda 4481$ сызықтарының эквивалент ені қатынасы пайдаланылды. Атмосфералық параметрлері сенімді анықталған стандартты аса алып жұлдыздар негізінде эмпирикалық калибрлеу жасалып, алынған полиномдық тәуелділік бүкіл таңдама үшін тиімді температураларды анықтауға қолданылды. Спектроскопиялық бағалауларды тексеру мақсатында ультракүлгін, оптикалық, жақын инфрақызыл және орта инфрақызыл фотометрия деректері негізінде спектрлік энергия таралулары құрастырылып, жұлдыз атмосфераларының теориялық модельдерімен салыстырылды. Алынған нәтижелер қолданылған сызықтар қатынасының индексі зерттеліп отырған бүкіл диапозонда температураның тиімді бақылаулық индикаторы болып табылатынын және барлық бағдарламалық жұлдыздарды өзара үйлесімді бірыңғай температуралық шкалаға орналастыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Спектрлік энергия таралуын талдау спектроскопиялық нәтижелерді растайды және алынған параметрлердің сәйкестігін

тәуелсіз тексеру құралы ретінде қызмет етеді. Жұмыстың ғылыми жаңалығы әрбір нысан үшін атмосфераны толық егжей-тегжейлі модельдеуді қажет етпестен, үлкен бақылаулық таңдамаларға жарамды бірыңғай калибрлеу тәсілін әзірлеу және қолдану болып табылады. Алынған нәтижелер көк аса алып жұлдыздарды зерттеудің эмпирикалық негізін кеңейтеді және болашақтағы галактикалық әрі галактикадан тыс жұлдыздық зерттеулер үшін практикалық анықтамалық негіз ұсынады.

Түйін сөздер: BA аса алып жұлдыздары, галактикалық аса алып жұлдыздар, температураны калибрлеу, эквивалент ендер қатынасы, спектроскопиялық диагностика, спектрлік энергия таралуы.

Ш.Т. Нурмахметова, Н.Л. Вайдман*, С.А. Хохлов, А.Т. Агишев
Астрофизический институт им. Фесенкова, обсерватория, Алматы, Казахстан
*e-mail: nva1dmann@gmail.com

Калибровка эффективной температуры галактических BA сверхгигантов

Настоящее исследование направлено на построение однородной шкалы эффективных температур для большой выборки галактических голубых сверхгигантов на основе сочетания спектроскопии среднего разрешения и анализа спектрального распределения энергии в широком диапазоне длин волн. Выборка включает около 140 звёзд спектрального диапазона B7-A0. В качестве основного спектроскопического диагностического параметра использовалось отношение эквивалентных ширин температурно-чувствительных линий He I $\lambda 4471$ и Mg II $\lambda 4481$. На основе стандартных сверхгигантов с надёжно определёнными атмосферными параметрами была построена эмпирическая калибровка, а полученное полиномиальное соотношение применено для определения эффективных температур всей выборки. Для проверки спектроскопических оценок были построены спектральные распределения энергии с использованием ультрафиолетовой, оптической, ближней инфракрасной и средней инфракрасной фотометрии и сопоставлены с теоретическими моделями звёздных атмосфер. Полученные результаты показывают, что принятый индекс отношения линий является эффективным наблюдательным индикатором температуры во всём исследуемом диапазоне и позволяет поместить все программные звёзды на единую внутренне согласованную температурную шкалу. Анализ спектрального распределения энергии подтверждает спектроскопические результаты и служит независимой проверкой согласованности полученных параметров. Научная новизна работы заключается в разработке и применении единой калибровочной схемы, пригодной для большой наблюдательной выборки без необходимости выполнения полного детального моделирования атмосферы для каждого объекта. Полученные результаты расширяют эмпирическую основу для исследования голубых сверхгигантов и представляют собой практическую опору для будущих исследований галактических и внегалактических звёзд.

Ключевые слова: BA-сверхгиганты, галактические сверхгиганты, калибровка температуры, отношение эквивалентных ширин, спектроскопическая диагностика, спектральное распределение энергии.

Introduction

Blue supergiants of mid-B to mid-A spectral types are luminous, relatively massive stars that occupy a short-lived but astrophysically important stage of stellar evolution. With typical masses of about 7–15 $M_{\odot}$, they radiate most of their energy in the optical domain and therefore belong to the visually brightest stellar objects in galaxies. Owing to their exceptionally high luminosities, blue

supergiants can be detected in external galaxies at distances of several to several tens of Mpc, which makes them valuable tracers of recent star formation, stellar evolution in the upper Hertzsprung–Russell diagram, and the chemical properties of young stellar populations.

Systematic studies of Galactic A- and BA-type supergiants have demonstrated both the diagnostic

richness and the complexity of these objects. The pioneering series by [1] presented an extensive ultraviolet and optical atlas of A-type supergiants and analyzed their atmospheric parameters and projected rotational velocities, establishing an important observational basis for later quantitative work. Subsequent high-precision spectroscopic analyses [2] showed that reliable atmospheric parameters of Galactic BA-type supergiants can be obtained through a combination of hydrogen lines, ionization equilibria of metals, and spectro-photometric constraints, leading to improved calibrations of spectral type, intrinsic colors, and bolometric corrections. More recently, Weißmayer et al. [3] extended such quantitative analyses to Galactic B-type supergiants and confirmed that a careful treatment of the atmospheric structure and line formation is essential for deriving accurate stellar parameters and chemical abundances. However, these detailed studies were based on relatively modest samples, typically of a few tens of stars, and therefore do not yet fully cover the observational diversity of the nearby Galactic blue-supergiant population.

A larger sample is needed not only to improve empirical calibrations between observable quantities and fundamental parameters, but also to test how robust these calibrations remain across different luminosity classes, rotation rates, reddening conditions, and circumstellar environments. Such a data set is particularly useful for identifying purely observational diagnostics that can later be applied to more distant stars in the Galaxy and beyond, where full high-resolution spectroscopic modeling is not always feasible.

Although several recent projects have focused on blue supergiants using high-resolution

spectroscopy, a complementary medium-resolution approach remains highly relevant. Medium-resolution spectra allow one to observe substantially larger samples in a homogeneous way and to derive temperatures, gravities, and reddening-sensitive characteristics with reasonable efficiency. When combined with spectral energy distribution (SED) analysis based on broad-band photometry from the ultraviolet to the infrared, such spectroscopy provides an independent cross-check of parameters inferred from line-profile modeling. This is especially important for blue supergiants, for which interstellar extinction, possible infrared excess, and the sensitivity of the continuum shape to T_{eff} can significantly affect the final parameter determination. In this sense, the joint use of spectroscopy and SED fitting is not merely auxiliary, but forms a self-consistent observational framework for establishing reliable stellar parameters and testing empirical calibrations. In related classes of hot stars, such as objects with the Be and B[e] phenomena, circumstellar emission and binarity are known to affect both line profiles and infrared excesses, further emphasizing the need for caution when interpreting continuum-based diagnostics [4,5].

In the present project, we analyzed multiple spectra for about 140 Galactic supergiants in the spectral range B7–A0 down to $V \sim 10$ mag. The main goal is to derive T_{eff} using a combination of medium-resolution spectroscopy and multi-band photometric SED analysis. Such a study is expected to enlarge the empirical basis established in earlier detailed analyses and to provide a homogeneous reference sample for future work on Galactic and extragalactic blue supergiants.

Materials and methods

As a first step of the spectroscopic analysis, we investigated the temperature-sensitive absorption lines He I $\lambda 4471$ and Mg II $\lambda 4481$. This line pair is widely used in the analysis of early- and intermediate-type stars because the relative strength of these features changes systematically with effective temperature, reflecting variations in the excitation and ionization conditions in the stellar atmosphere [6]. In particular, the ratio between the helium and magnesium lines provides a convenient observational indicator for stars in the B–A spectral domain, where the He I line gradually weakens toward lower temperatures, while Mg II becomes more pronounced.

The analysis was based on more than 1000 spectra of Galactic supergiants obtained in 2014–2026

at the Three College Observatory (TCO, North Carolina, USA). For each star, the measured line parameters were averaged over multiple spectra. The observations were carried out with the 0.81 m telescope equipped with a fiber-fed échelle spectrograph manufactured by Shelyak Instruments and an ATIK-460EX detector. The spectra have a resolving power of $R \sim 12\,000$ and cover the wavelength range from about 3800 to 7900 Å without gaps between the spectral orders. This instrumental setup is well suited for the present program, since it provides adequate spectral resolution and signal quality for stars down to about $V \sim 10$ mag. For the brightest objects, the signal-to-noise ratio in the continuum reaches ~ 100 –200 within a few seconds, whereas for the faintest targets it is typically about

~50 after exposures of 2-3 h. The highest signal-to-noise ratio, reaching up to ~300, is achieved in the 4500-5500 Å region, which includes the diagnostic He I and Mg II lines used in this work.

The equivalent widths of the He I and Mg II lines were measured in the IRAF environment using a manual procedure. Prior to the measurements, all spectra were continuum-normalized in IRAF in a consistent manner. The local continuum was defined interactively in the vicinity of each line, taking into account the actual shape of the observed spectrum and avoiding distorted or blended regions wherever possible. The equivalent widths were then determined by direct integration of the line profiles relative to the normalized continuum. For consistency, the same line identifications and a uniform integration approach were applied to all spectra in the sample.

The empirical calibration was constructed for the range $T_{\text{eff}} \approx 8000\text{--}20\,000$ K, which covers the typical effective temperatures of BA-type supergiants in our sample.

To establish an empirical temperature calibration, a set of standard stars with reliably determined atmospheric parameters was adopted from the spectroscopic study of BA-type supergiants [7]. Their effective temperatures, together with the measured equivalent widths of the diagnostic lines, are listed in Table 1. For each calibration star, the equivalent widths of He I 4471 and Mg II 4481 were measured in a homogeneous manner, and the line-strength ratio

$$R = \frac{EW(\text{He I } \lambda 4471)}{EW(\text{Mg II } \lambda 4481)}$$

was calculated. This ratio is temperature-sensitive because the He I line strengthens toward higher temperatures, whereas Mg II becomes relatively stronger at lower temperatures. The obtained R values were then compared with the corresponding literature effective temperatures of the calibration stars. To describe this dependence, we approximated the relation $R(T_{\text{eff}})$ by an ordinary least-squares fit with a second-order polynomial,

$$R = a + b T_{\text{eff}} + c T_{\text{eff}}^2. \quad (1)$$

For each program star, the measured ratio was converted into T_{eff} by solving the polynomial relation for the observed value of R.

The polynomial coefficients and their formal uncertainties were derived from the covariance

matrix of the fit, while the root-mean-square deviation of the residuals was used to quantify the scatter of the calibration. A quadratic function was found to provide an adequate representation of the observed dependence over the temperature range covered by the calibration stars and relevant to the program stars.

For each target spectrum, the equivalent widths of He I and Mg II were measured, their ratio was calculated, and the resulting value was used to estimate T_{eff} from the calibration relation above. In this way, the He I/Mg II ratio served as a purely observational temperature diagnostic tied to a set of standard stars with well-established parameters. Such an approach is especially useful for constructing a homogeneous temperature scale for a large sample when full detailed atmospheric modeling is not the primary step of the analysis.

As an additional verification of the temperatures derived from spectroscopy, spectral energy distributions were constructed for the target supergiants using photometric data from the ultraviolet to the mid-infrared. The observational material was compiled from major all-sky catalogs and literature sources covering several wavelength domains. Ultraviolet absolute fluxes were taken from the TD-1 catalog at 1565, 1965, 2365, and 2740 Å [8]. Optical Johnson UBVRI photometry [9] was adopted from the compiled photoelectric catalog. Strömgren-Crawford uvby [10] measurements were collected from the updated mean catalog and the classical compilation. Near-infrared JHKs photometry was taken primarily from 2MASS [11]; for the brightest objects, where saturation could affect the 2MASS measurements, these data were supplemented by the Catalog of Infrared Observations. Mid-infrared photometry in the W1–W4 bands was taken from the AllWISE data release [12].

The assembled photometric points were then compared with theoretical spectral distributions from the Castelli–Kurucz model atmosphere grid [13]. For each star, the model parameters were selected so as to provide the best overall description of the observed SED. In the present work, this procedure was used not as a fully independent detailed atmospheric analysis, but rather as an additional consistency check of the temperatures inferred from the spectroscopic calibration. The SED fitting therefore served to verify whether the continuum energy distribution, from the ultraviolet to the infrared, was compatible with the temperature estimates obtained from the He I/Mg II line ratio.

Table 1. Effective temperatures T_{eff} of the standard stars and equivalent widths of the He I and Mg II lines employed in deriving the empirical calibration relation.

N	Star	Sp.Type	EW(He I)	EW(Mg II)	T_{eff} , [K]
1	HD7902	B6 Ib	0.63	0.40	14 100
2	HD36371	B4 Ib	0.69	0.37	14 600
3	HD184943	B8 Ia	0.38	0.58	11 900
4	BS7699	B6 Ib	0.58	0.36	14 000
5	BS8020	B8 Ia	0.45	0.47	12 700
6	BS618	A1 Ia	0.12	0.64	9 200
7	BS641	A2 Iab	0.09	0.61	8 500
8	HD13744	B9 Iab	0.13	0.60	9 500
9	HD14433	A1 Ia	0.11	0.64	9 150
10	HD14489	A1 Ia	0.15	0.64	9 350
11	HD20041	A0 Ia	0.20	0.60	10 000
12	HD21291	B9 Ia	0.28	0.57	10 800
13	HD39970	A0 Ib	0.22	0.58	10 300
14	HD46300	A0 Ib	0.12	0.43	10 000
15	HD186745	B8 Ia	0.47	0.52	12 500
16	BS7573	A2 Ia	0.11	0.65	9 300
17	HD197345	A2 Ia	0.11	0.68	8 700
18	HD202850	B9 Iab	0.29	0.60	10 800
19	BS8334	A2 Ia	0.11	0.64	8 800
20	BS8345	A2 Ib	0.10	0.57	9 250
21	HD210221	A3 Ib	0.11	0.60	8 400
22	HD212593	B9 Iab	0.28	0.50	11 200
23	HD223960	B9 Ia	0.26	0.61	10 700
24	HD195324	A2 Iab	0.10	0.52	9 200
25	HD34085	B8 Ia	0.43	0.50	12 100
26	HD87737	A0 Ib	0.14	0.52	9 600
27	HD165784	A2 Iab	0.13	0.73	9 000

Results and discussion

Thus, the empirical calibration equation linking the spectroscopic index to the effective temperature has the form (Fig. 1)

$$R = 2.713 - 6.386 \times 10^{-4} T_{\text{eff}} + 3.972 \times 10^{-8} T_{\text{eff}}^2. \quad (2)$$

The resulting root-mean-square scatter of the calibration is $\text{RMS}(4471/4481)=0.033$. The root-mean-square scatter of the calibration was computed from the residuals between the observed equivalent-width ratios and the values predicted by the quadratic fit, as

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - R_{i,\text{fit}})^2}, \quad (3)$$

where R_i is the observed EW(HeI/MgII) ratio for the i -th calibration star and $R_{i,\text{fit}}$ is the corresponding value given by the polynomial calibration.

Using the calibration relation given by Equation (2), effective temperatures were recalculated for about 140 supergiants selected from [22]. For each object, T_{eff} was derived from the measured ratio of the equivalent widths of He I and Mg II using the empirical polynomial relation obtained from the calibration stars. The resulting temperatures are presented in Fig. 2. This procedure provided a homogeneous temperature scale for the entire sample within a single calibration framework.

The effective temperatures derived from the empirical He I $\lambda 4471$ /Mg II $\lambda 4481$ calibration were compared with literature estimates for a subset of program stars. The results are presented in Table 2. In most cases, the temperatures obtained from the

calibration equation are in satisfactory agreement with previously published values, confirming that the adopted line-ratio index provides a reliable temperature diagnostic over the studied spectral range. At the same time, some differences are present for individual objects, which may reflect differences in observational material, analysis techniques, or the intrinsic uncertainties of the spectroscopic calibration and literature determinations.

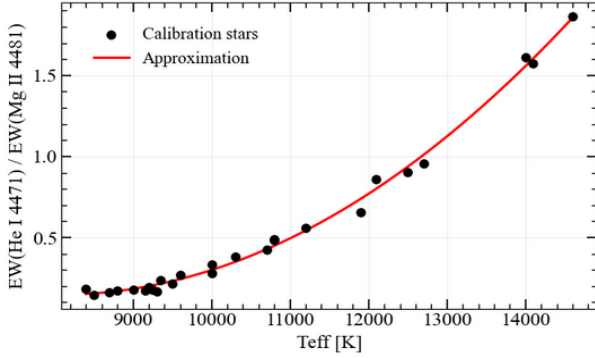


Figure 1 – Empirical relation between the equivalent-width ratio of He I $\lambda 4471$ and Mg II $\lambda 4481$ and effective temperature for the calibration supergiants. Black symbols show the standard stars, and the red curve gives the quadratic fit used for the temperature calibration.

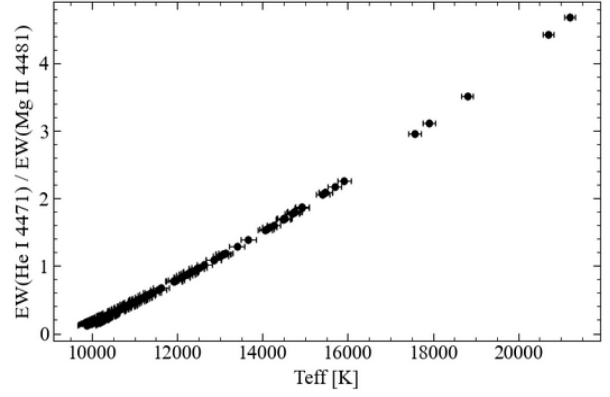


Figure 2 – Effective temperatures derived for the program stars from the empirical He I/Mg II calibration. The relation was applied uniformly to the full sample to place all objects on a homogeneous spectroscopic temperature scale.

Overall, the comparison shown in Table 2 supports the validity of the derived temperature scale and demonstrates that the proposed calibration can be used as a practical tool for homogeneous T_{eff} estimates of Galactic blue supergiants.

Table 2. Effective temperatures of the program stars derived from the empirical He I $\lambda 4471$ /Mg II $\lambda 4481$ calibration, compared with literature estimates.

N	Star	Sp.Type	T_{eff} , [K]	T_{eff} (lit) [K]	Ref
1	BD+60 2582	B7 Iab	12324 ± 184	$11\,900 \pm 200$	[2]
2	HD 5776	A2 Iab	10195 ± 207	10 715	[14]
3	HD 161695	A0 Ib	10268 ± 206	9 950	[15]
4	HD 175687	B9/A0 Ib	10153 ± 208	9 400	[16]
5	HD 16778	A1 Ia	9880 ± 211	9 550	[14]
6	HD 40589	A0 Iab	10841 ± 199	11 000	[17]
7	HD 46769	B7 Ib-II	15693 ± 156	$13\,920 \pm 710$	[18]
8	HD 67456	A3 Ib/II	9897 ± 211	9 500	[19]
9	HD 71833	B8 II	12847 ± 179	12 985	[20]
10	HD 35600	B9 Ib	11201 ± 195	11 000	[21]

The effective temperatures derived from the spectroscopic calibration were additionally checked against the observed spectral energy distributions. As illustrated in Fig. 3 for BS 25914, the model flux distribution calculated for temperatures in the vicinity of the spectroscopic estimate provides a satisfactory match to the observed photometric points over a wide wavelength range. In the literature, this object is identified with the B6 Ia/B5 Ia supergiant

BD+56°884, for which the corresponding effective temperature on the Galactic B-supergiant scale is about $T_{\text{eff}} \approx 13\,500\text{--}14\,000$ K [23]. The agreement between the observed SED and the model distributions in this temperature interval supports the consistency of the spectroscopic calibration with the photometric data.

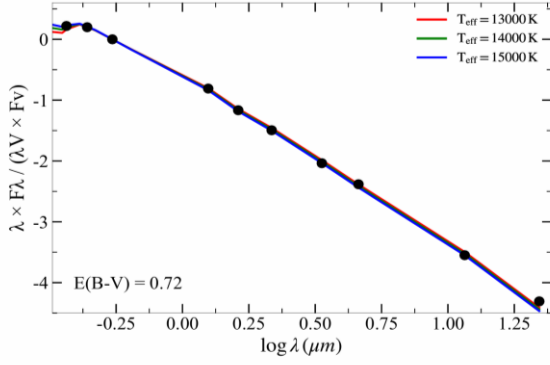


Figure 3 – Observed SED of BS 25914 compared with reddened model distributions computed for temperatures close to the spectroscopic estimate.

The agreement supports the consistency of the adopted temperature calibration with the photometric data.

Conclusion

In this work, we constructed an empirical effective-temperature calibration for blue supergiants based on the equivalent-width ratio of the He I $\lambda 4471$ and Mg II $\lambda 4481$ lines. The calibration was derived from standard stars with well-established atmospheric parameters and approximated by a second-order polynomial relation.

The resulting calibration was then applied to a sample of about 140 Galactic supergiants, allowing

their effective temperatures to be determined in a homogeneous way. This approach provides a consistent temperature scale for objects spanning the late-B to early-A spectral range and reduces the dependence on heterogeneous literature estimates.

An additional verification of the derived temperatures was carried out through comparison with spectral energy distributions. The agreement between the spectroscopic temperatures and the photometric SED fits confirms the overall reliability of the adopted calibration and supports its applicability to stars of similar spectral types.

Thus, the proposed method can be used as a practical tool for obtaining uniform temperature estimates for blue supergiants from spectroscopic data. At the same time, its accuracy depends on the quality of the observed spectra, the continuum normalization, and the applicability range of the calibration. Further improvement of the method may be achieved by extending the set of calibration stars and refining the relation using a broader spectroscopic sample.

Acknowledgments

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23484898).

Author Contributions

Sh.T. Nurmakhmetova: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – Original Draft; **N.L. Vaidman:** Data Curation, Visualization, Writing – Review & Editing; **S.A. Khokhlov:** Supervision, Funding Acquisition, Project Administration; **A.T. Agishev:** Formal Analysis, Writing – Review & Editing.

References

1. E. Verdugo, A. Talavera, and A.I. Gómez de Castro, Understanding A-type supergiants. I. Ultraviolet and visible spectral atlas of A-type supergiants, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **137**, 351–362 (1999). <https://doi.org/10.1051/aas:1999487>
2. M. Firnstein and N. Przybilla, Quantitative spectroscopy of Galactic BA-type supergiants. I. Atmospheric parameters, *Astron. Astrophys.* **543**, A80 (2012). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219034>
3. D. Weßmayer, N. Przybilla, and K. Butler, Quantitative spectroscopy of B-type supergiants, *Astron. Astrophys.* **668**, A92 (2022). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243973>
4. A.S. Nodyarov, A.S. Miroshnichenko, S.A. Khokhlov, S.V. Zharikov, Y.S. Kuratov, A. Manset, R.O. Gray, E. Semkov, N. Carlon, and T. Valchev, Toward Understanding the B[e] Phenomenon. IX. Nature and Binarity of MWC645, *Astrophys. J.* **936**, 129 (2022). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac87a1>
5. A.S. Miroshnichenko, S.V. Zharikov, D. Korčáková, N. Manset, R. Mennickent, S.A. Khokhlov, S. Danford, A. Raj, and O.V. Zakhochay, Binarity among objects with the Be and B[e] phenomena, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **50**(2), 513–517 (2020). <https://doi.org/10.31577/caosp.2020.50.2.513>
6. Y. Frémat, C. Neiner, A.-M. Hubert, M. Floquet, J. Zorec, E. Janot-Pacheco, and J.R. de Medeiros, Fundamental parameters of Be stars located in the seismology fields of COROT, *Astron. Astrophys.* **451**, 1053–1063 (2006). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053305>
7. N. Przybilla, K. Butler, S.R. Becker, and R.P. Kudritzki, Quantitative spectroscopy of BA-type supergiants, *Astron. Astrophys.* **445**, 1099–1126 (2006). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053832>

8. G.I. Thompson, K. Nandy, C. Jamar, A. Monfils, L. Houziaux, D.J. Carnochan, and R. Wilson, Catalogue of stellar ultraviolet fluxes from the TD-1 satellite, *ESRO SP-56* (1978). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978csuf.book.....T>
9. T. Lanz, Photoelectric photometric catalogue in the Johnson UBVRI system, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **65**, 195–197 (1986). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986A%26AS...65..195L>
10. E. Paunzen, A new catalogue of Strömgren-Crawford uvby β photometry, *Astron. Astrophys.* **580**, A23 (2015). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526653>
11. M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, et al., The Two Micron All Sky Survey (2MASS), *Astron. J.* **131**, 1163–1183 (2006). <https://doi.org/10.1086/498708>
12. E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, D. Padgett, R.S. McMillan, M. Skrutskie, et al., The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance, *Astron. J.* **140**, 1868–1881 (2010). <https://doi.org/10.1088/0004-6256/140/6/1868>
13. F. Castelli and R.L. Kurucz, New grids of ATLAS9 model atmospheres, in Modelling of Stellar Atmospheres, *Proc. IAU Symp.* **210**, ed. N. Piskunov, W.W. Weiss, and D.F. Gray, poster A20 (2003). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003IAUS..210P.A20C>
14. C.D. Garmany, R.E. Stencel, Galactic OB Associations in the Northern Milky Way Galaxy. I. Longitudes 55 to 150, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series* **94**, 211–244 (1992).
15. A.J. Cenarro, R.F. Peletier, P. Sánchez-Blázquez et al. Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra – II. The stellar atmospheric parameters, *MNRAS* **374**, 664–690 (2007).
16. K.A. Venn, Atmospheric Parameters and LTE abundances for 22 galactic, A-type supergiants, *Astrophysical Journal Supplement Series.* **99**, 659–692 (1995).
17. N. Markova, J. Puls, Bright OB stars in the Galaxy. IV. Stellar and wind parameters of early to late B supergiants, *Astronomy & Astrophysics* **478**, 823–842 (2008).
18. J. Zorec, L. Cidale, M.L. Arias, et al. Fundamental Parameters of B supergiants from the BCD system. I. Calibration of the (λ_1 , D) parameters into Teff, *Astronomy & Astrophysics* **501**, 297–320 (2009).
19. A. Przybylski, The Analysis of the Small Magellanic Cloud Supergiant HD 7583, *MNRAS* **159**, 155–163 (1972).
20. V. Makaganiuk, O. Kochukhov, N. Piskunov, et al. The search for magnetic fields in mercury-manganese stars, *Astronomy & Astrophysics* **525**, A97, 275–284 (2011).
21. Yu. Goranova, Ts. Georgiev, L. Iliev, et al. Radial velocities of B-stars towards the galactic anti-center, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **73**, 153–157 (2002).
22. N.L. Vaidman, Sh.T. Nurmakhmetova, A.B. Umirova, S.A. Khokhlov, A.T. Agishev, and B.S. Yermekbayev, Evaluating Gaia Astrometric Quality and Distances for Galactic Hot Supergiants, *Universe* **11**(11), 359 (2025). <https://doi.org/10.3390/universe11110359>
23. K. Lefever, C. Aerts, and P. De Cat, Statistical properties of a sample of periodically variable B-type supergiants, *Astron. Astrophys.* **463**, 1093–1109 (2007). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066038>

Information about authors:

Shakhida Nurmakhmetova – master student, Fesenkov Astrophysical Institute, Observatory, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: shahidanurmahametova@gmail.com).

Nadezhda Vaidman (corresponding author) – master in Physics and Astronomy, Fesenkov Astrophysical Institute, Observatory, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: nvaldmann@gmail.com).

Serik Khokhlov – PhD, professor of the Department of Electronics and Astrophysics, Fesenkov Astrophysical Institute, Observatory, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: skhokh88@gmail.com).

Aldiyar Agishev – PhD, associate professor of the Department of Electronics and Astrophysics, Faculty of Physics and Technology, Fesenkov Astrophysical Institute, Observatory, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: alldiyar.agishev@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Шахид Нұрмахаметова — магистратура студенті, Фесенков атындағы астрофизикалық институт, обсерватория, (Алматы, Қазақстан; e-mail: shahidanurmahametova@gmail.com).

Надежда Вайдман (автор-корреспондент) — физика және астрономия магистрі, Фесенков атындағы астрофизикалық институт, обсерватория, (Алматы, Қазақстан; e-mail: nvaldmann@gmail.com).

Серик Хохлов — PhD, электроника және астрофизика кафедрасының профессоры, Фесенков атындағы астрофизикалық институт, обсерватория, (Алматы, Қазақстан; e-mail: skhokh88@gmail.com).

Алдияр Агисhev — PhD, электроника және астрофизика кафедрасының доценті, Физика-техникалық факультет, Фесенков атындағы астрофизикалық институт, обсерватория, (Алматы, Қазақстан; e-mail: alldiyar.agishev@gmail.com).

Сведения об авторах:

Шахида Таишагомедовна Нурмахаметова — студент магистратуры, Астрофизический институт имени Фесенкова, обсерватория, (Алматы, Казахстан; e-mail: shahidanurmahametova@gmail.com).

Надежда Леонидовна Вайдман (автор-корресподент) — магистр физики и астрономии, Астрофизический институт имени Фесенкова, обсерватория, (Алматы, Казахстан; e-mail: nvaldmann@gmail.com).

Серик Анатольевич Хохлов — PhD, профессор кафедры электроники и астрофизики, Астрофизический институт имени Фесенкова, обсерватория, (Алматы, Казахстан; e-mail: skhokh88@gmail.com).

Алдияр Талгатович Агишев — PhD, доцент кафедры электроники и астрофизики, факультет физики и технологий, Астрофизический институт имени Фесенкова, обсерватория, (Алматы, Казахстан; e-mail: aldiyar.agishev@gmail.com).

Article history: received: 31 March 2026; accepted: 12 May 2026.

Мақала тарихы: түсті: 31 наурыз 2026; қабылданды: 12 мамыр 2026.

История статьи: поступила: 31 марта 2026; принята: 12 мая 2026.

МРНТИ: 41.27.29; 41.17.00; 41.51.41; 41.51.27

<https://doi.org/10.26577/RCPH97220263>А.У. Темирганова¹  И. Рева² , Д.М. Насирова¹ , С.А. Шомшекова^{2*} ¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан²Астрофизический институт имени В. Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

*e-mail: shomshekova@fai.kz

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СЕЙФЕРТОВСКОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 7469

В данной работе представлены результаты новых B , V и R_c фотометрических наблюдений сейфертовской галактики типа 1.5 NGC 7469, проведенных с октября 2025 г. по январь 2026 г. на Тянь-Шаньской астрономической обсерватории. Основной целью исследования был мониторинг состояния активного ядра галактики (АЯГ) после значительной оптической вспышки, зафиксированной в конце 2024 года. Наблюдения проводились на 1-метровом телескопе Carl Zeiss и обрабатывались методами дифференциальной ПЗС-фотометрии с использованием апертуры 7". Результаты показывают, что в течение периода исследования галактика оставалась в состоянии относительной фотометрической стабильности со средней звездной величиной в полосе V около 13.2–13.3. Зафиксированная амплитуда переменности составила ~ 0.12 mag, что значительно превышает погрешности измерений ($\sigma_V \approx 0.007$). Сравнение с историческими данными указывает на то, что, хотя быстрый рост яркости 2024 года прекратился, объект стабилизировался на уровне светимости, заметно превышающем минимум 2021 года. Эта стабильность в повышенном состоянии подтверждает сохранение новой активной фазы ядра. Полученные результаты предоставляют важные данные для понимания цикла аккреционных процессов и взаимодействия между АЯГ и окружающим кольцом звездообразования в системах LIRG.

Ключевые слова: сейфертовские галактики, активные ядра галактик, фотометрия, NGC 7469, оптическая переменность, аккреционные диски.

А.У. Темирганова¹, И. Рева², Д.М. Насирова¹, С.А. Шомшекова^{2*}¹Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан²В.Г. Фесенков атындағы астрофизика институты, Алматы, Қазақстан*e-mail: shomshekova@fai.kz

NGC 7469 Сейферт галактикасының фотометриялық мониторингі

Бұл жұмыста 2025 жылдың қазанынан 2026 жылдың қаңтарына дейін Тянь-Шань астрономиялық обсерваториясында жүргізілген NGC 7469 Сейферт 1.5 галактикасының жаңа B , V және R_c фотометриялық бақылауларының нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты — 2024 жылдың соңында тіркелген айтарлықтай оптикалық жарылыстан кейін белсенді галактика ядросының (AGN) күйін бақылау болды. Бақылаулар 1 метрлік Carl Zeiss телескопының көмегімен жүргізіліп, 7" апертураны қолдана отырып, дифференциалды ПЗС-фотометрия әдістерімен өңделді. Нәтижелер зерттеу кезеңінде галактиканың орташа V -шамасы шамамен 13,2–13,3 болатын салыстырмалы фотометриялық тұрақтылық күйінде қалғанын көрсетеді. Тіркелген айнымалылық амплитудасы $\sim 0,12$ mag құрады, бұл фотометриялық қателіктерден ($\sigma_V \approx 0,007$) айтарлықтай асып түседі. Тарихи деректермен салыстыру 2024 жылғы жарықтылықтың жылдам өсуі тоқтағанымен, объект 2021 жылы байқалған минимумнан айтарлықтай жоғары жарықтылық деңгейінде тұрақталғанын көрсетеді. Бұл жоғарылаған күйдегі тұрақтылық ядроның жаңа белсенді фазасының сақталуын растайды. Алынған нәтижелер аккреция процестерінің циклін және LIRG жүйелеріндегі AGN мен айналадағы жұлдыз түзілу сақинасы арасындағы өзара әрекеттесуді түсіну үшін маңызды деректер береді.

Түйін сөздер: Сейферт галактикалары, белсенді галактика ядролары, фотометрия, NGC 7469, оптикалық айнымалылық, аккрециялық дискілер.

A.U. Temirzhanova¹, I. Reva², D.M. Nasirova¹, S.A. Shomsheva^{2*}

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

²Fesenkov astrophysical institute, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: shomsheva@fai.kz

Photometric monitoring of the Seyfert galaxy NGC 7469

This paper presents the results of new B, V, and R_c photometric observations of the Seyfert 1.5 galaxy NGC 7469, conducted from October 2025 to January 2026 at the Tian Shan Astronomical Observatory. The primary goal of the study was to monitor the state of the active galactic nucleus (AGN) following a significant optical outburst recorded in late 2024. Observations were performed using a 1-meter Carl Zeiss telescope and processed with differential CCD photometry techniques using a 7" aperture. The results show that during the study period, the galaxy remained in a state of relative photometric stability with a mean V-band magnitude of approximately 13.2–13.3. The recorded variability amplitude was ~ 0.12 mag, which significantly exceeds the photometric errors ($\sigma_V \approx 0.007$). Comparison with historical data indicates that while the rapid brightness increase of 2024 has ceased, the object has stabilized at a luminosity level notably higher than the minimum observed in 2021. This stability at an elevated state confirms the persistence of a new active phase of the nucleus. The findings provide critical data for understanding the duty cycle of accretion processes and the interaction between the AGN and the surrounding starburst ring in LIRG systems.

Keywords: Seyfert galaxies, active galactic nuclei, photometry, NGC 7469, optical variability, accretion disks.

Введение

Сейфертовские галактики представляют собой один из наиболее изученных классов объектов с активными ядрами (AGN), светимость которых поддерживается аккрецией вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД) [1-3]. Изучение их переменности на различных временных масштабах позволяет диагностировать физические условия в аккреционном диске и горячей короне [4-6]. Среди таких объектов NGC 7469 (тип Sy 1.5) занимает особое место как «лаборатория» для изучения взаимодействия между активным ядром и интенсивным звездообразованием [7-10].

Галактика классифицируется как яркая инфракрасная система (LIRG), где центральное ядро окружено мощным окооядерным кольцом звездообразования радиусом около 500 пк. Современные исследования с помощью космического телескопа James Webb (JWST) выявили в этом кольце 66 областей звездообразования, включая 37 новых объектов, ранее скрытых пылью, что подчеркивает сложность структуры этой системы [11-13]. Кроме того, данные JWST NIRSpec показали наличие сложных газовых притоков (inflows), скорость которых на два порядка превышает

скорость аккреции на черную дыру, что указывает на процессы саморегуляции питания ядра [14, 15].

Активность NGC 7469 сопровождается мощными ионизованными оттоками (outflows). Наблюдения на телескопе VLT/MUSE выявили ионизованный ветер, распространяющийся на расстояние до 2 кпк, что свидетельствует о значительном влиянии AGN на эволюцию родительской галактики [16, 17]. Дополнительный интерес к объекту вызван недавним обнаружением пространственно совпадающих с ним нейтрино высоких энергий (~ 100 ТэВ), что делает NGC 7469 потенциальным кандидатом в источники космических лучей [18, 19].

Проблема исследования. Несмотря на десятилетия мониторинга, характер переменности ядра остается нестабильным. После периода относительного затишья в 2021–2023 годах, в конце 2024 года был зафиксирован резкий всплеск яркости (на 0.3–0.5 m), который может знаменовать начало нового активного этапа эволюции объекта [20-23].

Целью данной работы является фотометрический мониторинг NGC 7469 в пост-вспышечный период (октябрь 2025 – январь

2026). Научная новизна исследования заключается в получении новых данных о состоянии блеска галактики спустя год после зафиксированной в 2024 году вспышки активности. Анализ стабильности объекта в этот интервал времени необходим для проверки

гипотез о длительности активных фаз аккреции и корреляции между оптической переменностью и физическими процессами в околоядерном регионе, выявленными в недавних наблюдениях JWST и ALMA [24,25].

Материалы и методы

Наблюдения объекта NGC 7469 проводились в период с 30 октября 2025 года по 28 января 2026 года на 1-метровом телескопе Carl Zeiss Тянь-Шаньской астрономической обсерватории (ТШАО). Телескоп оснащен ПЗС-камерой Alta F16M с размером матрицы 4096×4096 пикселей, что обеспечивает масштаб изображения $0.76''/\text{пиксель}$. Фотометрические измерения выполнялись в стандартных широкополосных фильтрах Джонсона-Казинса B, V и R_c.

Для обработки полученных кадров применялся пакет программ MaximDL 6. Процедура редукции данных включала стандартную первичную коррекцию за темновой ток, плоское поле. Определение звездных величин проводилось методом высокоточной дифференциальной ПЗС-фотометрии относительно звезд сравнения, находящихся в одном поле зрения с исследуемым объектом, что позволило

минимизировать влияние атмосферной экстинкции и изменений воздушной массы.

Основной опорной звездой служила GSC 1160:1473 (TYC 1160-1473-1) с характеристиками $B = 12.644$, $V = 11.806$ и $R = 11.280$. Для контроля стабильности и оценки погрешностей использовались контрольные звезды: GSC 1160:784 ($V=12.770$), GSC 1160:585 ($V=13.460$) и GSC 1160:1473 ($V=12.600$).

Все фотометрические измерения были выполнены с использованием апертуры $7''$. Выбор данной апертуры обусловлен необходимостью минимизации вклада излучения мощного околоядерного кольца звездообразования NGC 7469, диаметр которого составляет около 1 кпк. Кроме того, использование апертуры $7''$ обеспечивает методическую однородность и прямую сопоставимость полученных результатов с данными многолетнего мониторинга 2020–2024 гг. [20].

Результаты и обсуждение

Основные результаты проведенного мониторинга за период с октября 2025 г. по январь 2026 г. представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Фотометрические данные объекта NGC 7469.

Дата	JD	JD-2400000	B	σ_B	V	σ_V	R	σ_R
30.10.2025	2460979	60979	13,9394	0,0078	13,294	0,007	12,5988	0,0064
25.11.2025	2461005	61005	13,835	0,0062	13,244	0,0062	12,576	0,006
30.11.2025	2461010	61010	13,8234	0,0072	13,2264	0,0076	12,5472	0,0068
02.12.2025	2461012	61012	13,8234	0,0076	13,2172	0,0074	12,5444	0,007
08.01.2026	2461049	61049	13,917	0,0074	13,2916	0,0076	12,5868	0,0068
28.01.2026	2461069	61069	14,006	0,0098	13,3354	0,008	12,6182	0,0066

На основании полученных данных была построена сводная кривая блеска в фильтре V, представленная на рисунке 1. Для наглядного анализа долговременной эволюции объекта на графике совмещены наши новые измерения с

архивными данными мониторинга [ASAS-SN](#) и результатами Fesenkov Astrophysical Institute (FAI) за предыдущие годы.

Визуальный анализ рисунка 1 позволяет зафиксировать текущее состояние объекта в

широком временном масштабе. Отчетливо видно, что после мощного всплеска яркости на 0,3-0,5^m в конце 2024 года, описанного в работе [20], объект не вернулся к состоянию глубокого фотометрического минимума 2021 года ($V \approx 13.43$). Вместо этого на кривой блеска наблюдается выход на «плато» относительной стабильности

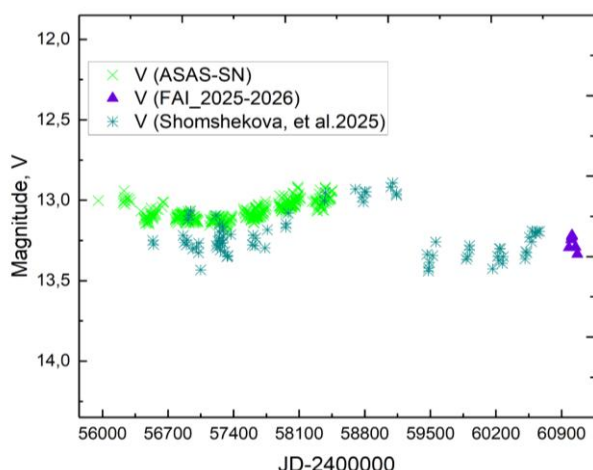


Рисунок 1 – Кривая блеска галактики NGC 7469 в фильтре V, включающая новые и архивные данные (ASAS-SN, FAI)

Заключение

По результатам фотометрических наблюдений галактики NGC 7469 в период октябрь 2025 г. - январь 2026 г. выявлена умеренная оптическая переменность во всех исследованных полосах. Амплитуда переменности за рассматриваемый интервал наблюдений равна: $\Delta B \approx 0.18$ mag, $\Delta V \approx 0.12$ mag, $\Delta R_c \approx 0.07$ mag. Полученные результаты показывают синхронный характер изменений блеска в фильтрах B, V и R_c, что типично для активных ядер галактик и указывает на доминирующий вклад переменного континуума

Зафиксированные в таблице 1 измерения показывают, что в исследуемый период блеск объекта испытывал лишь умеренные колебания. В фильтре V звездная величина изменялась от 13.217 до 13.335 с амплитудой $\sim 0.12^m$. Сравнение этой амплитуды со средней погрешностью измерений ($\sigma_V \approx 0.007$) подтверждает физическую реальность обнаруженных колебаний блеска даже в спокойной фазе. Аналогичная согласованная динамика наблюдается в полосах B и R_c.

Отсутствие резких скачков цветовых индексов (B-V) и (V-R_c) на фоне стабильного уровня светимости свидетельствует о сохранении повышенного темпа аккреции, установившегося после событий 2024+ года. В контексте данных JWST, обнаруживших мощные газовые притоки к ядру, наблюдаемое на Рисунке 1 плато может объясняться устойчивым механизмом питания сверхмассивной черной дыры из околядерного региона.

Зафиксированная малая амплитуда переменности (0.12^m) объясняет отсутствие в наших данных выраженного эффекта «bluer-when-brighter» (BWB), который обычно проявляется в NGC 7469 при более масштабных вспышках. Таким образом, новые данные подтверждают, что галактика вошла в новую фазу активности, характеризующуюся стабилизацией светимости на более высоком уровне по сравнению с периодом 2021-2023 гг.

центрального источника. Наибольшая амплитуда наблюдается в синей полосе B, что согласуется с общепринятой картиной более сильной переменности в коротковолновой области спектра АЯГ.

Информация о финансировании

Исследование выполнено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы № BR24992807.

Вклад авторов: А.У. Темиржанова: обработка данных, измерение данных; И. Рева: проведение наблюдений и сбор данных; Д.М. Насирова: анализ данных; С.А. Шомшекова: научное руководство, привлечение финансирования, анализ данных, визуализация.

Литература

1. B. M. Peterson, G. De Rosa, C. J. Grier, K. Horne, R. W. Pogge, M. C. Bentz, K. D. Denney, P. Martini, S. G. Sergeev, S. Kaspi, T. Minezaki, Y. Zu, C. S. Kochanek, B. J. Shappee, C. Araya Salvo, T. G. Beatty, J. C. Bird, J. C. Brown, D. Denisenko, C. Chen, C.-T. Chen, S. A. Cohen, M. Dietrich, V. T. Doroshenko, T. Drake, Yu. S. Efimov, U. Frey, J. Ginsburg, C. B. Henderson, A. L. King, S. Koshida, M. Mogren, A. M. Mosquera, K. Motohara, S. V. Nazarov, N. N. Okhmat, O. Pejcha, S. Rafter, R. E. Schild, D. M. Skowron, M. Valluri, J. L. Van Saders, and Y. Yoshii,

- Reverberation mapping of the Seyfert 1 galaxy NGC 7469, *Astrophys. J.* **795**, 149 (2014). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/2/149>
2. R. Middei, S. Bianchi, M. Cappi, P.-O. Petrucci, F. Ursini, N. Arav, E. Behar, G. Branduardi-Raymont, E. Costantini, B. De Marco, L. Di Gesu, J. Ebrero, J. S. Kaastra, S. Kaspi, J. Mao, M. Mehdipour, S. Paltani, U. Peretz, and G. Ponti, Multi-wavelength campaign on NGC 7469. IV. The broad-band X-ray spectrum, *Astron. Astrophys.* **615**, A163 (2018). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832726>
3. N. Arav, X. Xu, G. A. Kriss, C. Chamberlain, T. Miller, E. Behar, J. S. Kaastra, J. C. Ely, U. Peretz, M. Mehdipour, G. Branduardi-Raymont, S. Bianchi, M. Cappi, E. Costantini, B. De Marco, L. Di Gesu, J. Ebrero, S. Kaspi, R. Middei, P.-O. Petrucci, and G. Ponti, Multi-wavelength campaign on NGC 7469. V. Analysis of the HST/COS observations: Super solar metallicity, distance, and trough variation models, *Astron. Astrophys.* **633**, A61 (2020). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935342>
4. F. M. Vincentelli, M. Beard, I. M. McHardy, E. Cackett, K. Horne, and M. Pahari, The evolution of the UV/optical lag spectrum of NGC 7469 seen by the Liverpool Telescope, *arXiv arXiv:2302.09152* (2023). <https://arxiv.org/abs/2302.09152>
5. S. Grafton-Waters, G. Branduardi-Raymont, M. Mehdipour, M. J. Page, E. Behar, J. S. Kaastra, N. Arav, S. Bianchi, E. Costantini, J. Ebrero, L. Di Gesu, S. Kaspi, J. Mao, R. Middei, P.-O. Petrucci, and G. Ponti, Multi-wavelength campaign on NGC 7469. VI. Photoionisation modelling of the emission line regions and the warm absorber, *Astron. Astrophys.* **633**, A62 (2020). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935815>
6. E. Seifina, L. Titarchuk, and L. Ugolkova, Scaling of X-ray spectral properties of a black hole in the Seyfert 1 galaxy NGC 7469, *Astron. Astrophys.* **619**, A21 (2018). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833169>
7. L. Armus, T. S.-Y. Lai, V. U, K. L. Larson, T. Diaz-Santos, A. S. Evans, M. A. Malkan, J. Rich, A. M. Medling, D. R. Law, H. Inami, F. Muller-Sanchez, V. Charmandaris, P. van der Werf, S. Stierwalt, S. T. Linden, L. Barcos-Muñoz, C. C. Hayward, Y. Song, P. Appleton, S. Aalto, T. Bohn, T. Böker, M. J. I. Brown, L. Finnerty, J. Howell, K. Iwasawa, F. Kemper, J. Marshall, J. M. Mazzarella, J. McKinney, E. J. Murphy, D. Sanders, and D. Suresh, GOALS-JWST: Mid-infrared spectroscopy of the nucleus of NGC 7469, *Astrophys. J. Lett.* **942**, L37 (2023). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acac66>
8. E. Behar, S. Kaspi, G. Paubert, N. Billot, U. Peretz, R. D. Baldi, A. Laor, J. Kaastra, and M. Mehdipour, Simultaneous millimetre-wave and X-ray monitoring of the Seyfert galaxy NGC 7469, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **491**, 3253 (2019). <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3273>
9. S. Cazzoli, A. Gil de Paz, I. Márquez, J. Masegosa, J. Iglesias, J. Gallego, E. Carrasco, R. Cedazo, M. L. Garcia-Vargas, Á. Castillo-Morales, S. Pascual, N. Cardiel, A. Pérez-Calpena, P. Gómez-Alvarez, I. Martínez-Delgado, and L. Hermosa-Muñoz, NGC 7469 as seen by MEGARA: New results from high-resolution IFU spectroscopy, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **493**, 3656 (2020). <https://doi.org/10.1093/mnras/staa409>
10. S. Cazzoli, A. Gil de Paz, I. Márquez, J. Masegosa, J. Iglesias, J. Gallego, E. Carrasco, R. Cedazo, M. L. Garcia-Vargas, Á. Castillo-Morales, S. Pascual, N. Cardiel, A. Pérez-Calpena, P. Gómez-Alvarez, I. Martínez-Delgado, and L. Hermosa-Muñoz, NGC 7469 as seen by MEGARA at the GTC, *Proc. Int. Astron. Union* **356**, 202 (2021). <https://doi.org/10.1017/S174392132000318X>
11. T. Bohn, H. Inami, T. Diaz-Santos, L. Armus, S. T. Linden, V. U, J. Surace, K. L. Larson, A. Evans, S. Hoshikawa, T. S.-Y. Lai, Y. Song, J. M. Mazzarella, L. Barcos-Muñoz, V. Charmandaris, J. Howell, C. Ricci, S. Stierwalt, S. Aalto, T. Böker, M. J. I. Brown, K. Iwasawa, M. A. Malkan, P. P. van der Werf, P. Appleton, C. C. Hayward, F. Kemper, D. Law, J. Marshall, E. Murphy, D. Sanders, and D. Suresh, GOALS-JWST: NIRCам and MIRI imaging of the circumnuclear starburst ring in NGC 7469, *Astrophys. J. Lett.* **942**, L36 (2023). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acacb1>
12. V. U, T. Lai, M. Bianchini, R. P. Remigio, L. Armus, K. L. Larson, T. Diaz-Santos, A. Evans, S. Stierwalt, D. R. Law, M. A. Malkan, S. Lien, Y. Wang, P. P. van der Werf, Y. Gao, G. C. Privon, A. M. Medling, L. Barcos-Muñoz, C. C. Hayward, H. Inami, J. Rich, S. Aalto, P. Appleton, T. Bohn, M. L. Brown, V. Charmandaris, J. Howell, K. Iwasawa, F. Kemper, J. Marshall, J. M. Mazzarella, J. McKinney, F. Muller-Sánchez, E. J. Murphy, D. Sanders, and J. Surace, GOALS-JWST: Resolving the circumnuclear gas dynamics in NGC 7469 in the mid-infrared, *Astrophys. J. Lett.* **940**, L15 (2022). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac961c>
13. T. S.-Y. Lai, L. Armus, V. U, T. Diaz-Santos, K. L. Larson, A. Evans, M. A. Malkan, P. Appleton, J. Rich, F. Muller-Sánchez, H. Inami, T. Böhm, J. McKinney, D. R. Law, S. Linden, H. Goldstein, G. C. Privon, Y. Song, S. Stierwalt, P. P. van der Werf, L. Barcos-Muñoz, A. Togi, T. Böker, V. Charmandaris, J. Howell, K. Iwasawa, F. Kemper, J. Marshall, J. M. Mazzarella, E. J. Murphy, M. J. I. Brown, C. C. Hayward, D. Sanders, and J. Surace, GOALS-JWST: Tracing AGN feedback on the star-forming interstellar medium in NGC 7469, *Astrophys. J. Lett.* **941**, L36 (2022). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac9ebf>
14. M. Bianchini, V. U, Y. Song, T. S.-Y. Lai, R. P. Remigio, L. Barcos-Muñoz, T. Diaz-Santos, L. Armus, H. Inami, K. L. Larson *et al.*, GOALS-JWST: Gas dynamics and excitation in NGC 7469 revealed by NIRSpec, *Astrophys. J.* **965**, 103 (2024). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad2a50>
15. T. Izumi, D. D. Nguyen, M. Imanishi, T. Kawamuro, S. Baba, S. Nakano, K. Kohno, S. Matsushita, D. S. Meier, J. L. Turner, T. Michiyama, N. Harada, S. Martin, K. Nakanishi, S. Takano, T. Wiklind, N. Nakai, and P.-Y. Hsieh, ALMA observations of multiple CO and CI lines toward the active galactic nucleus of NGC 7469: An X-ray-dominated region caught in the act, *Astrophys. J.* **898**, 75 (2020). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9cb1>

16. X.Xu and J Wang, Spatially resolved ionized outflows extending to ~ 2 kps in Seyfert 1 galaxy NGC 7469 revealed by the Very Large Telescope/MUSE, *Astrophys. J.* **933**, 110 (2022). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7222>
17. A. C. Robledo-Ordaz, J. P. Torres-Papaqui, A. L. Longinotti, R. A. Ortega-Minakata, S. F. Sánchez, Y. Ascasibar, E. Bellocchi, L. Galbany, M. Chow-Martinez, J. J. Trejo-Alonso, T. E. Rivera-Thorsen, and P. J. Romero-Cruz, MUSE reveals extended circumnuclear outflows in the Seyfert 1 NGC 7469, *Astrophys. J. Lett.* **906**, L8 (2021). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abd32f>
18. G. Sommani, A. Franckowiak, M. Lincetto, and R.-J. Dettmar, High-energy neutrino emission from the Seyfert galaxy NGC 7469, *J. Phys.: Conf. Ser.* **3053**, A012025 (2025). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3053/1/012025>
19. G. Sommani, A. Franckowiak, M. Lincetto, and R.-J. Dettmar, Two 100 TeV neutrinos coincident with the Seyfert galaxy NGC 7469, *Astrophys. J.* **981**, 103 (2025). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/adb031>
20. S. Shomshbekova, I. Reva, L. Kondratyeva, N. Huseynov, V. Kim, and L. Aktay, Spectral and photometric studies of NGC 7469 in the optical range, *Universe* **11**, 227 (2025). <https://doi.org/10.3390/universe11070227>
21. M. Pahari, I. M. McHardy, F. Vincentelli, E. Cackett, B. M. Peterson, M. Goad, K. Gultekin, and K. Horne, Evidence for variability time-scale-dependent UV/X-ray delay in Seyfert 1 AGN NGC 7469, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **494**, 4057 (2020). <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1055>
22. E. R. Partington, E. M. Cackett, R. Edelson, K. Horne, J. A. Miller, A. J. Barth, J. Gelbord, and J. V. Hernández Santisteban, Testing X-ray reprocessing and mapping the soft excess of NGC 7469 with NICER, *Astrophys. J.* **986**, 81 (2025). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/add3ef>
23. Z. F. Binnatova, B. I. Abdullayeva, and N. A. Huseynov, BVRcIc monitoring of the Seyfert galaxy of the first type NGC 7469, *Astron. J. Azerbaijan* **18**, 47 (2023) [in English]. <https://doi.org/10.59849/2078-4163.2023.1.47>
24. T. S.-Y. Lai, L. Armus, M. Bianchini, T. Diaz-Santos, S. T. Linden, G. C. Privon, H. Inami, V. U. T. Bohn, A. S. Evans, K. L. Larson *et al.*, GOALS-JWST: Small neutral grains and enhanced 3.3 μm PAH emission in the Seyfert galaxy NGC 7469, *Astrophys. J. Lett.* **957**, L26 (2023). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad0387>
25. M. V. Zanchettin, M. Massardi, F. Salvestrini, M. Bischetti, C. Feruglio, F. Fiore, and A. Lapi, The resolved star formation law in NGC 7469 from JWST, ALMA, and VLA, *Astrophys. J.* **970**, 75 (2024). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad57bd>

Сведения об авторах:

Аяжан Темиржанова – PhD докторант, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, (Алматы, Казахстан, e-mail: temirzhanova_ayazhan@mail.ru).

Инна Рева – старший научный сотрудник, Астрофизический институт имени В. Г. Фесенкова, (Алматы, Казахстан, e-mail: reva@fai.kz).

Диана Насирова – ассоциированный профессор кафедры физики, Казахский Национальный педагогический университет им. Абая, (Алматы, Казахстан, e-mail: d.nasirova@abaiuniversity.edu.kz).

Сауле Шомшекובה – PhD, Астрофизический институт имени В. Г. Фесенкова, (Алматы, Казахстан, e-mail: shomshekova@fai.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Аяжан Теміржанова – PhD докторанты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: temirzhanova_ayazhan@mail.ru).

Инна Рева – аға ғылыми қызметкер, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: reva@fai.kz).

Диана Насирова – физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университет, (Алматы, Қазақстан, e-mail: d.nasirova@abaiuniversity.edu.kz).

Сауле Шомшекובה – PhD, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: shomshekova@fai.kz).

Information about authors:

Ayazhan Temirzhanova – PhD student, Abai Kazakh National Pedagogical University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: temirzhanova_ayazhan@mail.ru).

Inna Reva – Senior Researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: reva@fai.kz).

Diana Nasirova – associate Professor of the Department of Physics, Abai Kazakh National Pedagogical University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: d.nasirova@abaiuniversity.edu.kz).

Saule Shomshekova – PhD, Fesenkov Astrophysical Institute, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: shomshekova@fai.kz).

История статьи: поступила: 25 февраля 2026; после доработки 11 апреля; принята: 18 мая 2026.

Мақала тарихы: түсті: 12 қантар 2026; түзетілді: 11 сәуір; қабылданды: 18 мамыр 2026.

Article history: received: 25 February 2026; revised: 11 April; accepted: 18 May 2026.

С.К. Сахиев¹ , Маулен Насурлла¹ , Н. Буртебаев¹ , Н.О. Садуев^{1,2} ,
Д.А. Исаев^{1,2*} , Маржан Насурлла¹ , Р.А. Ходжаев^{1,2} , К.А. Талпакова¹ ,
А.К. Нұрпейсов^{1,2} , С.А. Турганова¹ 

¹Институт ядерной физики АРКАЭ, Алматы, Казахстан

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

*e-mail: damir.isaev.15@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ^{13}C

Измерены дифференциальные сечения неупругого рассеяния дейтронов на ядре ^{13}C для энергии 14.5 и 18 МэВ для следующих возбужденных состояний: 3.09 МэВ ($1/2^+$), 3.68 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($5/2^+$). Экспериментальные данные были получены с высоким угловым разрешением в широком диапазоне углов, $10^\circ \div 110^\circ$ в системе центра масс, что позволило детально исследовать структуру угловых распределений. Был произведен анализ угловых распределений упругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{13}C . Модель двойной свертки показала себя лучшей только при больших переданных импульсах. Выполнен сравнение описания упругого рассеяния между оптической моделью ядра и моделью двойной свертки. Получена систематика параметров оптического потенциала (ОП) для реакции $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$ в энергетическом диапазоне $E_d=13 \div 18$ МэВ с помощью минимизации χ^2 . Полученные параметры были использованы в рамках метода связанных каналов (МСК) для анализа угловых распределений упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{13}C . За счет анализа неупругого рассеяния дейтронов были вычислены параметры деформации низколежащих возбужденных состояний ядра ^{13}C согласующиеся с литературными данными.

Ключевые слова: ядро ^{13}C , дейтроны, оптическая модель, коллективная модель, метод связанных каналов, параметры деформации.

С.К. Сахиев¹, Маулен Насурлла¹, Н. Буртебаев¹, Н. О. Садуев^{1,2},
Д.А. Исаев^{1,2*}, Маржан Насурлла¹, Р.А. Ходжаев^{1,2}, К.А. Талпакова¹,
А.К. Нұрпейсов^{1,2}, С.А. Турганова¹

¹Ядролық физика институты ҚР АЭА, Алматы, Қазақстан

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

*e-mail: damir.isaev.15@gmail.com

Дейтрондардың ^{13}C ядроларында әрекеттесуін зерттеу

Келесі қозған күйлер үшін 14.5 және 18 МэВ энергиясы үшін ^{13}C ядроларында дейтрондардың серпімді емес шашырауының дифференциалдық қималары өлшенді: 3.09 МэВ ($1/2^+$), 3.68 МэВ ($3/2^-$) және 6.86 МэВ ($5/2^+$). Эксперименттік деректер бұрыштардың кең диапазонында, массалар центрі жүйесіндегі $10^\circ \div 110^\circ$, жоғары бұрыштық ажыратылымдықпен алынды, бұл бұрыштық үлестірімдердің құрылымын егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік берді. ^{13}C ядроларындағы дейтрондардың серпімді шашырауының бұрыштық таралуына талдау жасалды. Ядроның оптикалық моделі мен екі реттік фолдинг моделі арасындағы серпімді шашырауының сипаттамасын салыстыру жүргізілді. Екі реттік фолдинг модел тек үлкен берілген импульстарда өзін жақсы көрсетті. $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$ реакциясы үшін оптикалық потенциал (ОП) параметрлерінің систематикасы $E_d=13 \div 18$ МэВ энергия жипазонында, χ^2 -ті минимизациялау арқылы табылды. Табылған параметрлер ^{13}C ядроларындағы серпімді емес дейтрон шашырауының бұрыштық таралуын талдау үшін байланысқан арналар әдісі (БАӘ) аясында қолданылды. Серпімді емес

дейтрон шашырауының талдау арқылы, әдеби деректерге сәйкес келетін, ^{13}C ядросының төмен жатқан қозған күйлерінің деформация параметрлері есептелді.

Түйін сөздер: ^{13}C ядросы, дейтрондар, оптикалық модель, коллективтік модель, байланысқан арналар әдісі, деформация параметрлері.

S.K. Sakhiyev¹, Maulen Nassurlla¹, N. Burtebayev¹, N.O. Saduyev^{1,2},
D.A. Issayev^{1,2*}, Marzhan Nassurlla¹, R.A. Khodjayev^{1,2}, K.A. Talpakova¹,
A.K. Nurpeisov^{1,2}, S.A. Turganova¹

¹Institute of Nuclear Physics ARKAE, Almaty, Kazakhstan

²Farabi University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: damir.isaev.15@gmail.com

Investigation of deuteron interaction with ^{13}C nuclei

The differential cross sections of inelastic deuteron scattering on the ^{13}C nuclei were measured at energies 14.5 and 18 MeV for the following excited states: 3.09 MeV ($1/2^+$), 3.68 MeV ($3/2^-$) and 6.86 MeV ($5/2^+$). Experimental data were obtained with high angular resolution in a wide range of angles from 10° to 110° in the center of mass system, which made it possible to study in detail the structure of angular distributions. The angular distributions of elastic scattering of deuterons on ^{13}C nuclei were analyzed. A comparison of the description of elastic scattering between the optical model of the nucleus and the double folding model was performed. The double folding method proved to be best only for large transmitted momentums. A systematics of the optical potential (OP) parameters for the $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$ in the energy range $E_d=13\div 18$ MeV was obtained by minimizing χ^2 . The obtained parameters were used within the framework of the coupled channel method (CC) to analyze the angular distributions of elastic and inelastic scattering of deuterons on ^{13}C nuclei. Due to analysis of inelastic deuteron scattering, the deformation parameters of low-lying excited states of the ^{13}C nucleus were calculated, consistent with literature data.

Keywords: ^{13}C nucleus, deuterons, optical model, collective model, coupled channel calculations, deformation parameters.

Введение

С середины прошлого столетия рассеяние частиц было одним из стандартных методов для исследования структуры ядра-мишени. В процессах рассеяния, после взаимодействия внутренние структуры и энергии как снаряда, так и мишени не претерпевают каких-либо изменений. Такие процессы обычно называют упругим рассеянием. Упругое рассеяние легких ядер таких как — протоны, дейтроны, ^3He и альфа-частицы является мощным инструментом для изучения спектроскопии и структуры ядер. За счет слабой энергии связи и что следует с этого, отсутствия спектроскопии этих легких частиц делают их незаменимыми в этой цели. Дейтроны, в отличие от альфа-частиц, имеют слабосвязанную структуру [1] с энергией связи около 2 МэВ [2]. Тем самым, дейтрон приходится одним из ключевых ядер для исследования одно-нуклонных передач на ряду с ядром ^3He .

Структура ядра ^{13}C всегда была интересна по двум причинам: валентный нейтрон который

заполняет $1p_{1/2}$ оболочку и сложная структура низколежащих уровней [3]. ^{13}C является хорошим примером ядра описываемым оболочечной моделью ядра. Возбужденные состояния ^{13}C вплоть до ~ 10 МэВ хорошо изучено [4]. После обнаружения кластерной структуры в виде 3α конфигурации второго возбужденного состояния ядра ^{12}C (7.65 МэВ, 0^+) Фредом Хойлем в 1954 году исследователи ищут аналоги таких возбужденных состояний в других ядрах с явно выраженной кластерной структурой. В работах [5, 6] предполагается существование аналога состояния Хойля в уровне ^{13}C 8.86 МэВ ($1/2^-$) с кластерной структурой в виде $^{12}\text{C}+n$. Также присутствует изучение зеркального ядра ^{13}N на аналоги состояния Хойля [7, 8]. Гало состояние ядра отождествляется тем, что валентный нуклон явно находящийся на высшей орбите образует с оставшимся ядром-остатом связь, тем самым увеличивая радиус ядра и сечения взаимодействия с этим ядром. Первое возбужденной

состояние исследуемого ядра 3.09 МэВ ($1/2^-$) считается гало состоянием с типичной для таких ядер структурой [9-11].

Взаимодействие дейтронов с ядром ^{13}C ранее изучалась для разных целей. В работах [12, 13] были произведены эксперименты по измерению сечений взаимодействия и анализирующие способности дейтрона с ^{13}C при низких энергиях. Эксперименты специально проводились на суббарьерных энергиях для исключения содержания волновой функции дейтрона в поле ядерного потенциала мишени. Эти исследования показали, что в энергетическом диапазоне ниже 1 МэВ взаимодействие $^{13}\text{C}+d$ не имеет резонансную структуру, то есть реакции являются прямыми. Механизмы реакции, вызываемые бомбардировкой дейтронов и структура ядра ^{13}C были исследованы в работах [14-17]. В настоящем исследовании были использованы данные из работ [14-17], то есть в энергетическом диапазоне $E_d=13.7\div 18$ МэВ.

Экспериментальные данные по энергиям выше кулоновского барьера были проанализированы с помощью оптической модели [18], и были сравнены разные наборы потенциалов. Хорошие параметры оптического потенциала обеспечивают точные предсказания реакции возбуждения, перезарядки и передач нуклонов. Информация по параметрам оптической модели помогают при вычислениях в рамках методов связанных каналов (МСК) и искаженных волн (МИВ). За счет сложности подбора параметров оптического потенциала, для одного эксперимента существуют глобализация потенциала

оптической модели. В работе [19] построили глобальный оптический потенциал для дейтрона в энергетическом диапазоне $12\div 90$ МэВ. Хотя и в работе указано, что диапазон масс мишеней не меньше 27, в данной работе данная систематика была использована. Глобальный потенциал для ядер 1р-оболочки с более широким диапазоном энергии был систематизирован в работе [20]. В этой работе было показано особое поведение ядер при взаимодействии с дейтроном. Автор также указывает на более хорошее согласование угловых распределений дифференциальных сечений с экспериментом в отличие от предыдущей работы [19]. Оказалось, систематика из [19] лучше описывает энергетическое распределение полного сечения для ядер 1р-оболочки чем систематика, предложенная в [20].

Глобальные оптические потенциалы и локальные, полученные авторами этой работы, использовались для описания дифференциальных поперечных сечений (ДПС) упругого рассеяния дейтрона на ядре ^{13}C при энергиях $E_d=13.7\div 18$ МэВ. К тому же, параметры перечисленных оптических потенциалов были опробованы на неупругом рассеянии.

Вовлеченные экспериментальные данные возбуждения ядра ^{13}C в анализе, в частности, 3.09 МэВ ($1/2^+$), 3.684 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($5/2^+$), были измерены при энергиях 14.5 и 18 МэВ на изохронном циклотроне У-150М при Институте Ядерной Физики АРКАЭ. Ознакомиться с экспериментальной установкой и методами можно по работам [16, 17].

Методология исследования

Оптическая модель (ОМ) [18] предполагает наличие реальной и мнимой частей потенциала ядерного взаимодействия отвечающие за рассеяние и поглощение, соответственно. В нерелятивистском уравнении Шредингера:

$$(T - E + V_{opt})\Psi = 0, \quad (1)$$

T – оператор кинетической энергии, E – энергия в системе центра масс, V_{opt} – оптический потенциал, описывающий ядерную материю. В общем случае оптический потенциал (ОП) выглядит как:

$$V_{opt} = V_{nuc.}(r) + V_{SO}(r)(\vec{l}, \vec{s}) + V_c(r), \quad (2)$$

где ядерный потенциал $V_{nuc.}(r)$:

$$V_{nuc.}(r) = -V_R * f(r_R, a_R) - i \left(W_V * f(r_V, a_V) + 4a_S W_S * \frac{d}{dr} f(r_S, a_S) \right). \quad (3)$$

Спин-орбитальное взаимодействие налетающей частицы с оболочками ядра-мишени:

$$V_{SO}(r) = \left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \frac{1}{r} * \frac{d}{dr} (V_{SO} * f(r_{VSO}, a_{VSO}) + i W_{SO} * f(r_{WSO}, a_{WSO})). \quad (4)$$

Коэффициент $\left(\frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2$, что является комптоновской длиной волны нейтрального пимезона, предназначен для нормирования потенциала. Причем, в формулах (1), (2) и (3)

радиальная часть $f(r_i, a_i)$ берется как форм-фактор Вудса-Саксона:

$$f(r_i, a_i) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - r_i A_t^{\frac{1}{3}}}{a_i}\right)}. \quad (5)$$

Кулоновская часть оптического потенциала используется в виде однородной заряженной сферы:

$$V_c = f(x) = \begin{cases} \frac{Z_p Z_t e^2}{2R_c} \left(3 - \frac{r^2}{R_c^2}\right), & r \leq R_c \\ \frac{Z_p Z_t e^2}{r}, & r > R_c \end{cases} \quad (6)$$

Причем, кулоновский радиус во всех анализах был взят $R_c = 1.3^3 \sqrt{A_t} \text{ fm}$.

Решая уравнение (1) получаем волновую функцию, которая асимптотически ведет себя как:

$$\Psi = e^{-ikz} + f(\theta) \frac{\exp(ikr)}{r}, \quad (7)$$

где коэффициент перед расходящейся волной является амплитудой рассеяния, причем:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2. \quad (8)$$

Все расчеты по оптической модели для описания упругого рассеяния дейтронов были сделаны с помощью программы ECIS [21]. Программа имеет функционал для поиска оптимальных параметров для наилучшего совпадения теоретически предсказанных с экспериментальными угловыми распределениями дифференциальных сечений. В целях количественного описания «согласования» экспериментальных и теоретических дифференциальных сечений использовалась величина хи-квадрат:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{[\sigma_i^{EXP} - \sigma_i^{TH}]^2}{\Delta \sigma_i^2}, \quad (9)$$

где σ_i^{EXP} , σ_i^{TH} и $\Delta \sigma_i^2$ — дифференциальные поперечные сечения экспериментальные, теоретически полученные с помощью ОП и экспериментально найденные абсолютные ошибки в сечениях, соответственно.

При выборе оптического потенциала может возникнуть, так называемые, дискретные и непрерывные неоднозначности параметров [22]. Это означает, что разный набор параметров ОП могут выдавать схожие результаты. Схожие результаты для упругого рассеяния хоть и не являются большой опасностью, для неупругих процессов маленькие изменения в параметрах может вызвать большие расхождения в ДПС. Ради физической обоснованности параметров ОП также использовалась величина «объемный интеграл».

$$J_V = -\frac{4\pi}{A_p A_t} \int V(r) r^2 dr. \quad (10)$$

Она в среднем должна быть равна величине нуклон-нуклонного взаимодействия, то есть $\sim 400 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}^3$. Оно происходит от более реалистичной реальной части оптического потенциала, который является полумикроскопическим описанием нуклон-нуклонного взаимодействия — модель двойной свертки [23]. Выглядит оно следующим образом:

$$V_{DF} = N_R \iint (\vec{R} + \vec{r}_T - \vec{r}_P) d^3 \vec{r}_T d^3 \vec{r}_P, \quad (11)$$

где $\rho_T(\vec{r}_T)$ — плотность ядерной материи у ядра-мишени, $\rho_P(\vec{r}_P)$ — плотность ядерной материи у налетающего ядра и $v_{NN}(\vec{R} + \vec{r}_T - \vec{r}_P)$ — эффективный потенциал взаимодействия между двумя нуклонами зависящий от относительного расстояния между ними. Функции плотностей ядерной материи должны быть нормированы на количество нуклонов в ядре:

$$\int \rho(\vec{r}) d\vec{r} = A \quad (12)$$

В данной работе модель двойной свертки использовалась для апробации найденных оптических потенциалов. Соответственно, ниже указаны функции плотности, выбранные для расчета потенциала двойной свертки для пары ^{13}C и d:

$$\rho_{13C}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{13C}}{a_{13C}}\right)}, \quad (13)$$

$$\rho_d(r) = \rho_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha_d^2}\right), \quad (14)$$

где ρ_0 – константа, которая находится с помощью нормировки плотности, как указано в формуле (12). Эффективное нуклон-нуклонного взаимодействие определялось по глобальному потенциалу M3Y-Reid:

$$v_{NN}(r) = \left[7999 \frac{e^{-4r}}{4r} - 2134 \frac{e^{-2.5r}}{2.5r} \right] \text{ MeV} \quad (15)$$

Неупругое рассеяние анализировалось для переходов в состояния 3.089 МэВ ($1/2^+$), 3.068 МэВ ($3/2^-$) и 6.864 МэВ ($5/2^+$) ядра ^{13}C . Рассмотрим деформированное ядро с длиной деформации δ_λ . Влияние этих деформаций может быть выражено как изменение радиуса, при

Результаты и обсуждение

Изначально было проведено исследование упругого рассеяния дейтронов на ^{13}C , для нахождения оптимальных оптических параметров. Из работ [19, 20] были взяты глобальная систематика и ее параметры. В рисунке 1 показаны вычисленные теоретические ДПС вычисленных с помощью программного кода ECIS [21].

В работе [20] автор пояснил, что его систематика хоть и согласовывалась хорошо с угловыми распределениями ДПС, но имела изъян в виде плохого описания энергетической зависимости полного сечения взаимодействия. По этой причине, были не использованы параметры ОП из данной систематики.

Систематика из [19] не смогла полномерно описать ДПС упругого рассеяния из числа вышеперечисленных. Но как было пояснено выше, полное сечение данная систематика описывала с хорошей точностью. За счет этого факта, было принято решение использовать параметры с данной систематикой, но с измененными глубинами потенциала. Спин-орбитальное взаимодействие не было включено, так как только упругое рассеяние при 13.7 МэВ [15] имело достаточное количество экспериментальных точек в задней полусфере, а как известно, спин-орбитальное составляющая оптического потенциала влияет лишь на ДПС в задней полусфере.

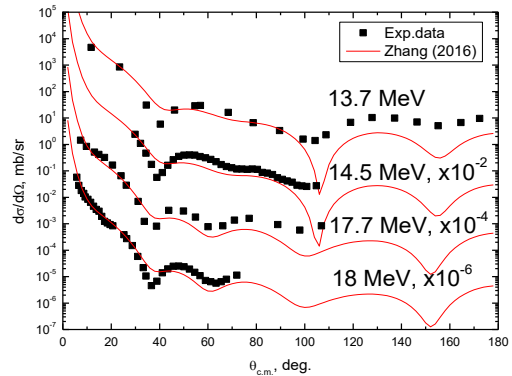
В настоящей работе были получены для каждого углового распределения 3 возможных варианта глубины реальной части — мелкий, средний и глубокий. Эти глубины соответствуют минимумам χ^2 что подтверждает наличие дискретной неоднозначности ОП. В таблице 1 указаны эти 3 набора параметров ОП. Причем, в таблице 1 W_s соответствует поверхностному

котором мы оцениваем оптические потенциалы, изменение, зависящее от относительной ориентации радиус-вектора по отношению к внутренней ориентации ядра. Деформированный радиус ядра будет выражаться как:

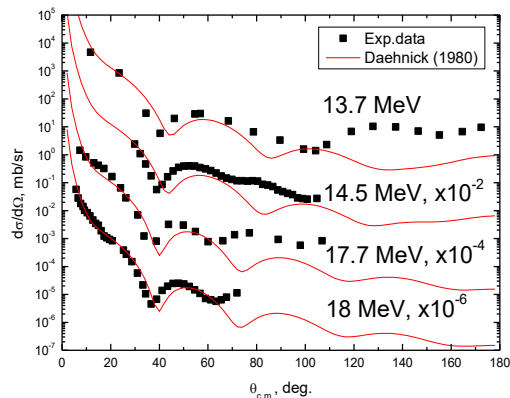
$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\lambda=1}^{\infty} \delta_\lambda Y_{\lambda 0}(\theta, \phi) \right) \quad (16)$$

И в этом виде использоваться в потенциале взаимодействия. Расчеты неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{13}C проводились методом связанных каналов по компьютерной программе FRESKO [24].

потенциалу, а объемный потенциал был очень близок к ~ 0 и не был учтен. Для потенциала двойной свертки, единственным изменяемым параметром является коэффициент нормализации N_R , который был зафиксирован для всех энергий, на значении 0.7.



(a)



(б)

Рисунок 1 – Теоретические угловые распределения ДПС $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$ полученных по глобальной систематике ОП из [20] (a) и [19] (б).

Таблица 1. Параметры ОП соответствующие минимумам χ^2 .

E_d , МэВ	Набор	V_r , МэВ	W_s , МэВ	J_V , МэВ*Фм ³	J_W , МэВ*Фм ³	χ^2/N
13.7	A	100.2	9.19	620.07	124.33	24.4
	B	50.0		309.32		111
	C	160.0		989.83		237
14.5	A	107.0	10.4	661.95	140.70	11.4
	B	50.0		309.32		81.9
	C	160.0		989.83		26.9
17.7	A	105.7	20.77	653.91	281.0	37.6
	B	50.0		309.32		91.3
	C	160.0		989.83		34.1
18	A	98.0	20.96	612.46	283.57	12.9
	B	50.0		309.32		85.8
	C	160.0		989.83		16.4

На рисунке 2 показаны как наборы А, В и С и потенциал двойной свертки описывают экспериментальные данные при перечисленных энергиях.

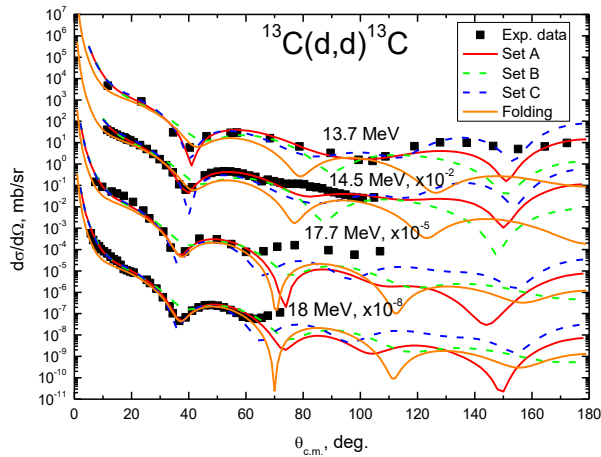


Рисунок 2 – Теоретические ДПС, полученные с помощью оптической и двойной свертки моделей в сравнении с экспериментальными данными.

Для оценки нахождения оптимальных глубин потенциала была изучена зависимость χ^2 от глубины реальной части, при фиксированных значениях геометрических параметров – радиуса и диффузности. Радиусы реальной и мнимой частей равны — 1.2 и 1.31 Фм соответственно, диффузности — 0.755 и 0.645 Фм, тоже соответственно. Значения глубин менялись от 30 МэВ до 250 МэВ с шагом 10 МэВ. Результаты показаны на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3 при низких энергиях рассеяния наблюдается несколько выраженных

минимумов χ^2 от глубины реальной части ОП. При увеличении энергии до 18 МэВ их количество уменьшается до двух, что согласуется с исследованиями упругого рассеяния альфа-частиц на ядрах ^{10}B в максимально широком диапазоне энергии [25]. В этой работе при энергии 91.8 МэВ наблюдается только один выраженный минимум χ^2 от глубины реальной части ОП.

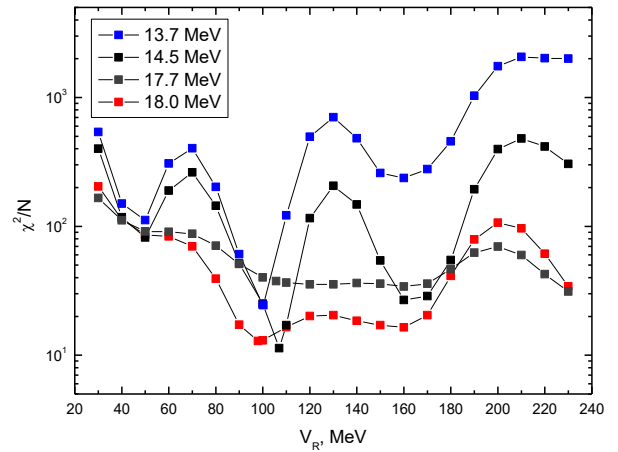


Рисунок 3 – Зависимость χ^2 от глубины реальной части оптического потенциала.

Геометрические параметры были зафиксированы.

При расчете неупругого рассеяния дейтронов на ядрах ^{13}C была использована коллективная модель. Для каждого возбужденного состояния было использована своя длина деформации. Схема связей ядра ^{13}C показана на рисунке 4.

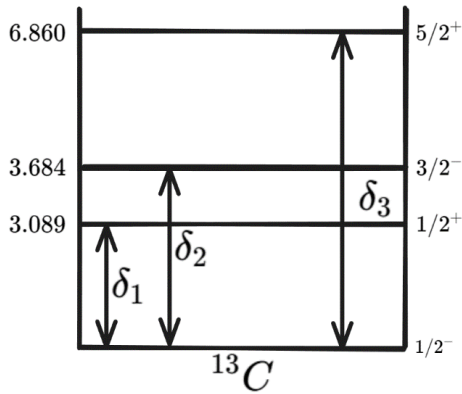
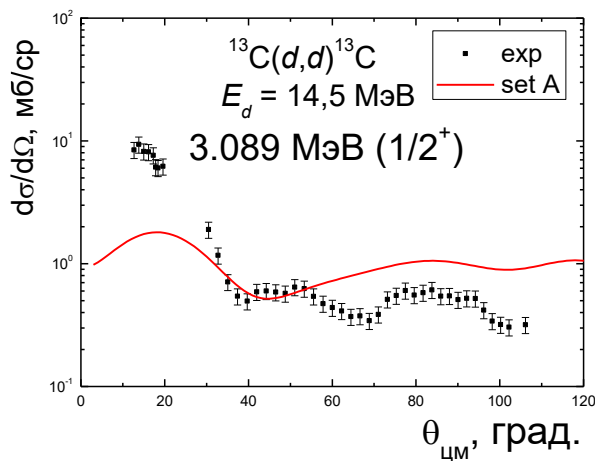


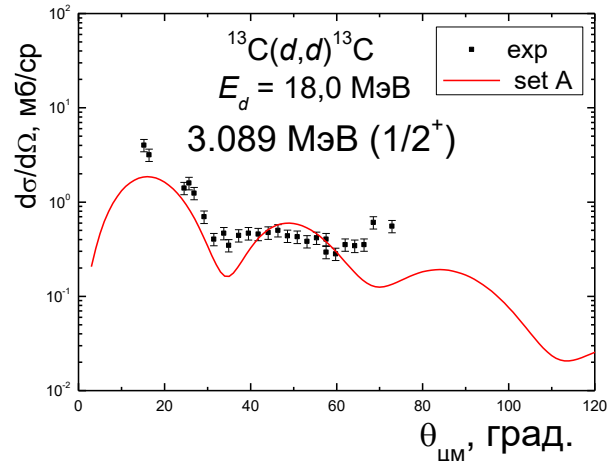
Рисунок 4 – Схема связей возбужденных состояний ядра ^{13}C .

На рисунках 5, 6 и 7 показаны результаты расчета по МСК для ДПС неупругих реакции $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}^*$ с возбуждениями на уровни: 3.089 МэВ ($1/2^+$), 3.684 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($1/2^+$) при энергиях 14.5 и 18 МэВ. Параметры деформации были получены с помощью нормализации теоретических ДПС на экспериментальные ДПС в средних углах. Они показаны в таблице 2.

Как видно из рисунков 5-6, коллективная модель неплохо описывает поведение экспериментальных угловых распределений неупругого рассеяния, несмотря на довольно большой разброс значений δ_λ ранее полученных результатов, извлеченные нами параметры деформации не противоречат ранее полученным значениям.

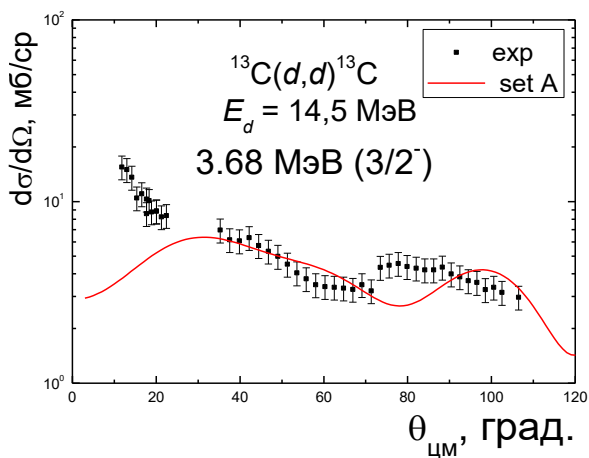


(a)

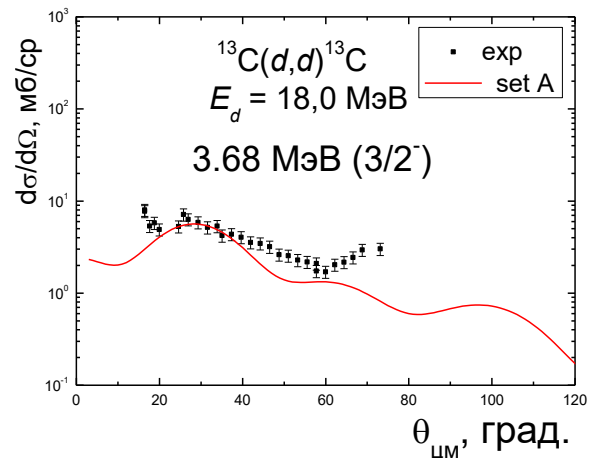


(б)

Рисунок 5 – Неупругое рассеяние дейтронов на ядрах ^{13}C при энергиях 14.5 МэВ и 18 МэВ с переходом в возбужденное состояние 3.089 МэВ ($1/2^+$).

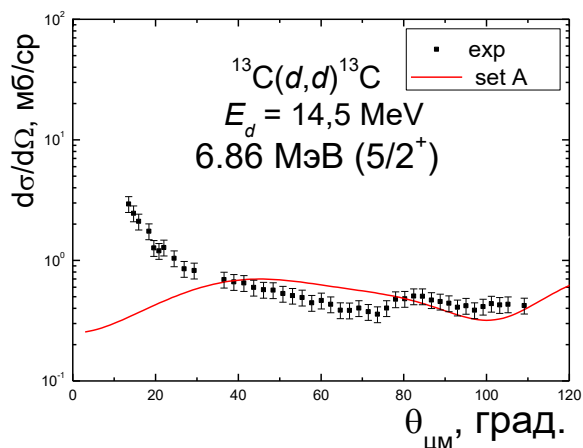


(a)

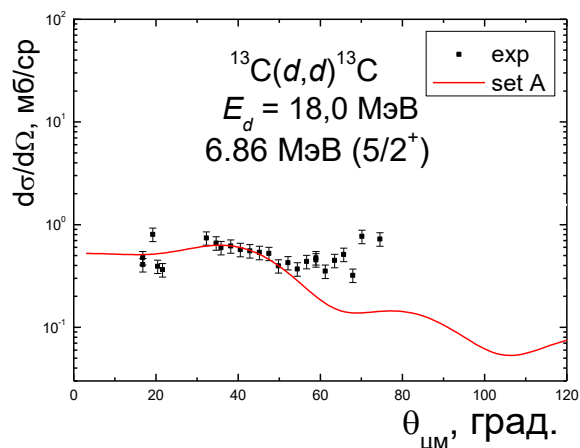


(б)

Рисунок 6 – Неупругое рассеяние дейтронов на ядрах ^{13}C при энергиях 14.5 МэВ и 18 МэВ с переходом в возбужденное состояние 3.68 МэВ ($3/2^-$).



(a)



(б)

Рисунок 7 – Неупругое рассеяние дейтронов на ядрах ^{13}C при энергиях 14.5 МэВ и 18 МэВ с переходом в возбужденное состояние 6.86 МэВ ($5/2^+$).

Таблица 2. Параметры деформации полученные при расчете по МСК.

E_d , МэВ	E_x , МэВ	J^π	λ	δ_λ , Фм	δ_λ , Фм ссылки
14.5	3.089	$1/2^+$	1	0.68	0.242 [26]
	3.68	$3/2^-$	2	1.41	1.335 [26]
	6.86	$5/2^+$	3	0.68	0.176 [26]
18	3.089	$1/2^+$	1	0.56	0.536 [27]
	3.68	$3/2^-$	2	1.16	1.166 [27]
	6.86	$5/2^+$	3	0.68	0.468 [27]

Заключение

В настоящей работе проведено комплексное исследование упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ядре ^{13}C в энергетическом диапазоне $E_d=13\div 18$ МэВ. На основе анализа экспериментальных данных выполнено сравнение различных оптических потенциалов, включая глобальные систематики и локальные параметры, полученные путем минимизации χ^2 . Исследование χ^2 -поверхности подтвердило наличие дискретных неоднозначностей параметров оптического потенциала. Были определены три набора параметров, мелкий, средний и глубокий, обеспечивающих сопоставимое качество описания упругих ДПС.

Используя найденные параметры ОП, выполнены расчеты неупругих процессов в рамках метода связанных каналов. Коллективная модель продемонстрировала хорошее согласование с экспериментальными данными для переходов в уровни 3.089 МэВ ($1/2^+$), 3.684 МэВ ($3/2^-$) и 6.86 МэВ ($5/2^+$) при энергиях 14.5 и 18 МэВ. Извлеченные параметры деформации оказались согласованы с ранее опубликованными

результатами и подтверждают коллективный характер низколежащих возбужденных состояний ядра ^{13}C .

Таким образом, полученные данные и выполненный анализ вносят вклад в уточнение параметров оптического потенциала для реакции $^{13}\text{C}(d,d)^{13}\text{C}$, что является важным шагом для дальнейших исследований механизмов прямых реакций и структуры возбужденных состояний ядра ^{13}C . Результаты работы могут быть использованы при расчетах передач нуклонов, анализе кластерных состояний и развитии моделей, описывающих взаимодействие слабосвязанных ядер.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке программы № BR24992891 (Комплексные исследования по ядерной, радиационной физике и технике, физике высоких энергий и космологии для развития конкурентных технологий) Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Вклад авторов

С.К. Сахиев: привлечение финансирования, администрирование проекта; **Маулен Насурлла:** концептуализация, курирование данных, методология; **Н. Буртебаев:** научное руководство, администрирование проекта, написание – рецензирование и редактирование; **Н.О. Садуев:** научное руководство, администрирование проекта; **Д.А. Исаев:** формальный анализ, визуализация, программное обеспечение, написание – первоначальный вариант; **Маржан Насурлла:** формальный анализ, курирование данных; **Р.А. Ходжаев:** формальный анализ, проведение исследования; **К.А. Талпакова:** формальный анализ, проведение исследования; **А.К. Нұрпейсов:** курирование данных, проведение исследования; **С.А. Турганова:** проведение исследования, программное обеспечение.

Литература

1. Y. Nishida, Elastic scattering of deuterons by heavy nuclei, *Progress of Theoretical Physics*, **19**(4), 389-403 (1958). <https://doi.org/10.1143/PTP.19.389>
2. C. Van Der Leun, & C. Alderliesten, The deuteron binding energy, *Nuclear Physics A* **380**(2), 261-269 (1982). <https://doi.org/10.26577/RCPH202592113>
3. J.H. Kelley, C.G. Sheu, & J.E. Purcell, Energy levels of light nuclei A= 13, *Nuclear Data Sheets* **198**, 1-448 (2024).
4. W. von Oertzen, M. Freer, & Y. Kanada-En'yo, Nuclear clusters and nuclear molecules, *Physics Reports* **432**(2), 43-113 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.07.001>
5. M. Milin, & W. Von Oertzen, Search for molecular bands in ^{13}C , *The European Physical Journal A-Hadrons and Nuclei* **14**(3), 295-307 (2002). <https://doi.org/10.26577/RCPH202592113>
6. Y. Chiba, & M. Kimura, Hoyle-analog state in ^{13}C studied with antisymmetrized molecular dynamics, *Physical Review C* **101**(2), 024317 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.101.024317>
7. Y.Y. Cao, D.Y. Tao, B. Zhou, & Y.G. Ma, Hoyle-analog state in ^{13}N . *Physical Review C* **112**(3), 034313 (2025). <https://doi.org/10.1103/d3f6-wpdb>
8. H. Fujimura, H. Akimune, I. Daito, M. Fujiwara, K. Hara, K. Y. Hara,... & M. Yosoi, Nuclear structure of the spin-isospin excited states in ^{13}N studied via the (^3He , t) and (^3He , tp) reactions at 450 MeV, *Physical Review C—Nuclear Physics* **69**(6), 064327 (2004). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.69.064327>
9. Z.H. Liu, C.J. Lin, H.Q. Zhang, Z.C. Li, J.S. Zhang, Y.W. Wu,... & Z.H. Peng, Asymptotic normalization coefficients and neutron halo of the excited states in ^{12}B and ^{13}C , *Physical Review C* **64**(3), 034312 (2001). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.64.034312>
10. A.S. Demyanova, A.N. Danilov, S.V. Dmitriev, A.A. Ogloblin, T.L. Belyaeva, N., Burtebaev,... & V.I. Zhrebchevskii, Spectroscopy of exotic states of ^{13}C . In *EPJ Web of Conferences* **66**, 02027 (2014). <https://doi.org/10.1051/epjconf/20146602027>
11. A.A. Ogloblin, A.S. Demyanova, A.N. Danilov, T.L. Belyaeva, S.A. Goncharov, & W. Trzaska, Nuclear states with anomalously large radius (size isomers), *Physics of Atomic Nuclei* **79**(4), 514-524 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1063778816040177>
12. M.M. Nagadi, A.A. Naqvi, M.A. Al-Ohali, F.Z. Khiari, & S. Kidwai, Deuteron Stripping Cross Section from ^{13}C at Deuteron Energies below 350 keV. *Australian Journal of Physics* **51**, 913-920 (1998).
13. G.D. Putt, Studies of some sub-Coulomb deuteron-induced reactions on ^{13}C and ^{12}C , *Nuclear Physics A* **161**(2), 547-564 (1971). [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(71\)90386-1](https://doi.org/10.1016/0375-9474(71)90386-1)
14. R.J., Peterson, H.C., Bhang, J.J. Hamill, & T G. Masterson, The ^{14}C (α , α') ^{14}C and ^{13}C (d, p) ^{14}C reactions, *Nuclear Physics A* **425**(3), 469-492 (1984).
15. H. Guratzsch, J. Slotta, & G. Stiller, A study of deuteron scattering on ^{12}C and ^{13}C . *Nuclear Physics A* **140**(1), 129-140 (1970).
16. V.V. Dyachkov, N. T. Burterbaev, & A.V. Yushkov, Measuring elastically scattered 18 MeV deuterons and the shape of nuclei, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* **76**(8), 895-900 (2012).
17. N. Burtebayev, D.M. Janseitov, Z. Kerimkulov, D. Alimov, M. Nassurlla, D.S., Valiolda,... & A. Aimaganbetov, Elastic and Inelastic Scattering of Deuterons From ^{13}C , *Journal of Physics: Conference Series* **1555**(1), 012028 (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1555/1/012028>
18. P.E. Hodgson, The nuclear optical model. *Reports on Progress in Physics* **34**(2), 765-819 (1971).
19. W.W. Daehnick, J.D. Childs, & Z. Vrcelj, Global optical model potential for elastic deuteron scattering from 12 to 90 MeV, *Physical Review C* **21**(6), 2253 (1980). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.2253>
20. Y. Zhang, D. Pang, & J.L. Lou, Optical model potential for deuteron elastic scattering with 1 p-shell nuclei, *Physical Review C* **94**(1), 014619 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.94.014619>
21. J. Raynal, Coupled channel calculations and computer code ECIS (No. CEA-CONF--9461), CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, 91-Gif-sur-Yvette (France), Service de Physique Theorique, 1988.
22. R.M. Drisko, G.R. Satchler, & R.H. Bassel, Ambiguities in the optical potential for strongly absorbed projectiles. *Physics Letters* **5**(5) (1963).

23. M. Karakoc, BiFold: A Python code for the calculation of double-folded (bifold) potentials with density-in/dependent nucleon-nucleon interactions, *Computer Physics Communications* **284**, 108613 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108613>
24. I.J. Thompson, Getting started with FRESKO, *Comput. Phys. Rep* **7**, 167-212 (1988).
25. M. Nassurlla, N. Burtebayev, S. Sakuta, M. Nassurlla, R. Khojayev, D. Alimov,... & A. Makhmut, A Study of Alpha-Particle Scattering on ^{10}B Nuclei at an Energy of 29 MeV, *Universe* **10**(1), 51 (2024). <https://doi.org/10.3390/universe10010051>
26. B. Urazbekov, N. Burtebayev, D. Janseitov, M. Nassurlla, D. Alimov, & D. Valiolda, Examination of collective and single-particle models for excited states of ^{13}C below 10 MeV in nuclear reactions induced by 18 MeV deuteron beam, *The European Physical Journal A* **60**(4), 86 (2024). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01292-9>
27. R. J. Peterson, J. R. Shepard, & R. A. Emigh, Isoscalar and isovector transition amplitudes in $A=13$, *Physical Review C* **24**(3), 826 (1981).

Сведения об авторах:

Сахиев Саябек Қуанышбекович – д.ф.-м.н., Генеральный директор, Институт ядерной Физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).

Маулен Насурлла – PhD, Заведующий лабораторией низкоэнергетических ядерных реакций (ЛНЭЯР), Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: nassurlla_inps@inp.kz).

Буртебаев Насурлла – д.ф.-м.н., ВНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: nburtebayev@yandex.kz).

Садуаев Нұржан Орынбасарович – PhD, Зам. генерального директора по научной работе, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: n.saduyev@inp.kz).

Исаев Дамир Асанханұлы (автор-корреспондент) – магистрант, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).

Маржан Насурлла – PhD, СНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: morzhic@mail.ru).

Ходжаев Ромазан Ахмеджанович – PhD студент, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан e-mail: ramazan_inp@mail.ru).

Талпакова Караиш Айдыралиевна – PhD студент, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: talpakova@inp.kz).

Нурпейсов Айкен Қайратұлы – PhD студент, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: aiken9898@mail.ru).

Турганова Санира Алимжановна – магистр, МНС ЛНЭЯР, Институт ядерной физики, (Алматы, Казахстан, e-mail: turganova.sanira.01@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Саябек Сахиев – ф.-м.ғ.д., Бас Директор, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).

Маулен Насурлла – PhD, Төмен энергиялы ядролық реакциялар зертханасының (ТЭЯРЗ) меңгерушісі, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: nassurlla_inps@inp.kz).

Насурлла Буртебаев – ф.-м.ғ.д., ТЭЯРЗ ЖФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: nburtebayev@yandex.kz).

Нұржан Садуаев – PhD, Бас директордың ғылым бойынша орынбасары, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: n.saduyev@inp.kz).

Дамир Исаев (автор-корреспондент) – магистрант, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: s.sakhi@inp.kz).

Маржан Насурлла – PhD, ТЭЯРЗ АФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: morzhic@mail.ru).

Ромазан Ходжаев – PhD студент, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: ramazan_inp@mail.ru).

Қараиш Талпакова – PhD студент, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: talpakova@inp.kz).

Айкен Нұрпейсов – PhD студент, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: aiken9898@mail.ru).

Санира Турганова – магистр, ТЭЯРЗ КФҚ, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: turganova.sanira.01@gmail.com).

Information about authors:

Sayabek Sakhiyev – D. Sc. in Physics and Mathematics, General Director, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: s.sakhi@inp.kz).

Maulen Nassurlla – PhD, Head of Laboratory of low-energy nuclear reactions (LLENR), Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nassurlla_inps@inp.kz).

Nassurlla Burtebayev – D. Sc. in Physics and Mathematics, LR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan e-mail: nburtebayev@yandex.kz).

Nurzhан Saduyev – PhD, Deputy Director General for Science, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: n.saduyev@inp.kz).

Damir Issayev (corresponding author) – M.Sc. student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: damir.isaev.15@gmail.com).

Marzhan Nassurlla – PhD, SR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: morzhic@mail.ru).

Romazan Khodjayev – PhD student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ramazan_inp@mail.ru).

Karashash Talpakova – PhD student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: talpakova@inp.kz).

Aiken Nurpeisov – PhD student, JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aiken9898@mail.ru).

Sanira Turganova – M.Sc., JR of LLENR, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: turganova.sanira.01@gmail.com).

История статьи: поступила: 10 февраля 2026; после доработки 20 апреля; принята: 15 мая 2026.

Мақала тарихы: түсті: 10 ақпан 2026; түзетілді: 20 сәуір; қабылданды: 15 мамыр 2026.

Article history: received: 10 February 2026; revised: 20 April; accepted: 15 May 2026.

Плазма физикасы

Plasma physics

Физика плазмы

МРНТИ 29.27.45, 31.15.15, 81.93.29, 76.29.33

<https://doi.org/10.26577/RCPH97220265>Д.Л. Алонцева¹ , Б.Н. Азаматов^{1,2} , С.Г. Войнарович³ , А.В. Ерсайнова^{1*} ¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан²ТОО Восточно-Казахстанский региональный технопарк Алтай», Усть-Каменогорск, Казахстан³Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина*e-mail: av_yersainova@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ИМПЛАНТАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

В статье представлен обзор современных тенденций развития технологий изготовления медицинских инструментов и имплантатов с акцентом на внедрение цифрового проектирования, аддитивных технологий изготовления, и методов поверхностной инженерии, с фокусом на использовании плазменных технологий. Целью обзора является системный анализ современных технологических подходов и выявление ключевых ограничений, сдерживающих широкое внедрение инновационных технологий производства медицинских имплантатов в клиническую практику. Рассмотрена эволюция производственных методов от традиционной механической обработки к персонализированному и функционально ориентированному производству. Проанализированы достижения в области трехмерного моделирования, 3D-печати металлических и полимерных конструкций, плазменной и ионно-плазменной модификации поверхности имплантатов, а также роботизированных хирургических платформ и комбинации этих продвинутых технологий. Особое внимание уделено особенностям термического плазменного напыления, закономерностям влияния параметров плазменного напыления на микроструктуру и свойства поверхностей медицинских изделий, а также технологическим ограничениям внедрения комбинированных технологий изготовления медицинских изделий, включая вариативность качества аддитивного производства, сложности сертификации материалов, отсутствие унифицированных стандартов для персонализированных медицинских изделий. Обобщение и анализ современных научных данных позволяет определить перспективные направления дальнейших исследований и повышения эффективности внедрения инновационных плазменных технологий модификации поверхности медицинских инструментов и имплантатов.

Ключевые слова: медицинские имплантаты, аддитивное производство, плазменные технологии, поверхностная модификация, биосовместимые материалы, цифровое проектирование, термическое плазменное напыление (ТПН).

Д.Л. Алонцева¹, Б.Н. Азаматов^{1,2}, С.Г. Войнарович³, А.В. Ерсайнова^{1*}¹Д. Серікбав атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан²Шығыс Қазақстан өңірлік Алтай технопаркі, ЖШС, Өскемен, Қазақстан³Украина ұлттық академиясының Е.О. Патон электр дәнекерлеу институты, Киев, Украина*e-mail: av_yersainova@mail.ru

Бетті модификациялаудың плазмалық технологияларын қолдану арқылы медициналық құралдар мен имплантаттар өндірісін дамытудың заманауи тенденциялары

Мақалада медициналық құралдар мен имплантаттарды дайындау технологияларын дамытудың заманауи үрдістеріне шолу жасалып, цифрлық жобалауды енгізуге, аддитивті өндіріс технологияларына және беткі инженерия әдістеріне, соның ішінде плазмалық

технологияларды қолдануға баса назар аударылады. Шолудың мақсаты медициналық имплантаттарды өндірудің инновациялық технологияларын клиникалық тәжірибеге кеңінен енгізуді тежейтін негізгі шектеулерді айқындау және заманауи технологиялық тәсілдерді жүйелі талдау. Дәстүрлі механикалық өңдеуден дербестендірілген және функционалдық бағдарланған өндіріске дейінгі өндірістік әдістердің эволюциясы қарастырылған. Үшөлшемді модельдеу, металл және полимерлік конструкцияларды 3D басып шығару, имплантаттар бетінің плазмалық және ионды-плазмалық модификациясы, сондай-ақ роботтандырылған хирургиялық платформалар және осы озық технологиялардың үйлесімі саласындағы жетістіктер талданған. Термиялық плазмалық бүрку ерекшеліктеріне, плазмалық бүрку параметрлерінің медициналық бұйымдар беттерінің микроқұрылымы мен қасиеттеріне әсер ету заңдылықтарына, сондай-ақ медициналық бұйымдарды дайындаудың біріктірілген технологияларын енгізудің технологиялық шектеулеріне ерекше көңіл бөлінген. Атап айтқанда, аддитивті өндіріс сапасының вариабельдігі, материалдарды сертификаттау күрделілігі, дербестендірілген медициналық бұйымдарға арналған бірыңғай стандарттардың болмауы мәселелері қарастырылады. Қазіргі ғылыми деректерді жинақтау және талдау медициналық құралдар мен имплантаттардың беттерін плазмалық технологиялар арқылы модификациялау саласындағы инновациялық тәсілдерді енгізу тиімділігін арттыру және одан әрі зерттеу бағыттарын айқындауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: медициналық имплантаттар, аддитивті өндіріс, плазмалық технологиялар, беткі модификация, биоүйлесімді материалдар, цифрлық жобалау, термиялық плазмалық бүрку (ТПБ).

D.L. Alontseva¹, B.N. Azamatov^{1,2}, S.G. Voinarovych³, A.V. Yersainova^{1*}

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²East Kazakhstan Regional Technopark Altai, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³E.O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Science of Ukraine, Kiev, Ukraine

*e-mail: av_yersainova@mail.ru

Modern trends in the development of medical instruments and implants using plasma surface modification technologies

This review article presents an overview of current trends in the development of medical instruments and implant manufacturing technologies, with an emphasis on digital design, additive manufacturing, and surface engineering methods, and a focus on the use of plasma technologies. The review aims to systematically analyze modern technological approaches and identify key limitations that hinder the widespread implementation of innovative technologies for the production of medical implants in clinical practice. The evolution of manufacturing methods from traditional mechanical processing to personalized and functionally oriented production is considered. Advances in 3D modeling, 3D printing of metal and polymer structures, plasma and ion-plasma modification of implant surfaces, robotic surgical platforms, and combinations of these advanced technologies are analyzed. Particular attention is paid to the characteristics of thermal plasma spraying, the patterns of influence of plasma spraying parameters on the microstructure and surface properties of medical devices, as well as the technological limitations of the implementation of combined technologies for the manufacture of medical devices, including the variability of the quality of additive manufacturing, the complexity of material certification, and the lack of unified standards for personalized medical devices. Promising directions for further research and ways to improve the efficiency of innovative plasma technologies implementation for modifying the surface of medical instruments and implants can be identified through the analysis and generalization of contemporary scientific data presented in this review.

Keywords: medical implants, additive manufacturing, plasma technologies, surface modification, biocompatible materials, digital design, thermal plasma spraying (TPS).

Введение

Современные медицинские инструменты и изделия медицинского назначения являются ключевой основой диагностики, хирургического лечения и реабилитации пациентов, определяя уровень безопасности и эффективности медицинской помощи. В последние десятилетия развитие данной области характеризуется активным внедрением цифровых технологий проектирования, аддитивного производства, биосовместимых материалов и интеллектуальных систем, что подтверждается результатами современных исследований [1]. В то же время получают новое применение технологии термического плазменного напыления, ранее фактически не использовавшиеся в процессах изготовления изделий медицинского назначения, в основном потому, что эти технологии относительно новые, не были достаточно исследованы и имелись проблемы с контролем результатов процесса, было трудно прогнозировать свойства обработанной плазмой поверхности. Однако, в последнее время интерес именно к такому приложению термического плазменного напыления (ТПН) возрос, во многом в силу более низкой стоимости производства ТПН биосовместимых покрытий из тугоплавких материалов. по сравнению с технологиями, требующими высокого вакуума для реализации [2,3].

Настоящий обзор основан на анализе публикаций последних 10 лет, индексируемых в базах Scopus, Web of Science и PubMed, с акцентом на аддитивные технологии, биосовместимые материалы, интеллектуальные медицинские системы и технологии ТПН.

Исторически производство медицинских инструментов опиралось на традиционные методы механической обработки, литья и штамповки, обеспечивавшие прочность и стерилизуемость изделий, но ограничивавшие сложность геометрии и возможности индивидуализации. Переход к цифровому проектированию и аддитивным технологиям позволил реализовать конструкции сложной пространственной формы, контролируемой пористости и функционально градиентных структур, особенно востребованные в ортопедии

и реконструктивной хирургии [4,5]

Параллельно развивались биосовместимые металлы, полимеры и композиционные материалы, а также методы поверхностной модификации имплантатов, направленные на повышение остеоинтеграции, износостойкости и антимикробных свойств медицинских изделий. В последние годы всё более значимую роль играют интеллектуальные медицинские инструменты, оснащённые сенсорными системами, навигацией в реальном времени и алгоритмами искусственного интеллекта, повышающими точность хирургических вмешательств и снижающими риск осложнений [6].

В современной разработке медицинских имплантатов всё более широко применяются технологии плазменного напыления покрытий, предназначенные для управляемой модификации поверхности и приповерхностных слоёв материалов. Плазменные процессы позволяют формировать биоактивные коррозионно-стойкие покрытия с заданными физико-химическими свойствами при минимальном тепловом воздействии на объём изделия [7]. Интеграция плазменной обработки с аддитивным производством и другими методами напыления существенно расширяет возможности поверхностной инженерии медицинских изделий и повышает их эксплуатационную надёжность.

Несмотря на технологический прогресс, сохраняются существенные ограничения, связанные с воспроизводимостью ТПН, аддитивного производства, сертификацией новых материалов, долговечностью функциональных покрытий, высокой стоимостью оборудования и недостаточной нормативной базой для персонализированных медицинских изделий [8].

В связи с этим актуальной задачей является комплексный анализ современных тенденций развития производства медицинских инструментов и имплантатов с одновременной оценкой технологических барьеров их клинического внедрения, что позволяет определить перспективные направления дальнейших исследований и инженерных разработок.

Методология исследования

Настоящая работа выполнена в формате аналитического обзорного исследования, направленного на систематизацию и критический анализ современных научных публикаций, посвящённых развитию медицинских инструментов и имплантатов. В качестве исходных данных использованы статьи из рецензируемых научных журналов, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science и PubMed, а также нормативные и методические документы в области медицинских технологий.

Отбор источников осуществлялся по ключевым направлениям: цифровое проектирование и моделирование, аддитивные технологии производства, биосовместимые материалы и

покрытия с фокусом на применении ТПН для получения биосовместимых покрытий, интеллектуализация медицинских инструментов, роботизированные и минимально инвазивные хирургические системы. Анализ включал сопоставление технологических решений, материалов и клинических эффектов, а также выявление технологических, регуляторных и экономических ограничений их внедрения.

Полученные данные были структурированы по этапам технологического развития и ключевым тенденциям, а результаты обобщены в виде схем и таблиц, отражающих взаимосвязь инженерных решений и клинических эффектов.

Результаты и обсуждение

Развитие технологий производства медицинских инструментов и имплантатов в течение XX–XXI веков

Развитие медицинских инструментов на протяжении последнего столетия тесно связано с прогрессом в области инженерных технологий, материаловедения и клинической практики. В первой половине XX века основными методами производства хирургического инструментария являлись механическая обработка металлов,ковка и литьё, обеспечивавшие получение прочных и стерилизуемых изделий из медицинских сталей, однако ограничивавшие сложность геометрии и возможности индивидуализации [9]. С середины XX века внедрение высокоточных производственных процессов и развитие новых сплавов, включая титановые и кобальт-хромовые материалы, существенно расширили функциональные возможности медицинских инструментов и имплантатов, особенно в ортопедии и кардиохирургии [10]. Параллельно широкое распространение получили медицинские полимеры, что способствовало развитию одноразовых стерильных инструментов и компонентов. В 1980–1990-е годы переход к минимально инвазивным методам лечения привёл к формированию нового класса хирургических инструментов – эндоскопических и микрохирургических систем, требующих высокой точности изготовления и миниатюризации конструкций [11]. В производстве начали активно применяться лазерная обработка, микрофрезерование и прецизионные методы сборки.

Начало XXI века ознаменовалось цифровизацией процессов проектирования

медицинских изделий. Внедрение систем автоматического проектирования (Computer-Aided Design), то есть CAD-систем и трёхмерного моделирования в сочетании с данными компьютерной и магнитно-резонансной томографией позволило создавать персонализированные инструменты и имплантаты с учётом анатомических особенностей пациентов [12]. Одновременно стремительное развитие аддитивного производства обеспечило возможность получения изделий сложной пространственной структуры, включая пористые и биомиметические конструкции, способствующие улучшенной остеоинтеграции и снижению эффекта экранирования напряжений в костной ткани [13]. Основные этапы эволюции медицинских инструментов и технологий их изготовления проанализированы в работе [13] и обобщенно представлены на рисунке 1.

Таким образом, за последние сто лет медицинские инструменты эволюционировали от стандартизированных металлических изделий к спроектированным с помощью цифровых технологий персонализированным системам, что заложило основу для современных технологических тенденций и одновременно выявило новые проблемы воспроизводимости, стандартизации и экономической эффективности производства. В этом контексте особую актуальность приобретает анализ современных тенденций развития производства медицинских инструментов и имплантатов, основанного на цифровом проектировании, аддитивных технологиях, интеллектуализации процессов и применении новых функциональных материалов, что рассматривается в следующем подразделе.

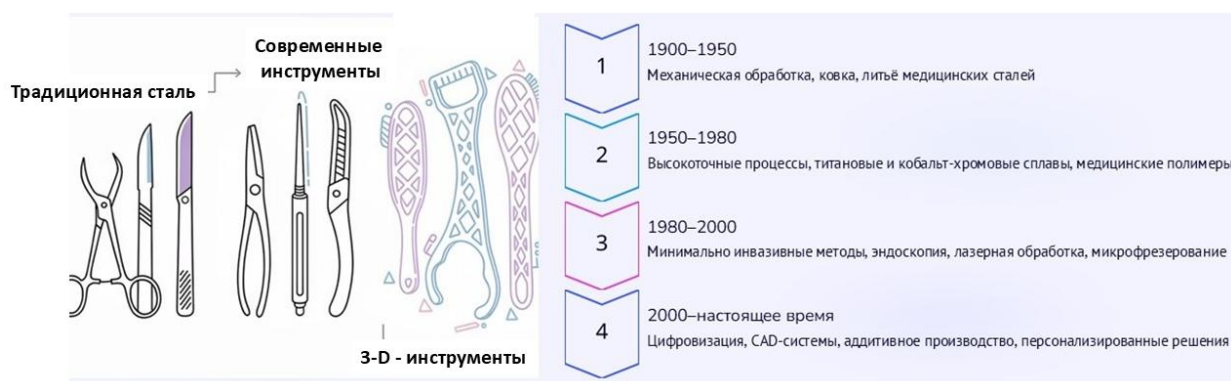


Рисунок 1 — Этапы развития медицинских инструментов и технологий их изготовления в XX–XXI веках по обобщенным данным статьи [13]

Основные тенденции развития производства медицинских инструментов и имплантатов

Цифровое проектирование и моделирование

Современные системы автоматизированного проектирования (CAD) в сочетании с данными медицинской визуализации позволяют формировать высокоточные трёхмерные модели медицинских инструментов и имплантатов с учётом индивидуальных анатомических особенностей пациента. Интеграция данных компьютерной и магнитно-резонансной томографии обеспечивает разработку персонализированных изделий для хирургических вмешательств и имплантационных процедур, повышая точность клинического планирования и соответствие конструкций биомеханическим требованиям организма [14].

В ряде исследований продемонстрированы автоматизированные подходы к проектированию индивидуальных имплантатов. Так, в работе [15] представлен цифровой процесс создания персонализированных имплантатов коленного сустава на основе сегментации данных компьютерной томографии (КТ) и последующей генерации CAD-модели без участия ручного проектирования, что обеспечивает высокую геометрическую точность и сокращает временные затраты на этап проектирования.

Комплексные обзоры современных аддитивных технологий в медицине подтверждают широкие возможности цифрового проектирования для создания ортопедических, стоматологических, краниопластических и тканеинженерных конструкций [8]. Показано, что применение титановых сплавов и пористых архитектур, сформированных методом 3D-

печати, способствует улучшенной остеоинтеграции и снижению эффекта экранирования напряжений в костной ткани.

Дальнейшее развитие цифровых рабочих процессов связано с внедрением параметрического и имплицитного моделирования. В частности, Dayanç A. и соавт. [16] предложили автоматизированный рабочий процесс цифрового проектирования, реализованный в программной среде nTopology и ориентированный на формирование геометрии, непосредственно пригодной для аддитивного производства. Разработанный подход позволил существенно сократить путь от диагностики до хирургического вмешательства за счёт автоматизации проектных операций.

Высокая точность цифровых и аддитивных технологий подтверждена экспериментальными и клиническими исследованиями. Показано, что 3D-печатные анатомические модели, изготовленные по данным КТ, характеризуются высокой геометрической точностью и клинической применимостью, а их использование в клиническом планировании и обучении способствует повышению эффективности хирургических вмешательств и сокращению времени процедур. Обобщённые данные клинических исследований демонстрируют повышение точности установки имплантатов и снижение операционной травматичности при применении персонализированных цифровых и аддитивных решений.

Перспективным направлением развития является интеграция аддитивного производства с системами медицинской визуализации в реальном времени. В работе [17] представлена система 3D-печати, совместимая с данными магнитно-резонансной томографии (МРТ) обеспечивающая субмиллиметровую точность

формирования изделий при сохранении качества визуализации, что открывает новые возможности для оперативной персонализации хирургических решений.

Основные тенденции развития производства современных медицинских имплантатов, выявленные в результате анализа работ [8,14–16] можно схематично и наглядно представить в виде рисунка 2.

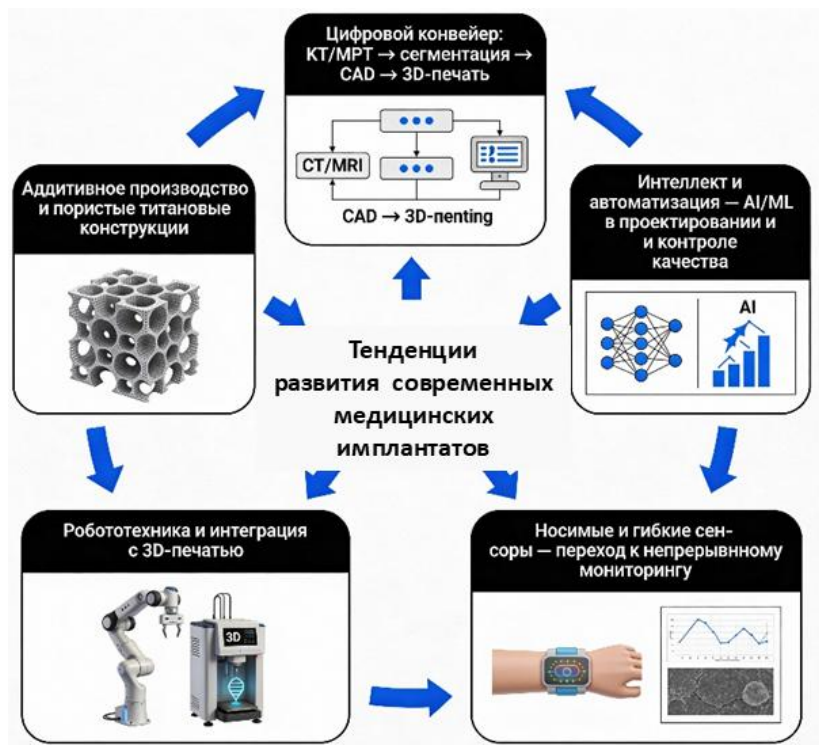


Рисунок 2 - Основные тенденции развития производства современных медицинских имплантатов

Таким образом, цифровое проектирование и моделирование в сочетании с аддитивным производством формируют основу для создания персонализированных медицинских имплантатов и инструментов с контролируемыми геометрическими и механическими характеристиками. Автоматизация проектных процессов и интеграция медицинской визуализации определяют ключевые направления эволюции медицинских изделий нового поколения.

Развитие биосовместимых материалов

Развитие современных медицинских инструментов и изделий медицинского назначения тесно связано с совершенствованием биосовместимых материалов, сочетающих высокие механические характеристики с долговременной стабильностью в биологической среде. В клинической практике широко применяются титановые сплавы, полимеры медицинского класса и композиционные материалы, обладающие высокой прочностью,

коррозионной стойкостью и биологической совместимостью с тканями организма [4]. Среди металлических биоматериалов титан и его сплавы занимают ведущие позиции в хирургии и ортопедии благодаря высокой удельной прочности, низкой токсичности и способности формировать стабильную оксидную плёнку, обеспечивающую защиту от биологической коррозии и длительный срок службы имплантатов [17].

Параллельно развивается направление биосовместимых полимеров, включая полиэфирэфиркетон (PEEK), поликапролактон и полимолочную кислоту, характеризующихся малой массой, рентгенопрозрачностью и возможностью биоразложения либо многократной стерилизации. Эти свойства расширяют области их применения в одноразовых медицинских инструментах, хирургических направляющих, временных имплантатах и системах тканевой инженерии [18,19].

Ключевой тенденцией современного материаловедения является формирование пористых и биомиметических структур, обеспечивающих улучшенную интеграцию медицинских изделий с биологическими тканями. Контролируемая пористость способствует врастанию костной ткани, повышению механической фиксации и снижению эффекта экранирования напряжений, характерного для массивных металлических имплантатов. Реализация подобных архитектур стала возможной преимущественно благодаря развитию аддитивных технологий, позволяющих управлять геометрией пор и пространственной организацией материала [4]. Дополнительное функциональное совершенствование медицинских инструментов и имплантатов достигается за счёт нанесения биоактивных и антибактериальных покрытий на основе гидроксиапатита и кальций-фосфатных керамик, способствующих ускоренному формированию костной ткани и улучшению остеоинтеграции [5,18].

Особое внимание уделяется цирконию и его сплавам, обладающим высокой коррозионной стойкостью и способностью формировать саморегулирующийся оксидный слой, ограничивающий высвобождение ионов в физиологической среде. Вместе с тем их относительно низкая биоактивность обуславливает необходимость применения методов поверхностной модификации. Аналогичный интерес представляют тантал и коммерчески чистый титан, а также комбинированные технологические подходы к их обработке, включая сочетание аддитивного производства и термоплазменного напыления, что позволяет преодолеть ограничения традиционных методов литья и штамповки.

Современные методы поверхностной инженерии включают нанесение тонкоплёночных и керамических покрытий, направленных на усиление остеоинтеграции, биологического отклика тканей и бактерицидных свойств поверхности. Показано, что биоактивные циркониевые покрытия и биоинспирированные структуры поверхности способствуют повышению адгезии и пролиферации остеобластных клеток, ускоряя процессы регенерации костной ткани. Дополнительное улучшение эксплуатационных характеристик достигается за счёт применения золь-гель и плазменных технологий формирования стабилизированных циркониевых покрытий [3,20–22].

В качестве иллюстративных примеров в литературе показано, что покрытия на основе сплава Zr–Nb, полученные методом микроплазменного напыления, характеризуются

развитой пористой структурой, высокой коррозионной стойкостью и адгезионной прочностью к титановым подложкам [23]. Аналогично, формирование оксидных слоёв на наноструктурированных сплавах Zr–1%Nb путём воздушно-термического окисления приводит к существенному повышению твёрдости, износостойкости и коррозионной устойчивости материалов [24].

Отдельной задачей является подавление постоперационных инфекций, связанных с образованием бактериальных плёнок на поверхности имплантатов и медицинских инструментов. Перспективным подходом является применение тонкоплёночных антибактериальных покрытий на основе серебра, меди и их комбинаций, наносимых методами магнетронного распыления, что позволяет контролировать элементный состав и динамику высвобождения ионов, обеспечивая баланс между бактерицидной активностью и биосовместимостью поверхности [25–27].

Таким образом, развитие биосовместимых материалов направлено не только на повышение прочностных характеристик медицинских изделий, но и на формирование функционально активных поверхностей и структур, обеспечивающих эффективное взаимодействие с биологической средой и улучшение клинических результатов.

Интеллектуализация медицинских инструментов

В последние годы активно развиваются медицинские инструменты с интегрированными сенсорными системами, обеспечивающими измерение усилий взаимодействия с тканями в режиме реального времени [28]. Показано, что использование встроенных датчиков силы позволяет существенно снизить риск повреждения мягких тканей при малоинвазивных вмешательствах за счёт контроля прикладываемых нагрузок и предотвращения избыточного давления.

Развитие получили и интеллектуальные инструменты с обратной связью для роботизированной хирургии. Интеграция многоосевых датчиков силы в роботизированные манипуляторы обеспечивает тактильную чувствительность и автоматическое ограничение усилий при контакте с биологическими структурами, что приводит к повышению точности хирургических движений и снижению микротравм тканей [29].

Значительный прогресс наблюдается в навигационных медицинских инструментах,

объединяющих данные компьютерной и магнитно-резонансной томографии с отслеживанием положения инструмента в реальном времени [30]. Разработанные навигационные системы позволяют обеспечить пространственную погрешность позиционирования менее 1 мм, что существенно повышает точность установки имплантатов и сокращает продолжительность операций.

Ключевым направлением интеллектуализации хирургических систем является интеграция алгоритмов искусственного интеллекта [31]. Показано, что применение методов глубокого обучения позволяет автоматически распознавать анатомические структуры во время эндоскопических вмешательств с высокой точностью, а также прогнозировать оптимальные траектории движения инструментов, снижая вероятность ошибок оператора и повышая безопасность операций.

Дополнительно развивается направление «умных» медицинских инструментов с элементами автономного управления [32]. Такие системы способны адаптировать параметры воздействия к механическим свойствам биологических тканей, обеспечивая дополнительный уровень безопасности при выполнении малоинвазивных хирургических вмешательств.

Таким образом, интеллектуализация медицинских инструментов эволюционирует от экспериментальных разработок к клинически применимым системам, обеспечивающим сенсорную обратную связь, пространственную навигацию и интеллектуальную поддержку принятия решений. В то же время дальнейшее развитие данных технологий требует стандартизации сенсорных систем, валидации алгоритмов искусственного интеллекта и повышения надёжности их работы в реальных клинических условиях.

Аддитивное производство как самостоятельная технологическая платформа

Аддитивное производство (АП или англ. AM, 3D-печать) становится одной из ключевых технологических платформ в изготовлении медицинских инструментов и имплантатов, обеспечивая возможность формирования сложной геометрии, функциональных структур и персонализированных изделий на основе цифровых моделей пациента [33]. В медицинской инженерии наибольшее распространение получили процессы селективного лазерного плавления (англ. SLM) и электронно-лучевого

плавления (англ. EBM), позволяющие изготавливать высокопрочные изделия из титановых и кобальт-хромовых сплавов с высокой плотностью и контролируемой микроструктурой [34].

В металлургическом АП данные технологии применяются для производства ортопедических имплантатов, протезов и сложных инструментов с оптимизированным распределением пор и решётчатых структур, способствующих снижению модуля упругости до значений, близких к костной ткани, и улучшению остеоинтеграции. Контроль размеров пор в диапазоне, характерном для костной регенерации, позволяет обеспечить биомеханическую совместимость имплантатов с тканями организма [35,36].

Наряду с металлургическими методами, широко используется моделирование методом наплавления расплава (англ. FDM), применяемое для изготовления полимерных медицинских изделий, хирургических направляющих и прототипов. Использование биосовместимых термопластиков, таких как PLA и PEEK, обеспечивает быструю и экономичную адаптацию конструкции под конкретного пациента, что особенно актуально для вспомогательных и навигационных инструментов [37].

Высокая степень персонализации изделий достигается за счёт интеграции данных медицинской визуализации (КТ, МРТ) с CAD-системами и аддитивными технологиями производства, что позволяет существенно сократить цикл разработки — от цифровой модели до готового изделия — по сравнению с традиционными методами механической обработки и литья [33,36].

Дополнительное расширение возможностей АМ связано с развитием технологий направленного энергетического наплавления (англ. DED) и других гибридных подходов, обеспечивающих локальное формирование, восстановление и модификацию металлических медицинских изделий, а также создание многоматериальных и функциональных структур с заданными механическими и биологическими свойствами.

Несмотря на значительный потенциал, аддитивное производство сталкивается с рядом технологических ограничений, включая необходимость постобработки для достижения требуемого качества поверхности, высокие капитальные затраты на оборудование и сложности стандартизации качества изделий для клинического применения. Тем не менее, АП

остаётся перспективной технологической платформой, способной трансформировать производство медицинских устройств за счёт персонализации, функциональной интеграции и ускоренного внедрения инноваций.

Минимально инвазивные технологии

Рост популярности методов малоинвазивной хирургии обусловлен стремлением снизить травматичность вмешательств, ускорить восстановление пациентов и повысить точность операций. Малоинвазивный подход основан на использовании небольших разрезов или точечных доступов, через которые вводятся специализированные инструменты и визуализационные системы, что позволяет минимизировать повреждения мягких тканей и сократить послеоперационный период. Ключевым направлением развития данных методов является внедрение эндоскопических систем, оснащённых высокоразрешающими камерами, обеспечивающими детальную визуализацию операционного поля и улучшенное восприятие анатомии пациента [15].

Существенным технологическим достижением в области малоинвазивной хирургии стало внедрение роботизированных хирургических платформ, расширяющих возможности традиционных методов за счёт повышения точности манипуляций, подавления тремора рук хирурга и увеличенного диапазона движений инструментов [38,39]. Современные роботизированные системы обеспечивают трёхмерную визуализацию высокого разрешения, масштабирование движений и высокую стабильность инструментов, что особенно важно

при выполнении сложных операций в ограниченных анатомических пространствах.

Применение роботизированной поддержки позволяет снизить кровопотерю, уменьшить травматизацию тканей и сократить сроки послеоперационного восстановления пациентов по сравнению с открытыми хирургическими вмешательствами. Перспективы дальнейшего развития данных технологий связаны с созданием более компактных платформ, улучшением эргономики инструментов и интеграцией навигационных систем и алгоритмов искусственного интеллекта для повышения автономности и безопасности операций [13,14,19,38–40].

Несмотря на клинические преимущества, широкое внедрение роботизированных хирургических комплексов ограничивается высокой стоимостью оборудования, необходимостью специализированной подготовки персонала и недостаточной тактильной обратной связью, что остаётся предметом активных инженерных и клинических исследований [13,39].

В совокупности рассмотренные технологические направления – цифровое проектирование, аддитивное производство, развитие биосовместимых материалов, интеллектуализация медицинских инструментов и роботизированные хирургические системы — формируют современную платформу медицинских технологий нового поколения, обеспечивая повышение точности, безопасности и эффективности клинических вмешательств. Обобщённая взаимосвязь ключевых технологий и их клинических эффектов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Взаимосвязь современных технологических направлений медицинских инструментов и их клинических эффектов

Направление	Технологическое решение	Основной эффект	Клиническое значение	Источники
Цифровое проектирование	CAD + KT/MPT	Персонализация изделий	Повышение точности операций	[10,14,16]
Аддитивное производство	SLM, FDM, EBM	Сложная геометрия, пористость	Улучшенная остеоинтеграция	[4,23,40]
Биосовместимые материалы	Ti, Ta, PEEK, Zr-сплавы	Биостабильность	Долговечность имплантов	[20–23,25]
Покрытия	HA, Ca-P, оксидные слои	Биоактивность	Меньше осложнений	[5,18,20,26]
Интеллектуальные системы	Сенсоры, ИИ	Навигация и контроль усилий	Повышение безопасности	[31,32,38]

Таким образом, данные, обобщённые в таблице 1, демонстрируют, что развитие медицинских инструментов направлено на повышение персонализации, функциональной интеграции и клинической эффективности, при одновременном наличии инженерных, регуляторных и экономических ограничений, требующих комплексного подхода к их преодолению.

Физические основы плазменных технологий получения биосовместимых покрытий медицинских изделий

Современное развитие технологий производства медицинских инструментов и имплантатов в значительной степени опирается на достижения физики плазмы и технологий её практического применения. Плазма представляет собой ионизированную газовую среду с высокой концентрацией заряженных частиц, активных радикалов и возбуждённых атомных состояний, что создаёт уникальные условия для управляемой модификации поверхностных и приповерхностных слоёв материалов. В отличие от традиционных термических методов, плазменные процессы могут обеспечить высокую интенсивность энерговложения при минимальном тепловом воздействии на объём изделия, что является критически важным для медицинских применений [41]. В инженерной практике медицинских технологий наибольшее распространение получили низкотемпературные и термические плазменные процессы, используемые для формирования функциональных покрытий, очистки и активации поверхности, а также синтеза биосовместимых и биоактивных слоёв [7]. Физические процессы в плазме — ионизация, рекомбинация, тепломассоперенос, ускорение частиц и их взаимодействие с поверхностью твёрдого тела — определяют микроструктуру, фазовый состав, адгезионные характеристики и остаточные напряжения формируемых покрытий.

Термин «термическое плазменное напыление» (ТПН) охватывает все методы, при которых покрытие на поверхности подложки формируется из нагретых частиц микрометрового размера, ударяющихся о подложку с высокой скоростью. В этом случае три наиболее важных параметра — размер частиц, температура частиц и скорость частиц — могут значительно варьироваться в зависимости от метода нанесения покрытия. Под общим названием «термическое напыление» объединяются следующие методы: плазменное напыление, пламенное напыление, дуговое напыление проволокой, детонационное

напыление, высокоскоростное воздушно-топливное напыление (англ. high velocity air fuel, HVOF), высокоскоростное кислородно-топливное напыление (англ. high velocity oxy-fuel coating spraying, HVOF), холодное напыление, тепловое напыление и напыление с последующим сплавлением. В качестве материалов для покрытий в порошковой или проволоочной форме используются сплавы, керамика, металлы, композиты и пластмассы.

Процесс создания термического плазменного покрытия включает осаждение многочисленных частиц на подложку, которые нагреваются до расплавленного или полурасплавленного состояния внутри плазменной струи. Эти частицы, известные как «брызги» (англ. splats), образуются на подложке, оставляя между собой зазоры, которые приводят к образованию пор. Пористость и шероховатость поверхности покрытия зависят от размера и степени плавления частиц, составляющих покрытие [42,43]. Размер пор зависит как от фактического размера частиц покрытия, так и от их формы [44–46]. В обзоре [43] было дано отличное визуальное описание процессов ТПН и нанесения порошковых покрытий. Понимание механизмов образования покрытия позволяет выбрать конкретные параметры ТПН для получения требуемой микроструктуры покрытия. Таким образом, технология ТПН подходит для получения покрытий из высокотемпературных металлов или керамики путем плавления частиц материала в плазменной струе. Однако важно учитывать, что обработка поверхности имплантата плазменной струей может привести к объемному нагреву, который может вызвать деформацию имплантата при охлаждении. Следовательно, при выборе параметров ТПН для покрытий из биосовместимых материалов на медицинских имплантатах крайне важно иметь научное обоснование для достижения желаемых свойств поверхности имплантата (улучшенная биосовместимость), предотвращения перегрева и эффективного использования дорогостоящих материалов покрытия. Нагрев и деформация могут быть особенно проблематичными для небольших пористых имплантатов, таких как 3D-печатные титановые межпозвоночные диски с трабекулярной структурой. Титан обладает относительно низкой теплопроводностью, и тонкие перегородки трабекулярной структуры могут значительно деформироваться во время термического плазменного напыления, искажая исходную 3D-модель. Для решения проблемы перегрева имплантата можно использовать альтернативные подходы, такие как

традиционное ТПН суспензии порошков гидроксиапатита (ГА) [47] или использование микроплазменного напыления (МПН) порошков ГА, как описано ранее [48–50]. Следует отметить, что механические и антибактериальные свойства покрытий из ГА (далее-ГА-покрытия) и их способность к регенерации костной ткани зависят как от параметров плазменного напыления [51,52] так и от состава покрытия [53,54].

Таким образом, одним из наиболее востребованных направлений является плазменное напыление биоактивных покрытий, прежде всего гидроксиапатита и кальций-фосфатных соединений, применяемых для повышения остеоинтеграции ортопедических и стоматологических имплантатов [48,55]. В условиях плазменного потока частицы порошкового материала подвергаются интенсивному нагреву и ускорению, что обеспечивает их расплавление или полурасплавленное состояние и последующую фиксацию на поверхности подложки с формированием многослойной пористой структуры. Управление параметрами плазмы позволяет контролировать пористость, фазовый состав и механические свойства покрытий, адаптируя их к требованиям костной ткани [55].

В настоящее время микроплазменное напыление (МПН) считается перспективной технологией для ТПН биосовместимых покрытий на имплантатах малого размера, включая такие компоненты, как части локтевого сустава, зубные имплантаты и межпозвоночные диски. МПН позволяет наносить покрытия как порошковыми, так и проволочными материалами на подложки из различных материалов. Возможность напыления проволокой дает МПН определенное преимущество. Действительно, хотя, как отмечено в обзоре [56], порошки являются наиболее часто используемым сырьем в процессе ТПН, определенные требования к химическому составу порошков, размеру и морфологии их частиц, и особенно требования к текучести порошка делают производство порошков для ТПН довольно дорогостоящим. Поэтому использование проволочного сырья представляется более доступным вариантом. Расход напыляемого материала при МПН значительно снижается по сравнению с традиционным ТПН из-за меньшего диаметра пятна распыления, обычно составляющего от 3 до 5 мм. Одновременно МПН предлагает преимущество минимального теплового воздействия на подложку благодаря низкой мощности источника. Это позволяет производить покрытия на тонкостенных и малогабаритных

деталях без деформации или перегрева. Кроме того, МПН позволяет создавать пористые покрытия на металлических эндопротезах с использованием тугоплавких и биосовместимых металлов (таких как Ti, Ta и Zr) [20–23] и их сплавов, а также керамики, такой как ГА и ГА+Zr [20,57,58]. Эти пористые покрытия способствуют улучшению биосовместимости и улучшают вторичную фиксацию имплантата, облегчая вращение костной ткани в поры. Более того, научно-обоснованный подбор параметров МПН позволяет минимизировать потери дорогостоящего материала при напылении и обеспечить максимальную степень полезного использования напыляемого материала [22].

Как можно заключить из анализа современной научной литературы о покрытиях, нанесенных методом МПН (далее-МПН покрытия), интерес к применению этой технологии для получения покрытий в биомедицинских целях достаточно стабилен и успешен, что подтверждается как тестами *in vitro*, так и *in vivo* [49]. Кроме того, различные исследователи отмечают, что метод МПН может быть использован для получения ГА-покрытий с высокой степенью кристалличности выше 90% [50,59]. Полученные ГА-покрытия с высокой степенью кристалличности (92%–95%) соответствуют требованию к кристалличности (не менее 50%), указанному в стандарте ISO 13779-2 для хирургических имплантатов [60]. Многочисленные исследования, рассмотренные Дорожкиным [49], показали, что кристаллические ГА-покрытия из демонстрируют низкую скорость растворения *in vitro*, что свидетельствует о снижении резорбции и увеличении прямого контакта с костью *in vivo*. Напротив, аморфные ГА-покрытия имеют тенденцию быстро растворяться в физиологической среде. Следовательно, для ГА-покрытий желательна высокая степень кристалличности. Стоит отметить, что Охки и др. [61] наблюдали отсутствие вредных соединений CaO в ГА-покрытиях, полученных методом ТПН. Результаты исследований [62] согласуются с результатами [61] относительно чистоты и кристалличности МПН ГА-покрытий на подложке из чистого титана.

Однако главной проблемой, препятствующей внедрению технологий ТПН в целом и МПН в частности в практику производства покрытий для медицинских имплантатов, является контроль процесса напыления, а именно возможность прогнозирования свойств покрытий в зависимости от выбора материала и параметров МПН, обеспечивающих наиболее эффективное

использование материалов (порошков и проволоки) и точное поддержание этих параметров в процессе осаждения. Восполнение этого пробела достаточно успешно выполнено в работах [20–23,62,63], а именно: была установлена корреляция между пористостью покрытия и параметрами МПН и выбраны конкретные параметры МПН для формирования пористых покрытий из Ti, Zr, Ta и ГА на титановых подложках (с желаемой пористостью, подходящей для биомедицинских применений) с удовлетворительной адгезией покрытий к подложке [20–23,62] а также была усовершенствована и применена технология роботизированного нанесения МПН покрытий на имплантаты сложной формы для точного поддержания таких критически важных параметров процесса, как скорость перемещения микроплазматрона вдоль поверхности имплантата и расстояние распыления [63], а также исследована возможность объединения технологий роботизированного МПН и аддитивного производства для потенциального изготовления имплантатов индивидуального дизайна с повышенной биосовместимостью поверхности [48,62]. Было показано, что размеры частиц в плазменной струе, скорость их перемещения и степень их расплавления в момент удара о подложку контролируются параметрами напыления, причем наиболее сильное влияние оказывают сила тока и расход плазмообразующего газа.

Эффективность микроплазменных и импульсных плазменных технологий с точки зрения стабилизации теплового режима и снижения термических напряжений подтверждена также в статье [44], где показано, что импульсное плазменное воздействие и комбинированные плазменно-энергетические методы позволяют уплотнять покрытия, стабилизировать фазовый состав и улучшать адгезию без существенного перегрева подложки, включая изделия сложной геометрии и покрытия, полученные высокоэнергетическими методами напыления. Плазменные технологии широко применяются и для модификации поверхности металлических имплантатов также и без формирования массивных покрытий (относительно толстые покрытия – это покрытия в диапазоне от 100 мкм до 500 мкм). К ним относятся ионно-плазменная обработка, плазменное окисление и электролитно-плазменные процессы, в результате которых формируются наноструктурированные оксидные и нитридные слои с повышенной твердостью,

коррозионной стойкостью и улучшенным биологическим откликом [45].

Таким образом, технологии ТПН формируют универсальный физико-технологический инструментарий для создания функциональных поверхностей медицинских инструментов и имплантатов. Управление энергетическими параметрами плазмы, архитектурой покрытий и сочетание различных материалов и современных технологий позволяют целенаправленно оптимизировать эксплуатационные, биологические и клинические характеристики изделий. Перспективы дальнейшего развития данных технологий связаны с интеграцией плазменной обработки с аддитивным производством, развитием многослойных систем покрытий и адаптацией процессов к требованиям биомедицинской стандартизации и клинической практики.

Технологические ограничения

Несмотря на значительные достижения в разработке современных медицинских имплантатов и аддитивных технологий производства, их широкое клиническое внедрение по-прежнему ограничивается рядом технологических, регуляторных и экономических факторов. К ключевым барьерам относятся вариабельность качества аддитивного производства, сложности сертификации и стандартизации материалов и процессов, деградация функциональных покрытий в физиологической среде, высокая стоимость роботизированных хирургических систем, а также отсутствие унифицированных нормативных требований для персонализированных медицинских изделий [11,30,64].

Качество изделий, полученных методами 3D-печати, в значительной степени определяется параметрами технологического процесса и характеристиками исходных материалов, что приводит к вариабельности микроструктуры, пористости и механических свойств. Для медицинских изделий такие отклонения критичны, поскольку они могут влиять на усталостную прочность, модуль упругости и биосовместимость, что обуславливает необходимость многоуровневой верификации и валидации производственных процессов перед клиническим применением [30,32].

Существенные ограничения формируются и в регуляторной сфере. Современные требования контролирующих органов предусматривают комплексную оценку безопасности и эффективности медицинских имплантатов, включая прослеживаемость материалов, контроль

параметров аддитивного производства и этапов постобработки. Для персонализированных изделий данные процедуры дополнительно усложняются отсутствием гармонизированных стандартов серийной валидации, что увеличивает сроки и стоимость вывода продукции на рынок [11,64].

Отдельной проблемой остаётся долговечность функциональных покрытий, применяемых для повышения биоактивности, антибактериальных свойств и износостойкости медицинских инструментов и имплантатов. Недостаточная адгезия, микродефекты или деградация покрытий в физиологической среде могут приводить к коррозионному разрушению и высвобождению частиц, сопровождающемуся воспалительными реакциями тканей. В связи с этим подчёркивается необходимость стандартизированных *in vitro* и *in vivo* испытаний для комплексной оценки трибологических и биологических характеристик покрытий [65,66].

Экономические факторы также существенно сдерживают клиническое внедрение передовых медицинских технологий. Роботизированные

хирургические системы требуют значительных капиталовложений, включая закупку оборудования, техническое обслуживание и обучение персонала, и в большинстве клинических направлений остаются более затратными по сравнению с традиционными методами лечения [67].

Наконец, отсутствие гармонизированных стандартов для персонализированных аддитивно изготовленных изделий формирует дополнительную регуляторную неопределённость для производителей и медицинских учреждений, особенно в условиях внедрения производства непосредственно в клиниках (англ. *point-of-care*). Разрабатываемые международные рекомендации пока не обеспечивают полной унификации требований к валидации, оценке рисков и клинической регистрации таких изделий. Основные технологические, регуляторные и экономические ограничения клинической трансляции современных медицинских инструментов и аддитивных технологий обобщены в таблице 2.

Таблица 2. Ключевые технологические ограничения внедрения современных медицинских инструментов и АП-изделий

Категория ограничения	Суть проблемы	Основные последствия для клинического внедрения	Источники
Нестабильность качества 3D-печати	Вариабельность параметров процесса, микроструктуры и пористости	Разброс механических свойств, необходимость строгой валидации	[1,4,8,9,33]
Сертификация и регуляция	Многоэтапная верификация материалов и процессов	Высокие затраты времени и ресурсов на вывод изделий на рынок	[12–14,37,64]
Износ покрытий	Микротрещины, деградация в физиосреде	Коррозия, воспалительные реакции, сокращение срока службы	[18,20,21,23,25]
Высокая стоимость роботизации	Дорогостоящее оборудование и обучение	Ограниченная доступность технологий	[6,28–30,66]
Отсутствие стандартов персонализации	Уникальность каждого изделия	Регуляторная неопределённость и риск внедрения	[12–15,64]

Анализ ограничений, обобщённый в таблице 2, показывает, что развитие медицинских имплантатов требует не только совершенствования материалов и технологий производства, но и унификации нормативной

базы, повышения стабильности аддитивных процессов и оптимизации функциональных покрытий, что является необходимым условием их клинического внедрения. Перспективы дальнейшего развития связаны с интеграцией

аддитивного производства и медицинской визуализации, развитием многоматериальной 3D-печати, созданием интеллектуальных биоактивных поверхностей и применением алгоритмов искусственного интеллекта для повышения безопасности хирургических вмешательств.

В результате проведённого анализа установлено, что развитие медицинских инструментов и имплантатов в XX–XXI веках характеризуется переходом от стандартизированных механически обработанных изделий к цифрово спроектированным, персонализированным и функционально интегрированным системам. Показано, что ключевыми технологическими драйверами данного процесса являются внедрение CAD/ CAM-технологий (англ. Computer-Aided Manufacturing, то есть автоматизированное производство), развитие аддитивного производства, развитие биосовместимых материалов и покрытий, а также интеллектуализация хирургических инструментов. Обобщение данных клинических и экспериментальных исследований продемонстрировало, что использование цифрового проектирования и аддитивных технологий позволяет существенно повысить точность хирургических вмешательств, улучшить остеоинтеграцию имплантатов и сократить время операций. В то же время выявлено, что дальнейшее внедрение данных технологий ограничивается вариабельностью качества аддитивного производства, сложностью сертификации персонализированных изделий, износом функциональных покрытий и высокой стоимостью роботизированных систем. Представленные в таблицах 1 и 2 результаты систематизации позволяют рассматривать современные медицинские инструменты как сложные инженерно-биологические системы, развитие которых требует комплексного подхода, сочетающего материаловедение, цифровое проектирование, клиническую валидацию и нормативное регулирование.

Заключение

Анализ современных исследований показывает, что дальнейшее развитие отрасли должно быть направлено на повышение воспроизводимости аддитивных технологий, разработку унифицированных стандартов для персонализированных медицинских изделий, совершенствование методов поверхностной инженерии и проведение долгосрочных

Таким образом, анализ показал, что современное производство медицинских имплантатов и изделий медицинского назначения характеризуется активным внедрением биосовместимых материалов, аддитивных технологий производства и функциональных поверхностных модификаций, направленных на повышение клинической эффективности и индивидуализацию медицинской помощи. Титановые и циркониевые сплавы, биосовместимые полимеры и композиционные материалы формируют основу современных медицинских конструкций, обеспечивая оптимальное сочетание механической прочности, коррозионной устойчивости и биологической совместимости с тканями организма. Особую роль в повышении функциональных характеристик медицинских изделий играют биоактивные и антибактериальные покрытия, включая магнетронные покрытия на основе серебра и меди, гидроксипатит и кальций-фосфатные керамики, а также модифицированные оксидные слои на основе тантала, титана, циркония и их сплавов. Формирование пористых и биомиметических структур способствует улучшенной остеоинтеграции, снижению эффекта экранирования напряжений и ускоренной регенерации костной ткани, что существенно расширяет возможности ортопедических и хирургических технологий. В то же время широкое клиническое внедрение современных медицинских инструментов сдерживается рядом технологических и регуляторных ограничений. Вариабельность качества аддитивного производства, сложности сертификации персонализированных изделий, деградация функциональных покрытий в физиологической среде и высокая стоимость роботизированных систем формируют комплексные барьеры для трансляции инновационных решений в практическое здравоохранение.

клинических исследований эксплуатационной надёжности медицинских материалов. Реализация данных направлений позволит обеспечить безопасное, экономически обоснованное и эффективное внедрение высокотехнологичных медицинских инструментов нового поколения.

Отдельно следует отметить возрастающую роль технологий ТПН в формировании функциональных поверхностей медицинских инструментов и имплантатов. Традиционное термическое плазменное напыление суспензий и микроплазменное напыление порошков и проволоки биосовместимых металлов позволяют целенаправленно управлять микроструктурой, фазовым составом, пористостью покрытий медицинских имплантатов. Это достигается пониманием физических процессов плазменного напыления и установлением закономерностей влияния параметров плазменного напыления на характеристики покрытий, что обеспечивает

улучшение биологического отклика и стабильность эксплуатационных характеристик изделий, включая имплантаты сложной геометрии и конструкции, полученные методами аддитивного производства.

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта BR24992786 «Разработка технологии изготовления образцов отечественных медицинских инструментов и изделий медицинского назначения», финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Вклад авторов

Д.Л. Алонцева: концептуализация исследования и формирование научной идеи работы, разработка методологии аналитического обзора, проведение исследования в форме систематического анализа и обобщения научных публикаций, подготовка и написание первоначального варианта рукописи; **С.Г. Войнарович:** экспертное сопровождение исследования, консультации по вопросам плазменных и микроплазменных технологий модификации поверхности, участие в рецензировании и редактировании рукописи; **Б.Н. Азаматов:** администрирование проекта, привлечение финансирования, координация выполнения исследовательских работ, участие в рецензировании и редактировании рукописи; **А.В. Ерсаннова:** научное руководство исследованием, курирование и систематизация исходных данных, формальный анализ и обобщение результатов, участие в рецензировании и редактировании рукописи.

Литература

1. S. Polo, A. García-Domínguez, E. M. Rubio, and J. Claver, Lattice Structures in Additive Manufacturing for Biomedical Applications: A Systematic Review, *Polymers* **17**, 2285 (2025).
2. J. Cizek and J. Matejicek, Medicine Meets Thermal Spray Technology: A Review of Patents, *J Therm Spray Tech* **27**, 1251 (2018).
3. D. Alontseva, B. Azamatov, Y. Safarova (Yantsen), S. Voinarovych, and G. Nazenova, A Brief Review of Current Trends in the Additive Manufacturing of Orthopedic Implants with Thermal Plasma-Sprayed Coatings to Improve the Implant Surface Biocompatibility, *Coatings* **13**, 1175 (2023).
4. M. H. Mobarak, Md. A. Islam, N. Hossain, Md. Z. Al Mahmud, Md. T. Rayhan, N. J. Nishi, and M. A. Chowdhury, Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication – A review, *Applied Surface Science Advances* **18**, 100462 (2023).
5. M. Montazerian, F. Hosseinzadeh, C. Migneco, M. V. L. Fook, and F. Baino, Bioceramic coatings on metallic implants: An overview, *Ceramics International* **48**, 8987 (2022).
6. M. Pan, C. Ma, K. Wang, Y. Su, Z. Zhang, M. Li, and K. Liang, A systematic review of autonomous navigation strategies in robot-assisted interventional surgery, *Applied Soft Computing* **186**, 114141 (2026).
7. E. Akdoğan and H. T. Şirin, Plasma surface modification strategies for the preparation of antibacterial biomaterials: A review of the recent literature, *Materials Science and Engineering: C* **131**, 112474 (2021).
8. L. R. R. Da Silva, W. F. Sales, F. D. A. R. Campos, J. A. G. De Sousa, R. Davis, A. Singh, R. T. Coelho, and B. Borgohain, A comprehensive review on additive manufacturing of medical devices, *Prog Addit Manuf* **6**, 517 (2021).
9. H. B. Mamo, M. Adamiak, and A. Kunwar, 3D printed biomedical devices and their applications: A review on state-of-the-art technologies, existing challenges, and future perspectives, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **143**, 105930 (2023).
10. A. Haleem, M. Javaid, R. Suman, and R. P. Singh, 3D Printing Applications for Radiology: An Overview, *Indian J Radiol Imaging* **31**, 10 (2021).
11. D. J. Ryu, A. Jung, H. Y. Ban, T. Y. Kwak, E. J. Shin, B. Gweon, D. Lim, and J. H. Wang, Enhanced osseointegration through direct energy deposition porous coating for cementless orthopedic implant fixation, *Sci Rep* **11**, 22317 (2021).
12. D. Suhag, *Handbook of Biomaterials for Medical Applications, Volume 2: Applications* (Springer Nature Singapore, Singapore, 2024).
13. C. Culmone, G. Smit, and P. Breedveld, Additive manufacturing of medical instruments: A state-of-the-art review, *Additive Manufacturing* **27**, 461 (2019).

14. K. W. Shim, Medical Applications of 3D Printing and Standardization Issues, *Brain Tumor Res Treat* **11**, 159 (2023).
15. A. Guezou-Philippe, A. Clavé, E. Maguet, L. Maintier, C. Garraud, J.-R. Fouefack, V. Burdin, E. Stindel, and G. Dardenne, Fully automated workflow for designing patient-specific orthopaedic implants: Application to total knee arthroplasty, *PLoS One* **20**, e0325587 (2025).
16. A. Dayanç, M. Canlıdınç, and F. Karakoç, Improving personalized medical implant design: An innovative and automated method leveraging implicit modeling, *Engineering Science and Technology, an International Journal* **47**, 101550 (2023).
17. A. Antoniou, N. Evripidou, M. Giannakou, and C. Damianou, The first magnetic resonance imaging compatible 3D printer, *Digital Medicine* **10**, (2024).
18. J. Gao, Y. Su, and Y.-X. Qin, Calcium phosphate coatings enhance biocompatibility and degradation resistance of magnesium alloy: Correlating in vitro and in vivo studies, *Bioactive Materials* **6**, 1223 (2021).
19. S. Dallal, B. Eslami, and S. Tiari, Recent Advances in PEEK for Biomedical Applications: A Comprehensive Review of Material Properties, Processing, and Additive Manufacturing, *Polymers* **17**, 1968 (2025).
20. D. Alontsev et al., Microplasma-Sprayed Titanium and Hydroxyapatite Coatings on Ti6Al4V Alloy: in vitro Biocompatibility and Corrosion Resistance: Part II: Coatings enhance cell proliferation, corrosion resistance and implant integration, *Johnson Matthey Technology Review* **69**, 59 (2025).
21. D. Alontseva et al., Biocompatibility and Corrosion of Microplasma-Sprayed Titanium and Tantalum Coatings versus Titanium Alloy, *Coatings* **14**, 206 (2024).
22. S.G. Voinarovych, D.L. Alontseva, A.R. Khozhanov, A. L. Krasavin, A. N. Kyslytsia, and S. N. Kalyuzhny, Effect of microplasma spraying parameters on the loss of sprayed Zr wire and coating porosity, *Rec.Contr.Phys.* **79**(4), 82-96 (2021).
23. S. Yu. Maksymov et al., Coating for medical application produced by microplasma spraying from Zr-Nb alloy, *Avtom. Svarka (Kiev)* **2024**, 10 (2024).
24. [A. Pfeil, T. Gayral, F. Geiskopf, L. Barbé, R. Cazzato, J. Garnon, and P. Renaud, *Design of an MR-Guided Device for Interventional Radiology Based on Workflow and Risk Analysis*, in *Robot Design* (Elsevier, 2026), pp. 77–116.
25. D. Alontseva, B. Azamatov, A. Borisov, B. Maratuly, Y. S. Yantsen, S. Voinarovych, A. Dzhes, and L. Łatka, Antibacterial Ti-Cu and Ta-Cu Coatings for Endoprostheses Applied by Magnetron Sputtering onto Ti6Al4V Alloy, *Advances in Materials Science* **24**, 23 (2024).
26. B. Azamatov, D. Dogadkin, B. Maratuly, A. Borisov, Y. S. (Yantsen), R. Yamanoglu, and D. Alontseva, Magnetron Sputtering of Antibacterial and Antifungal Tantalum-Copper and Niobium-Copper Coatings on Three Dimensional-Printed Porous Titanium Alloy Scaffolds: Part II: Precise deposition of coatings, *Johnson Matthey Technology Review* **69**, 88 (2025).
27. B. Azamatov, D. Alontseva, A. Kalzhanov, Y. Safarova, and S. Askarova, Bactericidal Properties and Biocompatibility of Titanium Implants with TaCu and NbCu Magnetron-Sputtered Coatings in vivo, *Eurasian Journal of Applied Biotechnology* (2025).
28. W. Othman, Z.-H. A. Lai, C. Abril, J. S. Barajas-Gamboa, R. Corcelles, M. Kroh, and M. A. Qasaimeh, Tactile Sensing for Minimally Invasive Surgery: Conventional Methods and Potential Emerging Tactile Technologies, *Front. Robot. AI* **8**, 705662 (2022).
29. S. Li and J. Xu, Multiaxis Force/Torque Sensor Technologies: Design Principles and Robotic Force Control Applications: A Review, *IEEE Sensors J.* **25**, 4055 (2025).
30. T. Li, A. Badre, F. Alambeigi, and M. Tavakoli, Robotic Systems and Navigation Techniques in Orthopedics: A Historical Review, *Applied Sciences* **13**, 9768 (2023).
31. D. Z. Khan et al., Artificial intelligence assisted operative anatomy recognition in endoscopic pituitary surgery, *Npj Digit. Med.* **7**, 314 (2024).
32. A. E. Abdelaal, J. Fang, T. N. Reinhart, J. A. Mejia, T. Z. Zhao, J. Bohg, and A. M. Okamura, *Force-Aware Autonomous Robotic Surgery*.
33. L. Jaksa, B. Azamatov, G. Nazenova, D. Alontseva, and T. Haidegger, State of the Art in Medical Additive Manufacturing, *Acta Polytech Hung* **21**, 553 (2024).
34. L. R. R. Da Silva, W. F. Sales, F. D. A. R. Campos, J. A. G. De Sousa, R. Davis, A. Singh, R. T. Coelho, and B. Borgohain, A comprehensive review on additive manufacturing of medical devices, *Prog Addit Manuf* **6**, 517 (2021).
35. A. Das and P. Rajkumar, Metal 3D printing of biometals for prostheses and implants: a review, *Explor BioMat-X* **2**, 101338 (2025).
36. M. Ghasempour-Mouziraji, D. Afonso, and R. A. D. Sousa, A Short Review on the Wire-Based Directed Energy Deposition of Metals: Mechanical and Microstructural Properties and Quality Enhancement, *Applied Sciences* **14**, 9921 (2024).
37. H. N. Singh, S. Agrawal, and Y. K. Modi, Additively manufactured patient specific implants: A review, *Archive of Mechanical Engineering* 109 (2024).
38. A. Catasta, C. Martini, A. Mersanne, R. Foresti, C. Bianchini Massoni, A. Freyrie, and P. Perini, Systematic Review on the Use of 3D-Printed Models for Planning, Training and Simulation in Vascular Surgery, *Diagnostics* **14**, 1658 (2024).

39. Y. Cao, S. Sun, W. Li, Y. Chang, N. Gu, J. Yao, and Y. Sun, Challenge and technological trends of flexible solid-state supercapacitors, *Journal of Energy Storage* **97**, 112837 (2024).
40. M. Kozin, M. I. Ammarullah, A. A. Yusuf, A. U. Saudi, S. A. Azahra, I. N. Jujur, M. H. Arrifqi, and Moch. A. Choiron, Finite Element Analysis of Von Mises Stress in External Fixators for Open Tibial Fractures: A Comparative Study of ASTM F1541-02 and Tibia-Based Models in Indonesian Patients, *Healthcare Tech Letters* **13**, e70068 (2026).
41. R. R. Pillai and L. Mohan, Plasma Surface Modification of Biomedical Implants and Devices: Emphasis on Orthopedic, Dental, and Cardiovascular Applications, *Prosthesis* **7**, 143 (2025).
42. B. Fotovvati, N. Namdari, and A. Dehghanghadikolaei, On Coating Techniques for Surface Protection: A Review, *JMMP* **3**, 28 (2019).
43. A. Nouri and A. Sola, Powder morphology in thermal spraying, *J Adv Manuf & Process* **1**, e10020 (2019).
44. A. Kengesbekov, D. Baizhan, D. Buitkenov, and N. Muktanova, Detonation Spraying of Functionally Graded Hydroxyapatite/Titanium Coatings on Ti-6Al-4V Alloy, *Coatings* **15**, 1418 (2025).
45. S. Pang et al., Boosting performance of perovskite solar cells with Graphene quantum dots decorated SnO₂ electron transport layers, *Applied Surface Science* **507**, 145099 (2020).
46. M. Tumilovich, V. Savich, and A. Shelukhina, Influence of shape and size of particles on the osseointegration of porous implants made of titanium powder, *Doklady BGUIR* **4**, 115 (2016).
47. L. Łatka, L. Pawlowski, D. Chicot, C. Pierlot, and F. Petit, Mechanical properties of suspension plasma sprayed hydroxyapatite coatings submitted to simulated body fluid, *Surface and Coatings Technology* **205**, 954 (2010).
48. A. Kadyroldina, D. Alontseva, S. Voinarovych, L. Łatka, O. Kyslytsia, B. Azamatov, A. Khozhanov, N. Prokhorenkova, A. Zhilkashinova, and S. Burburska, Microplasma spraying of hydroxyapatite coatings on additive manufacturing titanium implants with trabecular structures, *Materials Science-Poland* **40**, 28 (2022).
49. S. V. Dorozhkin, Calcium Orthophosphate (CaPO₄)-Based Bioceramics: Preparation, Properties, and Applications, *Coatings* **12**, 1380 (2022).
50. D. L. Alontseva, M. B. Abilev, A. M. Zhilkashinova, S. G. Voinarovych, O. N. Kyslytsia, E. Ghassemieh, A. Russakova, and L. Łatka, Optimization of Hydroxyapatite Synthesis and Microplasma Spraying of Porous Coatings Onto Titanium Implants, *Advances in Materials Science* **18**, 79 (2018).
51. B. Rakhadilov, Z. Satbayeva, A. Maulit, N. Kadyrbolat, and A. Rustemov, Electrolytic-Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steels After Mechanical Surface Treatment, *Crystals* **15**, 992 (2025).
52. B. Rakhadilov and D. Baizhan, Creation of Bioceramic Coatings on the Surface of Ti-6Al-4V Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation Followed by Gas Detonation Spraying, *Coatings* **11**, 1433 (2021).
53. M. Blum, M. Sayed, E. M. Mahmoud, A. Killinger, R. Gadow, and S. M. Naga, In Vitro Evaluation of Biologically Derived Hydroxyapatite Coatings Manufactured by High Velocity Suspension Spraying, *J Therm Spray Tech* **30**, 1891 (2021).
54. M.M.M. Abir, Y. Otsuka, K. Ohnuma, and Y. Miyashita, Effects of composition of hydroxyapatite/gray titania coating fabricated by suspension plasma spraying on mechanical and antibacterial properties, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **125**, 104888 (2022).
55. A. Kengesbekov, Z. Sagdoldina, K. Torebek, D. Baizhan, Y. Kambarov, M. Yermolenko, S. Abdulina, and M. Maulet, Synthesis and Formation Mechanism of Metal Oxide Compounds, *Coatings* **12**, 1511 (2022).
56. B. K. Rakhadilov, D. B. Buitkenov, M. Adilkhanova, Zh. B. Sagdoldina, and Sh. R. Kurbanbekov, Influence of pulse plasma treatment on the phase composition and microhardness of detonation coatings based on Ti-Si-C, *PH* **102**, 33 (2021).
57. B. K. Rakhadilov, D. R. Baizhan, Zh. B. Sagdoldina, D. B. Buitkenov, and M. Maulet, *Phase Composition and Structure of Composite Ti/HA Coatings Synthesized by Detonation Spraying*, in (Ekaterinburg, Russia, 2020), p. 020022.
58. S. Voinarovych, S. Maksimov, S. Kaliuzhnyi, O. Kyslytsia, Y. Safarova (Yantsen), and D. Alontseva, Functional Assessment of Microplasma-Sprayed Hydroxyapatite-Zirconium Bilayer Coatings: Mechanical and Biological Perspectives, *Materials* **18**, 3405 (2025).
59. A. Dey and A. K. Mukhopadhyay, In Vitro Dissolution, Microstructural and Mechanical Characterizations of Microplasma-Sprayed Hydroxyapatite Coating, *Int J Applied Ceramic Tech* **11**, 65 (2014).
60. Implants for surgery — Hydroxyapatite, ISO 13779-2:2018 (2018).
61. M. Ohki, S. Takahashi, R. Jinnai, and T. Hoshina, Interfacial Strength of Plasma-sprayed Hydroxyapatite Coatings, *J Therm Spray Tech* **29**, 1119 (2020).
62. D. Alontseva, E. Ghassemieh, S. Voinarovych, O. Kyslytsia, Y. Polovetskyi, N. Prokhorenkova, and A. Kadyroldina, Manufacturing and Characterisation of Robot Assisted Microplasma Multilayer Coating of Titanium Implants: Biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity, *Johnson Matthey Technology Review* **64**, 180 (2020).
63. A. Kussaiyn-Murat, A. Kadyroldina, A. Krasavin, M. Tolykbayeva, A. Orazova, G. Nazenova, I. Krak, T. Haidegger, and D. Alontseva, Application of Discrete Exterior Calculus Methods for the Path Planning of a Manipulator Performing Thermal Plasma Spraying of Coatings, *Sensors* **25**, 708 (2025).
64. K. Connole and O. McDermott, The Challenges in the Regulatory Approval of Additive-Manufactured Medical Devices: A Quantitative Survey, *Ther Innov Regul Sci* **59**, 1160 (2025).
65. X. Chen, J. Zhou, Y. Qian, and L. Zhao, Antibacterial coatings on orthopedic implants, *Materials Today Bio* **19**, 100586 (2023).

66. [J. Hadaya, N. L. Chervu, S. Ebrahimian, Y. Sanaiha, S. Nesbit, R. J. Shemin, and P. Benharash, Clinical Outcomes and Costs of Robotic-assisted vs Conventional Mitral Valve Repair: A National Analysis, *The Annals of Thoracic Surgery* **119**, 1011 (2025).

67. H. F. Roh, S. H. Nam, and J. M. Kim, Robot-assisted laparoscopic surgery versus conventional laparoscopic surgery in randomized controlled trials: A systematic review and meta-analysis, *PLoS ONE* **13**, e0191628 (2018).

Сведения об авторах:

Дарья Алонцева – доктор физико-математических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: dalontseva@ektu.kz).

Бағдат Азаматов – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Восточно-Казахстанский региональный технопарк Алтай, (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz).

Сергей Войнарович – кандидат технических наук, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, (Киев, Украина, e-mail: serge.voy@gmail.com).

Алёна Ерсайнова (автор-корреспондент) – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: av_yersainova@mail.ru).

Авторлар туралы мәлімет:

Дарья Алонцева – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, (Өскемен, Қазақстан, e-mail: dalontseva@ektu.kz).

Бағдат Азаматов – PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Шығыс Қазақстан өңірлік Алтай технопаркі, ЖШС, (Өскемен, Қазақстан, e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz).

Сергей Войнарович – техника ғылымдарының кандидаты, Украина ұлттық академиясының Е.О. Патон электр дәнекерлеу институты, (Киев, Украина, e-mail: serge.voy@gmail.com).

Алёна Ерсайнова (автор-корреспондент) – PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, (Өскемен, Қазақстан, e-mail: av_yersainova@mail.ru).

Information about authors:

Darya Alontseva – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: dalontseva@ektu.kz).

Bagdat Azamatov – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, East Kazakhstan Regional Technopark Altai, (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz).

Serhiy Voinarovych –Candidate of Technical Sciences, E.O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Science of Ukraine, (Kiev, Ukraine, e-mail: serge.voy@gmail.com).

Alyona Yersainova (corresponding author) – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, East Kazakhstan Regional Technopark Altai, (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: av_yersainova@mail.ru).

История статьи: поступила: 24 февраля 2026; принята: 10 апреля 2026.

Мақала тарихы: түсті: 24 ақпан 2026; қабылданды: 10 сәуір 2026.

Article history: received: 24 February 2026; accepted: 10 April 2026.

**Конденсирленген күй физикасы және материалтану
проблемалары. Наноғылым**

**Condensed Matter Physics and Materials Science Problems
Nanoscience**

**Физика конденсированного состояния и проблемы
материаловедения. Нанонаука**

Ю.Н. Гордиенко* , В.С. Бочков , А.Д. Ноқанова , О.С. Букина ,
Ю.Ю. Бакланова , Э. Сапарбек 

Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан,
Курчатов, Казахстан

*e-mail: gordienko@nnc.kz

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕСОРБЦИЯ ИМИТАТОРА ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ИЗ ПЕРЛИТА: ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДУВКИ ПО ДАННЫМ ТГА/ДСК-МС

В работе представлены результаты комплексного исследования десорбционных характеристик вспученного перлита марки М100 (ТОО «UNION PERLITE», Республика Казахстан), пропитанного имитатором жидких радиоактивных отходов (ЖРО) при массовом соотношении сорбент: раствор = 1:6. Исследования выполнены методом ТГА/ДСК-МС на установке «ТиГрА» в изотермическом режиме при 40 и 70 °С с выдержкой 24 ч в двух вариантах: без газовой продувки и при продувке потоком сухого воздуха (50 мл/мин). Установлено, что десорбция носит исключительно физический характер и обусловлена испарением свободной воды, составляющей ~51% от начальной массы образца, что количественно соответствует доле воды, внесённой с имитатором ЖРО. Повышение температуры с 40 до 70 °С приводит к существенному ускорению выхода на стационарный режим в 4,6 раза (с 9,2 до 2,0 ч без продувки; с 9,4 до 1,8 ч при продувке), тогда как газовая продувка в исследованных лабораторных условиях оказывает незначительное влияние на кинетику (<10% ускорения при 70 °С).

Масс-спектрометрический анализ подтвердил отсутствие газовой выделения органических и неорганических летучих соединений, кроме водяного пара (доминирующий сигнал $m/z = 18$). На ДСК-кривых термические эффекты (экзо- или эндотермические) не зарегистрированы. Полученные результаты подтверждают химическую и термическую инертность исследованного перлита и его перспективность для технологий низкотемпературной сушки и временного хранения кондиционированных ЖРО.

Ключевые слова: перлит, жидкие радиоактивные отходы, сорбент, десорбция, ТГА/ДСК-МС, низкотемпературная сушка.

Ю.Н. Гордиенко*, В.С. Бочков, Э.Д. Ноқанова, О.С. Букина,
Ю.Ю. Бакланова, Э. Сапарбек

Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы,
Курчатов, Қазақстан

*e-mail: gordienko@nnc.kz

Перлиттен сұйық радиоактивті қалдықтар имитаторының төмен температуралық десорбциясы: температураның және үрлеудің ТГА/ДСК-МС деректері бойынша әсері

Жұмыста М100 маркалы кеңейтілген перлиттің (ЖШС «UNION PERLITE», Қазақстан Республикасы) сұйық радиоактивті қалдықтар (СРҚ) имитаторымен сорбент:ерітінді = 1:6 массалық қатынасында сіңірілген үлгілерінің десорбциялық сипаттамаларын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеулер ТГА/ДСК-МС әдісімен «ТиГрА» қондырғысында 40 және 70 °С температураларда 24 сағат бойы ұстап тұру арқылы изотермиялық режимде, екі нұсқада: газ ағынынсыз және құрғақ ауа ағынында (50 мл/мин) жүргізілді. Десорбцияның тек физикалық сипатта болатыны және үлгінің бастапқы массасының шамамен 51%-ын

құрайтын еркін судың булануымен шартталатыны анықталды, бұл СРҚ имитаторымен енгізілген су үлесіне сандық тұрғыдан сәйкес келеді. Температураны 40-тан 70 °C-қа дейін арттыру стационарлық күйге жету уақытын 4,6 есе қысқартады (газ ағынысыз 9,2-ден 2,0 сағатқа дейін; ал газ ағыны кезінде 9,4-тен 1,8 сағатқа дейін), ал зертханалық газдық ағын жағдайында кинетикаға елеусіз әсер етеді (70 °C-та <10% жеделдеу).

Масс-спектрометриялық талдау органикалық және бейорганикалық ұшпа қосылыстардың бөлінбейтінін, тек су буының (басым сигнал $m/z = 18$) тіркелетінін көрсетті. ДСК-деректерінде экзо- немесе эндотермиялық әсерлер байқалмады. Алынған нәтижелер зерттелген перлиттің химиялық және термиялық инерттілігін, сондай-ақ оның СРҚ-ты төмен температурада кептіру және уақытша сақтау технологияларында қолдану перспективалылығын растайды.

Түйін сөздер: кеңейтілген перлит, сұйық радиоактивті қалдықтар, сорбент, десорбция, ТГА/ДСК-МС, төмен температуралық кептіру.

Yu.N. Gordienko*, V.S. Bochkov, A.D. Nokanova, O.S. Bukina,

Yu.Yu. Baklanova, E. Saparbek

Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
Kurchatov, Kazakhstan

*e-mail: gordienko@nnc.kz

Low-temperature desorption of LRW simulant from perlite: temperature and purging influence according to TGA/DSC–MS data

The results of an in-depth study into the desorption properties of expanded perlite grade M100 (LLP “UNION PERLITE”, Republic of Kazakhstan) impregnated with a liquid radioactive waste (LRW) simulant at a sorbent-to-solution mass ratio of 1:6 are presented in this paper. The investigations were performed by TGA/DSC-MS simultaneous technique using the “TiGrA” experimental complex under isothermal conditions at 40 and 70 °C with a holding time of 24 h in two modes: without gas purging and with a flow of dry air (50 mL/min). Desorption was found to be purely physical and associated with the evaporation of free water. The observed mass loss (~51% of the initial sample mass) is consistent with the water content of the LRW simulant used for impregnation. Increasing the temperature from 40 to 70 °C results in a 4.6-fold reduction in the time required to reach a steady state (from 9.2 to 2.0 h without purging; from 9.4 to 1.8 h with purging), whereas gas purging under laboratory conditions has only a minor effect on the process kinetics (<10% acceleration at 70 °C).

Mass spectrometric analysis confirmed the absence of gaseous release of organic or inorganic volatile compounds other than water vapor (dominant signal at $m/z = 18$). No exothermic or endothermic effects were observed on the DSC curves. The obtained results confirm the chemical and thermal inertness of the investigated perlite and its potential applicability in technologies for low-temperature drying and interim storage of conditioned LRW.

Keywords: perlite, liquid radioactive waste, sorbent, desorption, TGA/DSC–MS, low-temperature drying.

Введение

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) представляют собой один из наиболее сложных классов отходов ядерного топливного цикла, требующих надежных технологий кондиционирования для обеспечения безопасного обращения, транспортировки и хранения [1, 2]. Актуальность данной проблемы определяется необходимостью минимизации объемов отходов, подлежащих

окончательному захоронению, а также снижением рисков миграции радионуклидов в окружающую среду на всех этапах жизненного цикла ядерных установок. В соответствии с международными требованиями в области ядерной и радиационной безопасности долгосрочному хранению и окончательному захоронению подлежат исключительно радио-

активные отходы в твердой форме. Данное положение закреплено в рекомендациях Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), предусматривающих обязательную переработку и кондиционирование ЖРО с целью получения стабильных твердых форм, обеспечивающих долговременную изоляцию радионуклидов [3-5]. Следовательно, перевод ЖРО в устойчивое нетекучее состояние является необходимым этапом их обращения и ключевым условием обеспечения безопасности.

Одним из перспективных подходов является перевод ЖРО в нетекучее состояние с использованием неорганических сорбентов [6], позволяющих стабилизировать жидкую фазу и сформировать матричную систему, пригодную для последующей переработки или захоронения. Однако эффективность таких технологий существенно зависит от физико-химических характеристик конкретного типа отходов.

Солесодержащие ЖРО характерны для эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах [7], предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива и систем дезактивации в ряде стран. Высокая концентрация растворенных солей существенно осложняет процессы твердения и ограничивает применимость традиционных технологий иммобилизации [8]. Особенно актуальна данная проблема для отходов, образовавшихся при эксплуатации реакторной установки БН-350 [9,10] в Республике Казахстан. Указанные отходы относятся к категории среднеактивных, характеризуются высоким солесодержанием, а их радионуклидный состав определяется преимущественно присутствием ^{137}Cs .

В условиях развития атомной энергетики в Республике Казахстан [11], включая эксплуатацию исследовательских реакторов [12-17] и реализацию перспективных энергетических проектов, задача эффективного управления ЖРО приобретает стратегическое значение. В этой связи перед НЯЦ РК, обладающим профильными компетенциями в данной области [18-20], стоит задача разработки и внедрения технологических решений, обеспечивающих надежную иммобилизацию ЖРО реакторной установки БН-350 [21,22]

с учетом их физико-химических и радиационных характеристик [23,24].

В качестве одного из кандидатных сорбционных материалов рассматривается перлит – горная порода вулканического происхождения, представляющая собой гидратированное вулканическое стекло с содержанием конституционной воды более 1 % и развитой пористой структурой (до 40 %). Его физико-химические свойства – низкая плотность (до 0,05 г/см³), термическая стабильность и химическая инертность – обуславливают широкое применение в строительстве, сельском хозяйстве и промышленной фильтрации. Перлит можно рассматривать как перспективный материал для иммобилизации ЖРО, поскольку он способен удерживать значительные объемы жидкости (до 400 % от собственной массы) за счет развитой пористой структуры.

В то же время, для практического применения важно детально изучить, как из перлита удаляется влага после контакта с модельными ЖРО. Остаточное содержание влаги в материале может со временем влиять на коррозионное состояние контейнеров. Не менее существенным является вопрос безопасности при термической обработке: необходимо подтвердить, что при нагреве перлита не происходит выделение летучих радиоактивных соединений или токсичных газов. Данное требование является обязательным при разработке технологий переработки и кондиционирования ЖРО.

Настоящая работа направлена на комплексную оценку десорбционного поведения перлита казахстанского производства, пропитанного имитатором ЖРО, при термообработке сорбента в режимах, релевантных для промышленных технологий низкотемпературной сушки. Особое внимание уделено анализу кинетики удаления влаги, влиянию газовой среды на процесс сушки, а также выявлению возможных вторичных процессов (химических реакций и термодеструкции), способных повлиять на безопасность и технологичность предлагаемого решения.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выступал порошкообразный сорбент, пропитанный имитатором ЖРО. Сорбент – вспученный перлит марки М100 производства ТОО «UNION PERLITE» (г. Алматы, Казахстан) [25].

Преимущественный размер частиц порошка от 0,1 мм до 0,4 мм (72%) и плотность 0,05 г/см³. Химический состав сорбента включает типичные для перлита оксиды: SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , MgO , CaO , а также химически связанную

воду в структуре минерала (конституционную воду). Выбор данной марки обусловлен ее доступностью на внутреннем рынке Казахстана и стандартизированными характеристиками вспучивания [26]. В качестве имитатора ЖРО был применен водный раствор неорганических солей с содержанием воды от 58 мас.% до 62 мас.% и солей от 38 мас.% до 42 мас.%. Состав имитатора подобран таким образом, чтобы моделировать реальную солевую нагрузку жидких отходов исследовательских реакторов, не используя при этом активные радионуклиды на этапе отработки технологии. Имитатор был капельно добавлен в количестве 6 массовых частей на 1 часть сухого

сорбента в алундовый тигель (600 мкл), заполненный сорбентом 2/3 объема. Такое соотношение выбрано для достижения предельной емкости сорбента при сохранении его сыпучести или формировании стабильной пасты, что типично для процессов кондиционирования.

На рисунке 1 показаны этапы подготовки образца к испытаниям, включающие последовательную загрузку сухого перлита (рис. 1а), дозированное введение жидкого имитатора (рис. 1б), контрольное взвешивание для фиксации начальной массы влаги (рис. 1в) и подготовку готовой навески для размещения в анализаторе (рис. 1г).

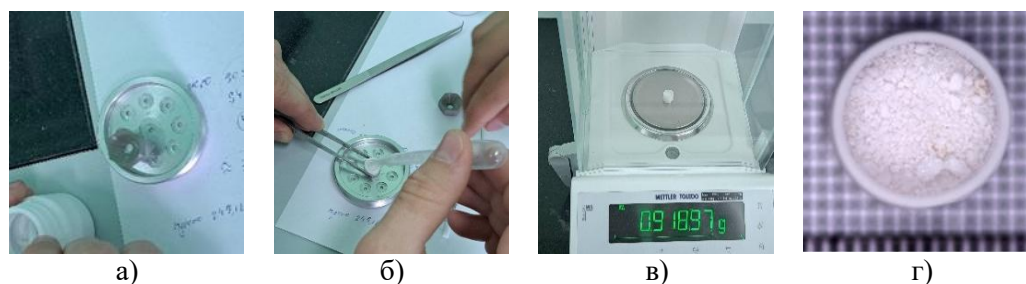


Рисунок 1 – Подготовка исследуемого образца к испытаниям: а) загрузка сорбента в тигель, б) ввод ЖРО в сорбент, в) взвешивание сорбента с ЖРО, г) готовая навеска образца

Испытания проводились на установке ТиГрА [27-29], включающей анализатор TGA/DSC 3+ (METTLER TOLEDO, Швейцария) и квадрупольный масс-спектрометр ThermoStar (PFEIFFER VACUUM, Германия). На рисунке 2 показана принципиальная схема установки ТиГрА.

Данная установка обеспечивает возможность параллельно применять три метода анализа в ходе одного эксперимента: термогравиметрия (ТГА), дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) и масс-спектрометрия (МС) в диапазоне температур от 22°C до 1500°C, в соответствии с установленной температурной программой. Синхронизация данных о потере массы, тепловом потоке и составе газовой фазы в ходе измерений обеспечивает онлайн мониторинг кинетики протекающих процессов, с возможностью анализа в режиме реального времени.

В ходе экспериментов образцы изотермически выдерживались при температурах 40 °C и 70°C в течение 24 часов. Эксперименты проводились в двух режимах:

1) в статической воздушной атмосфере (без продувки) и

2) при продувке осушенным воздухом с расходом 50 мл/мин. Температурные режимы выбраны для моделирования условий

естественной сушки (40 °C) и ускоренной термообработки (70°C), которые можно применить на промышленном оборудовании без риска термического разложения органических веществ.

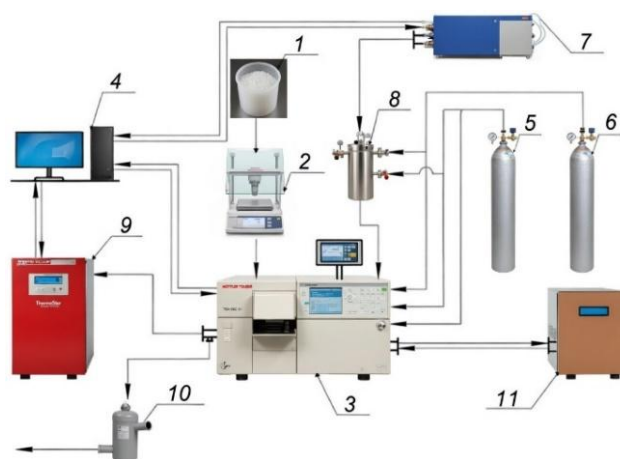


Рисунок 2 – Принципиальная схема установки ТиГрА: 1 – исследуемый образец; 2 – аналитические весы MS105DU; 3 – аналитический прибор TGA-DSC 3+; 4 – персональный компьютер; 5 – баллон с защитным газом; 6 – баллон с реакционным газом; 7 – генератор влаги МНГ-32; 8 – резервуар для смешивания газов; 9 – масс-спектрометр ThermoStar; 10 – фильтр для выходного газа; 11 – криостат

Зарегистрированные параметры охватывали изменение массы образца (ТГ-анализ) с точностью $\pm 0,1$ мкг, тепловой поток, подводимый к образцу (ДСК-анализ), с чувствительностью 1 мкВт, состав газовой фазы (МС-анализ). В МС-анализе контролировались токи ионизации при следующих значениях m/z : M2 (H_2^+); M12 (C^+);

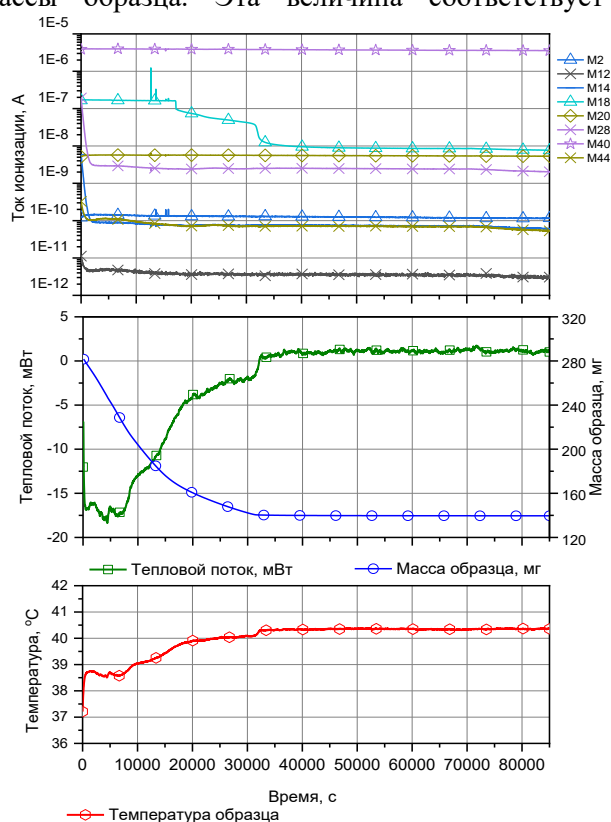
M14 (CH_2^+ / N^+); M16 (CH_4^+ / O^+); M18 (H_2O^+); M28 (CO^+); M32 (O_2^+); M40 (Ar^+); M44 (CO_2^+). Такой набор массовых чисел позволяет детектировать широкий спектр возможных продуктов разложения органических примесей, карбонатов, а также выделения газов радиолитического происхождения.

Результаты и обсуждение

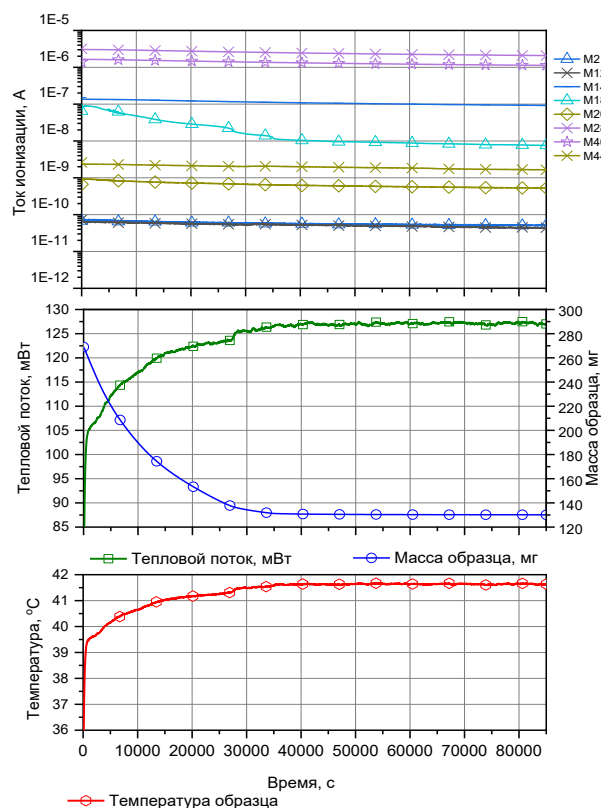
На рисунках 3 и 4 представлены результаты испытаний, полученные при температурах 40°C и 70 °С, выполненные в режимах без продувки и с продувкой осушенным воздухом. Графики отражают синхронное изменение массы, теплового потока и интенсивности сигналов масс-спектрометра во времени, что позволяет коррелировать потерю массы с выделением конкретных газовых компонентов и тепловыми эффектами.

Во всех экспериментальных сериях зафиксирована монотонная потеря массы с последующим выходом на плато, что видно на средних графиках рисунков 3 и 4. Степень десорбции составила 50,43–51,6% от начальной массы образца. Эта величина соответствует

испарению водной фракции (58–62%) внесённого имитатора ЖРО при соотношении сорбент/имитатор равное 1:6. Данные результаты указывают на преимущественно физический характер сорбции и отсутствие значимого химического связывания компонентов имитатора с матрицей перлита в исследованных условиях. Если бы происходило хемосорбционное связывание воды или образование кристаллогидратов солей, степень потери массы была бы ниже, либо требовались бы более высокие температуры для дегидратации. Наблюдаемая стабильность потери массы во всех сериях опытов подтверждает воспроизводимость свойств перлита марки M100 как сорбента.



а)



б)

Рисунок 3 – Результаты испытаний при температуре 40°C образца сорбента пропитанного имитатором ЖРО: а) без продувки, б) с продувкой осушенным воздухом

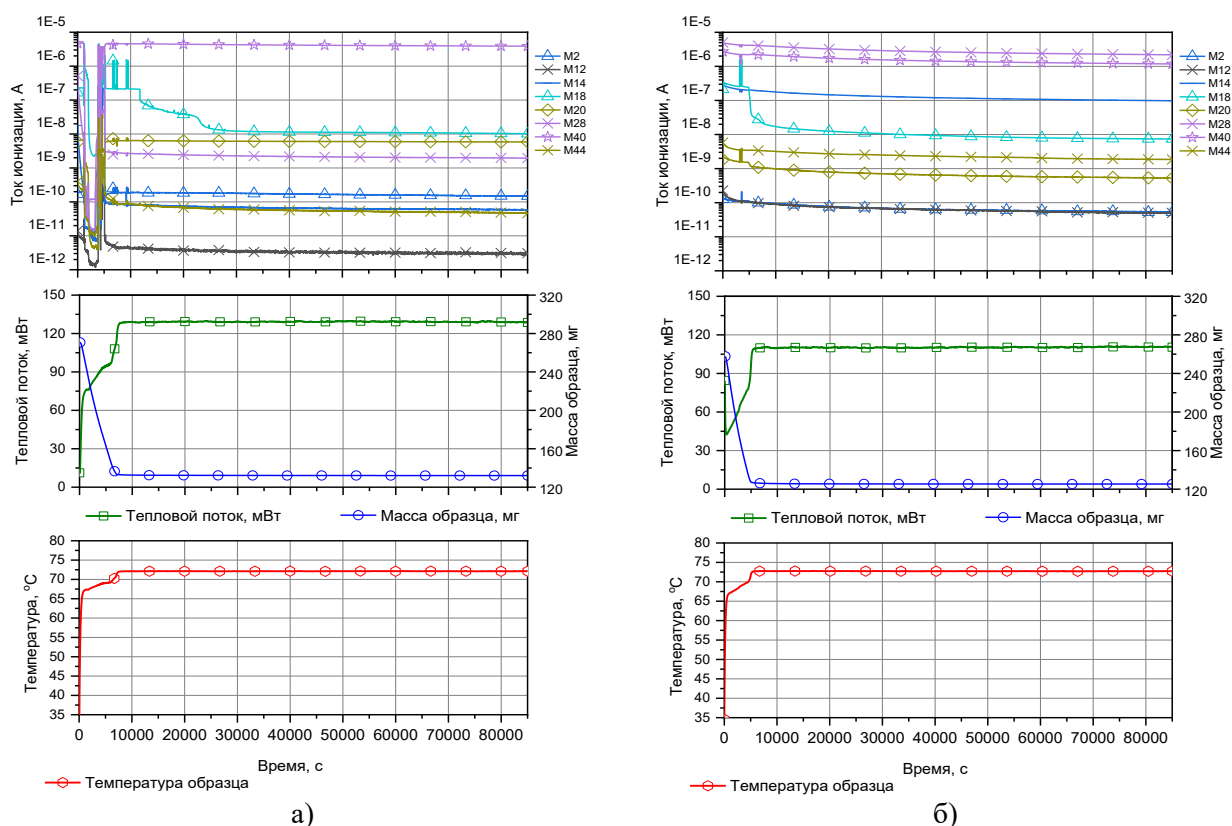


Рисунок 4 – Результаты испытаний при температуре 70°C образца сорбента пропитанного имитатором ЖРО: а) без продувки, б) с продувкой осушенным воздухом

Кинетика десорбции оказалась высокочувствительной к температуре, но слабо зависимой от режима газовой среды, что подтверждается данными таблицы 1 и рисунков 5 и 6. Повышение температуры с 40°C до 70°C привело к ускорению достижения стационарного состояния в 4,6 раза: время выхода на плато сократилось с 550 мин (~9,2 ч) до 120 мин (~2,0 ч) без продувки и с 564 мин (~9,4 ч) до 108 мин (~1,8 ч) с продувкой (рис. 5). Наблюдаемая зависимость соответствует

диффузионно-кинетической модели испарения, в рамках которой скорость процесса определяется температурой на границе раздела фаз и градиентом концентрации пара в пограничном слое. Повышение температуры приводит к увеличению давления насыщенного пара воды в порах перлита, что, в свою очередь, усиливает движущую силу массопереноса влаги из объема материала к его поверхности.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики десорбции перлита (РК), пропитанного имитатором ЖРО

Параметр	Температура образца 40 °С		Температура образца 70 °С	
	без продувки	с продувкой	без продувки	с продувкой
Начальная масса, мг	281,63	268,97	270,78	257,71
Конечная масса, мг	139,62	130,16	132,08	125,33
Относительная потеря массы, %	50,43	51,6	51,22	51,4
Время выхода на плато, мин	550	564	120	108
Доминирующий компонент газовой фазы	H ₂ O ⁺ (m/z=18)	H ₂ O ⁺ (m/z=18)	H ₂ O ⁺ (m/z=18)	H ₂ O ⁺ (m/z=18)

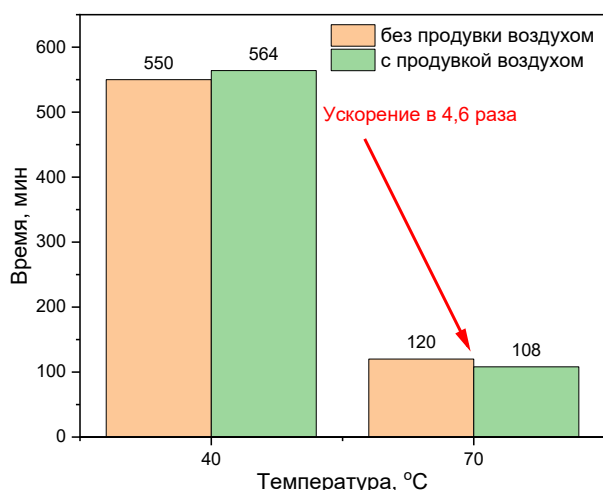


Рисунок 5 – Влияние температуры на кинетику десорбции

Минимальное влияние продувки (<5% различия во времени десорбции при 40 °C и ~10% при 70 °C, рисунок 5) указывает на то, что в исследованных условиях лимитирующей стадией является внутренняя диффузия влаги в порах перлита, а не внешний массообмен. Высокая паропроницаемость системы даже в статических условиях объясняется развитой пористой структурой перлита (преимущественно открытые поры в диапазоне 0,1-0,4 мм), обеспечивающей эффективную транспортировку пара к внешней поверхности. Это имеет важное практическое значение, так как упрощает конструкцию сушильного оборудования: отсутствие необходимости в мощной системе принудительной вентиляции снижает энергозатраты и усложнение инженерных систем.

Кривые ДСК во всех экспериментах показывали линейный тренд и не содержали каких-либо экзо- или эндотермических пиков (рисунки 3 и 4, средний график, зеленая кривая). Отсутствие ярко-выраженных тепловых эффектов на кривых указывает на то, что в системе не происходят химические реакции. В частности, не наблюдается разложения солей имитатора, дегидратации кристаллогидратов, окислительных процессов или каких-либо изменений в структуре перлита. Это означает, что процесс десорбции идет спокойно, без химических превращений, и связан главным образом с испарением воды при равномерном подводе тепла. Если бы в системе присутствовали органические соединения на ДСК-кривых появились бы характерные тепловые эффекты, связанные с их разложением или окислением. Поскольку таких эффектов не зафиксировано,

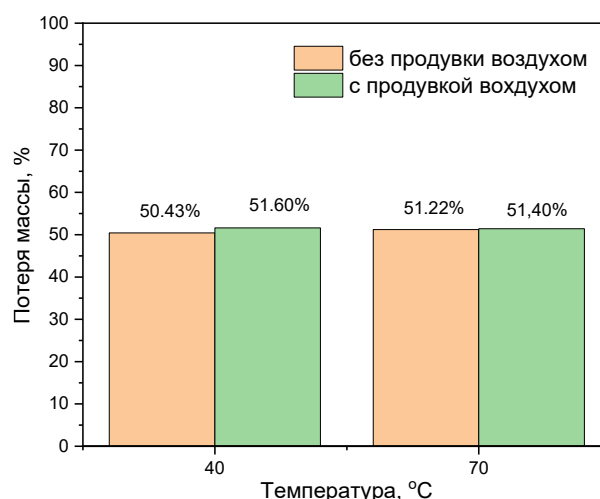


Рисунок 6 – Относительная потеря массы сорбента, пропитанного имитатором ЖРО в экспериментах с без продувки осушенным воздухом и с продувкой

можно говорить о стабильности системы «перлит-солевой раствор».

Результаты МС анализа газовой фазы (рисунки 3 и 4, верхний график) подтверждает этот вывод. Основной вклад в сигнал дает ион H_2O^+ (M18), причем его изменение совпадает по времени с потерей массы образца. Сигналы по другим массам M2, M12, M14, M16, M28, M32, M40, M44, остаются на уровне фона и не превышают 0,5% от сигнала воды. В частности, отсутствие сигналов для M44 и M28 указывает на то, что даже при 70 °C не происходит разложение карбонатов или органических примесей. Это важно с точки зрения радиационной безопасности, так как исключается поступление радиоактивных аэрозолей и летучих соединений углерода в вентиляционную систему при сушке реальных отходов.

Полученные данные свидетельствуют о физическом механизме десорбции [30, 31] — испарении несвязанной (химически свободной) воды из пор перлита. Высокая пористость и открытая структура вспученного перлита обеспечивают хорошую паропроницаемость, что позволяет полностью удалить влагу даже без продувки. Процесс соответствует стандартной кинетике испарения: с повышением температуры увеличиваются давление насыщенного пара воды и коэффициент диффузии, что ускоряет массоперенос. При этом максимальная степень десорбции почти не меняется: при 70 °C она составляет в среднем 51,3 %, а при 40 °C — 51,0 %. Это говорит о том, что полное удаление свободной влаги осуществляется при 40 °C. Остаточная масса образца (~49 %) соответствует количеству сухого вещества (перлит и соли

имитатора), что подтверждает отсутствие связанной воды при этой температуре. Режим при 70 °С оказывается более предпочтительным с точки зрения производительности, так как позволяет сократить продолжительность процесса почти в 5 (4,6) раз.

В лабораторных условиях, где используется небольшой объем материала, продувка осушенным воздухом практически не влияет на скорость сушки. Это связано с тем, что процесс в данном случае ограничен внутренней диффузией влаги в порах сорбента [32], а не внешним массообменом. Однако, в промышленных условиях ситуация может измениться. При работе с большими объемами материала и значительной толщиной слоя, а также при повышенной влажности окружающей среды продувка или вакуумирование способны заметно ускорить процесс сушки.

Перлит широко применяется как абсорбент для жидких отходов благодаря своей высокой впитывающей способности и малому увеличению

массы. В ядерной отрасли его используют, в частности, для стабилизации шламов и в составе композитных сорбентах. Полученные результаты показывают, что после насыщения влагу из перлита можно эффективно удалять при сравнительно низких температурах, без риска образования вторичных летучих продуктов. Это имеет принципиальное значение для обеспечения безопасности при обращении с ЖРО.

Кроме того, химическая инертность перлита в исследованном температурном диапазоне подтверждает возможность его использования для длительного хранения кондиционированных отходов. Матрица, не взаимодействует с солевыми компонентами имитатора ЖРО и сохраняет свою структуру. Это означает, что со временем не ожидается разрушения материала или выделения газов, способных повысить давление внутри контейнера. В результате снижаются требования к герметичности контейнеров и уменьшается риск возникновения аварийных ситуаций.

Заключение

Комплексные ТГА/ДСК-МС исследования перлита марки М100, пропитанного имитатором ЖРО, показали, что в диапазоне 40-70 °С удаление влаги носит физический характер и связано, главным образом, испарением свободной воды. Степень десорбции (около 51%) соответствует количеству введенного раствора, что указывает на обратимость процесса сорбции и отсутствие химического взаимодействия между компонентами. Это позволяет рассматривать перлит как стабильную матрицу, сохраняющую свои свойства в процессе сушки.

Скорость десорбции существенно зависит от температуры. При повышении температуры с 40 °С до 70 °С скорость процесса увеличивается примерно в 4,5-5 раз: время выхода на плато сокращается с ~9,3 ч до ~1,9 ч. При этом продувка осушенным воздухом со скоростью 50 мл/мин практически не влияет на кинетику процесса (ускорение менее 5% при 70 °С). Это говорит о том, что лимитирующей стадией является перенос влаги внутри пор перлита, а не внешний массообмен. С практической точки зрения это позволяет снизить расход продувочного газа и упростить энергобаланс сушильной установки.

Отсутствие заметных тепловых эффектов на ДСК-кривых, а также регистрация в газовой фазе только водяного пара подтверждают, что процесс протекает без химических превращений. Не зафиксировано выделение CO₂, CO, CH₄, что

исключает разложение как имитатора ЖРО, так и самой перлитовой матрицы в рассматриваемом диапазоне температур. Это снижает риск вторичного загрязнения рабочей зоны и упрощает требования к системе газоочистки.

Высокая термическая стабильность перлита и его химическая инертность по отношению к компонентам имитатора ЖРО подтверждают перспективность его использования при разработке технологий кондиционирования ЖРО.

Результаты также показывают, что низкотемпературная сушка при 70 °С является оптимальным режимом с точки зрения энергоэффективности и скорости процесса. Дополнительно подтверждается возможность временного хранения компонентов на основе перлита без риска газовыделения, что важно для промежуточных стадий обращения с отходами.

Рассматривается и потенциальное применение перлита в барьерных системах при захоронении низкоактивных отходов, где требуется стабильность материала.

Для практического внедрения технологии необходимы дополнительные исследования с использованием реальных ЖРО, содержащих радионуклиды (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr), с оценкой их удержания в перлитовой матрице после термообработки.

Также требуется изучить стойкость материала к выщелачиванию при воздействии

влаги и оценить влияние радиолитиза на десорбционные свойства в длительной перспективе.

Проведение вышеприведенных исследований позволит обоснованно оценить применимость технологии на предприятиях атомной отрасли Республики Казахстан.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов» (BR24993140).

Вклад авторов

Ю.Н. Гордиенко: ресурсы, методология, проведение исследования, написание – первоначальный вариант, написание – рецензирование и редактирование. **В.С. Бочков:** курирование данных, проведение исследования, программное обеспечение, валидация. **Ә.Д. Ноқанова:** визуализация, проведение исследования, формальный анализ. **О.С. Букина:** привлечение финансирования, администрирование проекта. **Ю.Ю. Бакланова:** научное руководство, формальный анализ. **Э. Сапарбек:** курирование данных, проведение исследования.

Литература

1. D. Deng, L. Zhang, M. Dong, R. E. Samuel, A. Ofori-Boadu, and M. Lamssali, Radioactive waste: A review, *Water Environ. Res.* **92**, 1818–1825 (2020). <https://doi.org/10.1002/wer.1442>
2. R. O. A. Rahman, H. A. Ibrahim, and Y.-T. Hung, Liquid radioactive wastes treatment: A review, *Water* **3**, 551–565 (2011). <https://doi.org/10.3390/w3020551>
3. International Atomic Energy Agency, *Disposal of Radioactive Waste*, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5 (IAEA, Vienna, 2011).
4. International Atomic Energy Agency, *Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment*, IAEA-TECDOC-1336 (IAEA, Vienna, 2003).
5. International Atomic Energy Agency, *International Safeguards in the Design of Radioactive Waste Management Programmes*, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.28 (IAEA, Vienna, 2025). <https://doi.org/10.61092/iaea.gzc8-slxn>
6. N. A. Nekrasova, V. V. Milyutin, V. O. Kaptakov, and E. A. Kozlitin, Inorganic sorbents for wastewater treatment from radioactive contaminants, *Inorganics* **11**, 126 (2023). <https://doi.org/10.3390/inorganics11030126>
7. K. G. Legkikh and V. B. Smykov, Innovative technologies for immobilizing the sodium primary coolant of fast neutron reactors and processing liquid radioactive waste generated during reactor operation, *At. Energy* **137**, 129–135 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01186-z>
8. N. C. Hyatt and M. I. Ojovan, Special Issue: Materials for nuclear waste immobilization, *Materials* **12**, 3611 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12213611>
9. V. M. Troyanov and A. A. Kamaev, Evolution of fast reactors: The role of a BN-350 reactor, *At. Energy* **136**, 222–232 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01155-y>
10. Y. V. Nosov, A. V. Rovneiko, O. L. Tashlykov *et al.*, Decommissioning features of BN-350, -600 fast reactors, *At. Energy* **125**, 219–223 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00470-z>
11. E. Batyrbekov, V. Vityuk, D. Zarva, and M. Sharipov, Conceptual view of the implementation of the nuclear energy program in the Republic of Kazakhstan, *Energies* **17**, 5788 (2024). <https://doi.org/10.3390/en17225788>
12. A. Shaimerdenov, D. Sairanbayev, Sh. Gizatulin, A. Nessipbay, Zh. Bugubay, D. Nugumanov, and S. Sakhiyev, WWR-K reactor LEU core design optimization for improving the experimental characteristics, *Ann. Nucl. Energy* **195**, 110174 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110174>
13. R. A. Irkimbekov, A. S. Surayev, G. A. Vityuk, O. M. Zhanbolatov, Z. B. Kozhabaev, S. V. Bedenko, N. Ghal-Eh, and A. D. Vurim, Study on an open fuel cycle of IVG.1M research reactor operating with LEU-fuel, *Nucl. Eng. Technol.* **55**, 1439–1447 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.12.012>
14. E. Batyrbekov, V. Vityuk, A. Vurim, and G. Vityuk, Experimental opportunities and main results of the impulse graphite reactor use for research in safety area, *Ann. Nucl. Energy* **182**, 109582 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109582>
15. E. Batyrbekov, M. Khasenov, M. Skakov, Y. Gordienko, K. Samarkhanov, A. Kotlyar, A. Miller, and V. Bochkov, High-energy tritium ion and α -particle release from the near-surface layer of lithium during neutron irradiation in the nuclear reactor core, *Fusion Sci. Technol.* **80**, 520–529 (2024). <https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2229682>
16. K. Samarkhanov, M. Khasenov, E. Batyrbekov, Y. Gordienko, Y. Baklanova, I. Kenzhina, *et al.*, Optical radiation from the sputtered species under excitation of ternary mixtures of noble gases by the ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ nuclear reaction products, *Eurasian Chem.-Technol. J.* **23**, 95–102 (2021). <https://doi.org/10.18321/ectj1079>

17. Y. Ponkratov, E. Batyrbekov, M. Khasenov, K. Samarkhanov, and Ye. Chikhray, Application of high-energy tritium ions and alpha particles formed in $6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ nuclear reaction to excite the luminescence of inert gas mixtures, *Fusion Sci. Technol.* **77**, 327–332 (2021). <https://doi.org/10.1080/15361055.2021.1887714>
18. K. K. Samarkhanov, Y. Yu. Baklanova, O. S. Bukina, V. V. Baklanov, Y. T. Koyanbayev, I. M. Kukushkin, I. M. Bolshinsky, and K. J. Bateman, Development of the technological process for the IGR reactor's highly-enriched irradiated uranium-graphite fuel immobilization, *J. Nucl. Mater.* **610**, 155801 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2025.155801>
19. K. Toleubekov, V. Baklanov, A. Akayev, M. Bekmuldin. Modeling the process of decay heat imitation in the corium at the «Lava-B» facility. *Recent Contributions to Physics*, **81**(2), 97–106 (2022). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v81.i2.012>
20. M. Skakov, V. Baklanov, I. Kukushkin, K. Toleubekov, M. Bekmuldin, A. Akaev, M. Azbergenov, Y. Dauletkanov, and A. Toktaushev, Investigation of the interaction between corium and metal-coolers at the VCG-135 test bench in the conditions of a severe accident, *Nucl. Eng. Des.* **424**, 113296 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113296>
21. N. Mukhamedov, V. Baklanov, M. Moldagulov, K. Toleubekov, A. Surayev, A. Yagudin, and S. Kanatnikov, The BN-350 reactor decommissioning: Quantitative analysis and prospects for solid radioactive waste management, *Energies* **18**, 4651 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18174651>
22. N. Mukhamedov, K. Toleubekov, G. Vityuk, M. Bekmuldin, and S. Dolzhikov, Decommissioning of the BN-350 fast neutron reactor: History review and current status, *Energies* **18**, 3486 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18133486>
23. Ye. T. Koyanbayev, M. K. Skakov, E. G. Batyrbekov, I. I. Deryavko, Ye. Ye. Sapatayev, and Ye. A. Kozhahmetov, The forecasting of corrosion damage of structural materials during dry long-term storage of RD BN-350 SNF with CC-19 SFA, *Sci. Technol. Nucl. Inst.* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/1293060>
24. Ye. T. Koyanbayev, M. K. Skakov, D. A. Ganovichev, Ye. A. Martynenko, and A. A. Sitnikov, Simulation of the thermal conditions of cask with fuel assemblies of BN-350 reactor for dry storage, *Sci. Technol. Nucl. Inst.* (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/3045897>
25. Union Perlite LLP, Company profile. Available at: <https://perlite.all.biz/contacts>
26. GOST 10832-2009. Perlite expanded sand and crushed stone. Technical specification.
27. Y. Ponkratov, V. Bochkov, K. Samarkhanov, I. Karambayeva, and S. Askerbekov, Methodology of corrosion testing of nuclear and fusion reactors materials using TGA/DSC and MS complex techniques, *Eurasian Chem.-Technol. J.* **21**, 35 (2019). <https://doi.org/10.18321/ectj787>
28. Yu. V. Ponkratov, K. K. Samarkhanov, V. V. Baklanov, Yu. N. Gordienko, I. E. Kenzhina, V. S. Bochkov, Ye. Yu. Tulubayev, N. A. Orazgaliyev, and E. Saparbek, Investigation of the interaction of liquid tin-lithium alloy with austenitic stainless steel at high temperatures, *Fusion Eng. Des.* **191**, 113560 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113560>
29. T. Kulsartov, K. Samarkhanov, V. Bochkov, Ye. Kenzhin, Yu. Ponkratov, I. Kenzhina, Zh. Zaurbekova, Ye. Sapatayev, S. Askerbekov, A. Yelishenkov, S. Udartsev, High-temperature corrosion testing of titanium beryllides in the presence of water vapor and oxygen, *J. Nucl. Mater.* **600**, 155294 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.155294>
30. Wang J., Lu X., He C. *et al.* Mechanical properties and microscopic characterization of waste perlite powder as supplementary cementitious material. *Sci Rep* **14**, 21963 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71968-1>
31. Z. Khoshraftar, H. Masoumi, A. Ghaemi. On the performance of perlite as a mineral adsorbent for heavy metals ions and dye removal from industrial wastewater: A review of the state of the art. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* **8**, 100385 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100385>
32. Jin-Tao Guo, Ya-Qian Wei, Sheng-Li Chen, Wei Sun, Ting-Ting Fan, Ming-Ri Xu, and Chang-Cheng Zhang, Measurement of pore diffusion factor of porous solid materials, *Pet. Sci.* **19**, 1897 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.04.008>

Сведения об авторах:

Юрий Гордиенко (автор-корреспондент) – заведующий лабораторией, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: gordienko@nnc.kz).

Вадим Бочков – инженер I-й категории, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: bochkovv@nnc.kz).

Амина Ноканова – инженер, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: nokanovaamina@nnc.kz).

Ольга Букина – начальник лаборатории, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: bukina@nnc.kz).

Юлия Бакланова – начальник отдела, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: Basalai@nnc.kz).

Эльдана Сапарбек – младший научный сотрудник, Филиал института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, (Курчатов, Казахстан, e-mail: Saparbek@nnc.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Юрий Гордиенко (автор-корреспондент) – зертхана меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: gordienko@nnc.kz).

Вадим Бочков – I-і санатты инженер, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: bochkovv@nnc.kz).

Әмина Ноқанова – инженер, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: nokanovaamina@nnc.kz).

Ольга Букина – зертхана меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: bukina@nnc.kz).

Юлия Бакланова – бөлім меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: Basalai@nnc.kz).

Эльдана Сапарбек – кіші ғылыми қызметкер, Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығының Атом энергиясы институтының филиалы, (Курчатов, Қазақстан, e-mail: Saparbek@nnc.kz).

Information about authors:

Yuriy Gordienko (corresponding author) – Head of laboratory, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: gordienko@nnc.kz).

Vadim Bochkov – 1st category engineer, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan – (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: bochkovv@nnc.kz).

Amina Nokanova – Engineer, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: nokanovaamina@nnc.kz).

Olga Bukina – Head of laboratory, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: bukina@nnc.kz).

Yuliya Baklanova – Head of department, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: Basalai@nnc.kz).

Eldana Saparbek – junior researcher, Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: Saparbek@nnc.kz).

История статьи: поступила: 22 февраля 2026; после доработки 14 апреля; принята: 21 мая 2026.

Мақала тарихы: түсті: 22 ақпан 2026; түзетілді: 14 сәуір; қабылданды: 21 мамыр 2026.

Article history: received: 22 February 2026; revised: 14 April; accepted: 21 May 2026.

A.Zh. Zhomartova^{1,2} , M. Kenessarin^{1,2,3,*} , K. Nazarov^{1,2,3} , S.E. Kichanov² ,
R.S. Zhumatayev³ , J.-M. Deom³ , A. Smat³ , B. Mukhametuly^{1,2,3} 

¹Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Farabi University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: muratkenessarin@inp.kz

MICROSTRUCTURAL AND MINERALOGICAL ANALYSIS OF URYSAI-2 CERAMICS BY X-RAY MICROTOMOGRAPHY AND RAMAN SPECTROSCOPY

The article presents the results of applying X-ray computed tomography (CT) to study the spatial arrangement, size distribution, and morphology of internal inclusions in several ceramic fragments from the Urysay-2 complex in the Zhambyl district of the Almaty region (Republic of Kazakhstan). Based on the tomographic data, segmentation of the internal inclusions was performed, and the grain size of the ancient ceramic samples was calculated. The reconstructions enabled a quantitative morphometric analysis of mineral inclusions, providing statistical distributions of equivalent diameter, elongation, and sphericity. The results revealed significant technological differences: sample C-1 contains the largest and most irregular inclusions (average equivalent diameter ≈ 0.35 mm, mean sphericity ≈ 0.90), whereas C-2 and C-3 show smaller and more uniform grains (average equivalent diameter 0.25–0.30 mm; sphericity up to 0.96), reflecting finer tempering. Raman spectroscopy identified the mineral phases of the samples, including quartz, albite, calcite, hematite, anatase/rutile, and magnetite. The anatase-to-rutile transformation observed in C-2 indicates firing temperatures above ~ 800 °C under oxidizing conditions. Beyond archaeology, this approach provides a reliable framework for the quantitative characterization of porous ceramics and composite materials in materials science.

Keywords: X-ray microtomography IMAX; Raman spectroscopy; Segmentation; Ancient ceramic microstructure;

А.Ж. Жомартова^{1,2}, М. Кенесарин^{1,2,3,*}, Қ. Назаров^{1,2,3}, С.Е. Кичанов²,
Р.С. Жұматаев³, Ж.-М. Деом³, А. СМАТ³, Б. Мұхаметұлы^{1,2,3}

¹Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²Біріккен ядролық зерттеу институты, Дубна, Ресей

³Әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: muratkenessarin@inp.kz

Рентгендік микротомография және раман спектроскопиясы арқылы Ұрысай 2 керамикасының микроқұрылымдық-минералогиялық талдауы

Мақалада Алматы облысы (Қазақстан Республикасы) Жамбыл ауданындағы «Ұрысай-2» кешенінің бірнеше керамикалық фрагменттеріндегі ішкі қосындылардың кеңістіктік орналасуын, көлемінің таралуын және морфологиясын зерттеу үшін рентгендік компьютерлік томографияны (КТ) қолдану нәтижелері берілген. Томографиялық мәліметтер негізінде ішкі қосындыларды сегменттеу жүргізілді, ежелгі керамикалық үлгілердің түйіршік мөлшері есептелді. Қайта құрулар эквивалентті диаметрдің, ұзарудың және сфераның статистикалық таралуларын қамтамасыз ететін минералды қосындылардың сандық морфометриялық талдауына мүмкіндік берді. Нәтижелер елеулі технологиялық айырмашылықтарды анықтады: С-1 үлгісі ең үлкен және ең дұрыс емес қосындыларды қамтиды (орташа эквивалентті диаметрі $\approx 0,35$ мм, орташа сфералық $\approx 0,90$), ал С-2 және С-3 кішірек және біркелкі дәндерді көрсетеді (орташа эквиваленттік диаметрі 0,35 мм-ге дейін; 0,96), жақсырақ шыңдауды көрсетеді. Раман спектроскопиясы үлгілердің минералды

фазаларын, соның ішінде кварц, альбит, кальцит, гематит, анатаза/рутил және магнетитті анықтады. С-2-де байқалған анатазаның рутилге айналуы тотықтырғыш жағдайында ~800 °C жоғары күйдіру температурасын көрсетеді. Археологиядан басқа, бұл тәсіл материалтанудағы кеуекті керамика мен композициялық материалдардың сандық сипаттамасының сенімді негізін қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: рентгендік микротомография IMAX, раман спектроскопиясы, сегменттеу, ежелгі керамикалық микроқұрылым.

А.Ж. Жомартова^{1,2}, М. Кенесарин^{1,2,3,*}, К. Назаров^{1,2,3}, С.Е. Кичанов²,
Р.С. Жуматаев³, Ж.-М. Деом³, А. Слат³, Б. Мухаметулы^{1,2,3}

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: muratkenessar@inp.kz

Микроструктурный и минералогический анализ керамики Урысай 2 методами рентгеновской микротомографии и рамановской спектроскопии

В статье представлены результаты применения рентгеновской компьютерной томографии (КТ) для изучения пространственного расположения, распределения размеров и морфологии внутренних включений в нескольких фрагментах керамики из комплекса Урысай-2 в Жамбылском районе Алматинской области (Республика Казахстан). На основании томографических данных проведена сегментация внутренних включений и рассчитан размер зерен образцов древней керамики. Реконструкции позволили провести количественный морфометрический анализ минеральных включений, позволив получить статистические распределения эквивалентного диаметра, удлинения и сферичности. Результаты выявили существенные технологические различия: образец С-1 содержит наиболее крупные и нерегулярные включения (средний эквивалентный диаметр ≈ 0,35 мм, средняя сферичность ≈ 0,90), тогда как образец С-2 и С-3 демонстрируют более мелкие и однородные зерна (средний эквивалентный диаметр 0,25–0,30 мм; сферичность до 0,96), что отражает более тонкую закалку. Рамановская спектроскопия позволила идентифицировать минеральные фазы образцов, включая кварц, альбит, кальцит, гематит, анатаз/рутил и магнетит. Наблюдаемое в С-2 превращение анатаза в рутил указывает на температуру обжига выше ~800 °C в окислительных условиях. Помимо археологических исследований, этот подход обеспечивает надежную основу для количественной характеристики пористой керамики и композитных материалов в материаловедении.

Ключевые слова: рентгеновская микротомография IMAX, рамановская спектроскопия, сегментация, древняя керамическая микроструктура.

Introduction

In recent years, the application of non-destructive physical methods has become a leading approach in the study of archaeological artefacts [1,2]. Their ability to preserve unique cultural heritage objects while simultaneously providing quantitative information on structure and composition makes them particularly valuable compared to conventional destructive analyses [3]. Among these techniques, X-ray and neutron methods have proven highly effective for investigating the internal structure of archaeological materials,

including weapons [4,5], horse equipment [6], coins [7,8], jewellery [9,10], and ceramics [11–13].

Ceramics, one of the most common categories of archaeological finds, represent a complex multiphase system in which mineral composition, porosity, and inclusion morphology provide direct insights into raw material preparation, firing regimes, and technological traditions of ancient potters [14,15]. Phase composition and microstructural features serve not only as markers of local production practices but also as indicators of cultural exchange and technological innovation [16]. Previous studies [17],

for instance, demonstrated how neutron tomography can classify ceramic fragments from the Byzantine fortress in Dobrudja into distinct technological groups.

X-ray microtomography (micro-CT) has recently emerged as a powerful non-invasive method for visualizing internal heterogeneities with micrometre-scale resolution (10–50 μm). It provides access to morphometric parameters such as equivalent diameter, elongation, and sphericity, enabling statistical descriptions of inclusion and pore populations [18–20]. Complementarily, Raman spectroscopy has proven to be a highly sensitive technique for identifying mineral phases and thermally induced transformations, including the anatase–rutile transition above $\sim 800^\circ\text{C}$ [21] and redox-dependent hematite–magnetite phases [22]. In addition, Raman analysis of carbonaceous phases has been used to estimate firing temperatures of archaeological ceramics from Eastern Kazakhstan [23].

Methodology

Description of the Studied Ceramic Materials. The Urysay-2 settlement is located in the upper reaches of the Kyzylkaynar Stream valley (Banditsay, according to local shepherds), 800 meters southwest of the Abdogala farm and stream and 1.8 kilometers south of Mount Karashagyl in the Zhambyl district of the Almaty region (Figure 1). The settlement is located in a gentle gorge between two hills, where surface sherds, possible leveled stepped terraces, and disordered rows of boulders suggest the existence of a settlement with burial objects. Judging by the available sherd types, the settlement was inhabited from the Late Bronze Age (characteristic low-temperature coal-black color with numerous inclusions in the internal composition and red-orange granulated exterior, some with textile imprints), the Early Iron Age, the Medieval Period, and the Ethnographic Period [24]. Four fragments of ceramic pottery were selected for further study (Figure 2).

Raman Spectroscopy. The primary analysis of the phase composition of the ceramic samples was performed using Raman spectroscopy. The experiments were prepared using the LabRam HR spectrometer (Horiba Gr, France) with a Leica M165 microscope equipped with a Ag laser with an excitation wavelength of 633 nm, a x20 objective, an 1800 grating, and a confocal hole of 100 μm . Raman spectra were recorded at different local points on the surface of the studied fragments. All spectra were measured in the range of 50–1800 cm^{-1} , and the exposition for each point was 4–5 min. The tentative

Despite their wide application in European and Asian archaeometry, systematic studies of ceramic complexes from Kazakhstan remain scarce. As part of ongoing research into cultural heritage and the comparative analysis of technological traditions across different regions, the present work applies X-ray microtomography and Raman spectroscopy to ceramic fragments excavated at the Urysay-2 settlement in the Zhambyl district of the Almaty region. The site, first discovered in 2020 by R. Sala and J.-M. Deom, covers an area of 2.5 hectares ($100 \times 25 \text{ m}$), is naturally sheltered from prevailing winds, and oriented toward southern solar exposure, making it an ideal location for a winter camp [24]. The aim of this study is to apply X-ray microtomography and Raman spectroscopy for the non-destructive characterization of ceramic fragments from Urysay-2, focusing on the quantitative analysis of inclusion morphology and mineralogical composition in order to reconstruct raw material preparation and firing technologies.

identification of the Raman spectra was performed by comparing the obtained spectra with the reference data [25].

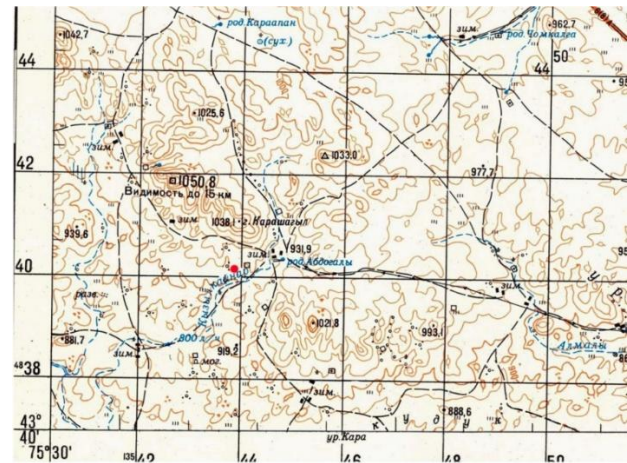


Figure 1 – Topographic map of the settlement Urysay-2 at a scale of 1:100,000 K-43-08

X-ray Microtomography. Tomographic studies were carried out using microtomography to obtain 3D models of the internal structure without destroying the samples. The method is based on the registration of a series of 2D projections during sequential rotation of the sample and subsequent reconstruction of volumetric data using filtered back projection (FBP) in cone geometry. This approach ensures visualization of pores, inclusions and cracks, as well

as quantitative morphometric analysis (volume fraction, size distribution, S/V, etc.) [18]. Measurements were carried out on a specialized IMAX microtomograph (PRODIS Compact), with a Spellman XRB011 microfocus X-ray source [26]. The tomograph operates both in 2D real-time fluoroscopy mode and in 3D tomography mode with a spatial resolution of up to 1 μm . The following parameters were used to study the artifacts: X-ray tube voltage of 70–80 kV, current of 50 μA , image pixel size of 35–45 μm , and voxel size after reconstruction of 35 $\times$ 35 μm^2 . A 150 μm thick copper filter was used to reduce the low-energy component of the spectrum. Tomographic data were obtained in the step-by-step sample rotation mode: up to 900

projections with an angular step of 0.4°, averaging 5 frames, and an exposure of 100–400 μs . Images were corrected for background noise and normalized by radiation intensity using the ProDIS software package. Image acquisition and adjustment (normalization, adjustment, filtering, and measurements, etc.), and the choice of energies and source current are performed using the ImageJ software package [27], written in Python. Reconstruction and visualization of 3D data were performed using VGStudio MAX 2.2, ImageJ, and its BoneJ module. This method allowed us to obtain detailed 3D models of the studied objects and identify the distribution of inclusions, pores, and cracks.

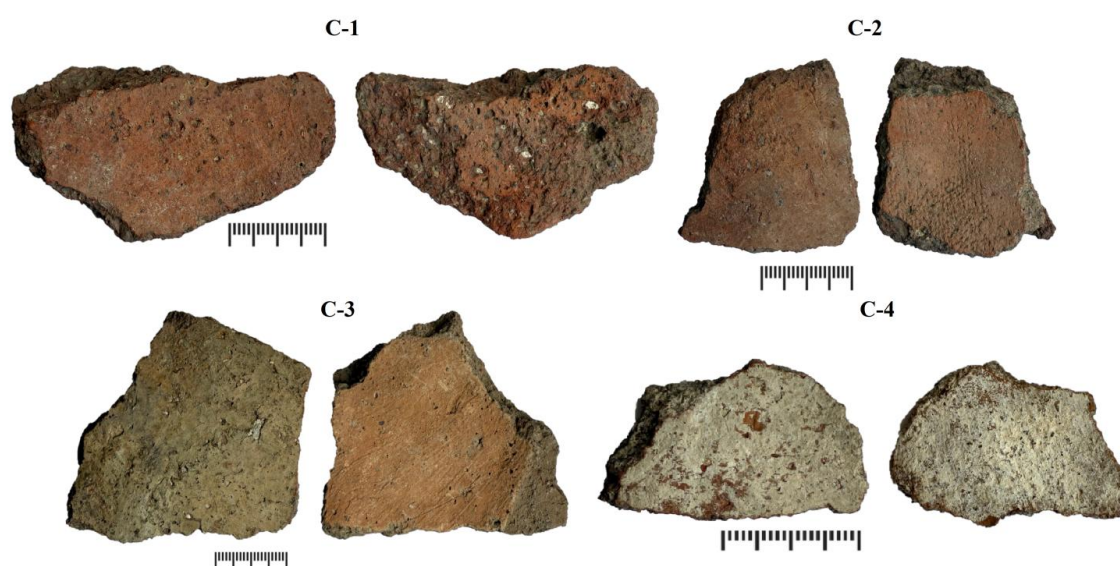


Figure 2 – The photos of the ceramic fragments and its sample labels. The scale bar is shown 2 cm.

Results and discussion

Raman spectroscopy. Using Raman spectroscopy, the mineral composition of ceramic samples from the Urysay-2 site (Almaty region, Kazakhstan). Identified phases include quartz, feldspar (albite), anatase, rutile, carbonaceous matter (D/G bands), calcite, and iron oxides (hematite and magnetite) (Table 1-2). Quartz was detected in all samples with characteristic bands near 127–206–355–464 cm^{-1} [28]. Feldspar was recorded through bands at ~ 285 and $478\text{--}512$ cm^{-1} , consistent with albite (NaAlSi₃O₈) [29]. Anatase is confirmed by its strong line at ~ 152 cm^{-1} and accompanying modes at ~ 396 and 642 cm^{-1} . In sample C-2, rutile was also identified, indicating partial phase transformation of TiO₂ at elevated temperatures in the range of 800–1000 $^{\circ}\text{C}$ [30]. Carbonaceous bands D ($\sim 1330\text{--}1346$ cm^{-1}) and G ($\sim 1560\text{--}1575$ cm^{-1}) were present in all

samples, suggesting organic temper or incomplete combustion during firing [23]. Calcite (ν_1 $\sim 1087\text{--}1088$ cm^{-1}) was found in C-1 and C-3, while hematite (Fe₂O₃) and magnetite (Fe₃O₄) were variably present [31]. In sample C-1, the coexistence of calcite and hematite suggests either moderate firing temperatures ($\leq 750\text{--}800$ $^{\circ}\text{C}$) in an oxidizing atmosphere or secondary recrystallization of calcite within pores after firing. The presence of rutile in C-2 reflects the anatase $\rightarrow$ rutile transition, which occurs at temperatures above ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ [30, 32]. Together with hematite, this indicates the highest-temperature oxidizing conditions among all samples. In contrast, samples C-1 and C-3 with calcite and anatase reflect moderate firing temperatures, whereas C-4 likely experienced higher temperatures under reducing conditions. Redox atmosphere: hematite in C-1–C-3

points to predominantly oxidizing conditions, while magnetite in C-4 indicates a reducing atmosphere [33]. The dominance of magnetite together with

carbon bands suggests reducing or fluctuating redox conditions with incomplete combustion of organic matter.

Table 1 – Representative samples with mineralogical composition and the list of Raman band position characteristic of the various compounds (w–weak, m–medium, s–strong).

Sample	Mineral phases	Main vibrational bands (cm ⁻¹)
C-1	Quartz (SiO ₂)	123(m), 202(m), 355(w), 463(s)
	Calcite (CaCO ₃)	1088(s)
	Albite Na(AlSi ₃ O ₃)	160(m), 285(m), 408(w), 478(s) , 506(s)
	Carbon	1334(s) , 1560(s)
	Hematite (Fe ₂ O ₃)	184(s) , 250(s) , 406(m), 462(m), 688(m)
C-2	Quartz (SiO ₂)	128(m), 204(m), 465(s)
	Anatase (TiO ₂)	152(s) , 205(w), 396(w), 510(w), 642(m)
	Carbon	1334(s) , 1573(s)
	Albite Na(AlSi ₃ O ₃)	156(m), 285(m), 401(w), 462(m), 511(m)
	Hematite (Fe ₂ O ₃)	216(s) , 277(s) , 463(w), 1307(w)
C-3	Rutile (TiO ₂)	143(w), 232(m), 415(s), 606(s)
	Quartz (SiO ₂)	124(m), 195(m), 352(w), 462(s)
	Anatase (TiO ₂)	152(s) , 203(w), 394(w), 508(w), 632(m)
	Calcite (CaCO ₃)	1087(s)
	Carbon	1344(s) , 1565(s)
C-4	Albite Na(AlSi ₃ O ₃)	158(m), 286(m), 407(w), 477(s) , 512(s)
	Hematite (Fe ₂ O ₃)	212(s) , 277(s)
	Quartz (SiO ₂)	127(m), 206(m), 351(w), 464(s)
	Anatase (TiO ₂)	151(s) , 205(w), 403(w), 510(w), 633(m)
	Carbon	1346(s) , 1575(s)
	Magnetite (Fe ₃ O ₄)	206(m), 299(m), 473(s), 670(s)

Table 2 – Distribution of mineral phases in ceramic samples based on Raman spectroscopy results. The "+" sign indicates positive phase identification

Sample	Observed phases					
	Quartz	Anatase	Albite	Carbon	Calcite	Hematite
C-1	+		+	+	+	+
C-2	+	+	+	+		+
C-3	+	+	+	+	+	+
C-4	+	+		+		+

X-Ray Microtomography. Three-dimensional 3D models of ceramic fragments (C-1–C-4) from the Urysay-2 complex were obtained using X-ray computed tomography (Figure 3). The distribution of internal heterogeneities, inclusion sizes (Table 3, Supplementary materials), pores, and cracks in the samples were taken from these models. Virtual

sections (Figure 3 (b,d)) reflected the internal component distributions and density differences. The X-ray interaction intensity, varying from blue (low) to red (high), indicated compositional differences. The reconstructed 3D models of the samples (Figure 3) revealed significant differences in their internal structure. Sample C-4 exhibits a high inclusion

content of ~1.15% of the total volume (Table 3). In contrast, sample C-3 has a more uniform structure and the lowest inclusion rate (~0.12%), indicating a dense

composition and uniform firing. The radiographic image also reveals numerous pores and cracks that formed during the firing of the ceramic ware.

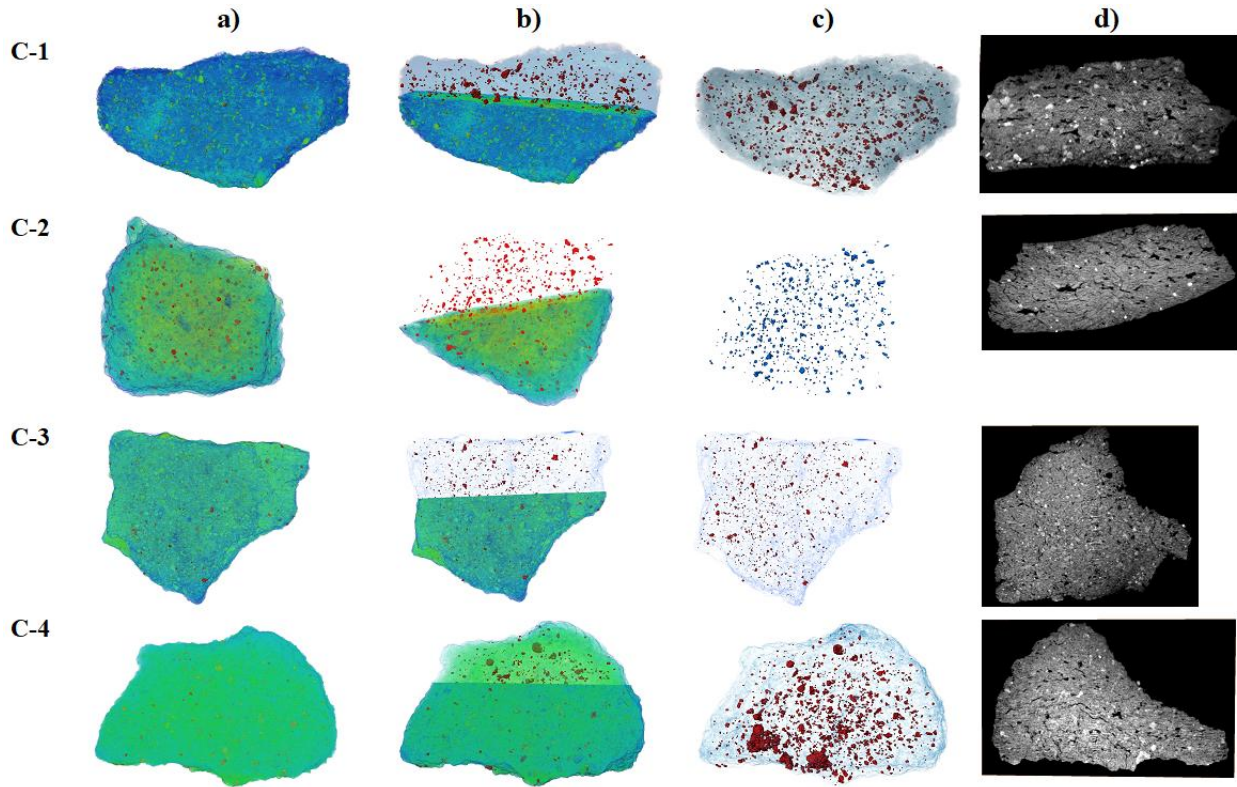


Figure 3 – 3D models (a) created after tomographic reconstruction and selected longitudinal sections (c) of a ceramic fragment. Rainbow coloring shows the degree of X-ray absorption from low (blue) to high (red). Internal features and inclusions are highlighted in green-red (b).

Table 3 – Calculated data on the volume of components of the studied ceramic fragments from computed tomography analysis.

Sample	Total Volume, voxel	Impurities Volume, voxel	Proportion of Impurities, %
C-1	311598784	1703699	0.55(1)
C-2	249769808	540539	0.25
C-3	617243008	743420	0.12
C-4	94542632	1088434	1.15

After segmenting the inclusions from the volume of the studied ceramic fragments, the sizes of these internal inclusions were studied and the equivalent diameter, elongation, and sphericity were quantified (Figure. 4–5, Supplementary Materials). The equivalent diameter parameter was used to estimate pore sizes [34].

$$D = \sqrt[3]{6 \times V / \pi}, \quad (1)$$

D – EqDiameter; V – volume 3D; π – pi number;

The average inclusion size varies from 0.25 to 0.35 mm, with median values between 0.21 and 0.30 mm. C-1 contains the largest inclusions on average (mean $\approx$ 0.35 mm, median $\approx$ 0.30 mm), while C-2 and C-3 are characterized by smaller and more uniform grains (mean $\approx$ 0.25–0.30 mm, median $\approx$ 0.21–0.25 mm). C-4 exhibits the widest size distribution, ranging from 0.13 mm up to 2.67 mm, consistent with less purified raw material. The statistical distribution of inclusion sizes appeared complex and multimodal. To analyse it, we employed non-parametric kernel density estimation of the probability density function,

with the optimal bandwidth determined by Silverman's criterion [35]. In this approach, we can

compare the calculated distributions from one sample to another.

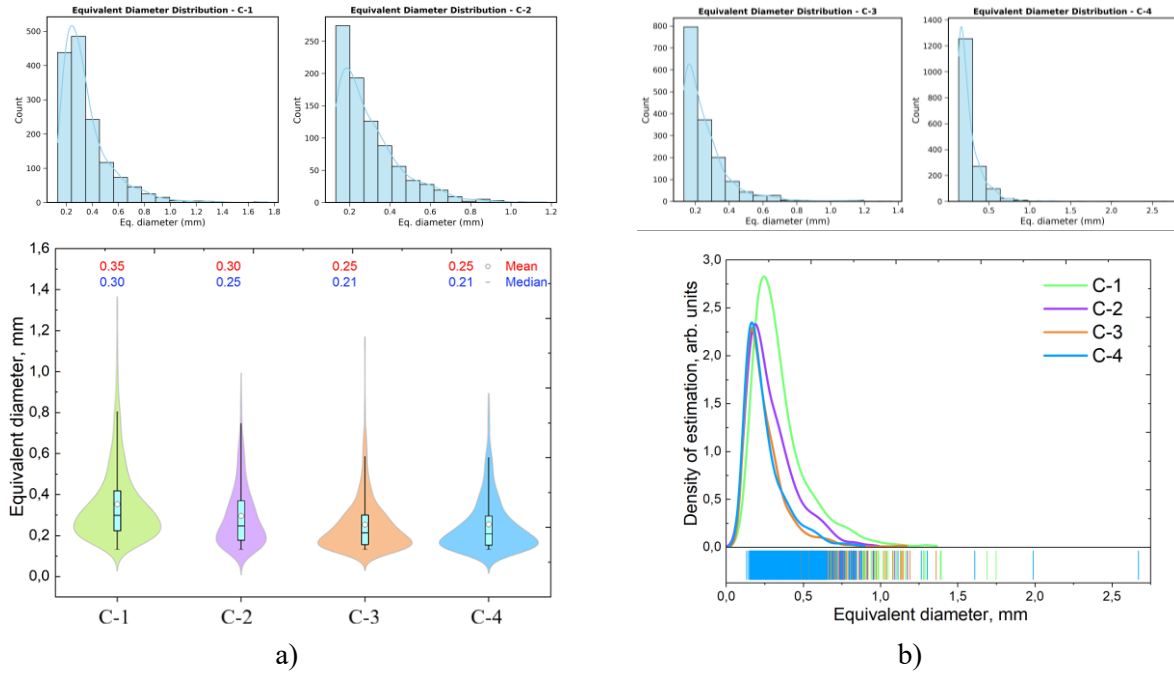


Figure 4 – (a) Violin plot of the distribution of data and the probability density of equivalent inclusion diameter. Calculated values of average and median inclusion sizes are presented at top. (b) Probability density function of equivalent diameter distribution is shown on the right.

The violin plots of equivalent diameter (Figure 4a) demonstrate distinct distribution patterns. Samples C-3 and C-4 display bimodal distributions, with populations of both fine and coarse inclusions. C-1 shows an asymmetric distribution with a long tail towards larger sizes, while C-2 is characterized by a narrow, nearly unimodal distribution, reflecting careful clay preparation. Kernel density estimation further highlights these differences, with well-defined maxima in C-3 and C-4. The next parameter that further differentiates the samples is the elongation of the internal inclusions ($E = 1 - b/a$, where a and b are the main axes of the ellipse/ellipsoid) [36]. Elongation values cluster around 0.6–0.7 for most samples, indicating predominantly sub-isometric shapes, though larger inclusions tend to be more elongated. Probability density functions of elongation (Figure 5a) exhibit two maxima: one near ~0.5 (flattened particles, aspect ratio ~1:2) and another near ~1.0 (isometric forms). This suggests a mixture of rounded temper grains and elongated fragments. Correlation analysis confirms a positive relationship between inclusion size and elongation ($r \approx 0.47$; Figure 5b), meaning that larger inclusions are generally more anisometric. Also, with tomography, we determined the sphericity of inclusions

$$\Psi = \frac{\pi^{1/3} \times (6 \times V)^{2/3}}{S},$$

Ψ – sphericity; π – pi number; V – Volume 3D; S – Area 3D; which made it possible to obtain additional information about the studied samples (Supplementary materials).

Sphericity values support these observations. C-2 and C-3 have the most rounded inclusions (mean $\Psi \approx 0.96$ – 0.97), consistent with refined temper and stable firing conditions. C-1 shows slightly lower sphericity (mean $\Psi \approx 0.90$), reflecting the presence of irregular particles. C-4 exhibits the lowest values (mean $\Psi \approx 0.94$), together with a wide range (0.23–1.0), indicating the use of coarser, angular fragments.

Overall, X-ray tomography reveals a technological contrast: C-2 and C-3 represent carefully prepared ceramics with uniform microstructures, while C-1 and especially C-4 reflect the use of heterogeneous raw materials and coarser tempering practices. These differences are consistent with the coexistence of parallel production traditions within the Urysay-2 settlement.

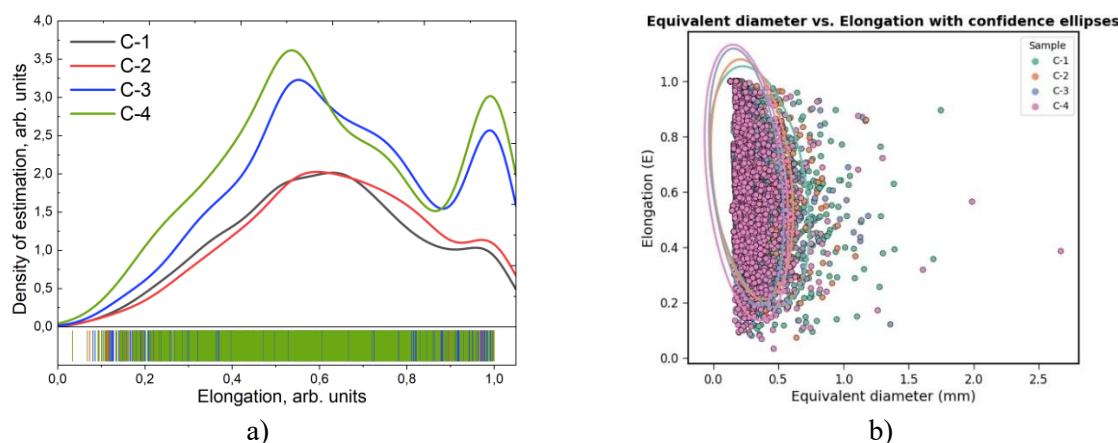


Figure 5 – (a) Probability density function of the elongation (b) distribution of inclusions in ceramic fragments.

Conclusions

This study demonstrates the effectiveness of combining X-ray microtomography and Raman spectroscopy for the non-destructive characterization of ancient ceramics from Kazakhstan. Raman spectroscopy identified quartz, feldspar, calcite, hematite, anatase/rutile, and magnetite as mineralogical markers of firing temperature and redox conditions. X-ray microtomography provided quantitative morphometric parameters of inclusions, revealing significant technological variability between the samples. This work demonstrates the

potential of non-destructive physical methods for the quantitative characterization of ancient ceramics and highlights their broader applicability to the study of porous and composite materials.

Acknowledgments

This work was supported by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Grant No. AP23490652.

Author Contributions

A.Zh. Zhomartova: Conceptualization, Methodology, Writing – original draft; **M. Kenessarin:** Investigation, Data curation, Resources; **K. Nazarov:** Conceptualization, Investigation, Data curation, Resources; **S.E. Kichanov:** Supervision, Conceptualization, Writing – review & editing; **R.S. Zhumatayev:** Methodology, Investigation; **J.-M. Deom:** Investigation, Data curation; **A. Smat:** Investigation, Writing – review & editing; **B. Mukhametuly:** Project administration, Investigation, Methodology.

References

1. P. Singh, E. Mal, A. Khare, and S. Sharma, A study of archaeological pottery of Northeast India using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS), *J. Cult. Herit.* **33**, 71–82 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.011>
2. M. Mednikova, I. Saprykina, S. Kichanov, and D. Kozlenko, The Reconstruction of a Bronze Battle Axe and Comparison of Inflicted Damage Injuries Using Neutron Tomography, Manufacturing Modeling, and X-ray Microtomography Data, *J. Imaging* **6**, 45 (2020). <https://doi.org/10.3390/jimaging6060045>
3. N. Kardjilov, F. Fiori, G. Giunta, A. Hilger, F. Rusticheli, M. Strobl, J. Banhart, and R. Triolo, Neutron tomography for archaeological investigations, *J. Neutron. Res.* **14**, 29–36 (2006). <https://doi.org/10.1080/10238160600673201>
4. A. Fedrigo, M. Strobl, A.R. Williams, K. Lefmann, P.E. Lindelof, L. Jørgensen, P. Pentz, D. Bausenwein, B. Schillinger, and A. Kovyakh, Neutron imaging study of ‘pattern-welded’ swords from the Viking Age, *Archaeol. Anthropol. Sci.* **10**, 1249–1263 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0454-5>
5. F. Grazi, F. Cantini, F. Salvemini, A. Scherillo, B. Schillinger, A. Kaestner, D. Edge, and A. Williams, The investigation of Indian and central Asian swords through neutron methods, *J. Archaeol. Sci. Rep.* **20**, 834–842, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.06.010>
6. A. Zh. Zhomartova, K. M. Nazarov, M. Kenessarin, Z. S. Samashev, R. S. Zhumatayev, D. M. Janseitov, and S. E. Kichanov, The neutron imaging studies of the metal archaeological objects from the Eleke Sazy complex, *Eurasian J. Phys. Funct. Mater.* **8**, 79–83, (2024). <https://doi.org/10.69912/2616-8537.1189>
7. B. Bakirov, I. Saprykina, S. Kichanov, R. Mimokhod, N. Sudarev, and D. Kozlenko, Phase Composition and Its Spatial Distribution in Antique Copper Coins: Neutron Tomography and Diffraction Studies, *J. Imaging* **7**, 129 (2021).

<https://doi.org/10.3390/jimaging7080129>

8. F. Salvemini, S. R. Olsen, V. Luzin, U. Garbe, J. Davis, T. Knowles, and K. Sheedy, Neutron tomographic analysis: Material characterization of silver and electrum coins from the 6th and 5th centuries BCE, *Mater. Charact.* **118**, 175–185, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.018>
9. N. Kardjilov, and F. Giulia (2017), *Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage*. Springer.
10. I.A. Saprykina, E.A. Khairidinova, S.E. Kichanov, A. V. Rutkauskas, N. M. Belozeroва, and D. P. Kozlenko, *Archaeol. Cult. Anthropol.* **4**, 167–181 (2022). <https://doi.org/10.55086/sp224167181>
11. B.A. Abdurakhimov, S.E. Kichanov, C. Talmatchi, D.P. Kozlenko, G. Talmatchi, N. M. Belozeroва, M. Balasoiu, and M. C. Belc, Studies of ancient pottery fragments from Dobrudja region of Romania using neutron diffraction, tomography and Raman spectroscopy, *J. Archaeol. Sci. Rep.* **35**, 102755 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102755>
12. A.Zh. Zhomartova, B.A. Bakirov, S.E. Kichanov, R.S. Zhumatayev, A.T. Toleubayev, S. Shakenov, and D. P. Kozlenko, Non-destructive structural studies of ceramic fragments of ancient tribes of Kazakhstan, *Eurasian J. Phys. Funct. Mater.* **7**, 79-90 (2023). <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2023070201>
13. M. Kenessarin, K. Nazarov, V. Smirnova, S. Kichanov, N. Torezhanova, O. Myakisheva, A. Zhomartova, B. Mukhametuly, R. Nemkayeva, and E. Myrzabekova, An Analysis of the Pore Distribution in Ceramic Vessels from the Akterek Burial Archeological Site Using Neutron Tomography Data, *Heritage* **8**, 210, (2025). <https://doi.org/10.3390/heritage8060210>
14. M.S. Tite, Ceramic production, provenance and use - a review, *Archaeometry* **50**, 216–231 (2008). <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00391.x>
15. G. Eramo, A. Mangone, Archaeometry of ceramic materials, *Phys. Sci. Rev.* **4**, (2019). <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0014>
16. S. Huang, B. Xue, Y. Zhao, and J. Yang, Characterization of primary silicate minerals in Earth-like bodies via Raman spectroscopy, *J. Raman Spectrosc.* **55**, 625–636 (2024). <https://doi.org/10.1002/jrs.6657>
17. A.Z. Zhomartova, B.A. Abdurakhimov, C. Talmatchi, S.E. Kichanov, D.P. Kozlenko, M. Bălăsoiu, G. Talmatchi, C. Şova, and M.C. Belc, The systematic structural studies of some Byzantine ceramic fragments from Dobrudja region of Romania: Raman spectroscopy, neutron diffraction, and imaging data, *Archaeometry* **66**, 787–802 (2024). <https://doi.org/10.1111/arcm.12947>
18. Z. Lin, Y. Deng, L. He, Z. Peng, and X. Duan, Microscale Investigation of Aggregate Stability Characteristic and Pore Structure of Collapsing Wall in Granite Red Soil, *Land Degrad. Dev.* 1–16 (2025). <https://doi.org/10.1002/ldr.70106>
19. D. Braun, *Am Antiq* **47**, 55–71 (1982).
20. P.R. Thomson, R. Ellis, D. Chiarella, and S. Hier-Majumder, Microstructural Analysis From X-Ray CT Images of the Brae Formation Sandstone, North Se, *Front. Earth Sci.* **8**, 246 (2020). <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00246>
21. P. McManus, and S. Fleming, *J. Mater. Sci.* **31**, 4567–4573 (1996).
22. D.L.A. de Faria, and F. N. Lopes, *J. Raman Spectrosc.* **28**, 873–878 (2007).
23. B. Bakirov, A. Zhomartova, S. E. Kichanov, R. Zhumatayev, A. T. Toleubayev, K. Nazarov, D. Kozlenko, and A. M. Nazarova, Non-destructive neutron structural studies of ancient ceramic fragments of the cultural heritage of the Republic of Kazakhstan, *Eur. J. Phys. Funct. Mater.* **6**, 56–70 (2022). <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060106>
24. R. Sala, and J.-M. Deome, Cultural landscape of Mount Karashagyl in the south-eastern part of the Chu-Ili Mountains // “XV Orazbaev oculary” halykaralyk gylimi-adistemelik konferensia materialdary / ed. R.S. Zhumataev. – Almaty: Kazakh University, 2023. P.108-113. (in Russ.)
25. B. Lafuente, R.T. Downs, H. Yang, and N. Stone, The power of databases: The RRUFF project, *Highlights Miner. Crystallogr.* 1–30 (2015). <https://doi.org/10.1515/9783110417104-003>
26. I. Chuprakov, K. Nazarov, B. Mukhametuly, A. Bekbayev, Y. Arynbeke, M. Kenessarin, Y. Bazarbayev, E. Myrzabekova, A. Nazarova, B. Abdurakhimov, and I. Zel, IMAX – a compact x-ray microtomography instrument for material research, *Herald Kazakh-Brit. Tech. Univ.* **22**, 298-306 (2025). <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-1-298-306>
27. C.A. Schneider, W.S. Rasband, and K.W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods* **9**, 671–675 (2012). <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
28. N. Buzgar, A. I. Apopei, and A. Buzatu, Characterization and source of Cucuteni black pigment (Romania): vibrational spectrometry and XRD study, *J. Archaeol. Sci.* **40**, 2128–2135 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.034>
29. J.J. Freeman, A. Wang, K.E. Kuebler, B.L. Jolliff, and L.A. Haskin, Characterization of natural feldspars by raman spectroscopy for future planetary exploration, *Can. Mineral.* **46**, 1477–1500 (2008). <https://doi.org/10.3749/canmin.46.6.1477>
30. O. Boytsova, I. Zhukova, A. Tatarenko, T. Shatalova, A. Beiliukov, A. Eliseev, and A. Sadovnikov, The Anatase-to-Rutile Phase Transition in Highly Oriented Nanoparticles Array of Titania with Photocatalytic Response Changes, *Nanomaterials* **12**, 4418 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano1224418>
31. L. Medeghini, P.P. Lottici, C. De Vito, S. Mignardi, and D. Bersani, Micro-Raman spectroscopy and ancient ceramics: applications and problems, *J. Raman Spectrosc.* **45**, 1244–1250 (2014). <https://doi.org/10.1002/jrs.4583>
32. D.A. H. Hanaor, and C.C. Sorrell, Review of the anatase to rutile phase transformation, *J. Mater. Sci.* **46**, 855–

874 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5113-0>

33. K.F. McCarty, M. Monti, S. Nie, D.A. Siegel, E. Starodub, F.E. Gabaly, and J.D.L. Figuera, Oxidation of Magnetite(100) to Hematite Observed by in Situ Spectroscopy and Microscopy, *J. Phys. Chem. C* **118**, 19768-19777 (2014). <https://doi.org/10.1021/jp5037603>

34. I.Y. Zel, M. Kenessarin, S.E. Kichanov, M. Balasoïu, D.P. Kozlenko, K. Nazarov, M. Nicu, L. Ionascu, A.C. Dragolici, and F. Dragolici, Spatial distribution of graphite in cement materials used for radioactive waste conditioning: An approach to analysis of neutron tomography data, *Cem. Concr. Compos.* **119**, 103993 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103993>

35. J.S. Simon, Density Estimation, *Statist. Sci.* **19** 588 – 597 (2004). <https://doi.org/10.1214/088342304000000297>

36. V. Angelidakis, S. Nadimi, and S. Utili, Elongation, flatness and compactness indices to characterise particle form, *Powder Technol.* **396**, 689–695 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.027>

Information about authors:

Ayazhan Zhomartova – Senior Researcher, Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhomartova@jinr.ru).

Murat Kenessarin (corresponding author) – Junior researcher, Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: muratkenessarin@inp.kz).

Kuanys Nazarov – Head of laboratory, Laboratory of neutron physics, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: k.nazarov@inp.kz).

Sergey Kichanov – Head of the DN-12 group, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute of Nuclear Research, (Dubna, Russia; e-mail: ekich@nf.jinr.ru).

Rinat Zhumatayev – Head of the department of archaeology, ethnology and museology, faculty of history, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhumatayevr@gmail.com).

Jean-Marc Deom, Researcher, faculty of history, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: jeandeom@kaznu.kz).

Aiaru Smat – Master's student, faculty of physics and technology, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: aiarualtaikhan01@gmail.com).

Bagdaulet Mukhametuly – Senior Researcher, Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: bagdaulet_m@inp.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Аяжан Жомартова – аға ғылыми қызметкер, нейтрондық физика зертханасы, ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан; e-mail: zhomartova@jinr.ru).

Мұрат Кенесарин (автор-корреспондент) – кіші ғылыми қызметкер, нейтрондық физика зертханасы, ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан; e-mail: muratkenessarin@inp.kz).

Куаныш Назаров – зертхана меңгерушісі, нейтрондық физика зертханасы, ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан; e-mail: k.nazarov@inp.kz).

Сергей Кичанов – НД-12 тобының басшысы, Франк нейтрондық физика зертханасы, Біріккен ядролық зерттеу институты, (Дубна, Ресей; e-mail: ekich@nf.jinr.ru).

Ринат Жуматаев – археология, этнология және мұражайтану кафедрасының меңгерушісі, тарих факультеті, Әл-фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан; e-mail: zhumatayevr@gmail.com).

Жан-Марк Деом – зерттеуші, тарих факультеті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан; e-mail: jeandeom@kaznu.kz).

Айару Слат – магистрант, физика техникалық факультеті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан; e-mail: aiarualtaikhan01@gmail.com).

Бағдәулет Мұхаметұлы – аға ғылыми қызметкер, нейтрондық физика зертханасы, Ядролық физика институты, (Алматы, Қазақстан; e-mail: bagdaulet_m@inp.kz).

Сведения об авторах:

Аяжан Жомартова – старший научный сотрудник, лаборатория нейтронной физики, Институт ядерной физики (Алматы, Казахстан; e-mail: zhomartova@jinr.ru).

Мурат Кенесарин (автор-корреспондент) – младший научный сотрудник, Лаборатория нейтронной физики, Институт ядерной физики (Алматы, Казахстан; e-mail: muratkenessarin@inp.kz).

Куаныш Назаров – заведующий лабораторией, Лаборатория нейтронной физики, Институт ядерной физики (Алматы, Казахстан; e-mail: k.nazarov@inp.kz).

Сергей Кичанов – руководитель группы ДН-12, Франковская лаборатория нейтронной физики, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Россия; e-mail: ekich@nf.jinr.ru).

Ринат Жуматаев – заведующий кафедрой археологии, этнологии и музеологии исторического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан; e-mail: zhumataeyevr@gmail.com).

Деом Жан-Марк – научный сотрудник исторического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан; e-mail: jeandeom@kaznu.kz).

Айару Смат – магистрант физико-технического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан; e-mail: aiarualtaikhan01@gmail.com).

Багдолет Мухаметули – старший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Института ядерной физики (Алматы, Казахстан; e-mail: bagdaulet_m@inp.kz).

Article history: received: 16 February 2026; revised: 01 April; accepted: 18 May 2026.

Мақала тарихы: түсті: 16 ақпан 2026; түзетілді: 01 сәуір; қабылданды: 18 мамыр 2026.

История статьи: поступила: 16 февраля 2026; после доработки 01 апреля; принята: 18 мая 2026.

В.М. Юров , К.Н. Жангозин* 
ТОО «ТСК-Восток», Астана, Казахстан
*e-mail: tskvstk@gmail.com

КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ И НАНОПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В КВАРЦЕ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПЕРКОЛЯЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Предложена квантовая модель формирования нанокластеров и наноплёнок металлов платиновой группы (МПГ) в кварцевых месторождениях. Модель опирается на представление о квантовом поверхностном нанослое металла с характерной толщиной $R_n \approx 0,7\text{--}0,8$ нм (по Юрову). В этом нанослое дискретизация электронных состояний, солитон-опосредованный перенос и эффекты поверхностного предплавления могут стабилизировать ультратонкие плёнки. Модель применена к месторождению Такыр-Кальджир (Восточный Казахстан), где МПГ наблюдаются в виде плёнок и кластеров нанометрового масштаба (порядка единиц нанометров) при содержаниях до 66,5 ppm. Геохимические данные указывают на полигенетическое происхождение: гидротермальный перенос $Pd\pm Pt$ в виде хлоридных комплексов и механическая денудация $Ir\text{--}Os$. Ключевое предсказание модели — перколяционная проводимость через сеть нанокластеров — согласуется с результатами электрогидравлического дробления: обычный кварц разрушается по границам зерен, микротрещинам, тогда как образцы Такыр-Кальджира распадаются на рваные ячеистые структуры, что указывает на вклад туннельного/прыжкового переноса.

Ключевые слова: квантовый поверхностный слой, наноплёнки МПГ, солитонный транспорт, перколяционная проводимость, электрогидравлическое дробление, транзитно-аккумулятивное месторождение, геохимия РЗЭ.

В.М. Юров, К.Н. Жангозин*
«ТСК-Восток» ЖШС, Астана, Қазақстан
*e-mail: tskvstk@gmail.com

Кварцтағы платина тобы металдарының нанокластерлері мен наноқабықшаларының түзілуінің кванттық моделі: перколяциялық өткізгіштікті эксперименттік растау

Кварц кен орындарындағы платина тобы металдарының (ПТМ) нанокластерлері мен наноқабықшаларының түзілуінің кванттық моделі ұсынылған. Модель $R_n \approx 0,7\text{--}0,8$ нм (Юров бойынша) сипаттамалық қалыңдығы бар кванттық беттік наноқабат тұжырымдамасына негізделген. Бұл наноқабатта электрондық күйлердің дискретизациясы, солитондық тасымалдау және беттік алдын ала балқу әсерлері үздіксіз ультражіңішке қабықшаларды тұрақтандыра алады. Модель ПТМ 66,5 ppm дейінгі мөлшерде нанометрлік масштабтағы наноқабықшалар мен нанокластерлер түрінде кездесетін Тақыр-Қалжыр кен орнына (Шығыс Қазақстан) қолданылған. Геохимиялық деректер полигенетикалық шығу тегін көрсетеді: $Pd\pm Pt$ хлоридті кешендер түрінде гидротермалық тасымалдануы және $Ir\text{--}Os$ механикалық денудациясы. Модельдің негізгі болжамы — нанокластерлер желісі арқылы перколяциялық өткізгіштік — электрогидравликалық ұсақтау нәтижелерімен сәйкес келеді: қарапайым кварц типтік морт траекториялар бойынша бұзылады, ал Тақыр-Қалжыр үлгілері жыртық ұшықты құрылымдарға ыдырайды, бұл туннельдік/секірмелі тасымалдау үлесін көрсетеді.

Түйін сөздер: кванттық беттік қабат, ПТМ наноқабықшалары, солитондық тасымалдау, перколяциялық өткізгіштік, электрогидравликалық ұсақтау, транзиттік-аккумулятивтік кен орны, СЖЭ геохимиясы.

V.M. Yurov, K.N. Zhangozin*
 TSK-Vostok LLP, Astana, Kazakhstan
 *e-mail: tskvstk@gmail.com

Quantum model of PGM nanocluster and nanofilm formation in quartz: experimental verification of percolation conductivity

A quantum model is proposed for the formation of platinum-group metal (PGM) nanoclusters and nanofilms in quartz deposits. The model is based on the concept of a quantum surface nanolayer with characteristic thickness $R_n \approx 0.7\text{--}0.8$ nm (Yurov). Within this nanolayer, discretization of electronic states, soliton-mediated transport, and surface premelting effects can stabilize continuous ultrathin films. The model is applied to the Taqyr-Qalzhyr deposit (Eastern Kazakhstan), where PGMs occur as nanometer-scale nanofilms and nanoclusters (on the order of single nanometers) with contents up to 66.5 ppm. Geochemical data indicate polygenetic origin: hydrothermal transport of Pd±Pt as chloride complexes and mechanical denudation of Ir–Os. The key prediction of the model—percolation conductivity through a nanocluster network—is consistent with electrohydraulic crushing results: ordinary quartz fractures along typical brittle trajectories, while Takyr-Kalzhyr samples disintegrate into ragged cellular structures, indicating contributions from tunneling/hopping transport.

Keywords: quantum surface layer, PGM nanofilms, soliton transport, percolation conductivity, electrohydraulic crushing, transit-accumulative deposit, REE geochemistry.

Введение

В работе [1] мы предложили новый «транзитно-аккумулятивный» тип минерализации МПГ для месторождения Такыр-Кальджир. Настоящая статья развивает эту концепцию для ответа на вопрос: какой механизм управляет формированием аномально тонких (порядка единиц нанометров) плёнок МПГ на поверхности кварца?

Большинство промышленных месторождений МПГ связано с магматическими системами. Комплекс Бушвельд (ЮАР) и Великая Дайка (Зимбабве) содержат МПГ в расслоённых мафит-ультрамафитовых интрузиях как включения в хромите или сульфидах [2, 3]. Месторождения Норильска содержат МПГ в Cu-Ni сульфидах [4]. Эти системы характеризуются: (1) магматической кристаллизацией *in situ*, (2) сульфидными/хромитовыми минералами-хозяевами, (3) содержаниями 3–5 ppm, (4) петрогенетическими моделями на основе силикатно-сульфидной несмесимости.

Классические модели не объясняют наблюдения на Такыр-Кальджире (Восточный Казахстан, эоцен): МПГ встречаются в виде ультратонких плёнок нанометрового масштаба в кварце (данные СЭМ); валовое содержание достигает 66,5 ppm — на порядок выше Бушвельда; Pd-обогащённые наноплёнки коррелируют с окисленными фациями, тогда как Ir-Os — обломочные зёрна в восстановленных фациях; P3Э-сигнатура ($\Sigma\text{REE} \approx 274$ ppm, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5,73$, $\text{Y}/\text{Ho} = 22,9$) характерна для F/Cl-содержащих гидротермальных флюидов.

Мы предполагаем многостадийный флюидно-сорбционный процесс: (1) транспорт Pd/Pt как хлоридных комплексов [5]; (2) аккумуляция в кварцево-галечных коллекторах; (3) восстановление и осаждение металлических Pd/Pt; (4) рост наноплёнок при квантовом ограничении. Физико-химическая модель основана на квантовой структуре поверхностного слоя металла [6, 7].

Теоретическая основа

Фундаментальная длина масштаба R_n

Модель основана на концепции квантового поверхностного слоя в металлах Юрова. В [6, 7] показано, что атомарно-гладкая металлическая

поверхность обладает квантово-механической структурой до характерной глубины R_n :

$$R_n = \beta \cdot 0,17 \times 10^{-9} \cdot \sqrt[3]{v(i)} \text{ [м]}, \quad (1)$$

где $v(i)$ — молярный объём, $\beta = 1-3$ учитывает кристаллическую структуру. Для ГЦК-металлов: Pd ($v = 8,85 \text{ см}^3/\text{моль}$) $\rightarrow R_n \approx 0,7 \text{ нм}$; Pt (9,10) $\rightarrow 0,7 \text{ нм}$; Ir (8,52) $\rightarrow 0,7 \text{ нм}$; Au (10,21) $\rightarrow 0,8 \text{ нм}$. Для гексагональных плотно упакованных металлов, таких как осмий, модель поверхностного слоя Юрова следует рассматривать как оценку характеристической шкалы длины реконструкции квантовой поверхности, а не строго изотропную толщину поверхностного слоя. Хотя абсолютное значение остается сопоставимым с значением благородных металлов ГЦК, эффективная глубина может зависеть от кристаллографической ориентации. Соответственно, для Os получается: Os: $v = 8,42 \text{ см}^3/\text{моль}$ $\rightarrow R_n \approx 0,7 \text{ нм}$ — это как и для остальных соответствует 3–4 атомным монослоям.

Нанометровый масштаб наблюдаемой морфологии относится как к толщине плёнок, так и к размеру нанокластеров. В рамках квантовой модели это отражает единый энергетический ландшафт, задаваемый фундаментальной длиной R_n : при сильном квантовом ограничении зародышеобразование кластеров может быть термодинамически предпочтительнее мгновенного формирования сплошной плёнки. Наблюдаемый нанофазный полиморфизм — прямое следствие квантового механизма в неравновесных геологических условиях.

Дискретные энергетические уровни и их роль в устойчивости нанофаз

В пределах поверхностного нанослоя толщины R_n электронное движение в направлении, перпендикулярном поверхности, оказывается квантово-ограниченным. Это приводит к появлению дискретных квази-двумерных состояний (квантование по толщине), что принципиально меняет плотность электронных состояний у уровня Ферми и, как следствие, поверхностную энергию и химический потенциал атомов в нанослое. Именно этим объясняется, почему на масштабе R_n возникают «особые» условия, при которых система предпочитает 2D-морфологию (ультратонкие плёнки) или, альтернативно, устойчивые 0D-зародыши (нанокластеры): меняется баланс «энергия поверхности $\leftrightarrow$ энергия границы $\leftrightarrow$ энергия упругих и дефектных искажений».

Квантование по толщине можно представить в виде модели «частицы в потенциальной яме»:

$$E_n = \left(\frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e} \right) \left(\frac{n}{d} \right)^2, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер состояния, d —

эффективная толщина квантово-ограниченного слоя (порядка R_n), m_e — эффективная масса. Экспериментальные подтверждения наличия квантованных поверхностных подзон в ультратонких металлических слоях получены методами фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением [8]. Для нашей модели важно не само значение E_n , а факт дискретизации, потому что она является физическим механизмом, связывающим нанометровую толщину R_n с изменением химического потенциала и, следовательно, с термодинамикой роста нанофаз.

Градиент химического потенциала как движущая сила латерального переноса

Квантово-ограниченный поверхностный слой характеризуется химическим потенциалом, отличающимся от объёмного. Для ГЦК-металлов это дополнительно усиливается реконструкцией поверхности (например, изменения межслоевого расстояния на Pd(111), Pt(111) [9]), что приводит к появлению градиента химического потенциала $\mu(z)$ вблизи поверхности. Схематически это можно записать как:

$$\mu(z) = \mu_{bulk} + \Delta\mu \cdot e^{-\frac{z}{\lambda}}, \quad (3)$$

где z — глубина, μ_{bulk} — химический потенциал в объёмной фазе, $\Delta\mu$ — избыточный поверхностный вклад, $\lambda \sim R_n/2$. Тогда $d\mu/dz$ задаёт «встроенную» термодинамическую тягу к перераспределению вещества в поверхностном слое. Здесь зависимость $\mu(z)$ следует понимать как индикатор того, что при $z \lesssim R_n$ формируется поверхностная зона с повышенным/пониженным химическим потенциалом по сравнению с объёмом. Это не означает «движущую силу вдоль поверхности» от $d\mu/dz$; латеральный перенос определяется градиентами химического потенциала вдоль поверхности, который возникает из-за неоднородного покрытия атомами (адсорбированными атомами), дефектов, ступеней, микротрещин и локальных различий адсорбции/восстановления. Роль поверхностной реконструкции и квантово-ограниченного слоя состоит в том, что они модифицируют энергетический ландшафт у поверхности (в частности, понижают барьеры миграции и изменяют энергию связи), тем самым повышая скорость латеральной диффузии в пределах нанослоя.

В практическом смысле это означает: атом, попавший на поверхность (после восстановления комплекса Pd/Pt), имеет пониженный эффективный барьер для миграции в пределах

нанослоя и может быстро перераспределяться по поверхности кварца, формируя либо непрерывные плёночные участки, либо насыщая центры нуклеации (кластеры). Таким образом, градиент μ — это связующее звено между квантовой природой нанослоя (R_n) и возможностью образования 2D-связных структур при умеренных температурах диагенеза.

Ускорение массопереноса: солитон-опосредованный транспорт и поверхностное предплавление

Ключевой вопрос для геологической среды: как обеспечить достаточно быстрый массоперенос металла по поверхности при 100–200 °С, чтобы успели сформироваться связные нанофазы. В квантовом нанослое R_n перенос может идти не только классической термоактивированной диффузией, но и через нелинейные коллективные возбуждения решётки, которые действуют как «носители» локализованной деформации и энергии. Юров и др. [7], а также ряд авторов [10, 11] обсуждают солитонные механизмы (краудионы, дискретные бризеры), которые способны переносить локальную перестройку атомной конфигурации на расстояния, существенно превышающие межатомное, без необходимости «перепрыгивать» высокий диффузионный барьер на каждом шаге.

Физический смысл для нашей модели таков: солитонные возбуждения эффективно понижают активационный барьер переноса в нанослое (ориентировочно с ~ 1 эВ до $\sim 0,1$ – $0,3$ эВ), что радикально увеличивает скорость массопереноса при умеренных температурах. Даже грубая оценка по Аррениусу показывает, что снижение барьера на $\sim 0,7$ – $0,9$ эВ при $T \sim 373$ – 473 К приводит к росту скорости на много порядков, делая возможным «быстрый» латеральный перенос в геологическом времени и формирование связных плёночных перемишек/коалесценцию кластеров.

Дополнительный вклад даёт поверхностное предплавление [12]: появление квазижидкого слоя на поверхности при $T \geq 0,2T_m$ резко

повышает подвижность адатомов и ускоряет коалесценцию. Для Pd это соответствует диапазону температур, сопоставимому с диагенетическим окном 100–200 °С, что согласуется с условиями формирования нанофаз в рассматриваемом объекте. В совокупности солитон-опосредованный перенос и предплавление обеспечивают механизм ускоренной «самосборки» нанофаз (наноплёнки $\leftrightarrow$ нанокластеры), необходимый для появления перколяционной связности металлической подсистемы. Следовательно, при наличии устойчивого притока Pd/Pt из флюида поверхность кварца способна быстро перераспределять металл в нанослое, что приводит к сосуществованию F1 (кластеры) и F2 (плёночные перемишки) и создаёт предпосылки для перколяционной проводимости.

Объект исследования

Месторождение Такыр-Кальджир расположено в Восточно-Казахстанском складчатом поясе. Геология включает палеозойский фундамент с габбро-диоритовыми и ультрамафитовыми телами, перекрытый мезозойско-кайнозойским чехлом. Такыр-Кальджирская разломная зона СЗ простирается сопоставляет девонские метаморфиты с эоценовыми осадками, создавая проницаемые каналы для гидротермальных флюидов.

Ключевые геологические единицы: *Ультрамафит-габбровые интрузии* — поставляют МПП путём гидротермального выщелачивания; Pd/Pt образуют хлоридные комплексы $[PdCl_4]^{2-}$, $[PtCl_6]^{2-}$ в окислительных условиях [13]. *Гранитоиды* — генерируют F/Cl-богатые флюиды. *Эоценовые осадки* — кварцево-галечные конгломераты служат проницаемыми ловушками.

Исследуемый материал — образцы кварцево-галечных конгломератов эоценового возраста из зоны окисления месторождения. Выделяются две основные фации: жёлтая (окисленная, обогащённая Fe-оксидами и Pd) и серая (восстановленная, обогащённая обломочными Ir-Os).

Материалы и методы исследования

Пробоподготовка

Образцы отбирались из керна скважин и канав на месторождении Такыр-Кальджир. Для геохимического анализа использовались композитные пробы (15 полевых дубликатов, гомогенизированных для представительности). Для гравитационного обогащения применялся

концентратор Кнелсона с получением концентрата и хвостов.

Аналитические методы

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS): определение концентраций редкоземельных элементов (РЗЭ) и

рассеянных элементов. Нормализация к CI-хондриту по Sun & McDonough (1989) [14].

Атомно-эмиссионная спектроскопия (ICP-AES): определение концентраций элементов платиновой группы (Pt, Pd, Ir, Os) после пробирной плавки с Ni-S коллектированием.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): морфологический анализ частиц после электрогидравлического дробления. Прибор: JSM-6390LV (JEOL) с энергодисперсионным анализатором.

Электрогидравлическое дробление (ЭИД)

Эксперименты проводились на установке импульсного разряда в водной среде. Параметры: напряжение 20–30 кВ, энергия импульса до 189 Дж. Образцы помещались в рабочую камеру с дистиллированной водой между электродами. После разряда продукты дробления извлекались и высушивались для СЭМ-анализа.

Для сравнения использовался результат измельчения ЭИД диэлектрического кварца из литературных источников [15]. Следует отметить, что параметры импульсного генератора в [15] (в частности, уровень напряжения) отличаются от использованных в настоящей работе. Однако в методе электрогидравлического дробления определяющими для механизма разрушения являются формирование плазменного канала и вводимая в разряд энергия/плотность энергии, а не само напряжение как таковое. В настоящей работе ключевой результат основан на сравнении «обычного» кварца и образцов Такыр-Кальджира, обработанных одним и тем же методом; публикация [15] используется лишь как ориентир типичной морфологии разрушения диэлектрического кварца при ЭИД.

Предлагаемая физико-химическая модель формирования нанофаз МПГ (нанокластеры и наноплёнки)

Стадия 1 — Флюидный транспорт и условия осаждения. Разломно-блоковое строение региона обеспечивает проницаемость и фокусировку глубинных флюидов, способных переносить Pd и Pt в виде устойчивых хлоридных комплексов. При подъёме и разгрузке флюида температура и солёность снижаются (условно от ~300 °C к ~100–150 °C), а кислотность смещается к слабокислым–нейтральным значениям, что меняет устойчивость комплексных форм и повышает вероятность их взаимодействия с минеральными поверхностями. Геохимическое моделирование по литературным данным [5] показывает высокую стабильность комплексов типа $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ и $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ (порядок $\log K_f \sim 18\text{--}20$,

где K_f — константа образования (устойчивости) хлоридного комплекса в водном растворе), что делает транспорт Pd/Pt реалистичным, но одновременно подразумевает резкое изменение поведения системы при разбавлении, нейтрализации и охлаждении флюида.

Стадия 2 — Адсорбционно-химическое закрепление на кварце. Поверхность кварца в зоне микротрещин и дефектов обогащена силанольными группами ($\equiv\text{Si-OH}$) и при pH выше ~2 приобретает отрицательный заряд, что облегчает взаимодействие с комплексами благородных металлов. Микротрещиноватость дополнительно увеличивает эффективную площадь контакта и создаёт локальные «ловушки» для адсорбированных комплексов. Фиксацию можно описать схематически как поверхностное комплексобразование/частичную замену лигандов с образованием связей $\equiv\text{Si-O-M}$ ($\text{M} = \text{Pd}, \text{Pt}$) и выделением HCl; максимум адсорбции ожидается в слабокислом диапазоне, где одновременно высока реакционная способность поверхности и не происходит полного подавления комплексных форм. На этой стадии кварц играет роль не только сорбента, но и подложки, задающей межфазную энергию и условия для последующей нуклеации.

Стадия 3 — Нуклеация и формирование металлических зародышей. При изменении Eh/pH, взаимодействии с восстановителями (Fe^{2+} -содержащие фазы, органическое вещество, поверхностные дефектные центры) или при локальной дегградации комплексов происходит восстановление и образование первичных металлических зародышей. На поверхности кварца появляется поток «адатомов» (адсорбированных атомов) МПГ, которые способны мигрировать по поверхности и конденсироваться в наноструктуры.

Стадия 4 — Два режима роста: 0D-нанокластеры и 2D-наноплёнки. Дальнейшая эволюция определяется конкуренцией двух кинетико-энергетических сценариев. При низком эффективном потоке металла и/или при сильной локализации на дефектах преобладает кластеризация: формируются 0D-нанокластеры, «закреплённые» на активных центрах кварца. При более высоком потоке металла и достаточной поверхностной подвижности адатомов возможен переход к 2D-росту с образованием ультратонких наноплёнок/перемычек. В рамках квантовой модели ключевым является наличие фундаментальной длины масштаба R_n порядка единицы нанометра (по Юрову), которая задаёт

квантовый поверхностный нанослой металла и меняет баланс энергии границы металл–SiO₂ и энергии поверхности. Это создаёт «окно» устойчивости ультратонких структур: на масштабе R_n становятся возможными как непрерывные 2D-фазы (наноплёнки), так и устойчивые нано-зародыши (кластеры) при сохранении дискретизации электронных состояний и специфической поверхностной динамики. Под «окном устойчивости» понимается диапазон толщин/размеров порядка R_n , в котором суммарная энергия ультратонкой структуры (вклад поверхности, границы металл–SiO₂ и квантово-размерный вклад) имеет локальный минимум. Поэтому вблизи $R_n \sim 1$ нм энергетически предпочтительными могут быть как непрерывные 2D-перемычки/наноплёнки, так и устойчивые 0D-зародыши (кластеры), тогда как при $d \gg R_n$ система переходит к «классическому» укрупнению (утолщение плёнки и/или агломерация), а при $d \ll R_n$ доминируют разорванные островковые состояния. Это отражает усиление роли поверхностной термодинамики и квантово-размерных эффектов при $d \sim R_n$.

Результаты и обсуждение

Геохимия РЗЭ

Результаты анализа содержания РЗЭ композитной фракции дают $\Sigma \text{REE} + \text{Y} = 325,7$ ppm ($\sim 54 \times \text{UCC}$). Хондрит-нормализованные спектры [14] показывают: $\text{LREE}/\text{HREE} = 5,30$; $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5,73$; умеренные отрицательные аномалии Ce

Стадия 5 — Сосуществование фаз и перколяционная связность (F1+F2).

Геологическая среда неизбежно неоднородна по флюидному потоку, дефектности кварца и локальным условиям восстановления. Поэтому наиболее естественным результатом является сосуществование кластерной подсистемы (F1) и плёночных перемычек/связок (F2). В таком смешанном ансамбле перенос заряда может осуществляться прыжковым/туннельным образом между близко расположенными наноклестрами и/или по ультратонким связкам, что приводит к перколяционной проводимости. Наблюдаемая при электрогидравлическом дроблении отличительная морфология разрушения (ячейность, «рваная» структура, множественные пути инициирования трещин) согласуется с наличием распределённой сети наноклестров, влияющих на локальные поля и пути разрядов/трещинообразования, а температурно- и полезависимая необратимость магнитного отклика соответствует релаксационной динамике ансамбля наноклестов, а не простому суммированию вкладов обычных магнитных минералов.

(Ce/Ce* = 0,72) и Eu (Eu/Eu* = 0,81); субхондритовое Y/Ho = 22,9, указывающее на F/Cl-содержащие гидротермальные флюиды [16, 17]. Комбинация указывает на транспорт РЗЭ окисленными галогенобогачёнными флюидами.

Таблица 1 – Концентрации РЗЭ для композитного образца

Элемент	Конц., ppm	C _N	Элемент	Конц., ppm
La	51,58	217,6	Tb	1,96
Ce	84,57	138,1	Dy	11,10
Pr	15,69	170,2	Ho	2,26
Nd	61,89	135,3	Er	6,60
Sm	13,73	92,7	Yb	6,17
Eu	3,56	63,1	Lu	0,93
Gd	12,92	64,8	Y	51,76

Примечание: $\Sigma \text{REE} + \text{Y} = 325,7$; $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5,73$; $\text{Y}/\text{Ho} = 22,9$; $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,72$; $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,81$

Систематика ЭПГ (элементы платиновой группы)

Данные по содержаниям ЭПГ исходных образцов выявляют полигенетические закономерности. Отношение Pd/Ir систематически различается между фациями: жёлтая фация характеризуется повышенным Pd/Ir = 2,6–3,2, тогда как серая фация демонстрирует

бимодальное распределение — либо высокие (Pd/Ir > 1), либо аномально низкие значения (Pd/Ir = 0,09–0,22). Это указывает на два генетических типа минерализации.

Геохимия рассеянных элементов

Механизм гидротермального транспорта дополнительно подтверждается составом

рассеянных элементов рудного материала. Коэффициенты концентрации (КК), рассчитанные как отношение содержания элемента в руде к среднему содержанию в земной коре, выявляют диагностическую геохимическую сигнатуру (табл. 3).

Наиболее яркая черта — экстремальное обогащение типичными флюидомобильными элементами: As (КК = 16,2) и Sb (КК = 11,0). Эти халькофильные элементы высокорастворимы в гидротермальных флюидах в виде тио- и хлорокомплексов и служат надёжными индикаторами флюидно-опосредованной минерализации. Напротив, сидерофильные элементы, типично обогащённые в магматических сульфидных системах, показывают субхондритовые значения: Ni (КК = 0,15) и Cu (КК = 0,04). Это выраженное Cu-Ni-обеднение эффективно исключает прямую генетическую связь с сульфидонасыщенными мафит-ультрамафитовыми расплавами, как в классических месторождениях норильского или бушвельдского типа.

Таблица 3 – Концентрации рассеянных элементов и коэффициенты концентрации (КК)

Элемент	Конц., ppm	Кларк, ppm	КК
Co	39,9	23	1,73
Ni	8,6	56	0,15
Cu	2,2	53	0,04
As	29,2	1,8	16,2
Mo	1,4	1,2	1,17
Sb	3,3	0,3	11,0

Примечание: Жирным выделены аномальные обогащения (КК > 10).

Экспериментальное подтверждение перколяционной проводимости

Для верификации объёмной проводящей фазы применён метод ЭИД при 10–30 кВ. Результаты выявили фундаментальное различие механики разрушения (рис. 1).

В обычном диэлектрическом кварце разряд локализуется по границам зёрен и макротрещинам, вызывая хрупкое расщепление с угловатыми обломками и раковистыми поверхностями; гранулометрия продуктов дробления относительно однородна [15].

В кварце Такыр-Кальджира морфология принципиально иная: «рваная» ячеистая структура с признаками объёмного коллапса и резко неоднородное распределение по размерам — мелкодисперсная фракция сосуществует со средними и крупными фрагментами (рис. 1с-d). Это указывает на распределение энергии разряда

через 3D-сеть проводящих включений (нанокластеров МПГ), вызывающих резистивный перегрев и множественные центры инициирования пробоя по топологии скрытой проводящей сети.

Структурные особенности (неправильная геометрия, отсутствие плоских граней, перешейки) несовместимы с чисто хрупким диэлектрическим разрушением. Аномалия однозначно указывает на перколяционную проводимость и подтверждает квантово-механическую связь нанокластеров (туннельная /прыжковая проводимость). Дополнительным аргументом в пользу физической реализуемости квантово-когерентного поведения металлических нанокластеров служит недавний эксперимент по материно-волновой интерферометрии [18], где показано, что наночастица металла может находиться в суперпозиции двух пространственно разделённых траекторий с расстоянием до 133 нм, существенно превышающим её собственный размер [18]. Это не является прямым доказательством переноса заряда в твёрдой матрице, но поддерживает допущение о том, что характерные масштабы квантовой делокализации /связи в нанометаллических объектах могут на порядки превышать их геометрические размеры, что согласуется с нашей интерпретацией перколяционного (туннельного/хоппингового) транспорта.

Значение квантовой модели. Настоящая работа представляет одно из первых применений концепции квантового поверхностного нанослоя металла R_n [6,7] к интерпретации рудной минерализации в кварцевых месторождениях. Предложенная модель важна тем, что переводит наблюдаемые наноморфологии МПГ из разряда «аномалий» в область количественно объяснимых следствий специфической физики ультратонкого металлического слоя и взаимодействия металл–SiO₂.

(1) **Ограничение толщины и морфологический “выбор” (2D vs 0D).** Наблюдаемая нанометровая толщина плёнок/перемычек согласуется с фундаментальной длиной R_n : вблизи $d \sim R_n$ суммарная энергия системы (поверхность + граница металл–SiO₂ + квантово-размерный вклад) может иметь локальный минимум, формируя «окно устойчивости» ультратонких структур. При $d \gg R_n$ квантовый вклад исчезает и рост переходит в классический режим (утолщение слоя и/или агломерация), что естественно объясняет сосуществование 2D-плёнок и 0D-кластеров в неоднородной геологической среде.

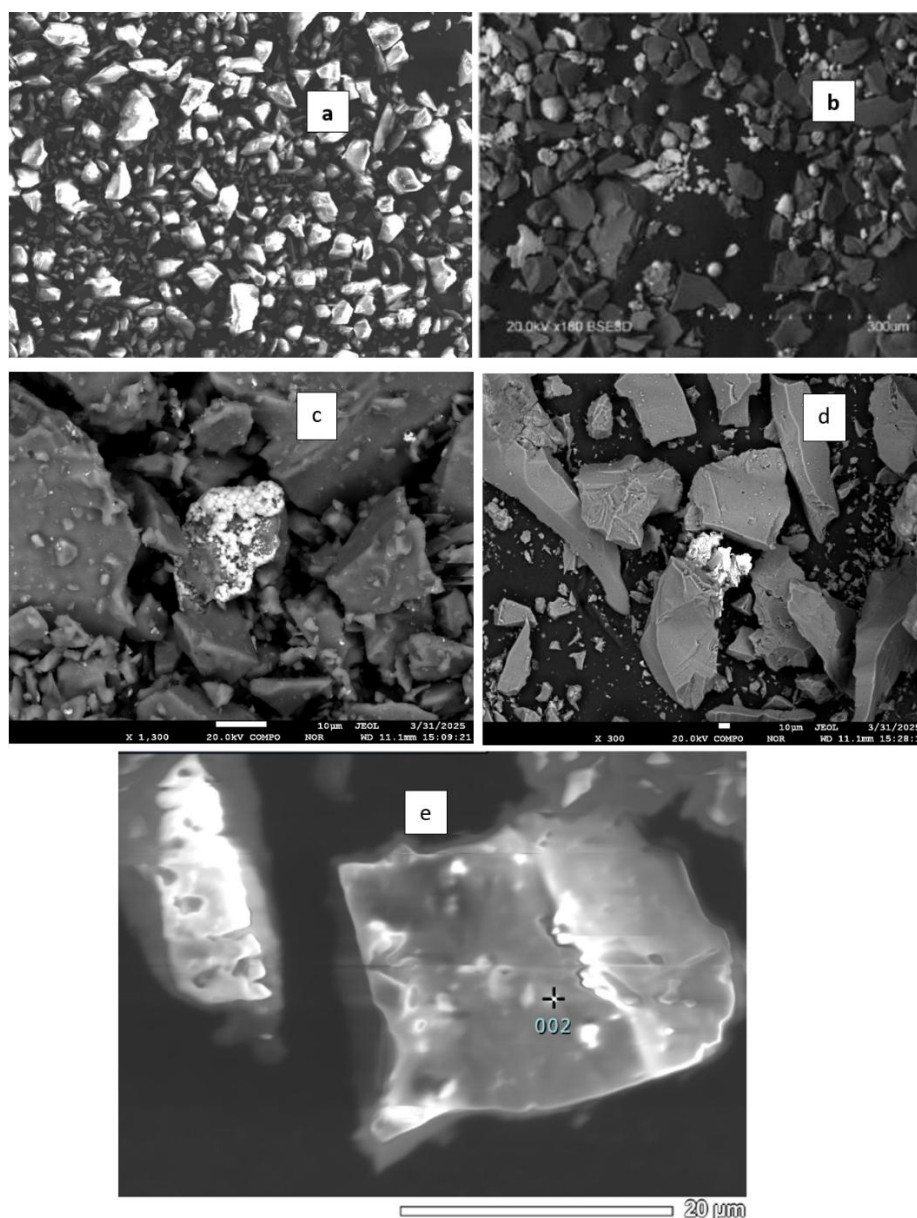


Рисунок 1 – СЭМ-изображения частиц кварца после ЭИД. (б) Обычный диэлектрический кварц: угловатые блоки с раковистыми поверхностями излома и узким распределением по размерам [15]. (а, с–е) МПГ-содержащий кварц Такыр-Кальджира: рваная ячеистая морфология и широкий разброс гранулометрического состава (от мелких осколков до крупных фрагментов), указывающие на множественные центры инициирования разряда через перколяционную сеть нанокластеров.

(2) Температурный порог и кинетика формирования в диагенетическом окне. Модель предлагает физический механизм ускоренного массопереноса в поверхностном слое: солитон-опосредованный транспорт и поверхностное предплавление становятся значимыми при $T \gtrsim 0,2 T_m$ (для Pd порядка 350 K), что соответствует реальным условиям диагенеза $\sim 100\text{--}200^\circ\text{C}$. Это снимает ключевую кинетическую проблему — как сформировать связанные наноплёнки/перемычки без высокотемпературных магматических режимов.

(3) Контроль подложки и роль кварца как “идеальной” матрицы. Наноплёнки требуют низкой межфазной энергии и наличия поверхностных дефектов/микротрещин, обеспечивающих центры нуклеации и высокую эффективную площадь. Кварц удовлетворяет этим условиям; оценка $\gamma_{\text{Pd-SiO}_2} \approx 0,5 \text{ Дж/м}^2$ указывает на благоприятную межфазную энергетику, а развитая трещиноватость и силанольные группы обеспечивают химическое закрепление предшественников и дальнейшую миграцию адатомов. Точное значение межфазной

энергии $\gamma_{\text{Pd-SiO}_2}$ зависит от состояния поверхности и химии интерфейса и требует отдельной оценки. В качестве порядка величины используем $\gamma \sim 0.1\text{--}0.5$ Дж/м², что согласуется с типичными диапазонами межфазных энергий/адгезии для металлических и металл-оксидных интерфейсов ($\gamma \sim 0.05\text{--}0.5$ Дж/м²) [19] и с тем, что для металл-оксидных границ адгезия часто имеет масштаб Дж/м² [19]; кроме того, расчеты показывают, что SiO₂ может обеспечивать существенно более сильную адгезию металла по сравнению с более ионными оксидами.

(4) Проверяемые предсказания модели. Модель предсказывает (i) наличие двух режимов роста (кластеризация при низком потоке металла и плёночные перемишки при повышенном потоке/подвижности), (ii) сильную чувствительность морфологии к дефектности кварца и параметрам поверхностной химии, (iii) возможность перколяционной связности металлической подсистемы за счёт сочетания 0D- и 2D-компонент. Эти выводы принципиально

проверяемы методами СЭМ/ТЕМ, поверхностной спектроскопии и физическими тестами (электрогидравлическое дробление, магнитные измерения), что делает модель не описательной, а предсказательной.

Недавние *in situ* наблюдения в жидкостной ячейке ПЭМ [20] показали, что на границе «минерал-вода» могут формироваться локальные межфазные микросреды (так называемые плотные жидкие межфазные слои), в которых происходит зарождение и рост наночастиц золота даже из крайне разбавленных (ppb-уровня) водных растворов Au. Хотя в указанной работе рассматривалась система «пирит-вода», общий вывод важен шире: нуклеация наночастиц может эффективно запускаться за счёт межфазной локализации вещества и интерфейсно-индуцированных химических/редокс-градиентов. Этот принцип можно рассматривать как возможную аналогию для интерпретации образования и перестройки нанопаз благородных металлов в силикатной (кварцевой) матрице — без привлечения сульфид-специфичных механизмов.

Заключение

1. Разработана квантовая модель формирования ультратонких наноплёнок МПГ (нанометрового уровня) на основе фундаментальной длины $R_n \approx 0,7\text{--}0,8$ нм, определяющей квантовый поверхностный слой с дискретными электронными состояниями.

2. Идентифицированы механизмы низкотемпературного массопереноса: солитон-опосредованная диффузия со сниженной энергией активации ($\sim 0,1\text{--}0,3$ эВ) и поверхностное предплавление, обеспечивающие коалесценцию при 100–200°C.

3. Геохимические данные Такыр-Кальджира ($\Sigma\text{REE}+\text{Y} = 326$ ppm, $\text{Y}/\text{Ho} = 22,9$, $\text{KK As} = 16,2$, $\text{KK Sb} = 11,0$, обеднение Cu-Ni) подтверждают гидротермальный транспорт Pd/Pt окисленными F/Cl-содержащими флюидами.

4. Эксперименты ЭИД дают прямое доказательство перколяционной проводимости через сеть нанокластеров МПГ: аномальная «рваная» морфология указывает на туннельный/прыжковый транспорт.

5. Месторождение Такыр-Кальджир установлено как новый «транзитно-аккумулятивный» тип минерализации МПГ, требующий наномасштабных диагностических подходов.

6. Первое применение квантовой модели поверхностного слоя металлов к геологии и экспериментальное обнаружение перколяционной проводимости.

7. Модель задаёт новый вектор поиска месторождений; метод ЭИД предлагается как экспресс-тест; результаты важны для технологий извлечения нанодисперсных МПГ.

Благодарности

Работа посвящена памяти профессора В.М. Юрова, скончавшегося в сентябре 2025 г. Его пионерские идеи в квантовой физике поверхностей составляют теоретический фундамент исследования.

Литература

1. K.N. Zhangozin, Proposed new geo-industrial subtype "Taqr-Qalzhyr Quartz-Hosted Fluid-PGE-REE", *Zenodo*, October 20, (2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.17401399> (in Russ).
2. R.G. Cawthorn, The platinum group element deposits of the Bushveld Complex, *Platinum Metals Rev.* **54**(4), 205–215 (2010). <https://doi.org/10.1595/147106710X520222>

3. T. Oberthür, The fate of platinum-group minerals in the exogenic environment, *Minerals* **8**(12), 581 (2018). <https://doi.org/10.3390/min8120581>
4. S.F. Sluzhenikin and A.V. Mokhov, Gold and silver in PGE–Cu–Ni ores of Noril'sk, *Miner. Deposita* **50**(4), 465–492 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0543-2>
5. S.A. Wood, B.W. Mountain, and P. Pan, The aqueous geochemistry of Pt, Pd and Au, *Can. Mineral.* **30**(4), 955–982 (1992).
6. V.M. Yurov et al., Quantum structure of the surface layer of metals, *Recent Contrib. Phys.* **90**(3), 93–107 (2024). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2024v90i3-012>
7. V.M. Yurov et al., Quantum properties of atomic-smooth metal surfaces, *Int. J. Appl. Fund. Res.* **12**, 52–57 (2024). <https://doi.org/10.17513/mjpf.13682>
8. J.J. Paggel, T. Miller, and T.C. Chiang, Quantum-well states in thin-film interferometer, *Science* **283**, 1709–1711 (1999). <https://doi.org/10.1126/science.283.5408.1709>
9. P.J. Feibelman, Relaxation of hcp (0001) surfaces, *Phys. Rev. B* **53**, 13740-13746 (1996). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.13740>
10. S.V. Dmitriev et al., Phonon states of strained graphene, *Comput. Mater. Sci.* **53**, 194–203 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.11.032>
11. F.M. Russell and J.C. Eilbeck, Moving breathers in layered crystal at 300 K, *EPL* **78**, 10004 (2007). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/78/10004>
12. B. Pluis, D. Frenkel, and J.F. Van der Veen, Surface-induced melting: Landau model, *Surf. Sci.* **239**, 282–300 (1990). [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(90\)90664-R](https://doi.org/10.1016/0039-6028(90)90664-R)
13. Y. Xiong and S.A. Wood, Hydrothermal solubility of ReO₂, *Chem. Geol.* **169**, 17–33 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00226-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00226-3)
14. S.S. Sun and W.F. McDonough, Chemical systematics of oceanic basalts, *Geol. Soc. London Spec. Publ.* **42**, 313–345 (1989). <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
15. Л.Г. Ананьева и др., Электроимпульсное дробление для высокочистого кварца, *Фунд. прикл. вопр. горн. наук* **9**(1), 126–132 (2022). [L.G. Anan'eva et al., *Elektroimpul'snoye drobleniye dlya vysokochistogo kvartsa, Fund. prikl. vopr. gorn. nauk* **9**(1), 126–132 (2022)]. (in Russ).
16. M. Bau and P. Dulski, Distribution of Y and REE in iron-formations, *Precambrian Res.* **79**, 37–55 (1996). [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00087-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00087-9)
17. A. Migdisov et al., Hydrothermal transport of REE, *Chem. Geol.* **439**, 13–42 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.016>
18. S. Pedalino, B.E. Ramírez-Galindo, R. Ferstl, K. Hornberger, M. Arndt, and S. Gerlich, Probing quantum mechanics with nanoparticle matter-wave interferometry, *Nature* **649** (2026). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09917-9>
19. I.D. Seymour, E. Quérel, R.H. Brugge, F.M. Pesci, and A. Aguadero, Understanding and Engineering Interfacial Adhesion in Solid-State Batteries with Metallic Anodes Ieuan, *ChemSusChem.* **16**, 1-41 (2023). <https://doi.org/10.1002/cssc.202202215>
20. Hang, H., Xian, H., Deng, T., He, Z., Li, S., Yang, Y., Liao, H., Jiang, Y., Xi, J., Zhu, J., He, H. (2026). In situ observations of gold deposition in a dense liquid layer at the pyrite–water interface. *PNAS*, **123**(4), e2517918123. <http://doi.org/10.1073/pnas.2517918123>.

Сведения об авторах:

Юров Виктор Михайлович – профессор, ВНС ТОО «ТСК-Восток», (Астана, Казахстан, e-mail: tskvstk@gmail.com).

Жангозин Канат Накошевич – ВНС, директор ТОО «ТСК-Восток», (Астана, Казахстан, e-mail: tskvstk@gmail.com)

Авторлар туралы мәлімет:

Виктор Юров – профессор, жетекші ғылыми қызметкер, «ТСК-Восток» ЖШС, (Астана, Қазақстан, e-mail: tskvstk@gmail.com).

Канат Жангозин – аға ғылыми қызметкер, «TSC-Vostok» ЖШС директоры, (Астана, Қазақстан, e-mail: tskvstk@gmail.com)

Information about authors:

Viktor Yurov – Professor, Leading Researcher, LLP “TSK-Vostok”, (Astana, Kazakhstan, e-mail: tskvstk@gmail.com).

Kanat Zhangozin – Leading Researcher, Director of TSC-Vostok LLP, (Astana, Kazakhstan, e-mail: tskvstk@gmail.com)

История статьи: поступила: 2 февраля 2026; принята: 28 апреля 2026.

Мақала тарихы: түсті: 2 ақпан 2026; қабылданды: 28 сәуір 2026.

Article history: received: 2 February 2026; accepted: 28 April 2026.

IRSTI 53.49.15

<https://doi.org/10.26577/RCPH97220269>

A.Y. Kussainov , M.T. Kaliaskarova* , I.K. Abizhanova , Y.S. Molbossynov ,
L.B. Bayatanova , G.Zh. Zhunissova 

Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*e-mail: mkaliaskarova@edu.ektu.kz

COMPARATIVE ANALYSIS OF WC-NICR, Al_2O_3 -NICR, AND Cr_3C_2 -NICR METAL-CERAMIC COATINGS APPLIED BY HVOF AND DETONATION SPRAYING METHODS

The paper presents a comparative analysis of technologies for forming metal-ceramic coatings of WC-NiCr, Cr_3C_2 -NiCr, and Al_2O_3 -NiCr systems obtained by high-velocity oxygen fuel (HVOF) and detonation spraying methods. The aim of the study was to determine the influence of the coating technology on the microstructure, physical-mechanical and tribological properties of the coatings. The study included analysis of the morphology of the starting powders and the microstructure of the coatings using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). Microhardness was determined using the FISCHERSCOPE HM 2000 system, and tribological characteristics were studied using the ball-on-disc method on an Anton Paar TRB³ tribometer in accordance with ASTM G133-95 and ASTM G99 standards. It was found that the spraying method has a significant effect on the structure and performance characteristics of coatings. For carbide systems (Cr_3C_2 -NiCr and WC-NiCr), the HVOF method is more effective, providing the formation of a dense, fine-grained structure, increased hardness, and a reduced friction coefficient. For the Al_2O_3 -NiCr oxide system, detonation spraying proved to be preferable, providing higher hardness and stable tribological characteristics. The results obtained allow for a reasonable choice of coating formation technology depending on their composition and operating conditions.

Keywords: HVOF, detonation spraying, metal-ceramic coatings, microstructure, friction coefficient, hardness.

А.Е. Кусайнов, М.Т. Қалиасқарова*, И.К. Абижанова, Е.С. Молбосынов,
Л.Б. Баятанова, Г.Ж. Жүнісова

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

*e-mail: mkaliaskarova@edu.ektu.kz

WC-NiCr, Al_2O_3 -NiCr және Cr_3C_2 -NiCr металлокерамикалық жабындарының HVOF және детонациялық бүрку әдістерімен алынған жабындарының салыстырмалы талдауы

Жұмыста жоғары жылдамдықты газотермиялық (HVOF) және детонациялық бүрку әдістері арқылы алынған WC-NiCr, Cr_3C_2 -NiCr және Al_2O_3 -NiCr жүйелеріндегі металлокерамикалық жабындарды қалыптастыру технологияларына салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеудің мақсаты-жабынды жағу технологиясының жабындардың микроқұрылымына, физика-механикалық және трибологиялық қасиеттеріне әсерін анықтау. Зерттеу барысында бастапқы ұнтақтардың морфологиясы мен жабындардың микроқұрылымы растарлық электрондық микроскопия (РЭМ) және энергиядисперсиялық спектроскопия (EDS) әдістерімен талданды. Микроқаттылық FISCHERSCOPE HM 2000 жүйесінде анықталды, ал трибологиялық сипаттамалар ASTM G133-95 және ASTM G99 стандарттарына сәйкес Anton Paar TRB³ трибометрінде «шар-диск» әдісі арқылы зерттелді. Бүрку әдісінің жабындардың құрылымы мен пайдалану сипаттамаларына елеулі әсер ететіні анықталды. Карбидті жүйелер (Cr_3C_2 -NiCr және WC-NiCr) үшін HVOF әдісі тиімдірек болып табылады, себебі ол тығыз, ұсақдисперсті құрылымның қалыптасуын, қаттылықтың артуын

және үйкеліс коэффициентінің төмендеуін қамтамасыз етеді. Ал Al_2O_3 -NiCr оксидті жүйесі үшін детонациялық бүрку әдісі анағұрлым тиімді болып, жоғары қаттылық пен тұрақты трибологиялық сипаттамаларды қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер жабындардың құрамы мен пайдалану жағдайларына байланысты оларды қалыптастыру технологиясын ғылыми негізде таңдауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: HVOF, детонациялық бүрку, металлокерамикалық жабындар, микроқұрылым, үйкеліс коэффициенті, қаттылық.

А.Е. Кусайнов, М.Т. Қалиасқарова*, И.К. Абижанова, Е.С. Молбосынов,
Л.Б. Баятанова, Г.Ж. Жунисова

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*e-mail: mkaliaskarova@edu.ektu.kz

Сравнительный анализ металлокерамических покрытий WC-NiCr, Al_2O_3 -NiCr и Cr_3C_2 -NiCr, нанесённых методами HVOF и детонационного напыления

В работе выполнен сравнительный анализ технологий формирования металлокерамических покрытий систем WC-NiCr, Cr_3C_2 -NiCr и Al_2O_3 -NiCr, полученных методами высокоскоростного газопламенного (HVOF) и детонационного напыления. Цель исследования заключалась в установлении влияния технологии нанесения на микроструктуру, физико-механические и трибологические свойства покрытий. Исследование включало анализ морфологии исходных порошков, микроструктуры покрытий методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS). Микротвёрдость определяли на системе FISCHERSCOPE HM 2000, трибологические характеристики исследовали методом «шар–диск» на трибометре Anton Paar TRB³ в соответствии со стандартами ASTM G133-95 и ASTM G99. Установлено, что метод напыления оказывает существенное влияние на структуру и эксплуатационные характеристики покрытий. Для карбидных систем (Cr_3C_2 -NiCr и WC-NiCr) более эффективным является метод HVOF, обеспечивающий формирование плотной мелкодисперсной структуры, повышение твёрдости и снижение коэффициента трения. Для оксидной системы Al_2O_3 -NiCr предпочтительным оказалось детонационное напыление, обеспечивающее более высокую твёрдость и стабильные трибологические характеристики. Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать технологию формирования покрытий в зависимости от их состава и условий эксплуатации.

Ключевые слова: HVOF, детонационное напыление, металлокерамические покрытия, микроструктура, коэффициент трения, твёрдость.

Introduction

Ensuring the operational reliability and durability of machine components operating under conditions of intense abrasive wear, erosion, and high-temperature corrosion is one of the priority tasks of modern materials science. In industries such as aircraft manufacturing, oil and gas, and thermal power engineering, traditional structural materials often reach their limits. Surface engineering using metal-ceramic coatings is recognized as the most effective technological solution in this field. Combining a nickel-chromium (NiCr) matrix with strengthening phases in the form of tungsten carbides WC, chromium Cr_3C_2 , or aluminum oxide Al_2O_3 , they are of particular interest due to their unique

balance of high microhardness of ceramics and fracture toughness of the metal matrix [1-3].

WC-NiCr is traditionally considered the benchmark for wear resistance under low-temperature abrasive conditions. Recent studies have focused on the microstructural characteristics of such coatings when sprayed onto various substrates, including magnesium and aluminum alloys [4,5]. However, the problem of thermal decomposition of carbides during high-energy spraying remains relevant for preserving operational properties [6,7].

Cr_3C_2 -NiCr is positioned in the literature as a key material for wear protection at temperatures up to 850–900°C. Its advantage lies in its ability to form

dense self-healing oxide films, which is critical for power plants and pumping equipment [8-10].

Al₂O₃-NiCr is distinguished by its exceptional chemical inertness and corrosion resistance. The use of a NiCr matrix compensates for the brittleness of aluminum oxide, creating multilayer and gradient structures that can operate effectively in aggressive environments [11-13].

The properties of coatings are fundamentally determined by the velocity and temperature of the sprayed particles. The high-velocity oxygen fuel (HVOF) method is characterized by a continuous supersonic flow, ensuring high productivity and uniformity of the layer. In the HVOF spraying process, powder particles are in a continuous high-speed flow of combustion products, which ensures uniform heating and high process productivity. However, prolonged exposure of the material to a high-temperature gas jet increases the risk of oxidation of the metal matrix and decomposition of carbide inclusions [14-16].

In contrast, detonation spraying (Det. s.) is based on cyclic explosive action. Thanks to the pulsed nature of the process and brief thermal contact at ultra-high speeds (up to 1000-1200 m/s), it is possible to minimize thermal degradation of the powder. Studies [12,17,18] show that the detonation method

allows the formation of unique gradient transitions and nanocrystalline structures, providing adhesive strength at the level of 80–110 MPa and high corrosion resistance when exposed to salt solutions.

Despite a significant number of publications on layer thickness optimization [19], there is a lack of systematic comparative data obtained under identical experimental conditions for carbide and oxide systems in the current literature. The tribological mechanisms of wear during the transition from traditional [20] have not been sufficiently studied. The question of the correlation between the method of transferring kinetic energy to particles and the completeness of preservation of strengthening phases in the NiCr matrix for all three systems simultaneously remains open [21-25]. Despite the availability of a significant number of publications on each of the systems separately, there is still a lack of systematic comparative data obtained under identical experimental conditions for all three compositions (WC, Cr₃C₂, Al₂O₃) when comparing HVOF and detonation methods in the modern world literature.

The aim of this work is to conduct a comprehensive comparative analysis of the microstructure and tribological characteristics of WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr, and Al₂O₃-NiCr coatings applied by HVOF and detonation spraying methods.

Materials and methods

WC-NiCr, Al₂O₃-NiCr, and Cr₃C₂-NiCr metal-ceramic powders were used to obtain coatings, the composition of which is given in Table 1. Low-alloy steel 20GL was used as the substrate material, the chemical composition of which is presented in Table 2. The study examined the tribological properties of the coatings, their hardness, and morphology.

HVOF coatings were obtained using a high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying system. The HVOF spraying modes are shown in Table 3. The distance to the substrate was 200 mm. Detonation coatings were obtained using a CCDS2000 detonation spraying system (LIH SO RAN, Novosibirsk, Russia).

The morphological characteristics of the powder particles and the coating surfaces were studied using scanning electron microscopy (SEM) on a TESCAN VEGA4 LMH microscope (TESCAN, Brno, Czech Republic). Energy dispersive analysis was performed using the Xplore 30 system (Oxford Instruments, Oxford, UK). The hardness of the coatings was measured using the FISCHER-SCOPE HM 2000 system (Helmut Fischer GmbH, Sindelfingen, Germany) controlled by WIN-HCU software version 7.1. In all tests, the exposure time was 10 s at a load

of 300 mN. Tribological studies were performed on an Anton Paar TRB³ tribometer (Anton Paar, Buchs, Switzerland) using a ball-on-disc test method in accordance with international standards ASTM G133-95 and ASTM G99. A ball with a radius of 6 mm made of 100Cr6 material was used as the counterbody.

Table 1. Powder composition

WC-NiCr			
W	C	Ni	Cr
base	5%	6%	8%
Cr ₃ C ₂ -NiCr			
Cr	C	Ni	Cr
base	9,2%	12%	4,5%
Al ₂ O ₃ -NiCr			
Al ₂ O ₃	Ni	Cr	
base	6,2%	8,3%	

Table 2. Chemical composition of 20GL steels

Element	Designation	Mass fraction in 20GL (%) (GOST 977-88)
Carbon	C	0,15-0,25
Silicon	Si	0,20-0,40
Manganese	Mn	1,20-1,60
Sulfur	S	до 0,040
Phosphorus	P	до 0,040
Iron	Fe	~97

Table 3. HVOF Spraying Parameters

Gas Control Panel Parameter Settings	Pressure
Propane	2,9 bar
Oxygen	5 bar
Compressed Air	3,2 bar

Results and discussion

The study compared two high-energy coating methods: detonation spraying and high-velocity oxygen fuel (HVOF) spraying. This section presents the results of a study of the structure, mechanical and tribological properties of WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr and

Al₂O₃-NiCr metal-ceramic coatings obtained by detonation and high-velocity oxygen fuel (HVOF) spraying methods.

The morphological characteristics of the particles are shown in Figure 1.

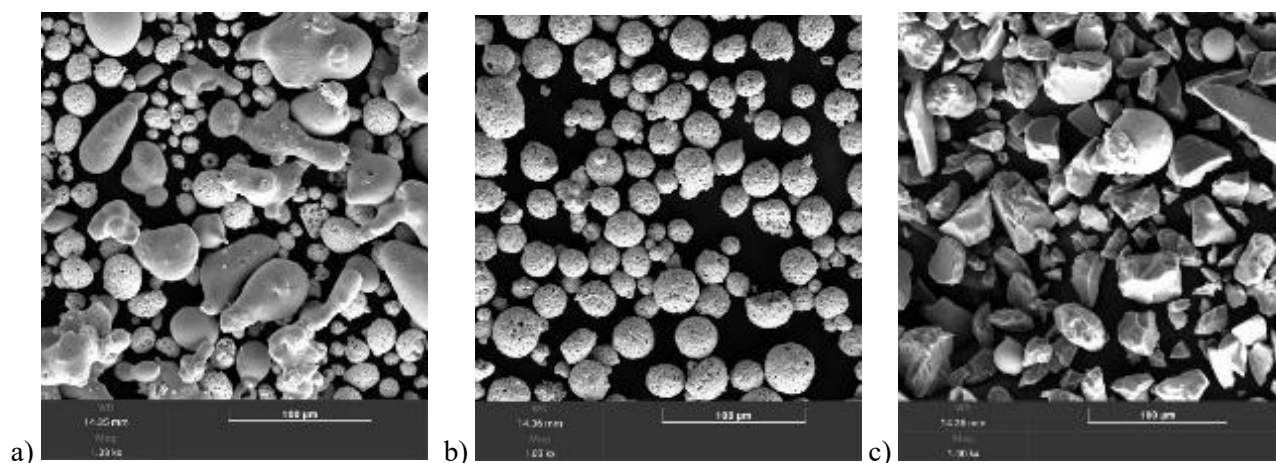
**Figure 1** – SEM images of powders a)WC-NiCr, б) Cr₃C₂-NiCr, c) Al₂O₃-NiCr

Figure 1 shows SEM images of the morphology of WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr, and Al₂O₃-NiCr powders. It has been established that WC-NiCr powder is characterized by predominantly irregular angular particle shapes and pronounced surface roughness. Cr₃C₂-NiCr powder has predominantly spherical

particles and a more uniform particle size distribution. Al₂O₃-NiCr powder is characterized by sharply angular, fragmented particle shapes due to the brittleness of the oxide phase. The results obtained show significant differences in the morphology of powders depending on their composition.

Table 4. Comparative analysis of powders using different spraying technologies

Characteristics	WC-NiCr	Cr ₃ C ₂ -NiCr	Al ₂ O ₃ -NiCr
Primary purpose	Extreme wear resistance, abrasion protection.	Corrosion resistance and wear at high temperatures.	Electrical insulation, wear at high temperatures, chemical resistance.
Max. operating T	Up to 500°C (further oxidation occurs).	Up to 850-900°C.	Up to 900-1000°C (depending on the bundle).

Figures 2 show the results of EDS analysis of WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr, and Al₂O₃-NiCr coatings. Elemental mapping shows a uniform distribution of the main elements across the thickness of the coatings and confirms the formation of a characteristic compositional structure of the layers. It was found that WC and Cr₃C₂ carbide particles, as well as the Al₂O₃ oxide phase, are uniformly dispersed in the NiCr metal matrix. No pronounced local segregation

of elements was detected, which indicates the homogeneity of the composition and structure of the coatings obtained.

After analyzing the coatings obtained by detonation spraying, the coatings formed by high-velocity oxygen fuel (HVOF) spraying were studied. The results of EDS mapping of the HVOF coatings are shown in Figures 2.

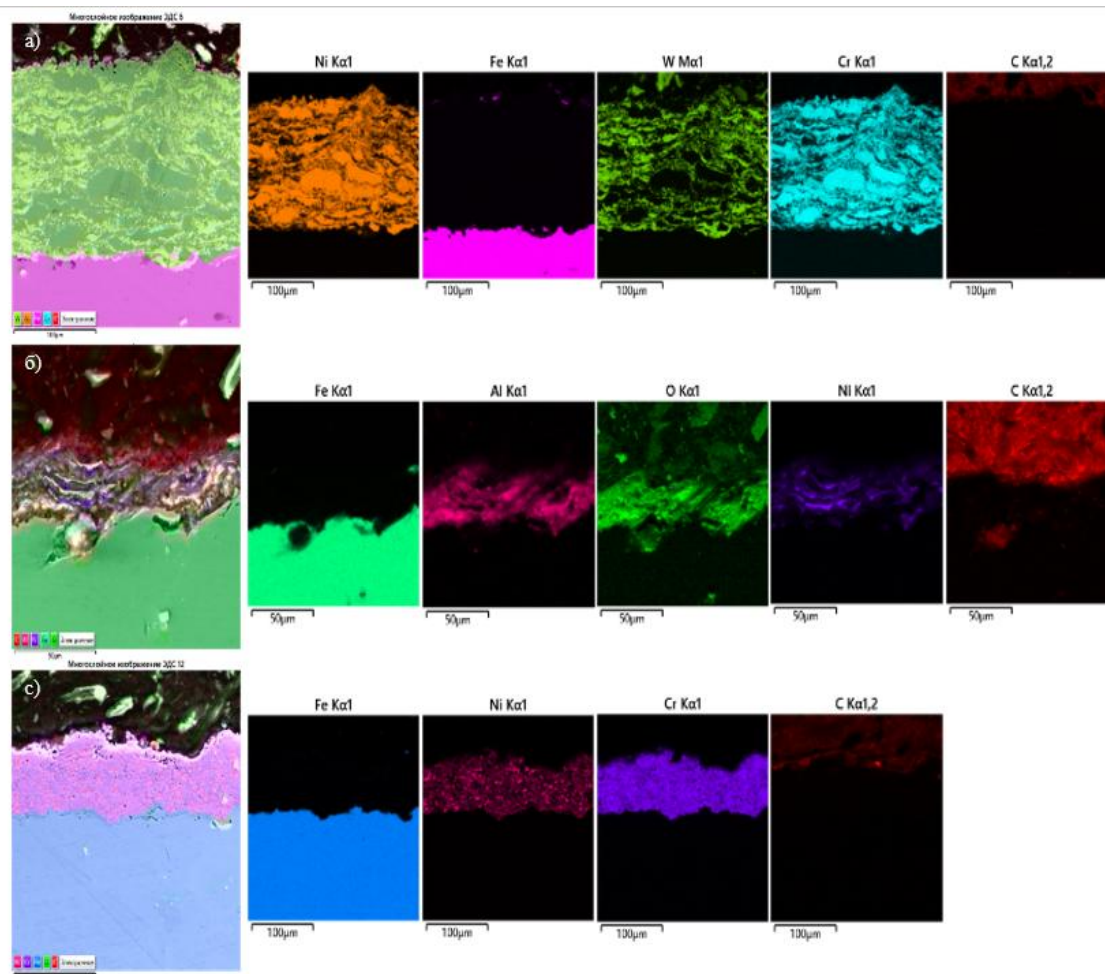


Figure 2 – EDS analysis of detonation coatings a) WC-NiCr, b) Al₂O₃-NiCr, c) Cr₃C₂-NiCr

The results of EDS mapping indicate the formation of a composite structure of the Al₂O₃-NiCr coating typical for metal-ceramic systems: the NiCr metal binder provides the viscosity and adhesion of the layer to the substrate, while the dispersed Al₂O₃ particles act as a strengthening phase. For the Cr₃C₂-NiCr coating, a uniform distribution of Cr₃C₂ carbide particles in the NiCr metal matrix was established, indicating a homogeneous structure and the absence of pronounced phase segregation. A characteristic compositional structure was revealed in WC-NiCr, represented by uniformly distributed WC carbide inclusions in a nickel-chromium binder forming a continuous metal matrix of the coating.

At the next stage of the study, tribological tests were carried out on coatings obtained by detonation spraying and HVOF. The results are shown in Figure 4. The tests were carried out at room temperature without lubricants, using a 6 mm radius ball made of 100Cr6 material as the counterbody. Tribological tests were carried out under a load of 6 N at a linear speed of 3 cm/s, with a wear radius of 3 mm and a total wear length of 60 m.

Figure 4 shows the friction coefficient values for WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr, and Al₂O₃-NiCr coatings, as well as the friction coefficient variation curves during testing. The hardness values of the coatings, determined by cross-section, are shown in Figure 5.

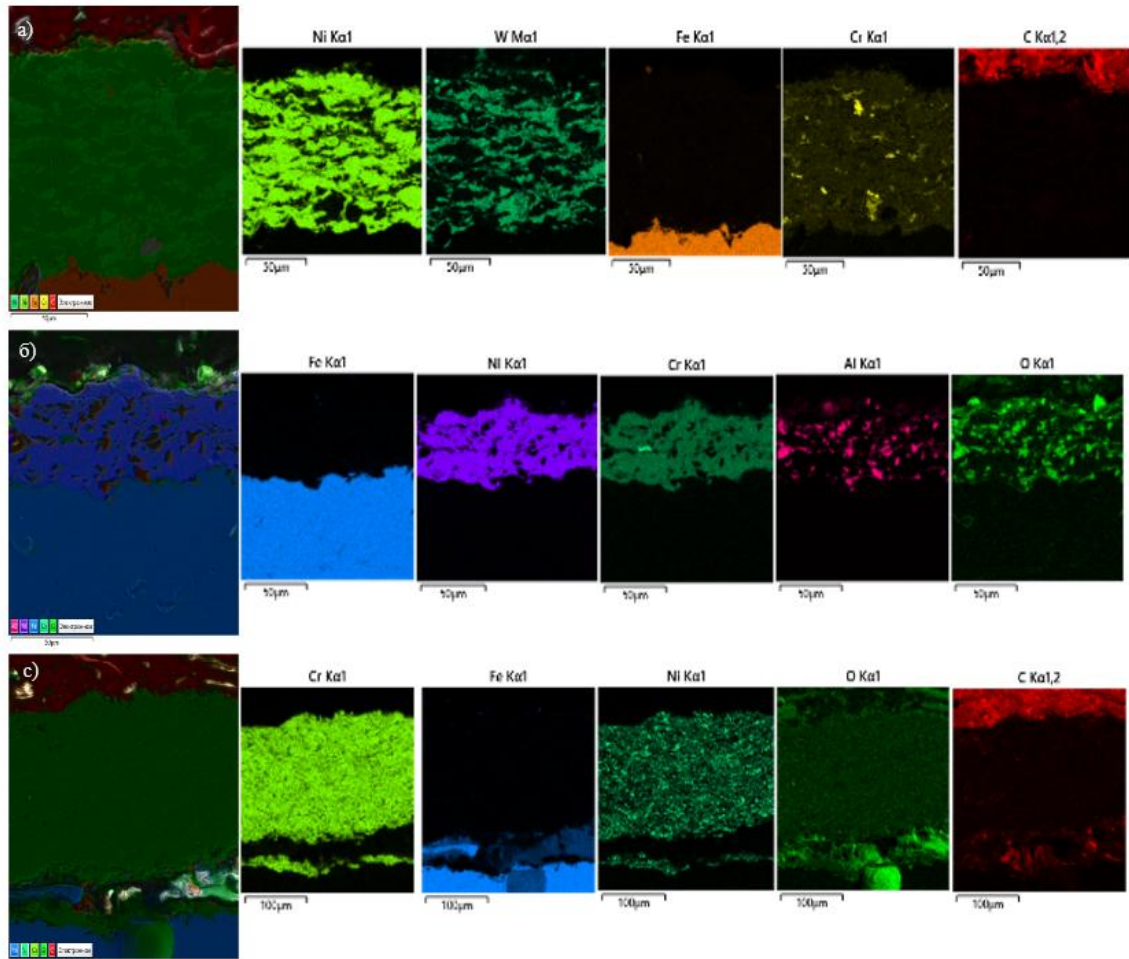


Figure 3 – Results of EDS mapping of coatings obtained by the HVOF method a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NiCr}$, c) WC-NiCr

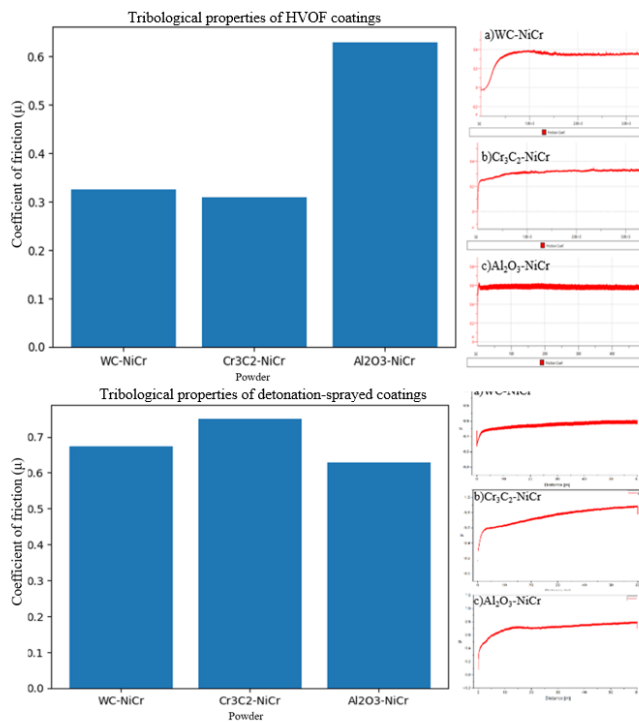


Figure 4 – Friction coefficient graph WC-NiCr (a), $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ (b), $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NiCr}$ (c)

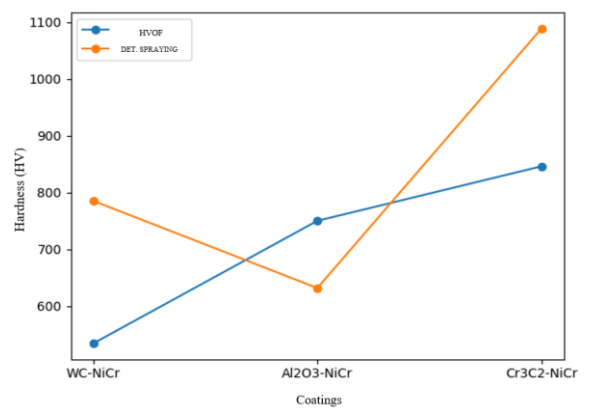


Figure 5 – Graph of coating hardness determined by cross-section

Table 5. Comparative characteristics of coatings obtained by detonation and HVOF spraying methods

Powder Composition	Spraying Method	Microhardness (HV)	Coefficient of Friction (μ)
WC-NiCr	Detonation spraying	534	0.673
	HVOF	785.2	0.326
Cr ₃ C ₂ -NiCr	Detonation spraying	846	0.751
	HVOF	1088.6	0.310
Al ₂ O ₃ -NiCr	Detonation spraying	750	0.629
	HVOF	631.6	0.630

Hardness measurement results (Fig. 5) revealed a significant advantage of the HVOF technology for carbide systems, including WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr, and Al₂O₃-NiCr coatings.

For the Cr₃C₂-NiCr coating, the HVOF method achieved a hardness of 1088.6 HV, which is 28.6% higher than that obtained by detonation spraying (846 HV). A similar trend was observed for WC-NiCr, where the hardness increased from 534 HV (detonation spraying) to 785.2 HV (HVOF). The high kinetic energy of particles during the HVOF process (up to 900 m/s) ensures extreme coating densification, which minimizes porosity and improves cohesive strength. In the case of detonation spraying, the lower hardness values of WC-NiCr (534 HV) can be explained by partial decarburization of the carbide phase and structural heterogeneity.

For the oxide-based Al₂O₃-NiCr coating, detonation spraying demonstrated superior performance (750 HV compared to 631.6 HV for HVOF). This is attributed to the fact that under

HVOF conditions the load is mainly carried by the more ductile metallic matrix, while aluminum oxide is present as discrete inclusions, reducing the overall hardness of the coating.

Tribological tests (Fig. 5) showed qualitative differences in coating behavior. The HVOF method significantly reduces the coefficient of friction for carbide coatings. For Cr₃C₂-NiCr, the friction coefficient decreased from 0.751 (detonation spraying) to 0.310 (HVOF), while for WC-NiCr it decreased from 0.673 to 0.326. During the HVOF process, a finer and more homogeneous microstructure is formed, as confirmed by EDS mapping (Fig. 4), which provides a stable contact area and reduces adhesive interaction.

In contrast, under detonation spraying conditions the best tribological performance was observed for the Al₂O₃-NiCr coating ($\mu=0.629$). This is attributed to the formation of a smoother contact surface and the characteristics of the hard oxide phase, which reduces seizure in the friction zone.

Conclusion

The results of the study of microstructure, physicomechanical, and tribological properties of WC-NiCr, Cr₃C₂-NiCr, and Al₂O₃-NiCr metal-ceramic coatings indicate a significant influence of the spraying method on the performance characteristics of the layers. Comparative analysis showed that the high-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying method is the most effective for carbide systems. Due to the high kinetic energy of particles (up to 900 m/s), extreme coating densification and the formation of a fine-dispersed homogeneous structure are achieved (confirmed by SEM and EDS mapping), which minimizes porosity and increases cohesive strength. Thus, for the Cr₃C₂-NiCr system, the HVOF method made it possible to achieve a hardness of 1088.6 HV (28.6% higher than that of the detonation method) and significantly reduce the coefficient of friction from 0.751 to 0.310. Similarly, for WC-NiCr, the hardness increased from 534 HV to 785.2 HV, while the coefficient of friction decreased from 0.673 to 0.326. In the case of detonation spraying, the lower performance of carbide coatings is explained by

partial decarburization of phases and structural heterogeneity. However, for the oxide system Al₂O₃-NiCr, detonation spraying proved to be more preferable, demonstrating a hardness of 750 HV compared to 631.6 HV for HVOF and a stable coefficient of friction of 0.629. This is attributed to the fact that during HVOF spraying of aluminum oxide, the load is predominantly carried by the ductile NiCr matrix, whereas the detonation method ensures the formation of a more rigid framework and a smoother contact surface, reducing seizure. Thus, the HVOF technology is recommended for producing ultra-hard wear-resistant carbide coatings, while detonation spraying is advisable for optimizing the properties of oxide systems.

Acknowledgments

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992864).

Author Contributions

A.E. Kussainov: Conceptualization, Methodology; **M.T. Kaliaskarova:** Formal Analysis, Data Curation, Writing – Review & Editing; **I.K. Abizhanova:** Investigation, Data Curation, Visualization; **E.S. Molbosynov:** Formal Analysis, Resources, Validation; **L.B. Bayatanova:** Supervision, Funding Acquisition, Project Administration; **G.Zh. Zhunisova:** Investigation, Data Curation, Visualization.

References

1. G. Wang, Y. Bai, J. Zhao, L. Wang, J. Zhang, Y. Zhou, Optimization of Thickness Uniformity Distribution on a Large-Aperture Concave Reflective Mirror and Shadow Mask Design in a Planetary Rotation System, *Coatings* **11**, 140 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11020140>.
2. W. Li, A. Tian, T. Li, Y. Zhao, M. Chen, Ag/ZIF-8/Mg-Al LDH Composite Coating on MAO Pretreated Mg Alloy as a Multi-Ion-Release Platform to Improve Corrosion Resistance, Osteogenic Activity, and Photothermal Antibacterial Properties, *Surf. Coat. Technol.* **464**, 129555 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129555>.
3. P. Li, Y. Du, G. Liu, P. Huang, Y. Ding, Light Self-Healing of Resin Matrix Composites Based on Pipe Network Carrier, *Mater. Lett.* **288**, 129330 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129330>.
4. E. Jonda, L. Łatka, A. Tomiczek, M. Godzierz, W. Pakieła, P. Nuckowski, Microstructure Investigation of WC-Based Coatings Prepared by HVOF onto AZ31 Substrate, *Materials* **15**, 40 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma15010040>.
5. T.A. Owoseni, M. Gupta, S.V. Joshi, M. Ingmar, T. Varis, Wear and Corrosion of HVOF and HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings on Aluminum Alloy, *J. Therm. Spray Technol.* **34**, 970–991 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01894-1>.
6. J. Zeng, X. Ji, Y. Yuan, Y. Wang, L. Liu, N. Su, Z. Qian, X. Chu, Y. Xie, C. Deng, Comparison of Microstructure, Mechanical Properties, and Wear Properties of Cold Sprayed and HVOF WC-10Co4Cr Coatings on 4340 Steel Substrates, *Coatings* **15**, 1227 (2025). <https://doi.org/10.3390/coatings15101227>.
7. B.K. Rakhadilov, M.B. Bayandinova, D.B. Buitkenov, D.N. Kakimzhanov, L.G. Zhurerova, G.U. Yerbolatova, Investigation of tribological properties of detonation coatings based on aluminum oxide and tungsten carbide, *NNC RK Bull.* 168–173 (2023). <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-168-173>.
8. R.J. Alroy, M. Kamaraj, D.V. Lakshmi, K. Praveen, P.S. Babu, G. Sivakumar, Tailoring Microstructural Features of Cr3C2-25NiCr Coatings through Diverse Spray Variants and Understanding the High-Temperature Erosion Behavior, *Tribol. Int.* **188**, 108810 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108810>.
9. A.S. Yadav, S.B. Mishra, Comparison on Erosion Performance of HVOF Sprayed NiCrSiBCFe-WC-Co and NiCrSiBCFe-Cr₃ C₂ NiCr Coatings, *Tribol. - Mater. Surf. Interfaces* **18**, 197–214 (2024). <https://doi.org/10.1177/17515831241274443>.
10. Sh.R. Kurbanbekov, D.E. Baltabaeva, B.Zh. Seytov, Yu.O. Amangel'dieva, A.N. Abdimutalip, Review of the physical and mechanical properties and phase composition of Cr3C2–NiCr coatings deposited by the HVOF method, *NNC RK Bull.* 14–24 (2025). <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-14-24>.
11. B. Rakhadilov, M. Maulet, M. Abilev, Z. Sagdoldina, R. Kozhanova, Structure and Tribological Properties of Ni–Cr–Al-Based Gradient Coating Prepared by Detonation Spraying, *Coatings* **11**, 218 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11020218>.
12. B. Rakhadilov, D. Buitkenov, Z. Sagdoldina, Z. Idrisheva, M. Zhamanbayeva, D. Kakimzhanov, Preparation and Characterization of NiCr/NiCr-Al₂O₃/Al₂O₃ Multilayer Gradient Coatings by Gas Detonation Spraying, *Coatings*, **11**, 1524 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11121524>.
13. Zh.B. Sagdoldina, B.K. Rakhadilov, D.B. Buitkenov, L.G. Sulyubayeva, A.B. Nabioldina, N.S. Raisov, S.D. Bolatov, Investigation of the Structural and Phase State of Detonation Multilayer Coatings Based on NiCr/NiCr–Al₂O₃/Al₂O₃ during High-Temperature Oxidation, *Bull. Karaganda Univ. Phys. Ser.* **11429**, 27–35 (2024). <https://doi.org/10.31489/2024ph2/27-35>.
14. L. Tegelkamp, M. Grimm, S. Conze, L.-M. Berger, T. Lindner, T. Lampke, Microstructure and Wear Resistance of Environmentally Friendly NbC-FeCr Coatings: An Evaluation of HVOF Process Parameters, *Surf. Coat. Technol.* **509**, 132208 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132208>.
15. R. Chethan, V. Vivekanand, H.S. Skanda Bharadwaj, Improvement in Sealing Assembly Process Using Project Management Techniques, *Mater. Today Proc.* **52**, 1537–1542 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.231>.
16. A. Małachowska, P. Sokołowski, G. Paczkowski, T. Lampke, A. Sajbura, Correction to: Comparison of Microstructures and Selected Properties of Plasma-Sprayed Iron-Based Metallic Glass Coatings, *J. Therm. Spray Technol.* **31**, 2002–2002 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01415-y>.
17. Z. Sagdoldina, B. Rakhadilov, M. Maulet, L. Sulyubayeva, C. Drenda, S. Bolatov, Comprehensive Study of the Mechanical and Tribological Properties of NiCr-Al Detonation Coatings, *Appl. Sci.* **15**, 7513 (2025). <https://doi.org/10.3390/app15137513>.
18. M. Maulet, M.N. Azlan, S. Bolatov, A. Alibekova, Durability and Corrosion Behavior of Ni-Cr-Al Detonation Coatings under Na₂SO₄/NaCl Exposure, *Bull. Shakarim Univ. Tech. Sci.* **1**, 389–394 (2024). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4\(16\)-49](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-4(16)-49).

19. Z. Tang, X. Dong, K. Wang, Y. Geng, M. Gao, X. Mei, An Investigation on the Effect of Change in Experimental Sequence of Warm Laser Shock Peening and Laser Shock Peening on the Performance of DD6 Nickel-Based Single-Crystal Superalloy, *Surf. Coat. Technol.* **464**, 129450 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129450>
20. C. Wu, M. Yuan, C. Zhao, Q. Wu, R. Huang, G. Xu, Corrigendum to “Oxidation Kinetics Characteristics of Ag-5.08Sn-3.14Sb Alloy Powders in Different Oxidizing Atmosphere” [Corros. Sci. 199 (2022) 110167], *Corros. Sci.* **200**, 110255 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110255>
21. F. Wu, N. Zhang, Y. Sun, X. Li, Z. Liu, Y. Yang, Effect of Applied Load on Tribological Behaviour of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy under Oil-Lubricated Condition, *Wear* 538–539, 205210 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205210>
22. C. Wu, M. Yuan, C. Zhao, Q. Wu, R. Huang, G. Xu, Corrigendum to “Oxidation Kinetics Characteristics of Ag-5.08Sn-3.14Sb Alloy Powders in Different Oxidizing Atmosphere” [Corros. Sci. 199 (2022) 110167], *Corros. Sci.* **200**, 110255 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110255>
23. Mc. Garcia-Alonso, B. Chico, R.M. Lozano, M.L. Escudero, Tribocorrosion Behavior of Graphene-Based Solid Lubricants Biofunctionalized with Hyaluronic Acid on CoCr Surfaces, *Tribol. Int.* **183**, 108420 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108420>
24. H.J.L. Clabel, A.G. Pelosi, J.V.P. Valverde, L. Misoguti, L. De Boni, C.R. Mendonça, Structural, Linear and Nonlinear Optical Properties of Perovskite BaTiO₃ Tri-Doped Er/Yb/Zn Embedded in Tellurium-Zinc Glass, *Ceram. Int.* **50**, 5948–5954 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.085>
25. M. Jebelli, K. Shariloo, M. Masdari, Flow-Induced Vibration of an Elliptical Cylinder and a Wake-Mounted Flat Plate, *Ocean Eng.* 279, 114560 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114560>

Information about authors:

Arystanbek Kussainov – PhD student (Technical Physics), Researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Scientific Center «Protective and Functional Coatings»), (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: arys20055@gmail.com).

Moldir Kaliaskarova (corresponding author) – Master’s student (Technical Physics), Junior Researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Scientific Center «Protective and Functional Coatings»), (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: mkaliaskarova@edu.ektu.kz).

Indira Abizhanova – PhD student (Metallurgy), Researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Scientific Center «Protective and Functional Coatings»), (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: iabizhanova@gmail.com).

Yermakhan Molbosynov – Junior Researcher, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Scientific Center «Protective and Functional Coatings»), (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: mr.molbosunov@gmail.com).

Lyaila Bayatanova – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University («Center of Physics»), (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: leila_1809@mail.ru).

Gulnara Zhunisova – Master’s, Moderator Teacher, Higher IT College of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, e-mail: junusova6@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Арыстанбек Кусайнов – докторант (Техникалық физика), ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Қорғаныс және функционалдық жабындар ғылыми орталығы), (Өскемен, Қазақстан, e-mail: arys20055@gmail.com).

Мәлдір Қалиасқарова (автор-корреспондент) – магистрант (Техникалық физика), кіші ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Қорғаныс және функционалдық жабындар ғылыми орталығы), (Өскемен, Қазақстан, e-mail: mkaliaskarova@edu.ektu.kz).

Индирә Абижанова – докторант (Металлургия), ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Қорғаныс және функционалдық жабындар ғылыми орталығы), (Өскемен, Қазақстан, e-mail: iabizhanova@gmail.com).

Ермахан Молбосынов – кіші ғылыми қызметкер, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Қорғаныс және функционалдық жабындар ғылыми орталығы), (Өскемен, Қазақстан, e-mail: mr.molbosunov@gmail.com).

Ләйла Баятанова – PhD, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті («Физика орталығы»), (Өскемен, Қазақстан, e-mail: leila_1809@mail.ru).

Гүлнәра Жүнісова – магистр, педагог-модератор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің Жоғары IT колледжі, (Өскемен, Қазақстан, e-mail: junusova6@gmail.com).

Сведения об авторах:

Арыстанбек Кусайнов – докторант (Техническая физика), научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (НЦ «Защитные и функциональные покрытия»), (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: arys20055@gmail.com).

Молдир Қалиасқарова (автор-корреспондент) – магистрант (Техническая физика), младший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (НЦ «Защитные и функциональные покрытия»), (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: mkaliaskarova@edu.ektu.kz).

Индира Абижанова – докторант (Металлургия), научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (НЦ «Защитные и функциональные покрытия»), (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: iabizhanova@gmail.com).

Ермахан Молбосынов – младший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (НЦ «Защитные и функциональные покрытия»), (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: mr.molbosunov@gmail.com).

Ляйла Баятанова – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева («Центр физики»), (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: leila_1809@mail.ru).

Гульнара Жунисова – магистр, педагог-модератор, Высший IT-колледж Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, (Усть-Каменогорск, Казахстан, e-mail: junusova6@gmail.com).

Article history: received: 19 March 2026; accepted: 21 May 2026.

Мақала тарихы: түсті: 19 наурыз 2026; қабылданды: 21 мамыр 2026.

История статьи: поступила: 19 марта 2026; принята: 21 мая 2026.

А.К. Ақылбаева , Ж.Б. Омарова* , А.М. Есентай , Д.Е. Ережеп 

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*e-mail: omarovazhansaya7@gmail.ru

ПЕРОВСКИТ КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ТӨЗІМДІЛІГІНЕ ИОНДАУШЫ ЖӘНЕ ИОНДАУШЫ ЕМЕС ЭНЕРГИЯ ШЫҒЫНДАРЫНЫҢ ӘСЕРІ

Күн элементтерінің радиациялық төзімділігі — ғарышта және радиациялық жүктемесі жоғары ортада жұмыс істеу үшін аса маңызды параметр. Бұл жұмыста зарядталған бөлшектердің күн элементтері материалдарындағы энергия беруінің негізгі механизмдері қарастырылған: иондаушы энергия шығындары (IEL, Ionizing Energy Loss) және иондаушы емес энергия шығындары (NIEL, Non-Ionizing Energy Loss). Ерекше назар иондық жұмсақ кристалдық торы мен жұқа жұтқыш қабаты бар галогенидті перовскитті күн элементтеріне аударылды. Перовскиттердегі иондаушы әсерлер көп жағдайда қайтымды екені және метастабильді заряд тұзақтарының түзілуімен байланысты екені көрсетілді. Ал иондаушы емес шығындар кристалдық тордың тұрақты ақауларының пайда болуына және фотоэлектрлік параметрлердің қайтымсыз деградациясына алып келеді. Жүргізілген талдау перовскитті күн элементтерінің ұзақ мерзімді радиациялық деградациясында NIEL-зақымдануларының шешуші рөл атқаратынын көрсетеді. Сонымен қатар электрондардың, протондардың және ауыр иондардың перовскит құрылымдарының белсенді қабатымен өзара әрекеттесуі қарастырылды. Перовскиттердің ақауларға жоғары төзімділігі өзін-өзі қалпына келтіру процестері мен иондардың миграциясы арқылы радиациялық әсерлерді ішінара өтейтіні атап өтілді. Алынған нәтижелер материал құрамын оңтайландыру және тұрақтылығын арттыру жағдайында перовскитті күн элементтерінің ғарыштық энергетикада қолдануға перспективалы екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: перовскитті күн элементі, иондаушы энергия шығыны, иондаушы емес энергия шығыны, деградация.

A. Akyibaeva, Zh. Omarova*, A. Yessentay, D. Yerezhep

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: omarovazhansaya7@gmail.ru

Influence of ionizing and non-ionizing energy losses on the radiation resistance of perovskite solar cells

Radiation resistance of solar cells is a critically important parameter for operation in space and radiation-intensive environments. This work examines the main mechanisms of energy transfer by charged particles in solar-cell materials: ionizing energy loss (IEL) and non-ionizing energy loss (NIEL). Particular attention is given to halide perovskite solar cells due to their ionically soft crystal lattice and thin absorbing layer. It is shown that ionization effects in perovskites are, in most cases, reversible and associated with the formation of metastable charge traps. In contrast, non-ionizing losses lead to the formation of stable lattice defects and irreversible degradation of photovoltaic parameters. The conducted analysis highlights the key role of NIEL-induced damage in the long-term radiation degradation of perovskite solar cells. The interaction of electrons, protons, and heavy ions with the active layer of perovskite structures is also considered. It is noted that the high defect tolerance of perovskites partially compensates for radiation effects through self-healing processes and ion migration. The obtained results demonstrate the promise of perovskite solar cells for space energy applications, provided that their stability is further improved and the material composition is optimized.

Keywords: perovskite solar cell, ionization energy losses, non-ionization energy losses, degradation.

А.К. Ақылбаева, Ж.Б. Омарова*, А.М. Есентай, Д.Е. Ережеп
Satbayev University, Алматы, Казахстан
*e-mail: omarovazhansaya7@gmail.ru

Влияние потерь ионизирующей и неионизирующей энергии на радиационную стойкость перовскитных солнечных элементов

Радиационная стойкость солнечных элементов — критически важный параметр для работы в космосе и радиационно-нагруженных средах. В данной работе рассмотрены основные механизмы передачи энергии заряженными частицами в материале солнечных элементов: ионизационные потери (IEL, Ionizing Energy Loss) и неионизирующие потери (NIEL, Non-Ionizing Energy Loss). Особое внимание уделено галогенидным перовскитным солнечным элементам с их ионно-мягкой кристаллической решёткой и тонким поглощающим слоем. Показано, что ионизационные эффекты в перовскитах в большинстве случаев обратимы и связаны с формированием метастабильных ловушек заряда. Неионизирующие потери, напротив, приводят к образованию устойчивых дефектов решётки и необратимой деградации фотоэлектрических параметров. Проведённый анализ подчёркивает ключевую роль NIEL-повреждений в долговременной радиационной деградации перовскитных солнечных элементов. Также рассмотрены особенности взаимодействия электронов, протонов и тяжёлых ионов с активным слоем перовскитных структур. Отмечено, что высокая дефектоустойчивость перовскитов частично компенсирует влияние радиационных воздействий за счёт процессов самовосстановления и миграции ионов. Полученные результаты демонстрируют перспективность перовскитных солнечных элементов для применения в космической энергетике при условии дальнейшего повышения их стабильности и оптимизации состава материалов.

Ключевые слова: перовскитный солнечный элемент, ионизационные потери энергии, неионизирующие потери энергии, деградация.

Кіріспе

Ғарыш кеңістігінде жұмыс істейтін күн элементтері үнемі жоғары энергиялы бөлшектердің соққысына ұшырап тұрады. Электрондар, протондар, ауыр иондар, иондаушы сәулелену, осылардың бәрі материалға тынымсыз әсер етеді [1]. Бұл сәулеленудің көздері белгілі: күннің жарқылдары, галактикалық ғарыштық сәулелер, Жердің радиациялық белдеулері [2]. Ұзақ уақыт бойы осындай әсерге ұшыраған материалда ақаулар жинала бастайды. Ал ақаулар жиналған сайын элементтердің электрлік, оптикалық, фотоэлектрлік сипаттамалары нашарлайды. Бұл тікелей ғарыш аппараттарының энергия жүйелерінің қанша уақыт қызмет ететінін анықтайды [3,4].

Жоғары энергиялы бөлшектер қатты денемен екі жолмен әрекеттеседі. Біріншісі, иондану. Электрондар қозады, лақтырылады, электрон-тесік жұптары түзіледі, жергілікті зарядтар жиналады. Екіншісі, кристалдық тордағы

атомдармен серпімді соқтығысу. Бұл жағдайда атомдар өз орнынан ығысады, құрылымдық ақаулар пайда болады. Осы екі процесті сипаттау үшін иондаушы энергия шығыны (IEL) және иондаушы емес энергия шығыны (NIEL) деген ұғымдар қолданылады. Оларды нақты ажырата білу, радиациялық төзімділікті бағалаудың іргетасы. Өйткені екеуі мүлде басқа табиғатты ақаулар тудырады: қайтымдылығы да, құрылғыға ұзақ мерзімді әсері де түбегейлі ерекшеленеді [5].

Кремний, III–V қосылыстары, бұл материалдарда радиациялық зақымдану жақсы зерттелген. Деградацияны болжау модельдері бар, сенімділікті арттыру тәсілдері жасалған. Ал галогенидті перовскиттерде жағдай мүлде басқа. Зертханаларда белсенді қолданылып жатқанына, прототиптер жасалып жатқанына қарамастан радиациялық деградация механизмдері әлі толық түсінілмеген [7,8].

Перовскитті күн элементтеріне қызығушылық соңғы жылдары қарқынды өсті. Себептері түсінікті: жоғары түрлендіру тиімділігі, төмен температуралы технологиялар, материалды аз тұтыну, жеңіл әрі икемді модульдер жасау мүмкіндігі [9]. Осының бәрі перовскиттерді шағын спутниктерде, орбиталық платформа-ларда, автономды ғарыш жүйелерінде қолдануға тартымды етеді. Бірақ бір мәселе бар. Перовскиттердің иондық жұмсақ торы, ақаулардың жоғары қозғалғыштығы, күрделі химиялық құрамы, осының бәрі дәстүрлі жартылай өткізгіштерден мүлде өзгеше физика тудырады [10,11].

Тәжірибелік және теориялық жұмыстар перовскиттердің иондалуға төзімділігінің жоғары екенін көрсетіп отыр. Мұны электрондық ақаулардың ішінара өздігінен қалпына келуімен түсіндіруге болады [12]. Алайда иондаушы емес шығындар, бұл басқа әңгіме. Олар тұрақты құрылымдық ақаулар тудырады. Тасымалдау қасиеттері нашарлайды. Фотоэлектрлік параметрлер қайтымсыз деградацияға ұшырайды. Ал

IEL мен NIEL үлестерін жүйелі салыстыру, әлі шектеулі [13]. Сондықтан иондаушы және иондаушы емес процестерді бірге ескеретін кешенді талдау бүгін шынымен өзекті. Радиациялық төзімділікті бағалау критерийлерін жасау, құрылғының қызмет мерзімін болжау, материалдардың құрамы мен құрылымын оңтайландыру, мұның бәрі осындай зерттеулерсіз мүмкін емес [14].

Бұл жұмыста галогенидті перовскит күн элементтеріндегі IEL және NIEL механизмдеріне толық шолу жасалған. Олардың фотоэлектрлік өнімділікке әсері талданған. Энергия берудің физикалық процестері, радиациялық сынақтардан алынған тәжірибелік деректер, құрылғылардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын анықтайтын факторлар, осылардың бәрі қарастырылған. Нәтижелер деградация механизмдерін айқындауға және ғарыштық, басқа да экстремалды жағдайлар үшін перовскит жүйелерінің радиациялық төзімділігін арттыру бойынша нақты ұсыныстар тұжырымдауға мүмкіндік береді.

Зерттеу әдістері мен әдістемесі

Бұл шолу галогенидті перовскит күн батареяларының радиациялық тұрақтылығына әсер ететін иондаушы энергия шығыны (IEL) мен иондаушы емес энергия шығыны (NIEL) механизмдерін жүйелі түрде талдауға бағытталған. Зерттеу жан-жақты әдебиетке шолу, салыстырмалы талдау және теориялық жалпылау негізінде жүргізілді.

Зерттеуде негізінен соңғы 10 жылда жарияланған ғылыми мақалалар, шолулар мен конференция материалдары талданды. Әдебиеттерді іздеу Web of Science, Scopus және ScienceDirect халықаралық ғылыми дерекқорлары арқылы жүргізілді. Іздеу барысында келесі кілт сөздер пайдаланылды: перовскитті күн элементтері, радиациялық әсерлер, иондаушы энергия шығыны, иондаушы емес энергия шығыны, протондық сәулелену, ғарыштық фотоэлектрлік техника, ақаулардың түзілуі, радиациялық қаттылық.

Алынған деректер бірнеше критерий бойынша сараланды. Атап айтқанда: тақырыптық өзектілігі, жарияланым сапасы (Q1–Q2 деңгейіндегі журналдар), эксперименттік деректердің қолжетімділігі және дәйексөз индексі ескерілді.

Таңдалған ғылыми басылымдар контент-талдау (content analysis) әдісімен өңделді. Әрбір дереккөз бірнеше параметр бойынша жіктелді: сәулелену түрі (электрондар, протондар, ауыр иондар, гамма-сәулелер), энергия диапазоны мен доза жүктемесі, зерттелетін материалдың құрамы мен құрылымы, қолданылған өлшеу әдістері, деградация көрсеткіштері (J_{sc} , V_{oc} , FF, PCE), сондай-ақ қалпына келу әсерлерінің болуы немесе болмауы. Осы тәсіл радиациялық әсердің негізгі үрдістерін жүйелеуге және салыстырмалы база құруға мүмкіндік берді.

Иондану мен ионданбау әсерлерін салыстырмалы бағалау нақты әдіснамалық негізде жүргізілді. Бұл негіз мыналарды қамтиды: әртүрлі сәулелену жағдайларындағы фотоэлектрлік параметрлердің өзгерістерін салыстыру, сәулеленуге дейінгі және кейінгі сипаттамаларды талдау, қалпына келу динамикасын зерттеу, NIEL коэффициенттері мен құрылғы деградациясы арасындағы корреляцияны бағалау.

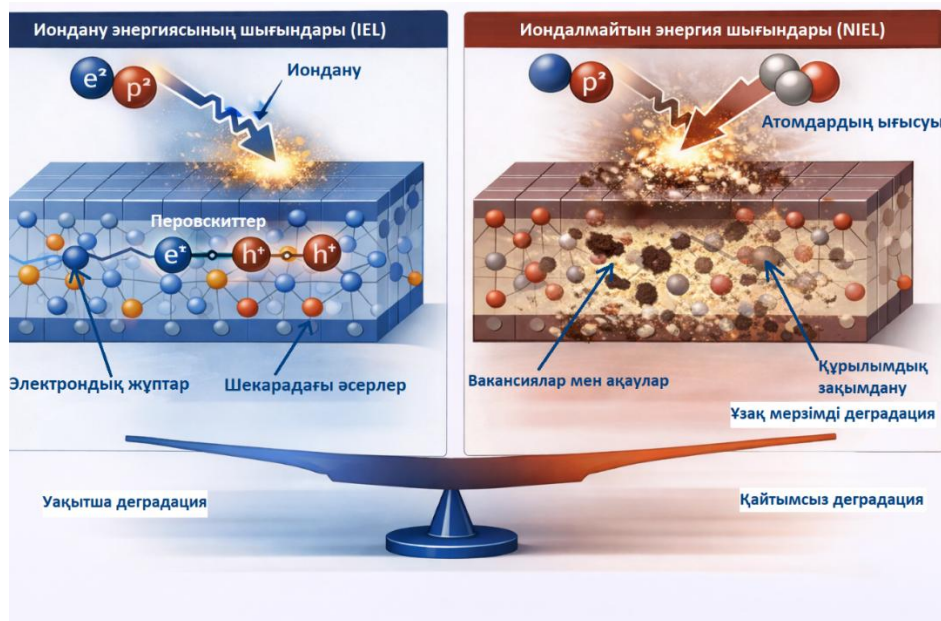
Алынған нәтижелер ғарыштық фотоэлектрикадағы классикалық радиациялық зақымдану модельдерімен және стандартталған NIEL тұжырымдамаларымен салыстырылды.

Нәтижелер

Иондану және ионданбау энергиясын жоғалту механизмдері

Зарядталған бөлшектер күн батареясының материалы арқылы өткенде оған энергияны екі негізгі жолмен береді. Біріншісі, иондану: электрондарды қоздыру және электрон-тесік жұптарын түзу. Екіншісі, иондаушы емес шығындар: тор атомдарының ығысуы,

вакансиялар мен аралық ақаулардың пайда болуы. Осы екі механизм сәйкесінше IEL (иондаушы энергия шығыны) және NIEL (иондаушы емес энергия шығыны) деп аталады [5] (1-сурет). Радиациялық каттылықты бағалау тұрғысынан бұл механизмдерді нақты ажырату аса маңызды. Себебі олардың құрылғыға тигізетін салдары түбегейлі ерекшеленеді.



1-сурет. Күн батареясындағы энергия тасымалының екі негізгі механизм арқылы схемалық көрінісі: иондаушы (IEL) және иондаушы емес (NIEL) энергия шығындары.

Ионизация әсерлері (IEL)

Жоғары энергиялы бөлшектер (электрондар, протондар, ауыр иондар) және электромагниттік сәулелену (гамма-сәулелер) материалдағы атомдық орбитальдардан электрондарды ығыстыра алады [15]. Бұл көптеген бос заряд тасымалдаушылар мен қозған күйлердің пайда болуына әкеледі.

Перовскит күн батареяларында жоғары энергиялы сәулеленудің немесе қарқынды жарықтандырудың әсерінен туындаған иондану процестері негізінен уақытша ақаулар ретінде көрінеді. Оларға ұсталған зарядтар, метастабильді заряд күйлері және иондық тор компоненттерінің валенттілігінің жергілікті өзгерістері жатады.

Галогенидті перовскиттердің кристалдық торы иондық жұмсақ. Осы себепті иондану тудырған ақаулар көбінесе қайтымды болып шығады, олар бөлме температурасында өздігінен босаңсиды. Бұл перовскиттерді дәстүрлі

жартылай өткізгіштерден түбегейлі ерекшелендіретін қасиет [16–19]. Тор өзі зақымдалмайды. Атомдар түйіндерінен ығыспайды. Иондану зақымы қайтымды күйінде қалады.

Эксперименттер мұны тікелей растайды [9,20–24]. Галогенидті перовскиттерді 1–6 МэВ диапазонындағы жылдам электрондармен сәулелендіргенде негізінен иондану әсерлері байқалады. Шағын метастабильді заряд тұзақтары пайда болады, олар қысқа тұйықталу тогының тығыздығы мен ашық тізбек кернеуін орташа деңгейде төмендетеді. Бірақ мынадай қызық жайт бар: бұл ақаулар өте қозғалғыш және өздігінен жоғалуға бейім. Күн батареясын бөлме температурасында біраз ұстап тұрсаңыз немесе жеңіл термиялық күйдіру жасасаңыз, сипаттамалар ішінара, кейде толығымен қалпына келеді.

Кремний мен III–V жүйелерінде де иондану әсерлері бар, бірақ ондағы физика басқа. Негізгі

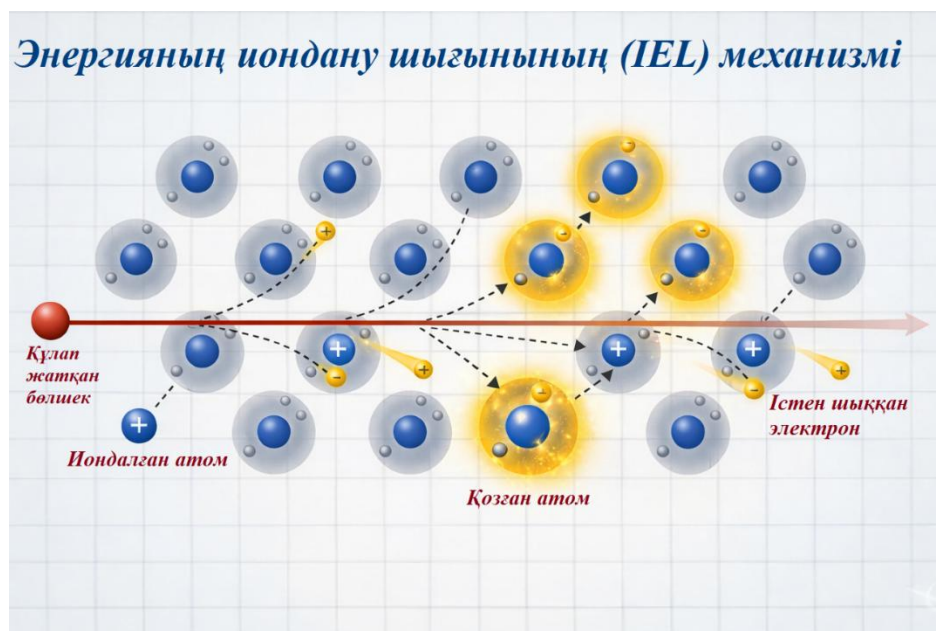
проблема р-п өткелдерінің өзгеруі, шунттау кернеуінің ауытқуы. Перовскиттерде мәселе мүлде өзге жазықтықта жатыр, тұзақтар түйіршік шекараларында, тасымалдау қабаттарының аралығында жиналады [25].

Иондану торды тікелей бұзбайды, бұл рас. Бірақ химиялық өзгерістер тудыруы мүмкін. Органикалық компоненттердің радиолизі, бос радикалдардың пайда болуы, молекулалардың ыдырауы, осының бәрі орын алуы ықтимал [26,27]. Нақтырақ айтсақ, радиациялық иондану метиламмоний немесе йодид ыдырауын тездетіп, қорғасын йодидінің (PbI_2) түзілуіне жол ашады. Бірақ мұнда бір шарт бар: реакция жүру үшін оттегі мен ылғал керек [28–30].

Вакуумда немесе инертті атмосферада сурет басқаша. Иондану әсері тек электрондық ақаулармен шектеледі, зарядтың ұсталуы, метастабильді тұзақтар, валенттік күйлердің

жергілікті ауытқулары. Оттегі мен ылғал жоқ болса, радикалды аралықтар тұрақтана алмайды. Сондықтан материалдың терең химиялық ыдырауы да, қайтымсыз фазалық түрленуі де болмайды [31,32].

2-суретте жоғары энергиялы зарядталған бөлшектің кристалдық тор арқылы өту схемасы берілген. Мұнда энергия берудің негізгі механизмдері бейнеленген, олардың бәрі бөлшектің электрондық қабықпен Кулондық әрекеттесуіне келіп тіреледі. Иондану екі түрлі жүреді: электронды лақтырумен және электронды жоғалтпай атомдық күйлерді қоздырумен. Бұл серпімсіз әрекеттесулер зарядталған бөлшектердің материалда баяулауының басым механизмі. Перовскит күн батареяларындағы иондану зақымының негізі, дәл осы процестер.



2-сурет. Энергияның иондаушы шығындану (IEL) механизмінің схемалық көрінісі

Иондаушы емес әсерлер (NIEL)

Бұл механизм бөлшектің соқтығысу кезінде материал атомдарына оларды кристалдық түйіндерден ығыстыруға жеткілікті энергия беруімен байланысты. Нәтижесінде ығысу зақымы пайда болады: вакансиялар, түйін аралықтары және күрделі тор ақаулары. Ауыр бөлшектердің (протондар, иондар) атом ядроларымен соқтығысуында иондаушы емес шығындар басым болады [33].

Әрбір бөлшек-материал комбинациясы үшін NIEL максималды болатын белгілі бір энергия мәні бар. Мысалы, кремнийде ондаған және жүздеген кэВ энергиясы бар протондар

атомдардың күшті ығысуын тудырады. Ал жылдамырақ протондар ($> \text{МэВ}$) тереңірек еніп, энергиясының бір бөлігін иондауға жұмсайды [34,35].

Перовскиттер, салыстырмалы түрде төмен байланыс энергиясы бар жұмсақ кристалдар. Оларды сіңіргіш қабатының жұқалығы да ерекшелендіреді ($\sim 300\text{--}600$ нм). Зерттеулер көрсеткендей, жұқа қабатты галогенидті перовскиттер үшін энергиясы 50–150 кэВ болатын төмен энергиялы протондар ерекше зиянды. Себебі осы энергия диапазонында иондаушы емес энергия шығындарының (NIEL) үлесі жұқа белсенді қабат ішінде максималды әрі

кеңістіктік түрде шоғырланған болады. Бұл атомдық ығысулар мен тор ақауларының тиімді түзілуіне әкеледі [36,37].

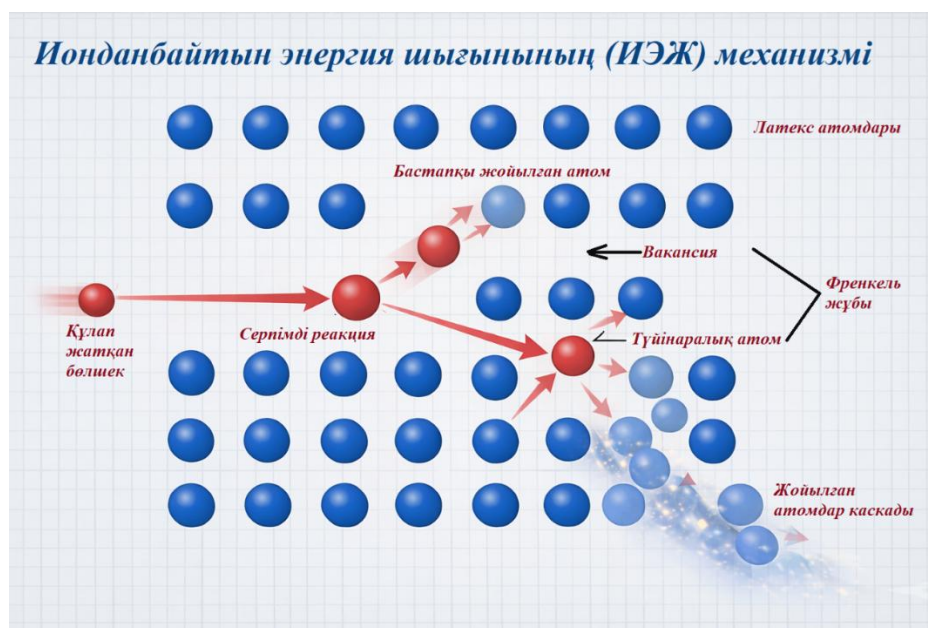
Модельдеу нәтижелері мұндай протондардың ену қабілетінің төмен екенін көрсетті, PbI_2 негізіндегі материалдарда бар-жоғы бірнеше микрометр. Олардың энергиясы іс жүзінде толығымен атомдарды тордан шығаруға жұмсалады. Нәтижесінде иондаушы емес зақымдану тұрақты ақаулар тудырады. Бұл ақаулар терең рекомбинация орталықтары ретінде әрекет етіп, тепе-теңдіксіз заряд тасымалдаушыларының сәулеленбей рекомбинациялануына жол ашады. Сонымен бірге олар ток азайтатын тұзақтар қызметін атқарады [38,39].

Тәжірибелерде дәл осы сурет байқалды: протонмен сәулеленуден кейін перовскит күн элементтері қысқа тұйықталу тогының (J_{SC}) және толтыру коэффициентінің төмендеуін көрсетті. Бұл параметрлер тыныштықтан кейін де қалпына келмеді. Осылайша, NIEL әсерлері ұзақ мерзімді деградацияның негізгі факторы болып табылады.

Ғарыштық күн батареялары технологиясында NIEL мәндері арқылы радиациялық

қаттылықты бағалау тәсілі бұрыннан қабылданған: NIEL коэффициенті төмен материалдар берілген бөлшектер спектрі үшін радиацияға төзімдірек деп саналады. Перовскиттердің NIEL мінез-құлқы жұқа пленкалы жартылай өткізгіштерге ұқсас, олар атомдық ығысуларға сезімтал, бірақ кремнийге қарағанда заряд жинақталуына әлдеқайда аз сезімтал [40].

3-суретте кристалдық тордағы атоммен жоғары энергиялы бөлшектің серпімді соқтығысуының схемасы көрсетілген. Кинетикалық энергияның берілуі нәтижесінде атом өз орнынан ығысып, бос орын мен интерстициалды атом түзіледі, бұл Френкель жұбы деп аталады. Бастапқы ығысқан атом кейінгі ығысулар каскадын іске қосуы мүмкін. Бұл материал құрылымында тұрақты сәулелену ақауларының қалыптасуына алып келеді. Мұндай ақаулар сәулеленбейтін рекомбинация орталықтары мен заряд тұзақтары ретінде қызмет етіп, перовскит күн батареяларының фотоэлектрлік өнімділігінің қайтымсыз төмендеуіне тікелей себеп болады.



3-сурет. Иондалмайтын энергия шығыны (NIEL) механизмінің және кристалдық тордағы радиациялық ақаулардың пайда болуының схемалық көрінісі

Талқылау

Бұл шолу иондаушы және иондаушы емес энергия шығындарының перовскит күн батареяларында (PSC) түбегейлі әртүрлі деградация механизмдерін тудыратынын көрсетеді. Иондаушы сәулелену негізінен

электрондық ішкі жүйеге әсер етеді. Ал иондаушы емес өзара әрекеттесулер кристалдық тордың қайтымсыз құрылымдық зақымдануына алып келеді.

Иондаушы энергия шығыны (IEL), жоғары энергиялы электрондардан, гамма-сәулеленуден, қарқынды фотон ағындарынан туындайтын процесс, негізінен метастабильді электрондық ақаулар тудырады. Таяз тұзақ күйлері, қысқа мерзімді заряд жинақталуы. J_{SC} мен V_{OC} орташа деңгейде төмендейді, бірақ қоршаған орта жағдайында бұл өзгерістер негізінен қайтымды. Неліктен? Перовскиттердің иондық торы жұмсақ, ақау түзілу энергиясы төмен, сондықтан зақым ішінара өздігінен жазылады. Кремний мен III–V жүйелерінде жағдай мүлде басқа: ондағы иондаушы сәулелену қосылыстар мен оксид интерфейстерін қайтымсыз бұзады. Перовскиттерде мұндай жойқын әсер жоқ. Бірақ бір ескерту бар, оттегі мен ылғал қатысқанда иондану органикалық компоненттердің химиялық ыдырауын тездетеді. Яғни қоршаған орта факторлары IEL деградациясының бағытын түбегейлі өзгерте алады.

NIEL, мүлде басқа табиғат. Иондаушы емес энергия шығыны атомдарды тікелей ығыстырады. Вакансиялар, интерстициалдар, ақау кластерлері пайда болады. Біздің талдау мұны нақты растайды: NIEL тудырған ығысу зақымы, PSC-лердегі қайтымсыз деградацияның басты көзі. Ең қауіптісі, 50–150 кэВ диапазонындағы төмен энергиялы протондар. Олардың максималды тежелуі дәл перовскит сіңіргішінің жұқа қабатында жүреді, кинетикалық энергияның көп бөлігі тор ақауларына айналады. Нәтиже: терең рекомбинация орталықтарының тығыздығы артады, тасымалдаушылардың қозғалғыштығы мен өмір сүру ұзақтығы құлдырайды, сәулеленбейтін рекомбинация күшейеді. J_{SC} , толтыру коэффициенті, түрлендіру тиімділігі, бәрі қайтымсыз төмендейді. Сәулеленуден кейін қалпына келу жоқ, бұл зақымның құрылымдық екенін тағы бір рет дәлелдейді. Байқалған заңдылық ғарыштық фотоэлектрикада бұрыннан қолданылатын NIEL моделімен сәйкес келеді. Демек, NIEL параметрлері PSC-лердің ұзақ мерзімді сенімділігін болжаудың нақты көрсеткіші бола алады.

Тағы бір фактор бар, иондардың миграциясы. Галогидтар мен катиондардың бос орындары перовскитте өте қозғалғыш. Радиациялық ақаулар бұл қозғалмалы түрлердің санын одан әрі арттырады. NIEL бастапқы ақаулар каскадын іске қосады, иондар қайта бөлінеді, электр өрісі жергілікті деңгейде бұрмаланады. Ток-кернеу гистерезисі күшейеді. Интерфейс тұрақтылығы төмендейді. Құрылғы тезірек қартаяды. Құрылымдық ақаулар мен ион тасымалы, бұл

екеуі бір-бірін күшейтетін синергетикалық процесс.

Қызық мәселе, PSC-лердің радиациялық төзімділігі асимметриялы. Иондаушы сәулеленуге олар жақсы төтеп береді: ақаулар жазылады, тор икемді. Ал ығысу зақымдануына сезімталдығы басқа жұқа пленкалы жартылай өткізгіштермен бір деңгейде. Бұл нені білдіреді? Иондаушы сәулелену басым ортада PSC-лер тамаша жұмыс істейді. Бірақ протон мен ионға бай ғарыштық жағдайларда, Жердің төменгі орбитасы, терең ғарыш миссиялары, олар осал болып қала береді. Сондықтан PSC-лердің ғарыштық қолданбаларға жарамдылығын бағалағанда нақты миссияға бағытталған радиациялық модельдеу міндетті. Шолу нәтижелері PSC-лердің радиациялық қаттылығын жақсарту бойынша бірқатар маңызды ұсыныстар береді. Олардың қатарында: ақаулардың түзілу энергиясын арттыру мақсатында органикалық катиондар мен галогенидтерді ішінара ауыстыру арқылы құрамды оңтайландыру; терең тұзақтардың пайда болуын басу үшін пассивациялық қоспалар енгізу; қорғаныш буферлік қабаттары бар көп қабатты құрылымдар жасау; заряд тасымалдау қабаттары мен интерфейс модификаторларын жетілдіру; төмен энергиялы протондар ағынын бәсеңдету үшін жеңіл қорғаныс материалдарын пайдалану. Осы стратегияларды енгізу құрылғының жоғары радиациялық жүктемелер кезіндегі беріктігін елеулі түрде арттыра алады.

Нақты ғарыштық ортада құрылғылар радиацияның, жылу циклінің, вакуумның және ультракүлгін сәулеленудің бірлескен әсеріне ұшырайды. Бұл синергетикалық сипаттағы істен шығу механизмдеріне алып келуі мүмкін. Сонымен бірге PSC-лер үшін стандартталған радиациялық сынау хаттамаларының болмауы жарияланған зерттеулер арасындағы тікелей салыстыруды қиындатады. Осы өзгергіштік құрылғының сандық өмір сүру мерзімін болжауды айтарлықтай шектейді.

Болашақ зерттеулер ғарыштық жағдайларда біріктірілген радиациялық әсерге бағытталуы тиіс, температура мен вакуум ықпалын қоса алғанда. Толығымен бейорганикалық және 2D перовскит құрылымдарына ерекше назар аудару қажет, себебі олар ақау түзілу энергиясы жоғары әрі иондардың қозғалғыштығы төмен болуы мүмкін. Стандартталған сәулелену хаттамаларын және жеделдетілген өмірлік сынау әдіснамаларын жасау ұзақ мерзімді ғарыштық миссияларға PSC-лерді енгізуді тездету үшін аса маңызды.

Қорытынды

Бұл мақалада перовскит күн батареяларына радиациялық әсердің екі негізгі механизмі талданады: иондаушы энергия шығыны (IEL) және иондаушы емес энергия шығыны (NIEL). Галогенидті перовскиттердегі иондану әсерлері негізінен метастабильді және қайтымды ақаулардың пайда болуына әкелетіні көрсетілген. Мұндай ақаулар кристалдық тордың бұзылуымен қатар жүрмейді және бөлме температурасында жиі өздігінен жоғалады.

Керісінше, иондаушы емес энергия шығыны атомдық ығысуды және тұрақты тор ақауларының түзілуін тудырады. Бұл ақаулар сәулеленбейтін рекомбинация орталықтары ретінде қызмет етіп, фотоэлектрлік өнімділіктің қайтымсыз деградациясына алып келеді. Жұқа қабатты перовскит күн батареялары үшін төмен энергиялы протондар ең үлкен қауіп төндіреді.

Себебі NIEL-дің максималды үлесі дәл белсенді қабатта шоғырланған.

Алынған нәтижелер перовскит күн батареяларының радиациялық қаттылығын бағалауда негізгі параметр ретінде иондаушы емес энергия шығындарының үлесін ерекше атап көрсетеді. Сонымен қатар, радиациядан туындаған тор ақауларын басу мақсатында материалдың құрамы мен құрылымын оңтайландыру қажеттілігі айқын көрінеді.

АЛҒЫС

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (AP22685441 гранты «Модельденген ғарыштық жағдайларда перовскит материалдарының тұрақтылығын зерттеу»).

Авторлардың үлесі

А.К. Ақылбаева: формальды талдау, зерттеу, ресурстар, визуализация, жазу – бастапқы жоба; **Ж.Б. Омарова:** деректерді жинақтау, қаржыландыруды тарту, жобаны басқару, жазу – шолу және редакциялау; **А.М. Есентай:** зерттеу, ресурстар, жазу – бастапқы жоба; **Д.Е. Ережеп:** тұжырымдама, қаржыландыруды тарту, жобаны басқару, қадағалау, жазу – шолу және редакциялау

Әдебиеттер

1. V. Romano, A. Agresti, R. Verducci, G. D'Angelo, Advances in Perovskites for Photovoltaic Applications in Space, *ACS Energy Lett.* **7**, 2490–2514 (2022). <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.2c01099>
2. A. Kishor, A. Raj, M. Raj, N. Goel, Proton Radiation Impact on Bilayer Perovskite Solar Cells for Space Application: A Comprehensive SCAPS, DFT and ML Study, *J. Phys. Chem. Solids* **209**, 113302 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2025.113302>
3. M.H. Nair, M.C. Rai, S. Reade, O. Bloch, S. Adlen, M. Soltan, D.A. Homfray, In-Orbit Assembly of High-Value Modular Infrastructures: Holistic Analysis and Mission Concepts, *Acta Astronaut.* **238**, 1418–1431 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.09.070>
4. D. Angmo, S. Yan, D. Liang, A.D. Scully, A.S.R. Chesman, M. Kellam, N.W. Duffy, N. Carter, R. Chantler, C. Chen, et al., Toward Rollable Printed Perovskite Solar Cells for Deployment in Low-Earth Orbit Space Applications, *ACS Appl. Energy Mater.* **7**, 1777–1791 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsaem.3c02761>
5. J.R. Srouf, J.M. McGarrity, Radiation Effects on Microelectronics in Space, *Proc. IEEE* **76**, 1443–1469 (1988). <https://doi.org/10.1109/5.90114>
6. L.C. Hirst, M.K. Yakes, J.H. Warner, M.F. Bennett, K.J. Schmieder, R.J. Walters, P.P. Jenkins, Intrinsic Radiation Tolerance of Ultra-Thin GaAs Solar Cells, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 033908 (2016). <https://doi.org/10.1063/1.4959784>
7. N. Gruginskie, F. Cappelluti, G.J. Bauhuis, P. Mulder, E.J. Haverkamp, E. Vlieg, J.J. Schermer, Electron Radiation-Induced Degradation of GaAs Solar Cells with Different Architectures, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **28**, 266–278 (2020). <https://doi.org/10.1002/ppp.3224>
8. E.A. Plis, Y. Fouchal, R. Ramirez, S.E.J. Collman, Properties of Space Cover Glass Materials Postexposure to High-Energy Electron Irradiation, *J. Spacecr. Rockets* **62**, 606–610 (2025). <https://doi.org/10.2514/1.A35993>
9. H. Afshari, S.A. Chacon, S. Sourabh, T.A. Byers, V.R. Whiteside, R. Crawford, B. Rout, G.E. Eperon, I.R. Sellers, Radiation Tolerance and Self-Healing in Triple Halide Perovskite Solar Cells, *APL Energy* **1**, 026105 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0158216>
10. E. Novoselov, S.O. Cholakh, I.S. Zhidkov, Unveiling the Hidden Cascade: Secondary Particle Generation in Hybrid Halide Perovskites Under Space-Relevant Ionizing Radiation, *Aerospace* **12**(11), 1015 (2025). <https://doi.org/10.3390/aerospace1211015>
11. M.E. Bush, J.D. Sims, S.S. Erickson, K.T. VanSant, S. Ghosh, J.M. Luther, L. McMillon-Brown, Space Environment Considerations for Perovskite Solar Cell Operations: A Review, *Acta Astronaut.* **235**, 235–250 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.05.025>

12. F. Lang, N.H. Nickel, J. Bundesmann, S. Seidel, A. Denker, S. Albrecht, V.V. Brus, J. Rappich, B. Rech, G. Landi, et al., Radiation Hardness and Self-Healing of Perovskite Solar Cells, *Adv. Mater.* **28**, 8726–8731 (2016). <https://doi.org/10.1002/adma.201603326>
13. M. Parashar, M. Sharma, S. Penukula, D.K. Saini, T.A. Byers, N. Rolston, B. Rout, Combined Effects of Irradiation and Environmental Stressors on Elemental Migration and Device Stability in Perovskite Solar Cells, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17**, 54721–54734 (2025). <https://doi.org/10.1021/acsami.5c10758>
14. A.R. Kirmani, T.A. Byers, Z. Ni, K. VanSant, D.K. Saini, R. Scheidt, X. Zheng, T.B. Kum, I.R. Sellers, L. McMillon-Brown, et al., Unraveling Radiation Damage and Healing Mechanisms in Halide Perovskites Using Energy-Tuned Dual Irradiation Dosing, *Nat. Commun.* **15**, 696 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44876-1>
15. F.H. Attix, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, (Wiley, New York, 1986). ISBN 9780471011460.
16. L.M. Herz, Charge-Carrier Dynamics in Organic-Inorganic Metal Halide Perovskites, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **67**, 65–89 (2016). <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112222>
17. W.-J. Yin, T. Shi, Y. Yan, Unusual Defect Physics in CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cell Absorber, *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4864778>
18. Y. Shao, Z. Xiao, C. Bi, Y. Yuan, J. Huang, Origin and Elimination of Photocurrent Hysteresis by Fullerene Passivation in CH₃NH₃PbI₃ Planar Heterojunction Solar Cells, *Nat. Commun.* **5**, 5784 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms6784>
19. J.M. Azpiroz, E. Mosconi, J. Bisquert, F. De Angelis, Defect Migration in Methylammonium Lead Iodide and Its Role in Perovskite Solar Cell Operation, *Energy Environ. Sci.* **8**, 2118–2127 (2015). <https://doi.org/10.1039/C5EE01265A>
20. K. Yang, K. Huang, X. Li, S. Zheng, P. Hou, J. Wang, H. Guo, H. Song, B. Li, H. Li, et al., Radiation Tolerance of Perovskite Solar Cells under Gamma Ray, *Org. Electron.* **71**, 79–84 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.05.008>
21. S. Kim, C.M. Lee, S.H.U. Shah, M.-C. Jung, S.G. Lee, C.H. Kim, H.J. Lee, C. Park, J.-Y. Yeom, S.Y. Ryu, et al., Radiation Tolerance of Organohalide-Based Perovskite Solar Cells under 6 MeV Electron Beam Irradiation, *J. Phys. Chem. C* **128**, 885–893 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c06128>
22. Y. Miyazawa, M. Ikegami, T. Miyasaka, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Hirose, Evaluation of Radiation Tolerance of Perovskite Solar Cell for Use in Space, *Proc. IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 1–4 (2015).
23. P. Li, H. Dong, J. Lan, Y. Bai, C. He, L. Ma, Y. Li, J. Liu, Tolerance of Perovskite Solar Cells under Proton and Electron Irradiation, *Materials* **15**, 1393 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15041393>
24. D.-T. Nguyen, D. Walter, K.J. Weber, T. Duong, T.P. White, Simulating Proton Radiation Tolerance of Perovskite Solar Cells for Space Applications, *Adv. Energy Sustain. Res.* **4** (2023). <https://doi.org/10.1002/aesr.202300085>
25. C. Wang, D. Qu, B. Zhou, C. Shang, X. Zhang, Y. Tu, W. Huang, Self-Healing Behavior of the Metal Halide Perovskites and Photovoltaics, *Small* **20** (2024). <https://doi.org/10.1002/sml.202307645>
26. D. Bryant, N. Aristidou, S. Pont, I. Sanchez-Molina, T. Chotchunangatchaval, S. Wheeler, J.R. Durrant, S.A. Haque, Light and Oxygen Induced Degradation Limits the Operational Stability of Methylammonium Lead Triiodide Perovskite Solar Cells, *Energy Environ. Sci.* **9**, 1655–1660 (2016). <https://doi.org/10.1039/C6EE00409A>
27. G. Xu, P. Cai, Y. Tu, H. Kong, Z. Ke, Y. Li, C. Zhuang, X. Du, Y. Zhang, Z. Li, et al., Calibration for Space Solar Cells: Progress, Prospects, and Challenges, *Sol. RRL* **8** (2024). <https://doi.org/10.1002/solr.202300822>
28. M.H. Miah, M.B. Rahman, M. Nur-E-Alam, M.A. Islam, M. Shahinuzzaman, M.R. Rahman, M.H. Ullah, M.U. Khandaker, Key Degradation Mechanisms of Perovskite Solar Cells and Strategies for Enhanced Stability: Issues and Prospects, *RSC Adv.* **15**, 628–654 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4RA07942F>
29. D. Yerezhap, Z. Omarova, A. Aldiyarov, A. Shinbayeva, N. Tokmoldin, IR Spectroscopic Degradation Study of Thin Organometal Halide Perovskite Films, *Molecules* **28**, 1288 (2023). <https://doi.org/10.3390/molecules28031288>
30. B. Zhang, B. Xue, S. Xiao, X. Wang, Chemical Stability of Metal Halide Perovskite Detectors, *Inorganics* **12**, 52 (2024). <https://doi.org/10.3390/inorganics12020052>
31. X. Zhang, X. Wang, H. Liu, R. Chen, Defect Engineering of Metal Halide Perovskite Optoelectronic Devices, *Prog. Quantum Electron.* **86**, 100438 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100438>
32. C. Wang, Z. Xie, Y. Wang, Y. Ding, M.K.H. Leung, Y.H. Ng, Defects of Metal Halide Perovskites in Photocatalytic Energy Conversion: Friend or Foe?, *Adv. Sci.* **11** (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202402471>
33. A. Peters, M. Preindl, V. Fthenakis, Semiconductor Material Damage Mechanisms Due to Non-Ionizing Energy in Space-Based Solar Systems, *Energies* **18**, 509 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18030509>
34. X.-H. Zhao, H.-L. Lu, Y.-M. Zhang, Y.-M. Zhang, Model of Phonon Contribution to Nonionizing Energy Loss (NIEL) for InP/InGaAs Heterojunction, *Microelectron. Reliab.* **78**, 156–160 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.07.097>
35. C. Inguibert, K. Lemi re, S. Yjjou, M. Ruffenach, C. Aicardi, NIEL with Various Damage Energy Threshold Applied to Solar Cells Degradation Prediction, *Proc. 24th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, 1–14 (2024).

36. H. Fiedler, P. Gupta, J.V. Kennedy, Ion Irradiation of Halide Perovskites: Role of Defect Engineering for Enhanced Performance, *Small* **22**(9), e12001 (2026). <https://doi.org/10.1002/sml.202512001>
37. K. Biswas, The Nature of Defect Tolerance in (Some) Halide Perovskites, *APL Electron. Devices* **1**, 030901 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0282710>
38. D. Meggiolaro, F. De Angelis, First-Principles Modeling of Defects in Lead Halide Perovskites: Best Practices and Open Issues, *ACS Energy Lett.* **3**, 2206–2222 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b01212>
39. G. Alkhalifah, B. Wang, O.V. Prezhdo, W.-L. Chan, Suppressing Polaronic Defect–Photocarrier Interaction in Halide Perovskites by Pre-Distorting Its Lattice, *J. Am. Chem. Soc.* **147**, 2411–2420 (2025). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c12322>
40. R.J. Walters, G.P. Summers, Space Radiation Effects in Advanced Solar Cell Materials and Devices, *MRS Proc.* **692**, H10.2.1 (2001). <https://doi.org/10.1557/PROC-692-H10.2.1>

Авторлар туралы мәлімет:

Айгерім Ақылбаева – PhD, аға ғылыми қызметкер, Satbayev University, (Алматы, Қазақстан; e-mail: aigerimakylbayeva@gmail.com).

Жансая Омарова (автор-корреспондент) – PhD, қауым. профессор, Satbayev University, (Алматы, Қазақстан; e-mail: omarovazhansaya7@gmail.ru).

Айдана Есентай – аға оқытушы, Satbayev University, (Алматы, Қазақстан; e-mail: yessentai.aidana@gmail.com).

Дархан Ережеп – т.ғ.к., PhD, аға ғылыми қызметкер, Satbayev University, (Алматы, Қазақстан; e-mail: darhan_13@physics.kz).

Information about authors:

Aigerim Akylbayeva – PhD, Senior Researcher, Satbayev University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: Aigerimakylbayeva@gmail.com).

Zhansaya Omarova (corresponding author) – PhD, Associate Professor, Satbayev University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: omarovazhansaya7@gmail.ru).

Aidana Yessentai – Senior Lecturer, Satbayev University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: yessentai.aidana@gmail.com).

Darkhan Erezhep – cand. tech.sc., PhD, Senior Researcher, Satbayev University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: darhan_13@physics.kz).

Сведения об авторах:

Айгерім Ақылбаева – PhD, ЧС, Satbayev University, (Алматы, Казахстан; e-mail: Aigerimakylbayeva@gmail.com).

Жансая Омарова (автор-корреспондент) – PhD, ассоц. профессор, Satbayev University, (Алматы, Казахстан; e-mail: omarovazhansaya7@gmail.ru).

Айдана Есентай – старший преподаватель, Satbayev University, (Алматы, Казахстан; e-mail: yessentai.aidana@gmail.com).

Дархан Ережеп – к.т.н., PhD, ВНС, Satbayev University, (Алматы, Казахстан; e-mail: darhan_13@physics.kz).

Мақала тарихы: түсті: 16 ақпан 2026; түзетілді: 18 сәуір; қабылданды: 22 мамыр 2026.

Article history: received: 16 February 2026; revised: 18 April; accepted: 22 May 2026.

История статьи: поступила: 16 февраля 2026; после доработки: 18 апреля; принята: 22 мая 2026.

Жылу физикасы және теориялық жылу техникасы

Thermophysics and Theoretical Heat Engineering

Теплофизика и теоретическая теплотехника

В. Мукамеденқызы¹ , Б. Ақбердиев^{2*} 

¹Әл Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: bekzhanakberdiyev@gmail.com

БИНАРЛЫ ГАЗ ҚОСПАЛАРЫНДАҒЫ МЕХАНИКАЛЫҚ ТЕПЕ-ТЕҢДІК ТҰРАҚТЫЛЫҒЫНА ТЕМПЕРАТУРАНЫҢ ӘСЕРІН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Бұл жұмыс $Ar-N_2$ жүйесін мысалға ала отырып, гравитациялық өрістегі бинарлы газ қоспаларында температураның механикалық тепе-теңдік тұрақтылығына және массаалмасу сипатына әсерін зерттеуге арналған. Бұл жұмыс екі колбалы аппаратта газдардың изотермдік араласуын қарастырады, онда молекулалық массалары әртүрлі компоненттердің өзара диффузиясы кезінде тығыздықтың тұрақсыз концентрациялық стратификациясының пайда болуы механикалық тепе-теңдіктің бұзылуына әкеледі.

Зерттеудің негізгі мақсаты – әртүрлі қысымдарда диффузия-конвективті массаалмасу режимдерінің қалыптасуы мен дамуында температураның рөлін анықтау. Осы мақсатта компонент тасымалдау теңдеулері мен SST $k-\omega$ турбуленттік моделі қолданылған үшөлшемді кеңістіктегі ANSYS Fluent бағдарламалық пакетінде сандық модельдеу жүргізілді. Температура жүйенің тұрақтылығына өзара диффузия коэффициенттері мен қоспаның массаалмасу қасиеттерінің өзгеруі арқылы әсер ететін сыртқы параметр ретінде қарастырылады.

Бинарлы газ қоспасында механикалық тепе-теңдіктің тұрақтылығына температура шешуші фактор екені анықталды. Температураның көтерілуі компоненттердің диффузиялық қозғалғыштығының артуына байланысты концентрацияға негізделген гравитациялық конвекцияның әлсіреуіне әкеледі, бұл жүйенің тұрақтылық шекарасына жақын жерде тұрақталуында да, дамыған конвекция аймағында конвекциялық тасымалдаудың салыстырмалы тиімділігінің төмендеуінде де көрініс табады. Сандық модельдеу араласу процесінің уақыт бойынша динамикасын қалпына келтіруге және эксперименттік өлшеулерге қолжетімсіз конвективті құрылымдардың эволюциясын анықтауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер эксперименттік деректермен жақсы сәйкес келеді және бинарлы газ жүйелерінде диффузия-конвекциялық процестерді температуралық бақылау жөніндегі түсінікті кеңейтеді.

Түйін сөздер: бинарлы газ қоспалары, механикалық тепе-теңдік, температуралық әсер, сандық модельдеу.

V. Mukamedenkyzy¹, B. Akberdiyev^{2*}

¹Farabi University, Almaty, Kazakhstan

²Abai Kazakh national pedagogical university, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: bekzhanakberdiyev@gmail.com

Numerical modeling of the effect of temperature on the stability of mechanical equilibrium in binary gas mixtures

This work is devoted to studying the influence of temperature on the stability of mechanical equilibrium and the nature of mass transfer in binary gas mixtures in a gravitational field using the $Ar-N_2$ system as an example. It considers isothermal mixing of gases in a two-flask apparatus, in which the loss of mechanical equilibrium is caused by the formation of unstable concentration stratification of density during the mutual diffusion of components with different molecular weights.

The main objective of the study is to establish the role of temperature in the formation and evolution of diffusion-convective mass transfer regimes at different pressures. To this end, numerical modeling was performed in the ANSYS Fluent software package in a three-dimensional setting using component transport equations and the SST $k-\omega$ turbulent model. Temperature is considered as an external parameter affecting the stability of the system through changes in the mutual diffusion coefficients and transport properties of the mixture.

It has been established that temperature is a determining factor in the stability of mechanical equilibrium in a binary gas mixture. An increase in temperature leads to a weakening of concentration-driven gravitational convection due to an increase in the diffusion mobility of the components, which manifests itself both in the stabilization of the system near the stability boundary and in a decrease in the relative efficiency of convective transport in the region of developed convection. Numerical modeling made it possible to reconstruct the temporal dynamics of the mixing process and reveal the evolution of convective structures that is inaccessible to experimental measurements. The results obtained are in good agreement with experimental data and expand our understanding of the temperature control of diffusion-convective processes in binary gas systems.

Keywords: binary gas mixtures, mechanical equilibrium, temperature effect, numerical modeling.

В. Мукамеденқызы¹, Б. Ақбердиев^{2*}

¹Казахский национальный университет имени аль Фараби, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

*e-mail: bekzhanakberdiyev@gmail.com

Численное моделирование влияния температуры на устойчивость механического равновесия в бинарных газовых смесях

Работа посвящена исследованию влияния температуры на устойчивость механического равновесия и характер массопереноса в бинарных газовых смесях в гравитационном поле на примере системы $Ar-N_2$. Рассматривается изотермическое смешение газов в двухколбовом аппарате, при котором потеря механического равновесия обусловлена формированием неустойчивой концентрационной стратификации плотности в процессе взаимной диффузии компонентов с различными молекулярными массами.

Основной целью исследования является установление роли температуры в формировании и эволюции диффузионно-конвективных режимов массопереноса при различных давлениях. Для этого выполнено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent в трёхмерной постановке с использованием уравнений переноса компонентов и турбулентной модели SST $k-\omega$. Температура рассматривается как внешний параметр, влияющий на устойчивость системы через изменение коэффициентов взаимной диффузии и транспортных свойств смеси.

Установлено, что температура является определяющим фактором устойчивости механического равновесия в бинарной газовой смеси. Рост температуры приводит к ослаблению концентрационной гравитационной конвекции вследствие увеличения диффузионной подвижности компонентов, что проявляется как в стабилизации системы вблизи границы устойчивости, так и в снижении относительной эффективности конвективного переноса в области развитой конвекции. Численное моделирование позволило восстановить временную динамику процесса смешения и выявить эволюцию конвективных структур, недоступную при экспериментальных измерениях. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными и расширяют представления о температурном контроле диффузионно-конвективных процессов в бинарных газовых системах.

Ключевые слова: бинарные газовые смеси, механическое равновесие, температурный эффект, численное моделирование.

Кіріспе

Бинарлы газ қоспаларын зерттеу – қазіргі заманғы теориялық және қолданбалы гидродинамиканың негізгі міндеттерінің бірі, себебі мұндай жүйелердегі массаалмасу механизмдері қабатталған ортаның динамикалық қасиеттерін анықтап, физикалық және технологиялық процестердің кең ауқымына түбегейлі әсер етеді. Бинарлы газ қоспаларындағы массаалмасу процестерін тереңірек түсіну аэродинамика, астрофизика және климатология үшін, сондай-ақ химиялық және энергетикалық технологиялар саласындағы мәселелер үшін де негізгі маңызы бар [1–6].

Температура градиенті болмаса да, гравитациялық өрісте молекулалық массалары әртүрлі газдардың изотермдік өзара диффузиясы концентрацияға негізделген тығыздық стратификациясының пайда болуына әкелуі мүмкін [7–8]. Мұндай стратификация жүйеде механикалық тепе-теңдік бұзылып, диффузиялық режимінен концентрациялық гравитациялық конвекция режимге өту байқалады. Кинетикалық араласу режимдерінің өзгеруі тығыздық градиентінің пайда болуымен анықталады, ол температуралық біртектіліктің бұзылуынан да, қоспа компоненттерінің диффузиялық қасиеттеріндегі айырмашылықтардан да туындауы мүмкін [9–12].

Бинарлы газ жүйелерінде күрделі конвекциялық режимдердің қалыптасуы концентрация мен термодиффузия өрістерінің біркелкі еместігімен байланысты, бұл массатасымалдаудың бәсекелес механизмдерін тудырады. Тұрақсыздықтың дамуында компоненттердің өзара диффузия коэффициенттерінің айырмашылығы маңызды рөл атқарады, ол концентрация градиентінің кеңістік-уақыттық эволюциясының сипатын анықтайды. Изотермдік емес жағдайлардағы тұрақсыз диффузиялық процестерді талдау күрделірек мәселе болып табылады, себебі температура факторы екі түрлі жолмен көрініс табуы мүмкін: бір жағынан, температура градиенті тұрақсыздықтың дамуын жеделдететін катализатор ретінде әрекет ете алады, ал екінші жағынан, температураның

көтерілуі тасымалдау коэффициенттерінің өзгеруіне байланысты жүйені тұрақтандыруға әкелуі мүмкін [1, 8, 13–15]. Осы тұрғыдан алғанда, компоненттердің диффузиялық қозғалғыштығының рөлі изотермдік араласу жағдайларында айқын көрінеді, бұл осындай режимдерді концентрацияға негізделген гравитациялық конвекция механизмдерін талдауға ерекше қолайлы етеді.

Кең ауқымды тәжірибелік зерттеулердің қолжетімділігіне қарамастан, бинарлы газ қоспаларындағы механикалық тепе-теңдіктің тұрақтылығына температураның әсерін сандық сипаттау, әсіресе тәжірибелік деректерді сандық модельдеу нәтижелерімен салыстыру тұрғысынан алғанда әлі де шектеулі [16, 17]. Қазіргі есептеу әдістері ағын құрылымдары мен концентрациялық өрістерді егжей-тегжейлі талдауға мүмкіндік береді, бірақ олар сенімді эксперименттік деректерге негізделген мұқият тексеруді қажет етеді [12].

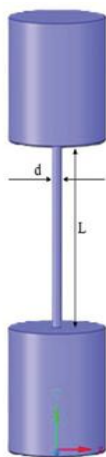
Зерттеудің мақсаты – конвективті ағынның дамуы жағдайында бинарлы газ қоспаларындағы концентрация өрістерінің құрылымын талдау және жүйенің механикалық тепе-теңдік шекараларының параметрлік тәуелділігін ескеретін сандық массаалмасу моделін әзірлеу және оны тексеру. Жұмыста массаалмасудың диффузиялық режимінен концентрациялық гравитациялық конвекция режиміне өтуін сипаттайтын өлшемсіз параметрлердің критикалық мәндерін анықтауға ерекше назар аударылады. Механикалық тепе-теңдіктің тұрақтылығы гидродинамикалық тұрақтылық теориясы шеңберінде сандық модельдеу әдістері арқылы зерттеледі. ANSYS Fluent бағдарламалық пакетінің [16–19] есептеу мүмкіндіктері концентрация градиенттерінің кеңістік-уақыттық динамикасы мен тұрақтылық шекараларын талдау үшін пайдаланылды. Жұмыста бинарлы аргон–азот газ қоспасы үшін массаалмасу режимінің өзгерісінің критикалық шекарасын тәжірибелік және сандық анықтау жүргізілді және есептелген нәтижелер тәжірибелік мәліметтермен жақсы сәйкестігін көрсетті.

Есептің қойылымы және сандық әдістер

Зерттеу нысаны ретінде [20]-да келтірілген, қысымы 4.02 МПа және температура аралығы 297–353 К жағдайларында жүргізілген тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері алынды. Бұл зерттеулер екі колбалы әдісті жүзеге асыратын эксперименттік қондырғыны

пайдалану арқылы орындалған, оның сұлбасы 1-суретте көрсетілген. Диффузиялық аппарат көлемдері бірдей екі колбадан ($V_u = V_l = 69.5 \text{ см}^3$) тұрады, олар диаметрі $d = 3.4 \text{ мм}$ және ұзындығы $L = 70 \text{ мм}$ болатын диффузиялық арна арқылы өзара байланысқан. Эксперименттердің ұзақтығы

17 минутты құрады. ANSYS Fluent бағдарламалық кешені еркін геометриялық диффузиялық арналарды үшөлшемді модельдеуге мүмкіндік береді [20], сондай-ақ таңдалған теңдеулер жүйесімен сипатталатын физикалық процестерді көрнекі түрде визуализациялауды қамтамасыз етеді.



1-сурет. Диффузиялық ұяшықтың және есептік модельдеу аймағының үшөлшемді моделі

Бинарлы газ қоспасын модельдеу кезінде есептеу аймағын дискреттеу үшін аралас тор әдісі қолданылды. Жүйенің цилиндрлік элементтері үшбұрыштық шектеулі элементтерге негізделген құрылымсыз тор арқылы жуықталып, диффузиялық арна төртбұрыштық элементтерден құралған құрылымды тор арқылы модельденді. Бұл тор құру стратегиясы қондырғының әртүрлі бөліктерінің геометриялық ерекшеліктерін тиісті түрде ескеруге мүмкіндік береді. 1 мм сипаттамалық тор ұяшығы өлшемін таңдау модель геометриясын дәл қайталауды және сандық шешімнің тұрақты сәйкестігін қамтамасыз етеді [21]. Шамамен 425000 элементтен тұратын есептеу аймағының жалпы рұқсат ету қабілеті бинарлы газ жүйесіндегі массаалмасу және араласу процестерін сенімді сипаттауға жеткілікті. Үшбұрышты және төртбұрышты элементтерді біріктіретін гибриді тор модельдеу дәлдігі мен есептеу тиімділігі арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді. Цилиндрлік аймақтарда үшбұрышты ұяшықтарды қолдану қисық беттерді дұрыс жуықтап көрсетуге мүмкіндік береді, ал диффузиялық арнадағы құрылымдық тор есептеу шығындарын айтарлықтай азайтады. Ұсынылған тәсіл бинарлы газ қоспаларындағы процестерді сандық модельдеу үшін есептеу торын құрудың қазіргі заманғы тәжірибелеріне сәйкес келеді, онда элемент түрлері мен өлшемдерін таңдау

аймақтың геометриялық күрделілігі мен есептеу дәлдігіне қойылатын талаптар арасындағы тепе-теңдік негізінде анықталады [22].

$Ar-N_2$ жүйесіндегі массаалмасуын модельдеу алғашқы тәжірибелік шарттарды ескеріліп жүргізілді: онда аргон жоғарғы колбада, ал азот төменгі колбада орналасқан [20]. Газдардың молекулалық массаларының айырмашылығынан туындайтын бұл конфигурация қоспа тығыздығының айқын гравитациялық стратификациясын қалыптастырады және механикалық тепе-теңдіктің бұзылуымен байланысты процестерді зерттеуге мүмкіндік береді. Математикалық модельдеу шеңберінде газ тәрізді ортаның физика-химиялық сипаттамалары тұрақты деп қабылданды. Тиісті параметрлердің сандық мәндері ANSYS Fluent бағдарламалық пакетіне енген дерекқорынан алынды.

Аппарат жабық жүйе ретінде модельделгендіктен, оның барлық шекарасында өткізбейтіндік (no-flux) шарттары белгіленеді. Мұндай шекаралық шарт математикалық тұрғыдан басқару бетіндегі кез келген массаалмасуды болдырмайды, осылайша жүйені материалдық құрамдастары бойынша сыртқы ортадан оқшаулайды. Араластыру процесінің изотермді болуын қамтамасыз ету үшін тиісті жылу шекаралық шарттары қолданылды, ал аппараттың корпусы құрылымдық тот баспайтын болаттан жасалған қатты қабырға ретінде модельденді, оның термодинамикалық және беріктік қасиеттері де стандартты ANSYS Fluent материалдар кітапханасынан [21–23] алынды.

Механикалық тұрақсыздықтан туындайтын конвективті ағындар бастапқы кезеңде күрделі эволюциялық динамиканы көрсетеді. Конвективті ағымдардың эволюциясы бірнеше кезеңнен тұрады: шағын конвективті бұзылыстардың сызықты өсуі, тұрақсыздық режимдерінің сызықты емес өзара әрекеттесуі, көпмасштабты вихрлік құрылымдардың қалыптасуымен турбулентті режимге өту және жүйе параметрлерімен анықталатын басқа да ерекшеліктер [20]. Әртүрлі қарқынды конвективтік ағымдары бар ортада бөлшектеме ағындарды талдау үшін $k-\omega$ турбуленттік моделін [22–24] қолдану орынды, ол массаалмасу процестерін кең ауқымда жеткілікті дәл сипаттауға мүмкіндік береді. Бастапқы және шекаралық шарттар келесідей қойылды: бастапқы уақытта диффузия аппаратының жоғарғы және төменгі колбаларда әртүрлі қос газ қоспалары болды. Компоненттердің молярлық үлестері тиісті торлық аймақтарға “патч” әдісі арқылы анықталды.

ANSYS Fluent бағдарламасында бинарлы газ қоспаларын модельдеу компоненттерге (массалық үлестер Y_1 және Y_2) арналған тасымалдау және қозғалыс теңдеулері арқылы жүзеге асырылады. Массалары молекулалық және турбулентті диффузияны ескере отырып конвекция-диффузия теңдеулерімен сипатталады, ал қоспаның тығыздығы таңдалған күй теңдеуі бойынша есептеледі. Формулаларға массалық үлес үшін тасымалдау теңдеуі кіреді [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho Y_1)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} Y_1) &= \nabla(\rho D_{eff} \nabla Y_1) + S_1, \\ \frac{\partial(\rho Y_2)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} Y_2) &= \nabla(\rho D_{eff} \nabla Y_2) + S_2, \end{aligned} \quad (1)$$

мұндағы D_{eff} – эффективті диффузия, S_1 , S_2 – компоненттердің мүмкін болатын массалық көздері мен жұтылуын ескеретін жалпыланған мүшелер. Қарастырылып отырған есепте қосымша масса көздері жоқ.

Стандартты k – ω моделі жартылай эмпирикалық тасымалдау теңдеулері жүйесіне негізделген, оған турбулентті кинетикалық энергия k және спецификалық диссипациялық жылдамдық ω теңдеулері кіреді, мұнда ω турбулентті энергияның диссипациялық жылдамдығы ε -нің k -ға қатынасы ретінде анықталады [21].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \vec{u} k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_k, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \vec{u} \omega) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_\omega, \end{aligned} \quad (2)$$

мұндағы G_k – орташа жылдамдықтың градиентінен туындайтын турбуленттілік нәтижесінде пайда болатын кинетикалық энергияның түзілуін сипаттайды; ρ – орта тығыздығы; $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ – жылдамдық векторы; G_ω – меншікті диссипация жылдамдығының ω генерациясын сипаттайды. Берілген теңдеулер жүйесінде Γ_k және Γ_ω , сәйкесінше, k және ω үшін тиімді турбулентті диффузияны сипаттайды; Y_k және Y_ω – диссипация мүшелері; S_k мен S_ω – пайдаланушы анықтайтын бастапқы шарттар, осы жұмыста олар нөлге тең деп есептеледі [17]. i және j индекстері координаттар бойынша қосындыны білдіреді ($i, j = 1, 2, 3$).

k – ω моделі үшін эффективті диффузиялық коэффициенттер келесі теңдеулермен беріледі:

$$\begin{aligned} \Gamma_k &= \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \\ \Gamma_\omega &= \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}. \end{aligned} \quad (3)$$

Прандтль турбуленттік сандары σ_k мен σ_ω диффузиялық жолмен тасымалданатын турбулентті кинетикалық энергияның тиімділігін және оның диссипация жылдамдығын анықтайды. Қолданылған модельде $\sigma_k = \sigma_\omega = 2$ тұрақты мәндер қабылданған. Молекулалық тұтқырлық μ турбулентті кинетикалық энергия k және диссипация жылдамдығының ω функциясы болып табылатын турбулентті тұтқырлықпен μ_t толықтырылады:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}, \quad (4)$$

мұндағы α^* – турбуленттік тұтқырлықты бәсеңдететін және тұрақты $\alpha^*=1$ мәнге ие коэффициент [21].

1 және 2 заттар үшін $\vec{J}_1$ және $\vec{J}_2$ диффузиялық ағындар келесі формулалар бойынша анықталады:

$$\begin{aligned} \vec{J}_1 &= - \left(\rho D_{12} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_1 \\ \vec{J}_2 &= - \left(\rho D_{12} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Ұсынылған модельде: μ_t – турбулентті тұтқырлық; $Sc_t = \mu_t / (\rho D_t)$ – Шмидт турбуленттік саны, Sc_t -тің стандартты мәні 0.7 деп алынады. D_{12} – өзара диффузия коэффициенті; T – температура.

Өзара диффузия коэффициенті D_{12} Чэппен–Энског кинетикалық теориясы [21] бойынша келесі формула бойынша анықталады:

$$D_{12} = 0.00186 \frac{\left[T^3 \left(\frac{1}{M_{w,1}} + \frac{1}{M_{w,2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{p_{abs} \sigma_{12}^2 \Omega_D}, \quad (6)$$

мұндағы M_w – мольдік масса (г/моль), T – температура (K), p_{abs} – абсолюттік қысым (атм), Ω_D – өлшемсіз соқтығысу диффузиялық интегралы, жүйедегі молекулалық өзара әрекеттестіктің интенсивтілігін сандық тұрғыда сипаттайды.

Барлық есептеу модельдері үшін қысым әдісіне негізделген тәсіл қолданылды. Есептеу сұйықтық динамикасы теңдеулерін кеңістік бойынша дискреттеу үшін 1-кестеде көрсетілген

схемалар пайдаланылды, олар [16, 18] еңбектерінде сынақтан өткізіліп, расталған.

1-кесте. Шешу тәсілдері

Шама	Дискреттеу
Gradient	Least Square Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind
Pseudo Time Method	Off
Transient Formulation	Second Order Implicit

Берілген параметрлер ANSYS Fluent ортасындағы сандық шешімнің конфигурациясын сипаттайды, басқару теңдеулеріне қолданылған дискретизация әдістерін, шамалау схемаларын және модельдеу процесінде пайдаланылатын есептеу алгоритмдерін егжей-тегжейлі көрсетеді. Тандалған, жақсы дәлелденген дискретизация схемаларының комбинациясы сандық шешімнің дәлдігі мен есептеу тиімділігі арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бұл конвективті және диффузиялық процестердің біріктірілген әсері бар мәселелер үшін аса маңызды және осы кластың мәселелері үшін артықшылыққа ие таңдау болып табылады [21, 25].

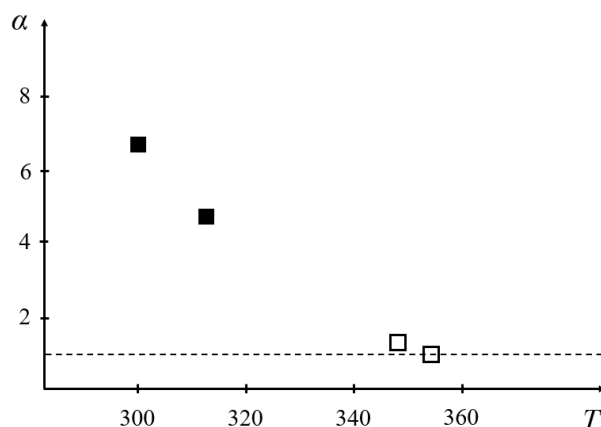
Сандық зерттеулердің нәтижелері және талқылау

Бинарлы газ қоспаларының динамикасын сандық модельдеу Ansys Fluent 2025 R2 бағдарламалық ортасында Intel Core i5-12450HX процессорымен, 16 Гб жедел жады және NVIDIA GeForce RTX 3050 графикалық үдеткішімен жабдықталған Lenovo LOQ 15IAX9 есептеу жүйесінде жүргізілді. Есептеу сценарийінің күрделілігі мен итерациялық конвергенция сипаттамаларына байланысты бір есептеу тәжірибесінің ұзақтығы 120 минуттан 180 минутқа дейін созылды.

2-сурет $Ar-N_2$ бинарлы газ жүйесінде температураға тәуелді α параметрінің $p = 0,584$ МПа тұрақты қысым мен $\tau = 17$ мин араластыру уақытындағы мәнін көрсетеді. α параметрі эксперименттік түрде алынған компоненттің молярлық үлесін Стефан–Максвелл теңдеулеріне негізделген таза диффузиялық массаалмасу болжамы бойынша есептелген сәйкес мәнге қатынасы ретінде анықталады. Осылайша, α – нақты массаалмасу процесінің диффузия режимінен ауытқуын сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік беретін интегралдық сипаттама.

Температура көтерілген сайын α параметрінің мәндері монотонды түрде азайып, бірге жақындайды, бұл тұрақты диффузия режиміне сәйкес келеді. $\alpha \leq 1$ аймағында эксперименттік деректер диффузиялық жуықтама бойынша есептеулермен жақсы сәйкес келеді, ал конвекциялық әсерлер болмайды немесе бәсеңдетілген сипатта болады. Бұл құбылыс өзара диффузия коэффициентінің артуымен және тығыздықтың стратификациясының рөлінің бір мезгілде азаюымен байланысты және бұл жүйенің механикалық тепе-теңдігін тұрақтандырады. Алынған α параметрінің температураға тәуелділігі берілген термобаралық жағдайларда

$Ar-N_2$ жүйесінде концентрацияға негізделген гравитациялық конвекциядан диффузия режиміне өту шекарасын анықтауға мүмкіндік береді.



2-сурет. $p = 0,584$ МПа, $\tau = 17$ мин кезіндегі $Ar - N_2$ жүйесі үшін α параметрінің температураға тәуелділігі: ■, □ - эксперименттік деректер [20]; нүктелі сызық – диффузия болжамына негізделген есептеу

Суреттен көрініп тұрғандай, $\alpha > 1$ мәндері салыстырмалы түрде төмен температураларда байқалады, бұл эксперименттік массаалмасу диффузиялық есептеуден асатынын көрсетеді. Бұл жүйеде механикалық тепе-теңдіктің бұзылуын және концентрациялық гравитациялық конвекцияның дамуын көрсетеді, онда конвекциялық ағындардың пайда болуы массаалмасуын күшейтеді. Осы температуралық ауқымда молекулалық диффузия пайда болған тығыздық ауытқуларын басуға жеткіліксіз болып, конвекциялық механизмнің үлесі басым болады.

2-кестеде концентрациялардың тәжірибелік, теориялық (Стефан–Максвелл теңдеулері бойынша) және сандық есептік (ANSYS Fluent бағдарламасындағы) мәндері келтірілген. Кестеде көрсетілгендей, $p = 4,02$ МПа қысым кезінде $Ar-N_2$ жүйесі үшін төменгі колбаға диффузияланған аргон мөлшері 297–353 К температура аралығында температураның артуымен монотонды түрде өседі. Сонымен қатар, Стефан–Максвелл теңдеулері бойынша алынған есептік мәндер байқалатын массалық тасымалды айтарлықтай төмен бағалайды, ал ANSYS Fluent бағдарламасында жүргізілген модельдеу нәтижелері бүкіл температура диапазонында тәжірибелік деректермен жақсы сәйкес келеді. Бұл жоғары қысым жағдайында жүйе концентрациялық гравитациялық конвекция аймағында терең орналасқан кезде массалық тасымалдаудың конвективтік механизмінің тұрақты түрде басым болатынын көрсетеді.

Алғаш қарағанда мұндай көрініс 2-суретте көрсетілген нәтижелерден өзгеше болып көрінеді, мұнда салыстырмалы түрде төмен қысымда ($p = 0,584$ МПа) температураның артуымен тәжірибелік мольдік үлестер, сонымен қатар α параметрі азайып, диффузиялық шекке ұмтылады. Алайда, 2-сурет пен 2-кесте қысым бойынша әртүрлі аймақтарға сәйкес келетінін және тиісінше жүйенің «диффузия–конвекция» шекарасына қатысты әртүрлі күйде орналасқанын атап өткен жөн. $p = 0,584$ МПа кезінде жүйе критикалық аймаққа жақын орналасады: температураның артуы өзара диффузия коэффициентін арттырып, сонымен қатар тиімді Рэлей санын төмендетеді. Бұл механикалық тепе-теңдіктің тұрақтануына және конвекция үлесінің азаюына алып келеді - нәтижесінде α параметрі бірге ұмтылады.

2-кесте. $p = 4.02$ МПа және $\tau = 17$ мин кезінде $Ar-N_2$ жүйесі үшін төменгі колбаға диффузияланған Ar мөлшері

Температура, K	Компоненттердің концентрациялары, мольдік үлестер		
	Эксперимент [20]	Стефан–Максвелл бойынша есептелген	Ansys Fluent
297	0.1403	0.0018	0.1349
313	0.1482	0.0020	0.1498
343	0.1534	0.0023	0.1614
353	0.1698	0.0024	0.1719

$p = 4,02$ МПа кезінде жағдай өзгеше: жүйе конвективтік аймақтың терең бөлігінде орналасқан және қарастырылып отырған

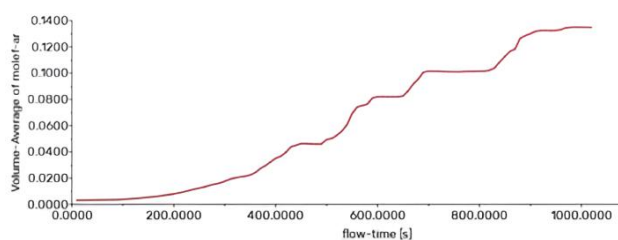
температура диапазонының барлығында режим конвективтік күйде сақталады. Бұл жағдайда температураның артуы заттың жалпы тасымалының біршама өсуіне алып келеді (2-кесте), алайда α параметрін қайта есептегенде оның мәндері температура өскен сайын төмендейді, яғни конвективтік тасымалдың диффузиялық тасымалдан салыстырмалы артықшылығы әлсірейді. Осылайша, 2-кесте мен 2-сурет қарама-қайшы емес, керісінше, бірін-бірі толықтыратын құбылыстарды сипаттайды: төмен қысымдарда температураның артуы жүйені диффузия басым режимге ауыстырса, ал жоғары қысымдарда конвективтік режим сақталады, бірақ температураның өсуіне қарай оның тиімділігі біртіндеп төмендейді.

Эксперименттік тәсілге қарағанда сандық модельдеу массаалмасу процесінің толық уақыттық эволюциясын қалпына келтіруге мүмкіндік береді, өйткені экспериментте тек соңғы уақыттағы концентрацияның интегралдық мәні ғана өлшенеді. Бұл тәсіл бастапқы кезеңді, өтпелі режимдерді және квази-тұрақты араласу құрылымының қалыптасуын қамтиды, соның нәтижесінде механикалық тепе-теңдіктің тұрақсыздық механизмдерін тереңірек талдауға жағдай жасалады.

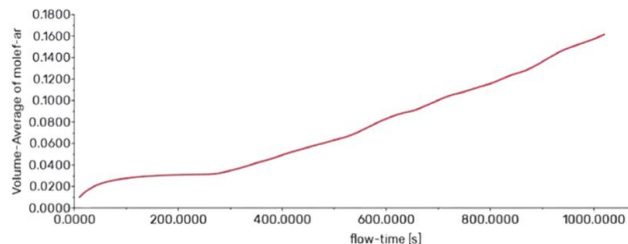
3а-суреттен көрінгендей, $T = 297$ К температурада аргон концентрациясының уақыттық тәуелділігі айқын бейстационарлықпен сипатталады, ол массатасымалдың үдеуі мен баяулауы кезектесіп отыратын аймақтардың пайда болуымен көрінеді. Мұндай көрініс диффузиялық арнада конвективтік құрылымдардың біртіндеп пайда болуы, дамуы және ішінара ыдырауы нәтижесінде туындайды, бұл концентрациялық гравитациялық конвекция аясында зат тасымалының импульстік күшеюіне әкеледі. Температураның $T = 313$ және 343 К-ге дейін артуымен (3b, 3c-суреттер) уақыттық тәуелділіктер біршама тегістелген әрі тұрақты сипатқа ие болады және флуктуация амплитудасы азайған орнықты конвективтік режимнің қалыптасуын көрсетеді. Температураның өсуі өзара диффузия коэффициентінің артуымен қатар тығыздық стратификациясының салыстырмалы үлесінің төмендеуімен қатар жүреді, соның нәтижесінде конвективтік ағындар импульстік сипатын жоғалтып, уақыт бойынша анағұрлым реттелген күйге өтеді. $T = 353$ К температурада (3d-сурет) қысық монотонды болып, уақыттың біркелкі функциясына жақындайды. Бұл массатасымалының квазистационарлық сипатын және жүйенің механикалық тепе-теңдігінің одан әрі тұрақтануын көрсетеді. Берілген қысымда конвективтік механизм сақталғанымен, оның

кеңістіктік-уақыттық құрылымы анағұрлым реттелген сипатқа ие болады, ал молекулалық диффузияның жалпы тасымалдағы үлесі артып,

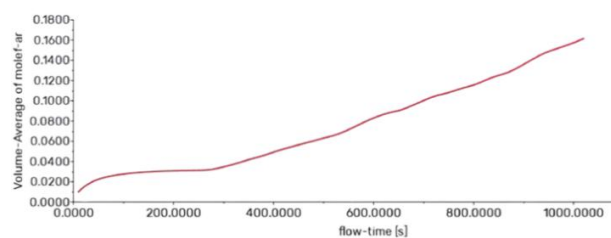
айқын бейстационарлық эффекттердің бәсеңдеуіне алып келеді.



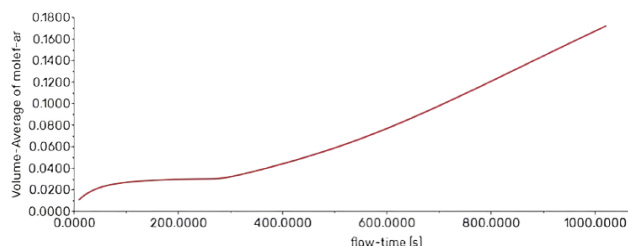
а)



ә)



б)



в)

3-сурет. $p=4.02$ МПа және $t=17$ мин кезінде Ar-N₂ жүйесі үшін төменгі колбадағы Ar концентрациясы өзгерісінің уақытқа тәуелділігі: а) $T=297$ K; ә) $T=313$ K; б) $T=343$ K; в) $T=353$ K.

Қорытынды

Бұл жұмыста гравитациялық өрісте изотермдік араластыру жағдайында бинарлы Ar–N₂ газ қоспасында температураның механикалық тепе-теңдік тұрақтылығына және массаалмасу сипатына әсерін эксперименттік және сандық әдістер арқылы зерттеу жүргізілді. Температура диффузия-конвекциялық режимдердің қалыптасуында шешуші рөл атқаратыны және қоспаның тасымалдау қасиеттерін өзгерте отырып диффузиялық және концентрацияға негізделген гравитациялық конвекция арақатынасын басқаратыны көрсетілді.

Температураның көтерілуі концентрациялық гравитациялық конвекцияның әлсіреуіне әкелетіні анықталды, бұл тұрақтылық шекарасына жақын жердегі механикалық тепе-теңдіктің тұрақталуында да, дамыған конвекция аймағындағы конвекциялық массаалмасудың салыстырмалы тиімділігінің төмендеуінде де көрініс табады.

ANSYS Fluent бағдарламалық пакетінде үшөлшемді конфигурацияда массаалмасу теңдеулері мен SST $k-\omega$ турбуленттік моделі

қолданылып жүргізілген сандық симуляциялар интегралдық массаалмасу сипаттамалары бойынша эксперименттік нәтижелермен жақсы сәйкестігін көрсетті. Сандық әдістің басты артықшылығы – араласу процесінің толық уақыттық дамуын, соның ішінде тұрақсыздықтың бастапқы кезеңі мен кейінгі квази-тұрақты конвективті құрылымдардың қалыптасуын қалпына келтіру мүмкіндігі. Бұл концентрация мәндерімен шектелген эксперименттік өлшеулер шеңберінде қол жеткізу мүмкін емес.

Алынған нәтижелер температураның бинарлы газ қоспаларындағы механикалық тепе-теңдік тұрақтылығына әсер етуінің физикалық механизмдерін анықтап, концентрациялық гравитациялық конвекцияның табиғаты түсінігін кеңейтеді. Ұсынылған тәсіл мен анықталған заңдылықтар тығыздығы қабаттасқан газ жүйелеріндегі массаалмасуды модельдеуде қолданылуы мүмкін және үшкомпонентті және көпкомпонентті газ қоспаларын одан әрі зерттеудің негізін құрайды.

Авторлардың үлесі

В. Мукамеденқызы: әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, мәтінді редакциялау және толықтыру, ғылыми жетекшілік, жобаны басқару, тұжырымдама жасау, жарияланған жұмысты дайындау; **Б. Ақбердиев:** бағдарламалық код пен қолдаушы алгоритмдерді іске асыру; компьютерлік бағдарламаларды жобалау, формалды талдау, әдістемені әзірлеу, деректерді өңдеу және басқару, қолжазбаның бастапқы нұсқасын дайындау және жазу.

Әдебиеттер

1. V. Kossov, H. Altenbach, Diffusion mechanisms of convective instability in liquid and gas mixtures, *Z Angew Math Mech.* **103**, e202300801 (2023). <https://doi.org/10.1002/zamm.202300801>
2. D. Livescu, J.R. Ristorcelli, M.R. Petersen and R.A. Gore, New phenomena in variable-density Rayleigh–Taylor turbulence, *Physica Scripta* **2010**(142), 014015 (2010). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2010/T142/014015>
3. A. Mialdun, H. Bataller, M. M. Bou-Ali, M. Braibanti, F. Croccolo, A. Errarte, J. M. Ezquerro, J. J. Fernández, Yu. Gaponenko, L. García-Fernández, J. Rodríguez & V. Shevtsova, Preliminary analysis of Diffusion Coefficient Measurements in ternary mIXtures 4 (DCMIX4) experiment on board the International Space Station, *The European Physical Journal E.* **42**, 87 (2019). <https://doi.org/10.1140/epje/i2019-11851-6>
4. Y. Gaponenko, A. Mialdun & V. Shevtsova, Experimental and numerical analysis of mass transfer in a binary mixture with Soret effect in the presence of weak convection, *The European Physical Journal E.* **37**, 90 (2014). <https://doi.org/10.1140/epje/i2014-14090-5>
5. O. Fedorenko & I. Poyarkov, Instability of mechanical equilibrium in non-ideal gas mixtures. *Recent Contributions to Physics* **2024**(3), 116–124 (2024). <https://doi.org/10.26577/RCPh.2024v90i3-014>
6. V. Kossov, O. Fedorenko, D. Zhakebayev, V. Mukamedenkyzy and D. Kulzhanov, Convective mass transfer of a binary gas mixture in an inclined channel. *Z Angew Math Mech.* **102**, e201900197 (2022). <https://doi.org/10.1002/zamm.201900197>
7. A. Vailati, S. Xu and S. Aime, Diffusion and convection in nature, *European Physical Journal E.* **44**, 145 (2021). <https://doi.org/10.1140/epje/s10189-021-00148-0>
8. N.B. Ankusheva, V.N. Kossov & V.D. Seleznev, Effect of diffusion channel inclination on stability of mechanical equilibrium in isothermal binary gas mixtures, *J Appl Mech Tech Phy.* **51**, 62–64 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10808-010-0009-y>
9. G. Ahlers, S. Grossmann & D. Lohse, Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh–Bénard convection, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 503 (2009). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.503>
10. R. Liyanage, Direct comparison of density-driven convective mixing in a three-dimensional porous medium, *Physical Review Fluids* **9**, 043802 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.043802>
11. A. Banerjee, Rayleigh–Taylor Instability: A Status Review of Experimental Designs and Measurement Diagnostics, *Journal of Fluids Engineering* **142**(12), 12-29 (2020). <https://doi.org/10.1115/1.4048349>
12. V.N. Kossov, S.A. Krasikov, S.M. Belov, O.V. Fedorenko, M. Zhaneli, Comparative study of evolution of structured flows at boundary of the regime change “diffusion — concentration convection” in isothermal multicomponent mixing in gases by techniques of visual and numerical analysis, *Bulletin of the Karaganda University “Physics” series*, **109**(1), 49-58 (2023). <https://doi.org/10.31489/2023ph1/49-58>
13. V. Kosov, O.V. Fedorenko, M.K. Asembaeva, V. Mukamedenkyzy, Changing diffusion-convection modes in ternary mixtures with a diluent gas, *Theor. Found. Chem. Engin.* **54**(2), 289-296 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0040579520020086>
14. T. Qiu, C. Li, Y. Zhang, W. Ge, HS-PPM simulation for diffusion coefficients of binary and multicomponent gas mixtures, *AIChE Journal*, **71**(9), e18891 (2025). <https://doi.org/10.1002/aic.18891>
15. V.V. Dil'man, V.A. Lotkhov, Molecular turbulent evaporation in a gravitational field, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **49**(1), 102–106 (2015). <https://doi.org/10.1134/S0040579515010017>
16. V.N. Kossov, V. Mukamedenkyzy, A. Tolepbergen and H. Altenbach, Peculiarities of combined mixing caused by instability of mechanical equilibrium of isothermal ternary gas mixture at diffusion, *International Journal of Chemical Engineering* **1**, 9643371 (2025). <https://doi.org/10.1155/ijce/9643371>
17. T. Qiu, C. Li, Y. Zhang and W. Ge, HS-PPM simulation for diffusion coefficients of binary and multicomponent gas mixtures, *AIChE Journal* **71**(9), e18891 (2025). <https://doi.org/10.1002/aic.18891>
18. V. Mukamedenkyzy, A.G. Tolepbergen, Some features of rayleigh-taylor convection in the mixing of ideal gas mixtures, *Recent Contributions to Physics* **92**(1), 110-119 (2025). <https://doi.org/10.26577/RCPh202592112>
19. D.B. Zhakebayev, O.V. Fedorenko, V.N. Kossov, V. Mukamedenkyzy and O.L. Karuna, Simulation of concentration convection in an inclined channel, *Heat Transfer Research* **53**(15), 39-52 (2022). <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2022043133>
20. Д.У. Кулжанов, Устойчивость механического равновесия в бинарных газовых смесях при различных температурах, *Recent Contributions to Physics* Сер. физ. **2**, 115-118 (2002).
21. User's ANSYS Fluent Guide, Release 2025. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA. <https://www.ansys.com/>
22. H. Kutkan, J. Guerrero, Turbulent premixed flame modeling using the algebraic flame surface wrinkling model: a comparative study between OpenFOAM and ANSYS Fluent, *Fluids* **6**, 462 (2021). <https://doi.org/10.3390/fluids6120462>
23. N. Slavinskaya & O. Haidn, Direct numerical simulation of spray and dispersion of liquid fuel droplets, *Recent Contributions to Physics* **2023**(1), 72–80 (2023). <https://doi.org/10.26577/RCPh.2023.v84.i1.09>
24. O. Nouhaila, M. Hassane, M.L. Scutaru and L. Jelenschi, On the accuracy of turbulence model simulations of the exhaust manifold, *Applied Sciences* **14**, 5262 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14125262>

25. M. A. Abd Halim, N. A. R. Nik Mohd, M. N. Mohd Nasir and M. N. Dahalan, The Evaluation of k- ϵ and k- ω Turbulence Models in Modelling Flows and Performance of S-shaped Diffuser, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* **15**, 5171-5177 (2018). <https://doi.org/10.15282/ijame.15.2.2018.2.0399>

Авторлар туралы мәлімет:

Венера Мукамеденқызы – физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор. Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: mukameden@inbox.ru).

Бекжан Акбердиев (автор-корреспондент) – PhD студенті, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, (Алматы, Қазақстан, e-mail: bekzhanakberdiyev@gmail.com).

Information about authors:

Venera Mukamedenkazy – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan), e-mail: mukameden@inbox.ru).

Bekzhan Akberdiyev (corresponding author) – PhD student, Abai Kazakh National Pedagogical University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bekzhanakberdiyev@gmail.com).

Сведения об авторах:

Венера Мукамеденқызы – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, (Алматы, Казахстан, e-mail: mukameden@inbox.ru).

Бекжан Акбердиев (автор-корреспондент) – PhD студент, Казахский национальный педагогический университет им. Абая, (Алматы, Казахстан, e-mail: bekzhanakberdiyev@gmail.com).

Мақала тарихы: түсті: 22 ақпан 2026; түзетілді: 14 сәуір; қабылданды: 21 мамыр 2026.

Article history: received: 22 February 2026; revised: 14 April; accepted: 21 May 2026.

История статьи: поступила: 22 февраля 2026; после доработки 14 апреля; принята: 21 мая 2026.

Roohi Zafar¹ , Muhammad Kamran^{2*} , Tahir Malik³ , Kousar Shaheen¹ 

¹Department of Physics, NED University of Engineering & Technology, Karachi, Pakistan

²Department of Computer Science & Information Technology, NED University of Engineering & Technology, Karachi, Pakistan

³Department of Telecommunications Engineering, NED University of Engineering & Technology, Karachi, Pakistan

*e-mail: kamran@cloud.neduet.edu.pk

CHARACTERIZING ENVIRONMENTAL THERMAL FLUCTUATIONS FOR USE IN TRUE RANDOM NUMBER GENERATORS

Random number generation is significant for secure communication, data security and cryptography. However, while Quantum Random Number Generators (QRNGs) rely on quantum uncertainty, environmental data can also serve as practical sources of randomness for true random number generation. Environmental data such as temperature, humidity, and wind speed exhibit continuous variability over time; these changes arise from complex weather behavior. In this paper, temperature data collected from two meteorological stations in Pakistan, Karachi and Hyderabad, are used to generate random bits. Everyday temperature values are transformed into binary sequences using a mean-based thresholding technique, followed by post-processing with the Von Neumann extractor to decrease bias and correlation. The quality of the generated random bits is evaluated using Shannon entropy, lossless compression testing with the Gzip, Bzip2, and LZMA algorithms, the NIST SP 800-22 statistical test suite and the auto-correlation analysis. The results determine that correctly processed temperature-based entropy can produce statistically usable random sequences suitable for randomness testing and security-related research.

Keywords: Random Bit Generation, temperature data, entropy extraction, Shannon entropy, auto-correlation, Von Neumann filtering, NIST SP 800-22.

Рухи Зафар¹, Мұхаммед Камран^{2*}, Тахир Малик³, Кусар Шахин¹

¹Физика кафедрасы, NED Инженерлік және технологиялық университеті, Карачи, Пәкістан

²Информатика және ақпараттық технологиялар кафедрасы,

NED Инженерлік және технологиялық университеті, Карачи, Пәкістан

³Телекоммуникация инженериясы кафедрасы,

NED Инженерлік және технологиялық университеті, Карачи, Пәкістан

* e-mail: kamran@cloud.neduet.edu.pk

Шынайы кездейсоқ сан генераторларында пайдалану үшін қоршаған ортадағы термалық флуктуацияларды сипаттау

Кездейсоқ сандарды генерациялау қауіпсіз байланыс, деректерді қорғау және криптография үшін өте маңызды. Дегенмен, кванттық кездейсоқ сандар генераторлары (QRNG) кванттық белгісіздікке сүйенсе де, қоршаған орта деректері шынымен кездейсоқ сандарды генерациялау үшін кездейсоқтықтың практикалық көздері ретінде де қызмет ете алады. Температура, ылғалдылық және жел жылдамдығы сияқты қоршаған орта деректері уақыт өте келе үздіксіз өзгергіштікті көрсетеді; бұл ауытқулар ауа райының күрделі мінез-құлқынан туындайды. Бұл мақалада кездейсоқ биттерді генерациялау үшін Пәкістандағы, Карачидегі және Хайдарабадтағы екі метеорологиялық станцияда жиналған температура деректері пайдаланылады. Тәуліктік температура мәндері орташа мәнге негізделген шекті есептеу әдісін қолдана отырып, екілік тізбектерге түрлендіріледі, содан кейін ауытқу мен корреляцияны азайту үшін фон Нейман экстракторымен кейінгі өңдеу жүргізіледі. Генерацияланған кездейсоқ биттердің сапасы Шеннон энтропиясы, Gzip, Bzip2 және LZMA

алгоритмдерін қолдана отырып, шығынсыз сығымдау сынағы, NIST SP 800-22 статистикалық сынақ жиынтығы және автокорреляциялық талдау арқылы бағаланады. Нәтижелер дұрыс өңделген температураға негізделген энтропия кездейсоқтықты тексеру және қауіпсіздік зерттеулеріне қолайлы статистикалық тұрғыдан пайдалы кездейсоқ тізбектерді жасай алатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: кездейсоқ бит генерациясы, температура деректері, энтропияны алу, Шеннон энтропиясы, автокорреляция, фон Нейман сүзгісі, NIST SP 800-22.

Рухи Зафар¹, Мухаммад Камран^{2*}, Тахир Малик³ и Коусар Шахин¹

¹Кафедра физики, Инженерно-технологический университет NED, Карачи, Пакистан

²Кафедра компьютерных наук и информационных технологий,
Инженерно-технологический университет NED, Карачи, Пакистан

³Кафедра телекоммуникационной инженерии,
Инженерно-технологический университет NED, Карачи, Пакистан

*e-mail: kamran@cloud.neduet.edu.pk

Характеризация температурных флуктуаций окружающей среды для использования в генераторах истинно случайных чисел

Генерация случайных чисел имеет важное значение для безопасной связи, защиты данных и криптографии. Однако, хотя квантовые генераторы случайных чисел (QRNG) основаны на квантовой неопределенности, данные об окружающей среде также могут служить практическими источниками случайности для генерации истинно случайных чисел. Данные об окружающей среде, такие как температура, влажность и скорость ветра, демонстрируют непрерывную изменчивость во времени; эти изменения возникают из-за сложного поведения погоды. В данной работе для генерации случайных битов используются данные о температуре, собранные на двух метеорологических станциях в Пакистане, Карачи и Хайдарабаде. Ежедневные значения температуры преобразуются в двоичные последовательности с использованием метода пороговой обработки на основе среднего значения, после чего проводится постобработка с помощью экстрактора фон Неймана для уменьшения смещения и корреляции. Качество сгенерированных случайных битов оценивается с помощью энтропии Шеннона, тестирования сжатия без потерь с использованием алгоритмов Gzip, Bzip2 и LZMA, статистического набора тестов NIST SP 800-22 и автокорреляционного анализа. Результаты показывают, что правильно обработанная энтропия, основанная на температуре, может создавать статистически пригодные случайные последовательности, подходящие для проверки случайности и исследований в области безопасности.

Ключевые слова: генерация случайных битов, данные о температуре, извлечение энтропии, энтропия Шэннона, автокорреляция, фильтрация фон Неймана, NIST SP 800-22.

Introduction

Random Number Generators (RNGs) are necessary for applications such as statistical analysis, cryptography, simulation, and secure communications. Centered on their randomness sources, RNGs are commonly divided into two categories: Pseudo-Random Number Generators (PRNGs) and True Random Number Generators (TRNGs) [1-3]. Generators that produce random numbers sequentially using deterministic algorithms are called pseudo-random number generators. [4-8]. Although these numbers appear random, they can be reproduced if the algorithm or the starting value is

known, which may pose a security risk in security-critical applications [9,10]. In contrast. A TRNG is a function or a device that is based on a rather unpredictable physical phenomenon known as the entropy source. These entropy sources can originate from natural phenomena. Sources such as thermal noise, clock jitter, atmospheric noise, bioelectrical signals, environmental variations and quantum phenomena contain natural entropy that cannot be reproduced deterministically [11-15]. Among many true random number generators, QRNG systems are a special class of TRNGs in which randomness is

derived from quantum-mechanical processes and offer solid analytical guarantees of indeterminacy [16-19], but still challenges such as maintaining quantum coherence, achieving precise measurement, and generating stable bits limit their practical deployment. As a result, alternative approaches, such as environmental entropy sources, have emerged as simpler, low cost and more accessible options for random number generation. These sources are neither algorithmic, like PRNGs, nor purely quantum, like Quantum Random Number Generation, but rather exploit complex natural processes. Famous examples include uses of Atmospheric turbulence, atmospheric radio noise, and natural wind flow [20-23]. By

applying mathematical normalization, disordered sampling, and post-processing techniques, these real-world signals can be converted into statistically usable true random numbers suitable for secure applications [24-28]. In this research, Real-world temperature deviations are used to generate random bits, the collected data are transformed in to binary sequence followed by post processing to remove bias and correlations, which are then tested with standard randomness tests. Using temperature data from two geographically distinct meteorological stations, this study demonstrates a simple, reproducible, and low-cost approach to generating and validating random bits from real-world environmental data.

Data source

In this research, daily temperature values for Karachi and Hyderabad were extracted from earlier publications that analyzed meteorological records for

different cities in Pakistan [29,30]. The daily temperature dataset is used as an entropy source for generating random bits.

Research methodology

Figure 1 illustrates the suggested methodology for temperature-based true random number generation, including data acquisition from published datasets, mean-based binary conversion, Von

Neumann post-processing, and randomness evaluation using Shannon entropy and NIST SP 800-22 tests.

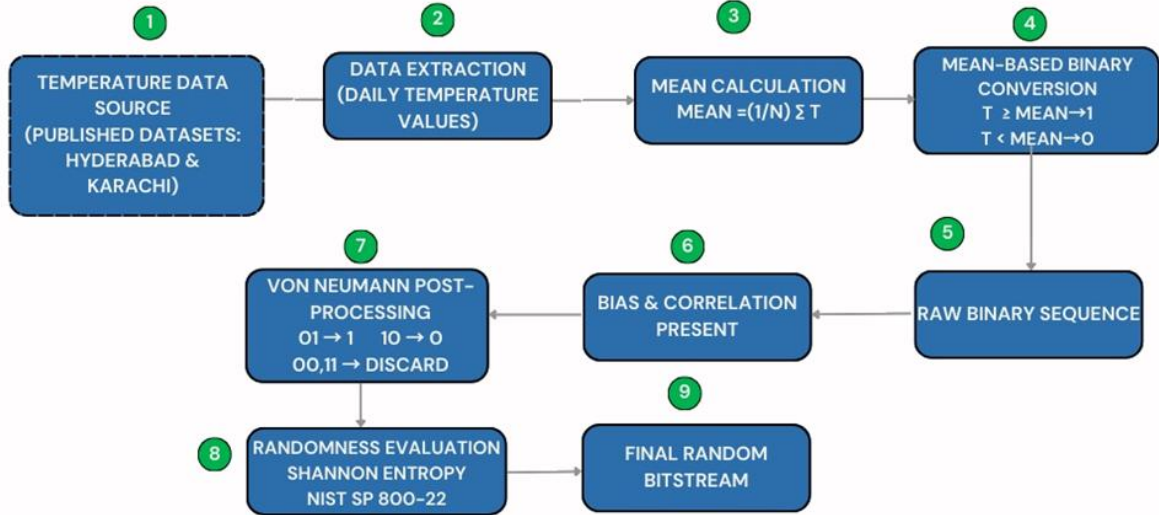


Figure 1 - Flow chart of methodology

Validation of Quantum Random Numbers

Shannon entropy testing

To initially check the randomness of the generated bit stream, a self-test based on Shannon entropy was performed. Entropy measurement provides a quantitative estimate of unpredictability in binary data and is defined as:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

where p_i represents the probability of each possible outcome within a selected data window in Eq. (1), entropy values near 1 bit indicate highly unpredictable, statistically balanced randomness. Using reference [28], entropy was computed with a sliding-window approach over the generated sequence, as shown in Figure 2.

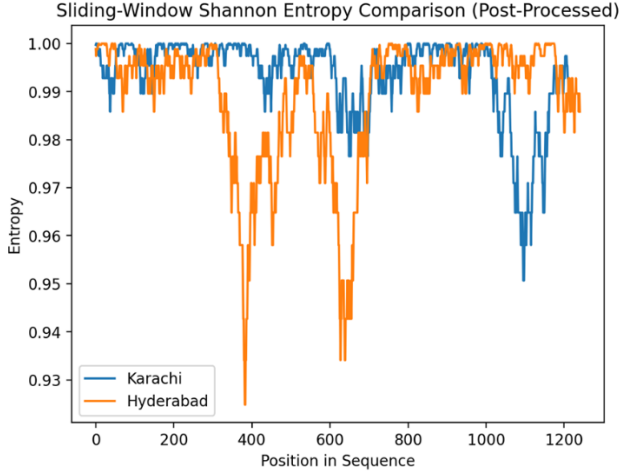


Figure 2 – Shannon Entropy Variation Across Post-Processed Binary Sequences from Karachi and Hyderabad

It is also observed from Figure 2, that Shannon entropy remains nearly 1 for both datasets, which indicates that the temperature-based entropy source, after post-processing, generates high-quality true random bits suitable for further statistical validation and practical TRNG applications

Compression test method

To calculate the randomness of the generated binary sequences, a compression test was performed. The main idea of this test is that truly random data should not contain patterns; it should be difficult to compress. If a compression algorithm cannot significantly reduce the file size, the data can be considered highly random. In this research, binary sequences were first converted into byte format and stored as files. Three commonly used lossless compression algorithms were then applied to the files:

- Gzip
- Bzip2
- LZMA

The compression process was implemented using Python. For each dataset, the original and

compressed file sizes were recorded. The compression ratio was then calculated using:

$$\text{Compression Ratio} = \frac{\text{Compression Size}}{\text{Original Size}} \quad (2)$$

The original and compressed file sizes were recorded and reported in Tables 1 and Table 2.

Table 1: Compression Test Results for the weather station Hyderabad, Original file size is 499 bytes

Algorithm	Compressed Size	Compression Ratio
Gzip	522	1.04609
Bzip2	659	1.32064
LZMA	560	1.12224

Table 2: Compression Test Results for the weather station Karachi, Original file size of 498 bytes

Algorithm	Compressed Size	Compression Ratio
Gzip	521	1.04618
Bzip2	673	1.35140
LZMA	560	1.12449

The compression ratio for both stations is close to 1, indicating that the binary sequences lack discernible patterns and behave similarly to random data. Therefore, the generated sequences demonstrate good randomness according to the compression-based randomness test.

NIST Test Suit

To further validate that the high entropy observed translates into statistically robust randomness, we next apply the NIST statistical suite. Figures 3 and Figure 4 show the randomness quality of the temperature data before and after applying the Von Neumann debiasing and the entropy extractor (post-processing).

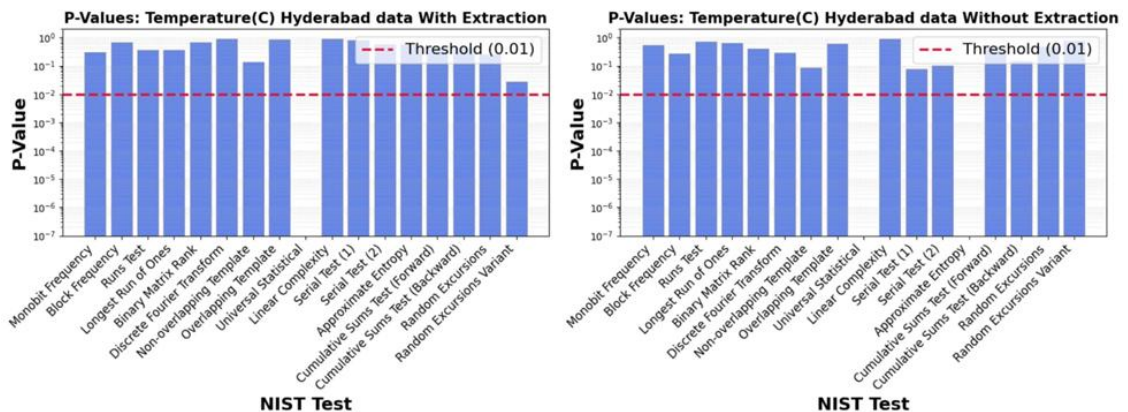


Figure 3 – P-Value Comparison of NIST Randomness Tests for Hyderabad Temperature Data

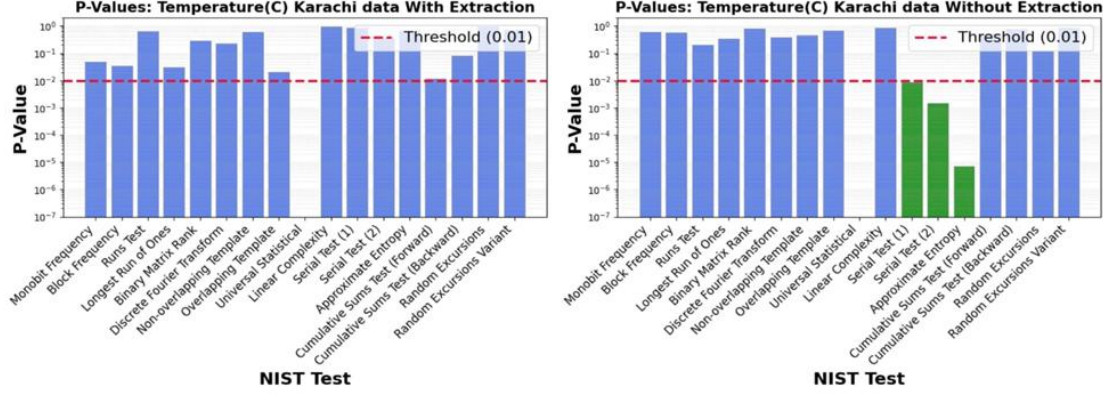


Figure 4 – P-Value Comparison of NIST Randomness Tests for Karachi Temperature Data

The raw data fails some NIST randomness tests because real-world physical measurements often exhibit small biases, and the data size for a given research is very limited. After post-processing, the sequence becomes more unpredictable and more balanced, thereby increasing the randomness of the bit sequence. Because of this enhancement, the post-processed data passes the most NIST tests in both Hyderabad and Karachi.

Autocorrelation analysis

The statistical independence of the entropy sources was evaluated by calculating the absolute

autocorrelation coefficient, $|R(k)|$, for the thermal fluctuation data harvested from Karachi and Hyderabad. As illustrated in Figure 5, both datasets exhibit a rapid decorrelation, with $|R(k)|$ dropping by approximately two orders of magnitude immediately following the initial lag ($k = 1$). Throughout the observation window of 100 lags, the autocorrelation values remain predominantly suppressed within the 10^{-2} to 10^{-4} range, indicating a lack of significant periodic structures or long-term memory effects in the urban thermal noise.

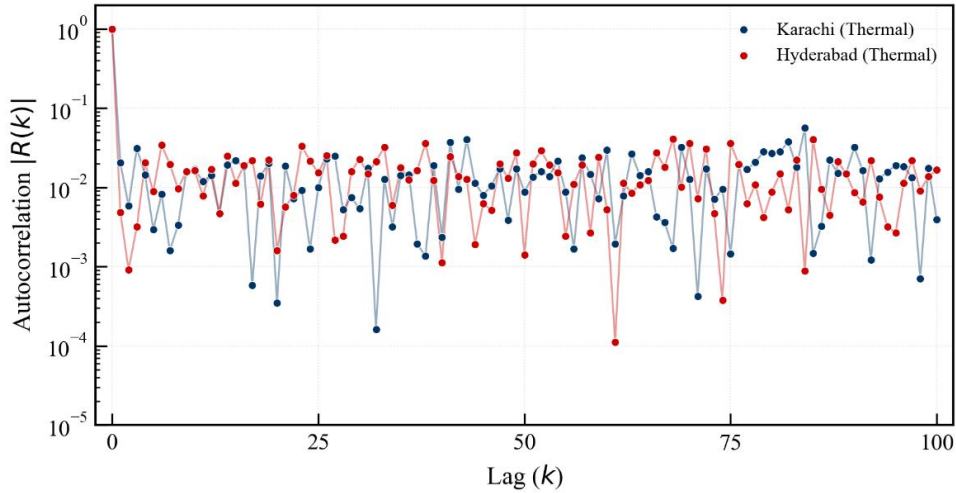


Figure 5 – Auto-correlation traces of Karachi and Hyderabad.

This near-zero residual correlation is highly advantageous for TRNGs, as it confirms a high degree of min-entropy per sample. Furthermore, the stochastic parity between the two geographically distinct cities suggests that environmental thermal

noise provides a robust and spatially invariant entropy floor, requiring minimal cryptographic post-processing to achieve a statistically uniform and unpredictable bitstream.

Discussion

Although the suggested method relies on environmental temperature data rather than on a

quantum source, it adheres to the fundamental principles of true random number generation. In

contrast to software-based generators that depend on deterministic initial conditions, the temperature variations used in this work represent real-world physical uncertainty. To further strengthen the entropy source for practical purposes, use large volumes of data collected over multiple days and from several geographically separated weather stations. As shown by the entropy analysis and NIST results, post-processing methods are applied to remove bias and correlation without introducing

artificial randomness, thereby preserving the true nature of the underlying entropy. Even if temperature-based TRNGs do not replace quantum-based QRNGs in terms of security importance, they offer a practical, low-cost form of true random number generation based on physical phenomena. This environmentally sourced TRNG could be particularly valuable for embedded Internet of Things devices operating in resource-constrained settings, where integrating quantum hardware is impractical.

Conclusion

The Aim of this research was to present a method for generating and certifying true random bits using real-world temperature data from two meteorological stations. A mean-based thresholding scheme was used to generate raw bits, followed by Von Neumann and entropy-extractor post-processing to improve randomness quality. Statistical evaluation using the sliding-window Shannon entropy technique, Compression Test Method and the NIST SP 800-22 test suite and Auto-correlation analysis confirms that the generated bit sequences exhibit strong randomness. Although not a replacement for high-speed QRNGs, the projected approach explains that

environmental data can serve as a simple, low-cost source of true randomness for research and security applications.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Pakistan Meteorological Department (PMD), Karachi, for providing the meteorological data used in this study.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

Author Contributions

Roohi Zafar: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft; **Muhammad Kamran:** Conceptualization, Formal Analysis, Visualization, Writing – Review & Editing; **Tahir Malik:** Methodology, Data Curation, Writing – Review & Editing; **Kousar Shaheen:** Conceptualization, Methodology, Data Curation, Investigation.

References

1. M. Herrero-Collantes, J.C. García-Escartín, Quantum Random Number Generators, *Rev. Mod. Phys.* **89**, 015004 (2017). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.015004>
2. A. Bikos, P.E. Nastou, G. Petroudis, Y.C. Stamatou, Random Number Generators: Principles and Applications, *Cryptography* **7**, 54 (2023). <https://doi.org/10.3390/cryptography7040054>
3. M. Stipčević, Ç.K. Koç, True Random Number Generators, In: Koç, Ç. (eds) *Open Problems in Mathematics and Computational Science*, 275–315 (2014). https://doi.org/10.1007/978-3-319-10683-0_12
4. K. Bhattacharjee, S. Das, A search for good pseudo-random number generators: : Survey and empirical studies, *Comput. Sci. Rev.* **45** (C), 100471 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2022.100471>
5. H. Zenil, (Ed.) *Randomness through Computation*; Collective Volume. World Scientific, 2011. Available online: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/7973#t=oc>
6. F. James, A Review of Pseudorandom Number Generators, *Comput. Phys. Commun.* **60**, 329–344 (1990). [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(90\)90032-V](https://doi.org/10.1016/0010-4655(90)90032-V)
7. P. L'Ecuyer, Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo, (Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, John Wiley & Sons, Ltd, 2014); [Update based on original article by Pierre L'Ecuyer, Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, © 2014, John Wiley & Sons, Ltd <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat04386.pub2>]
8. K. Sathya, J. Premalatha, V. Rajasekar, Investigation of Strength and Security of Pseudo Random Number Generators, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **1055**, 012076 (2021). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1055/1/012076>
9. M. Mondal, K.S. Ray, Review on DNA Cryptography, *arXiv:1904.05528* (2019). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05528>
10. R. Salayev, R. Sultanov, D. Ibadullaev, S. Azimkulov, S. Yuldoshev, Modern Methods of Generating Pseudo Random Numbers: Advantages and Disadvantages, *Proc. 2025 IEEE 26th Int. Conf. Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 1410–1415 (2025). <https://doi.org/10.1109/EDM65517.2025.11096902>

11. S. Petrie, J.A. Connelly, A Noise-Based IC Random Number Generator for Applications in Cryptography, *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **47**, 615–621 (2000). <https://doi.org/10.1109/81.847872>
12. W.T. Holman, J.A. Connelly, A.B. Dowlatabadi, An Integrated Analog/Digital Random Noise Source, *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **44**, 521–528 (1997). <https://doi.org/10.1109/81.585537>
13. S. Matsuoka, S. Ichikawa, N. Fujieda, A True Random Number Generator That Utilizes Thermal Noise in a Programmable System-on-Chip (PSoC), *Int. J. Circ. Theor. Appl.* **49**, 3354–3367 (2021). <https://doi.org/10.1002/cta.3046>
14. L. Gong, J. Zhang, H. Liu, L. Sang, Y. Wang, True Random Number Generators Using Electrical Noise, *IEEE Access* **7**, 125796–125805 (2019). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939027>
15. S.A. Tuncer, T. Kaya, True Random Number Generation from Bioelectrical and Physical Signals, *Comput. Math. Methods Med.* **2018**, 3579275 (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/3579275>
16. V. Mannalath, S. Mishra, A. Pathak, A Comprehensive Review of Quantum Random Number Generators: Concepts, Classification and the Origin of Randomness, *Quantum Inf. Process.* **22**, 439 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11128-023-04175-y>
17. K.M. Masum, M.S. Moghadam, L. Kouhalvandi, M.H. Najafi, A. Roohi, S. Aygun, Quantum-Based Random Numbers: Entropy, Efficiency, and Practicality, *Proc. IEEE Int. Conf. Quantum Comput. Eng. (QCE)* **2**, 468–475 (2025). <https://doi.org/10.1109/QCE65121.2025.10399>
18. Z. Haider, M.H. Saeed, M.E.H. Zaheer, Z.A. Alvi, M. Ilyas, T. Nasreen, M. Imran, R.U. Islam, M. Ikram, Quantum Random Number Generator (QRNG): Theoretical and Experimental Investigations, *Eur. Phys. J. Plus* **138**, 797 (2023). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04455-2>
19. B. Huttner, G. Trachsel, Quantum Random Number Generators (QRNG), in *Quantum Technologies*, 107–118 (2026). https://doi.org/10.1007/978-3-031-90727-2_11
20. D.G. Marangon, G. Vallone, P. Villoresi, Random Bits, True and Unbiased, from Atmospheric Turbulence, *Sci. Rep.* **4**, 5490 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep05490>
21. random.org, True Random Number Service. Available at: <https://www.random.org> (accessed 2026).
22. M.S. Kim, I.W. Tcho, S.J. Park, Y.K. Choi, Random number generator with a chaotic wind-driven triboelectric energy harvester, *Nano Energy* **78**, 105275 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105275>
23. M.S. Kim, I.W. Tcho, Y.K. Choi, Cryptographic Triboelectric Random Number Generator with Gentle Breezes of an Entropy Source, *Sci. Rep.* **14**, 1358 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51939-2>
24. S.H. Kwok, Y.L. Ee, G. Chew, K. Zheng, K. Khoo, C.H. Tan, A Comparison of Post-Processing Techniques for Biased Random Number Generators, *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.* **352**, 175–190 (2011). https://doi.org/10.1007/978-3-642-21040-2_12
25. K. Márton, L. Pârvu, A. Suci, The Impact of Post-Processing Functions on Random Number Sequences, *Proc. RoEduNet Conf.*, 1–6 (2018). <https://doi.org/10.1109/ROEDUNET.2018.8514140>
26. G.L. Thompson, R.L. Weil, Von Neumann Model Solutions Are Generalized Eigensystems, in *Contributions to the Von Neumann Growth Model*, 139–154 (1971). https://doi.org/10.1007/978-3-662-24667-2_14
27. A. Rukhin et al., A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications, NIST Special Publication 800-22 Rev. 1a (2010).
28. K. Karera, A. Khan, H. Tariq, M. Nadeem, R. Zafar, M. Kamran, M.M. Khan, Construction of a Quantum Random Number Generator, *Proc. 4th Int. Conf. Innovations in Computer Science (ICONICS)*, 1–8 (2024).
29. A. Tahir, M. Akhter, Z. Uddin, M. Sarim, Neural Network and Regression Methods for Estimation of the Average Daily Temperature of Hyderabad for the Years 2018-2020, *Int. J. Econ. Environ. Geol.* **12**, 87–91 (2023). <https://doi.org/10.46660/ijeeg.v12i2.107>
30. A. Tahir, M. Ashraf, M. Akhter, Z. Uddin, M. Sarim, New Regression models for Estimation daily temperature of Karachi and its Neural Network analysis, *Glob. NEST J.* **23**, 519–525 (2021). <https://doi.org/10.30955/gnj.003953>

Information about authors:

Roohi Zafar, Department of Physics, NED University of Engineering & Technology, (Karachi, Pakistan, e-mail: roohizj@cloud.neduet.edu.pk).

Muhammad Kamran, Department of Computer Science & Information Technology, NED University of Engineering & Technology, (Karachi, Pakistan e-mail: kamran@cloud.neduet.edu.pk).

Tahir Malik, Department of Telecommunications Engineering, NED University of Engineering & Technology, (Karachi, Pakistan, e-mail: tmalik@cloud.neduet.edu.pk).

Kousar Shaheen, Department of Physics, NED University of Engineering & Technology, (Karachi, Pakistan, e-mail: kousarshaheen416@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Рухи Зафар, NED инженерлік және технологиялық университетінің физика кафедрасы (Карачи, Пәкістан, e-mail: roohizj@cloud.neduet.edu.pk).

Мухаммад Камран, NED инженерлік және технологиялық университетінің есептеу техникасы және ақпараттық технологиялар кафедрасы (Карачи, Пәкістан, e-mail: kamran@cloud.neduet.edu.pk).

Тахир Малик, NED инженерлік және технологиялық университетінің телекоммуникациялық инженерия кафедрасы (Карачи, Пәкістан, e-mail: tmalik@cloud.neduet.edu.pk).

Кусар Шахин, NED инженерлік және технологиялық университетінің физика кафедрасы (Карачи, Пәкістан, e-mail: kousarshaheen416@gmail.com).

Информация об авторах:

Рухи Зафар, кафедра физики, Инженерно-технологический университет NED (Карачи, Пакистан, электронная почта: roohizj@cloud.neduet.edu.pk).

Мухаммад Камран, кафедра компьютерных наук и информационных технологий, Инженерно-технологический университет NED (Карачи, Пакистан, e-mail: kamran@cloud.neduet.edu.pk).

Тахир Малик, кафедра телекоммуникационной инженерии, Инженерно-технологический университет NED (Карачи, Пакистан, e-mail: tmalik@cloud.neduet.edu.pk).

Коусар Шахин, кафедра физики, Инженерно-технологический университет NED (Карачи, Пакистан, e-mail: kousarshaheen416@gmail.com).

Article history: received: 19 March 2026; accepted: 5 May 2026.

Мақала тарихы: түсті: 19 наурыз 2026; қабылданды: 5 мамыр 2026.

История статьи: поступила: 19 марта 2026; принята: 5 мая 2026.

Жоғары мектепте физика пәнін оқыту әдістемесі

Methods of teaching high school physics

Методика преподавания физики в высшей школе

Ә.С. Игенбаева^{1,2} , Қ.Е. Нұрғалиева^{1*} , С.Г. Карстина³ , Ф.Т. Шагеева⁴ 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

³Академик Е.А. Букетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан

⁴Қазан ұлттық зерттеу технологиялық университеті, Қазан, Ресей

*e-mail: knurgaliyeva@kaznu.kz

ГАРДНЕРДІҢ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕОРИЯСЫ БОЙЫНША СТУДЕНТТЕРДІҢ ИНТЕЛЛЕКТ ТҮРЛЕРІ МЕН ЖАЛПЫ ФИЗИКАДАҒЫ ОҚУ ЖЕТІСТІКТЕРІ АРАСЫНДАҒЫ БАЙЛАНЫС

Ұсынылған мақалада Г. Гарднер көптік интеллект теориясына сәйкес жіктелген студенттердің интеллект түрлерінің жалпы физикадағы академиялық көрсеткіштеріне әсері қарастырылады. Зерттеуге «Интеллектуалды басқару жүйелері» білім беру бағдарламасы бойынша білім алып жатқан бакалавриатта оқитын 58 бірінші курс студенттері қатысты. Тест арқылы анықталған интеллект типіне байланысты студенттер үш топқа бөлінді: Hard Skills, Soft Skills және Hybrid Hard/Soft Skills. Жіктеу негізі ретінде Гарднер бойынша белгілі бір интеллект түрінің басым болуына байланысты қалыптасатын жетекші дағдылар алынды. Әр топтың академиялық көрсеткіштері механика мен электр және магнетизм бөлімдері бойынша тест нәтижелерін пайдалану арқылы бағаланды. Талдау нәтижелері Hard Skills-интеллекті (логикалық-математикалық, натуралистік, кинестетикалық) басым студенттердің ең жоғары нәтижелерді көрсеткенін (орташа балл – 93,3%) көрсетті, ал Soft Skill-интеллект (тұлғааралық, тұлғаишілік, экзистенциалдық) және Hybrid Hard/Soft Skills типтерге жататын студенттер (лингвистикалық, музыкалық, визуалды-кеңістіктік) салыстырмалы түрде төмен академиялық көрсеткіштерге ие болды. Зерттеу қорытындылары оқу үдерісін ұйымдастыруда және сараланған оқыту әдістерін әзірлеуде білім алушылардың когнитивтік бейінін ескерудің маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: soft skills, hard skills, көптік интеллект, когнитивтік ерекшеліктер, функционалдық ерекшеліктер, функционалдық ерекшеліктер, жаратылыстану ғылым- білім беру.

A.S. Igenbayeva^{1,2}, K.E. Nurgaliyeva^{1*}, S.G. Karstina³, F.T. Shageeva⁴

¹Farabi University, Almaty, Kazakhstan

²Abai Kazakh national pedagogical university, Almaty, Kazakhstan

³Buketov Karaganda university, Karaganda, Kazakhstan

⁴Kazan National Research Technological university, Kazan, Russia

*e-mail: knurgaliyeva@kaznu.kz

The relationship between students' types of intelligence according to Gardner and their academic achievements in the general physics course

The article examines the influence of different types of students' intelligence, classified according to Howard Gardner's theory of multiple intelligences, on their academic performance in general physics. The study involved 58 first grade bachelor students enrolled in the educational program *Intelligent Control Systems*. According to their dominant type of intelligence, the students were divided into three subgroups: Hard Skills, Soft Skills, and Hard/Soft Skills. The classification was based on the dominant abilities formed as a result of the prevalence of particular types of intelligence identified by Gardner. Based on the results of tests in mechanics and electromagnetism, the academic performance of each group was evaluated. The analysis showed that students with dominant Hard Skills intelligence (logical–mathematical, naturalistic, and kinesthetic) demonstrated the highest results (average score of 93.3%), whereas students

with Soft Skills intelligence (intrapersonal, interpersonal, and existential) and mixed types (linguistic, musical, and visual–spatial) showed comparatively lower academic performance. The findings highlight the importance of considering students' cognitive profiles when organizing the educational process and developing differentiated teaching methods. The results may be useful for teachers of natural sciences and specialists in the field of pedagogy.

Keywords: soft skills, hard skills, multiple intelligences, cognitive characteristics, functional characteristics, natural science education.

А.С. Игенбаева^{1,2}, К.Е. Нургалиева^{1*}, С.Г. Карстина³, Ф.Т. Шагеева⁴

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

³Карагандинский национальный исследовательский университет имени Е.А. Букетова,
Караганды, Казахстан

⁴Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

*e-mail: knurgaliyeva@kaznu.kz

Взаимосвязь типов интеллекта студентов по Гарднеру с их академическими достижениями в курсе общей физики

В статье рассматривается влияние различных типов интеллекта учащихся, классифицированных в соответствии с теорией множественного интеллекта Говарда Гарднера, на их успеваемость по общей физике. В исследовании приняли участие 58 студентов 1 курса бакалавриата, обучающихся по образовательной программе «Интеллектуальные системы управления». Студенты по типу интеллекта были сгруппированы на три подгруппы: Hard Skills, Soft Skills и Hard/Soft Skills. В основе разделения на категории были взяты доминирующие навыки, формирующиеся на основе преобладания того или иного интеллекта по Гарднеру. На основе результатов тестов по механике и электромагнетизму была оценена успеваемость каждой группы. Анализ показал, что студенты с доминирующими Hard Skills-интеллектом (логико-математический, натуралистический, кинестетический) демонстрируют самые высокие результаты (средний балл 93,3%), в то время как студенты с Soft Skills-интеллектом (внутриличностный, межличностный, экзистенциальный) и смешанными типами (лингвистический, музыкальный, визуально-пространственный) показали сравнительно более низкие результаты академической успеваемости. Выводы исследования подчеркивают важность учета когнитивного профиля учащихся при организации учебного процесса и разработке дифференцированных методов обучения. Результаты могут быть полезны преподавателям естественных наук и специалистам в области педагогики.

Ключевые слова: soft skills, hard skills, множественный интеллект, когнитивные особенности, функциональные особенности, естественно-научное образование.

Kіріспе

Бүгінгі күнгі жоғары білім беру академиялық тәсілден тыс студенттердің жеке ерекшеліктерін ескеруді талап етеді. Осы орайда Говард Гарднер ұсынған көптік интеллект теориясы студенттердің икемділігін ерекшелігін, соның ішінде, логика-математикалық, тұлғааралық, музыкалық және басқа да түрлерін бөліп көрсетеді. Бұлай жіктеу білім алушылардың когнитивтік ерекшеліктерін анағұрлым толығырақ түсінуге мүмкіндік береді [1]. Соңғы

онжылдықта бұл тұжырым кеңінен дамып, когнитивтік стильдер мен ұстанымдардың оқу жетістіктеріне әсерін көрсететін зерттеулерде дәлелденді [2]. Жаратылыстану бойынша білім беру контекстінде бұл теорияны қолдану физика сияқты күрделі пәндерді табысты меңгеруге ықпал ететін интеллект түрлерін анықтауға көмектеседі деп күтіледі. Мысалы, физиканы оқу барысында студенттің қажетті ақпаратты таба білуі, әртүрлі физикалық шамалар арасындағы

байланысты түсінуі, физикалық формулалар мен заңдарды есіне сақтап, мағынасын айқындауы, физикалық мәселенің мәнін ұғып, оны шешу логикасын анықтай алуы және қорытындыларын негіздеуге қабілеті болуы тиіс [3,4]. Әртүрлі әдеби дереккөздерді талдау нәтижесі физика пәні бойынша үлгерім белгілі бір интеллект түрлерінің басымдылығымен байланысты болуы мүмкін екенін көрсетеді. Мысалы [5] еңбекте логика-математикалық интеллектісі дамыған студенттер шамалар арасындағы байланыстарды жақсы талдайтыны, себеп-салдар қатынастарды түсінетіні, заңдылықтарды анықтай алатыны, абстракциялармен жұмыс істейтіні және сәкесінше есептерді шешуде, дәлелдеуде жоғары нәтижелер көрсететіні айтылады. Ал [6] зерттеуде визуалды-кеңістік интеллект физикалық процестердің графиктерімен, сызбаларымен және модельдерімен жұмыс істеуде маңызды екендігі көрсетілген. Мұндай интеллектке ие студенттер эксперименттік деректерді жақсы талдайды. Сондай-ақ графиктер мен сызбаларды пайдаланып есептер шығарады және физикалық процестерді кескіндер мен суреттер арқылы көрнекі түрде көрсете алады. Тұлғааралық интеллекттің жоғары деңгейі студенттердің физика бойынша жобалық және топтық жұмыстарын орындауда маңызы жоғары [7,8]. Өз ұстанымын түсіндіруге және гипотезаларды қорғауға да ықпал етеді. Ал лингвистикалық интеллект болса, дәлелдеу, түсіндіру, мәселені тұжырымдау және

шешімін сипаттау үшін маңызды. Осындай интеллекті жоғары студенттер материалмен жақсы жұмыс жасайды. Мәтіндік ақпаратты жақсы түсінеді. Есептерді (отчет) сапалы рәсімдейді. Мәселенің мәнін нақты тұжырымдайды және физика есептерін шешу жолын түсіндіре алады. Тұлғаишілік интеллект болса, өзін-өзі бағалауға және рефлексияға ықпал етеді. Студенттердің физика бойынша есептерін шешу стратегияларын түзетуге және қателерін талдауға мүмкіндік береді. Осылайша, білім алушының жеке интеллект профилін түсіну – оқытушыға оқыту мен бағалаудың неғұрлым тиімді тәсілдерін таңдауға мүмкіндік береді [9]. Бұл көптік интеллектін педагогика саласындағы зерттелуімен және сол зерттеулер нәтижелерімен де растады [10, 11]. Яғни, оқытушы физиканы оқытуда әртүрлі тәсілдер мен модельдерді, инновациялық білім беру ресурстарын қолдануы, оқу үдерісін студенттердің интеллект ерекшеліктері мен қажеттіліктеріне бейімдеуі тиіс [12–20]. Бұл студенттердің оқу материалын тереңірек түсінуіне, білім беру мақсаттарына жетуіне және олардың интеллектуалдық қабілеттерінің дамуына ықпал етеді. Осы жұмыста біз Г.Гарднер ұсынған көптік интеллект теориясына сәйкес жіктелген студенттердің әртүрлі интеллект түрлерінің жалпы физика пәні бойынша үлгеріміне әсерін зерттеуді жалғастырып, ең тиімді оқыту моделін анықтауды мақсат еттік.

Теориялық негіздер

Бұл мақалада интеллект түрінің студенттердің академиялық жетістіктеріне әсері зерттелді. Осы зерттеудің мақсаттарына жету үшін Говард Гарднер ұсынған интеллект түрлері олар қалыптастыратын басым дағдыларға сәйкес топтастырылды: кәсіптік дағдылар (hard skills), икемді дағдылар (soft skills) және аралас дағдылар (hybrid hard/soft skills). Кәсіптік (Hard) дағдыларға аналитикалық ойлау мен практикалық бағыттылыққа байланысты логико-математикалық, натуралистік және кинестетикалық интеллект жатады. Soft skills құрамына эмоционалдық және

әлеуметтік құзыреттілікке жауап беретін тұлғаишілік, тұлғааралық және экзистенциалдық интеллект түрлері кіреді. Ал екі топтың элементтерін біріктіретін лингвистикалық, музыкалық және визуалды-кеңістіктік интеллект аралас топқа жатқызылады. Бұл жіктеу оқыту әдістерін студенттердің когнитивтік ерекшеліктеріне бейімдеуге мүмкіндік береді. Қазіргі заманғы мета-талдаулар оқыту үдерісін студенттердің когнитивтік сипаттамаларына бейімдеу білім беру тиімділігін арттыратынын растайды.

Әдістеме

Деректерді жинау

Зерттеуге Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Интеллектуалды басқару жүйелері» білім беру бағдарламасы бойынша

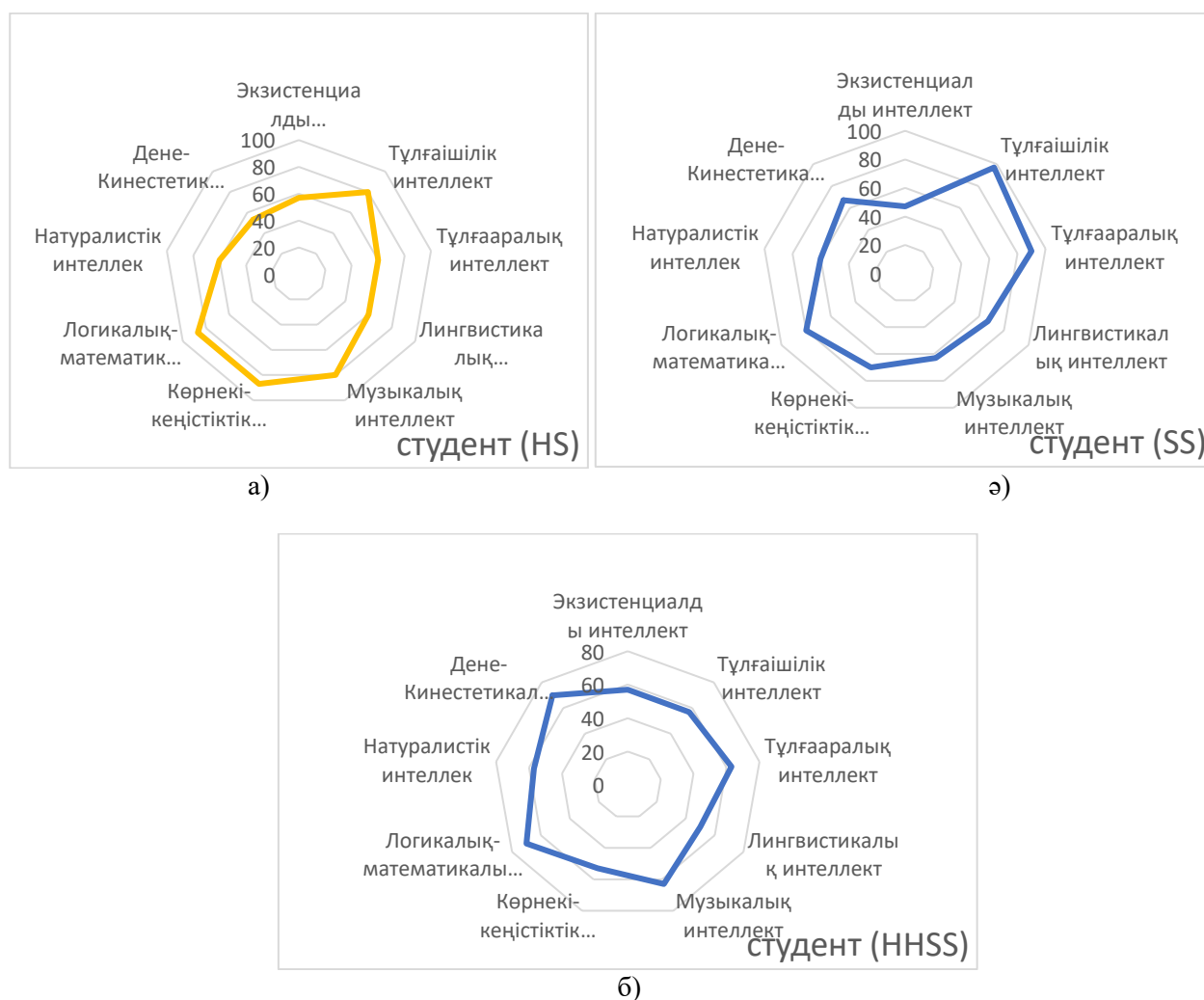
білім алып жатқан 1-курс 58 студенті қатысты. Зерттеу басталғанға дейін студенттерге Г.Гарднер теориясына сәйкес көптік интеллект деңгейін

анықтауға арналған тесттер ұсынылды. Алынған деректер кейін студенттердің көптік интеллект типтері мен олардың оқу үлгерімі арасындағы корреляцияны талдау үшін пайдаланылды. Зерттеу «Жалпы физика» пәнін оқыту аясында бір семестр бойы жүргізілді. Зерттеу барысында студенттер механика бөлімі бойынша 4 тест және электрмагнетизм бөлімі бойынша 4 тапсырма орындады [21,22]. Жалпы физика курсы аясында «Механика» бөлімі бойынша студенттердің білімдері мен дағдыларының қалыптасу деңгейін бағалау мақсатында үш тестілеу жүргізілді. Барлық тесттер дәріс материалдары мен практикалық сабақтарға негізделіп әзірленді және теориялық дайындық пен физикалық есептерді шығару дағдыларын кешенді түрде тексеруге бағытталды. Айта кету керек, «Механика» бөлімі инновациялық технологияларды қолданусыз, дәстүрлі форматта оқытылды. Тест №1 – «Механика» бөлімі бойынша кіріспе сұрақтар. Бұл тест диагностикалық сипатта болып, «Механика» бөлімін оқудың бастапқы кезеңінде жүргізілді. Тестілеуге 44 студент қатысты. Тест 24 тапсырмадан тұрды, оның ішінде: механиканың негізгі ұғымдары, анықтамалары мен заңдары бойынша білімді тексеруге бағытталған 16 теориялық сұрақ және меңгерілген формулалар мен есеп шығару әдістерін қолдануды талап ететін 8 есептік тапсырма болды. Тесттің мақсаты студенттердің теориялық дайындық деңгейі мен практикалық дағдыларының бастапқы деңгейін анықтау болды. Тест №2 – «Шеңбер бойымен қозғалыс». Бұл тест «Шеңбер бойымен қозғалыс» тақырыбын меңгеру аяқталғаннан кейін қалыптастырушы эксперимент аясында өткізілді. Тестілеуге 55 студент қатысты. Тест құрылымы шеңбер бойымен қозғалыстың негізгі сипаттамаларын (сызықтық және бұрыштық шамалар, центрге тартқыш үдеу және т.б.) қамтитын 11 теориялық сұрақтан және теориялық білімді практикалық есептерді шешуде қолдану дағдыларын тексеруге бағытталған 13 есептік тапсырмадан тұрды. Тест №3 – «Энергияның сақталу заңы». Үшінші тест «Механика» бөліміндегі «Энергияның сақталу заңы» тақырыбы аяқталғаннан кейін жүргізілді. Тестілеуге 57 студент қатысты. Тест 25 тапсырмадан тұрды, оның ішінде: энергияның сақталу заңының мәнін және механикалық энергия түрлерін түсінуді тексеруге бағытталған 6 теориялық сұрақ және әртүрлі деңгейдегі есептерді шешуде энергияның сақталу заңын қолдануға арналған 19 есептік тапсырма болды. Тест №4 – «Механика» бөлімі бойынша қорытынды тест. Қорытынды тест бөлім бойынша

барлық өтілген тақырыптар негізінде әзірленді. Тест құрылымы оқу жоспарының талаптарына сәйкес келді: тапсырмалардың 20%-ы студенттердің когнитивтік дағдыларын (түсіну, талдау, интерпретация) бағалауға, ал 80%-ы теориялық білімді практикалық есептерді шешуде қолдануға байланысты функционалдық дағдыларын тексеруге бағытталды. «Электр және магнетизм» бөлімін оқыту студенттердің танымдық белсенділігін арттыруға және практикалық бағытталған дағдыларын қалыптастыруға арналған цифрлық білім беру платформаларын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Оқу үдерісі төрт апта бойы кезек-кезеңімен ұйымдастырылды, қатысушылар саны 45-тен 58 студентке дейін өзгеріп отырды. Бірінші аптада сабақтарға 45 студент қатысты. Оқу үдерісінде Tarsia және PhET платформалары қолданылды. Tarsia ортасында әзірленген тапсырмалар физикалық ұғымдар мен формулаларды сәйкестендіруге бағытталып, логикалық ойлауды дамытуға және жүйелі білім қалыптастыруға ықпал етті. Ал PhET платформасы электр және электромагниттік құбылыстарды көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік беретін виртуалды эксперименттер жүргізу үшін пайдаланылды. Екінші аптада оқыту PhET платформасын қолдану арқылы жалғастырылды, оған 52 студент қатысты. Негізгі назар студенттердің өздігінен эксперимент жүргізуіне және әртүрлі параметрлердің зерттелетін физикалық процестерге әсерін талдауға аударылды. Үшінші аптада оқу үдерісіне 58 студент қатысты. Студенттердің өзіндік оқу әрекетін ұйымдастыру үшін LiveWorksheets платформасы қолданылды. Ол жерде автоматты тексеру мүмкіндігін беретін интерактивті жұмыс парақтарын пайдалануға болады. Сол жерден білім алушылардың жедел кері байланыс алуы олардың ойында оқылған материалдың бекітілуіне және өзін-өзі бақылау дағдыларын дамытуға ықпал етті. Төртінші аптада сабақтарға 57 студент қатысып, олар интеллект түрлерінің ұқсастығына қарай топтарға бөлінді. Топтық жұмысты ұйымдастыру үшін Migo платформасы пайдаланылды. Бірлескен жұмыс барысында студенттер «Электр және магнетизм» бөлімі бойынша интеллект-карталар мен визуалды сызбалар әзірледі. Мұндай жұмыс түрі білімді жүйелеуді тиімдірек жүзеге асыруға, білім алушылардың жеке когнитивтік ерекшеліктерін ескеруге, сондай-ақ коллаборация және командалық өзара әрекет дағдыларын дамытуға мүмкіндік берді. Бірінші аптада Tarsia және PhET платформалары қолданылды. Tarsia (оқу тапсырмаларын құрастыруға арналған құрал)

ұғымдар мен формулаларды сәйкестендіруге бағытталған тапсырмаларды әзірлеу үшін пайдаланылып, логикалық ойлауды дамытуға ықпал етті. Ал PhET платформасы виртуалды эксперименттер арқылы электромагниттік құбылыстарды көрнекі түрде көрсету үшін қолданылды. Екінші аптада PhET платформасымен жұмыс жалғасып, электр және магнетизм заңдарын тереңірек меңгеру мақсатында интерактивті симуляциялар негізінде өздігінен эксперимент жүргізу ұйымдастырылды. Үшінші аптада LiveWorksheets платформасы қолданылды. Бұл платформа автоматты тексеруі бар интерактивті жұмыс парақтарын пайдалануға мүмкіндік беріп, жедел кері байланыс арқылы оқу материалын бекітуге ықпал етті. Төртінші аптада Miro платформасы пайдаланылды. Miro (бірлескен жұмысқа арналған бұлттық тақта) командалық жұмыс барысында интеллект-

карталар мен визуалды сызбаларды құрастыру үшін қолданылып, білімді жүйелеу және коллаборация дағдыларын дамытуға әсер етті. Зерттеуге 58 студент қатысты. Олардың ішінен 27 студент барлық 8 тапсырманы толық орындады. Сол себепті мақала аясында тек осы 27 студенттердің нәтижелері сараланатын болады. Студенттердің интеллект профилін және басым интеллект түрін анықтау үшін көптік интеллект теориясы негізінде әзірленген әдістеме қолданылды. Диагностикалық құрал ретінде әрбір интеллект түрінің айқындылық деңгейін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік беретін стандартталған сауалнама пайдаланылды. Алынған мәліметтер бойынша торлы диаграмма тұрғызылып, студенттердің доминантты когнитивтік профилі айқындалды (1 - сурет) және сол нәтижелерге сәйкес студенттер HS, SS және HHSS топтарына жіктелді (1-кесте).



1-сурет. Гарднердің көптік интеллектісі бойынша торлы диаграммалар мысалы. а) Кәсіби интеллектісі (HS) басым торлы диаграмма мысалы, ә) Икемді интеллектісі (SS) басым торлы диаграмма мысалы, б) интеллектісі аралас (HHSS) торлы диаграмма мысалы

1-кесте. Зерттеуге қатысқан студенттер топтарының атауы және анықтамасы

Топтың сипаттамасы	Қысқартылған атауы (аббревиатурасы)	Студенттер саны	Интеллекттің түрі	басым
«Кәсіптік» дағдылары айқын байқалатын студенттер тобы (Hard Skills)	HS	7 студент	Логико-математикалық, натуралистік	
«Икемді» дағдылары айқын байқалатын студенттер тобы (Soft Skills)	SS	8 студент	Тұлғаишілік, ТҰЛҒААРАЛЫҚ, экзистенциалдық	
«Кәсіптік» немесе «Икемді» дағдылары айқын көрінбейтін студенттер тобы (Hybrid Hard and Soft Skills)	NHSS	12 студент	Лингвистикалық, музыкалық, визуалды-кеңістіктік	

Статистикалық маңыздылықты анықтау үшін біржақты дисперсиялық талдау (ANOVA) жүргізілді, ол келесі нәтижелерді берді: F-статистикасы: 26.5007, $p < 0.0001$. Бұл мәндер топтар арасындағы айырмашылықтардың

статистикалық тұрғыдан өте маңызды екенін көрсетеді. Яғни топтар арасындағы академиялық көрсеткіштердегі байқалған айырмашылықтар кездейсоқ емес, студенттердің интеллект типіне байланысты екенін көрсетеді.

Нәтижелер

Hard Skills типі басым студенттер барлық тесттер бойынша ең жоғары нәтижелер көрсетті. Бұл логико-математикалық және практикалық бағытталған дағдылары дамыған білім алушылардың нақты ғылымдарды меңгеруде артықшылыққа ие болатыны туралы гипотезаны растайды.

Тест №1 – «Механика» бөлімі бойынша кіріспе сұрақтар оқу үдерісінің бастапқы кезеңінде-ақ топтар арасындағы айырмашылықтарды көрсетті. HS тобы студенттерінің орташа балы 84,7%-ды, SS тобы – 87,8%-ды, ал NHSS тобы – 67,5%-ды құрады. Аралас топтың төмен нәтижелері бастапқы дайындық деңгейінің біркелкі еместігін және механиканың теориялық негіздерін меңгеру үшін қажетті когнитивтік дағдылардың әртүрлі деңгейде қалыптасқанын көрсетеді.

Аталған тесттен кейін «Механика» бөлімі бойынша сабақтар дәстүрлі форматта өткізілді: дәріс – аптасына 1 академиялық сағат, семинар – аптасына 2 академиялық сағат. Семестр барысында «Механика» бөлімі бойынша барлығы 4 дәріс және 8 семинар сабағы өткізілді.

Зерттеу барысында №2 тест – «Шеңбер бойымен қозғалыс» тақырыбы бойынша қалыптастырушы эксперимент жүргізілді. Орташа нәтижелер барлық топтарда оң динамиканы көрсетті: HS тобы – 86,4%, SS тобы – 79,9%, NHSS тобы – 77,8%. Бұл ретте Hard Skills

тобының студенттері есептерді шешу барысында формулаларды қолдану және физикалық тәуелділіктерді талдау дағдыларының тұрақтылығын көрсетті.

«Энергияның сақталу заңы» тақырыбы бойынша №3 тест нәтижелері көрсеткіштердің одан әрі артқанын көрсетті. HS тобында орташа балл 93,7%-ды, SS тобында – 87%-ды, NHSS тобында – 84,3%-ды құрады. Алынған деректер теориялық білімді есептік және ситуациялық тапсырмаларда қолданумен байланысты функционалдық құзыреттіліктердің артқанын, әсіресе Hard Skills басым студенттерде айқын байқалатынын көрсетеді.

«Механика» бөлімі бойынша қорытынды №4 тест пәндік құзыреттіліктердің тұрақты қалыптасқанын растады. HS тобының орташа нәтижесі 96,4%, SS тобы – 93,8%, NHSS – 82,5% болды. Осылайша, топтар арасындағы айырмашылық бөлімді оқытудың соңғы кезеңінде де сақталды.

«Электр және магнетизм» тақырыбын оқыту аясында студенттердің танымдық белсенділігін арттыруға және Hard Skills пен Soft Skills дағдыларын қатар дамытуға бағытталған Tarsia, PhET, LiveWorksheets және Miro цифрлық құралдары кезең-кезеңімен енгізілді. Төрт тест бойынша орташа нәтижелерді талдау HS тобының көшбасшы позициясын сақтағанын көрсетті (орташа балл – 91,8%), SS тобы тұрақты,

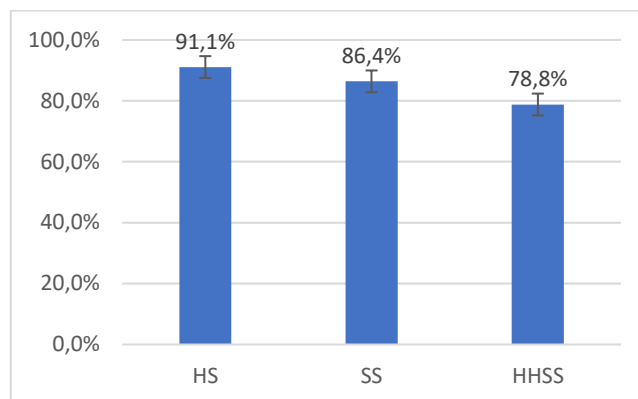
бірақ салыстырмалы түрде төмен нәтижелер көрсетті (орташа балл – 85,7%), ал HHSS тобы нәтижелердің ең жоғарғы вариативтілігімен сипатталды (орташа балл – 79,7%).

Оқытудың қорытынды кезеңінде студенттер Miro онлайн-тақтасын пайдаланып, бөлімнің негізгі ұғымдары бойынша менталды карталар, сызбалар және инфографикалар әзірледі. Бұл кезең ақпаратты визуализациялау, креативті ойлау және командалық коммуникация дағдыларын дамытуға ықпал етіп, әсіресе Soft Skills тобы студенттерінің нәтижелеріне оң әсерін тигізді.

Барлық сегіз тапсырмалардан жалпыланған талдауы HS тобының орташа балы 91,1, SS тобы – 86,4, ал HHSS тобы – 78,8 екенін көрсетті. Топтар бойынша студенттердің үлгерімінің орташа бағасы 2-суретте көрсетілген.

2-кестеде келтірілген пайыздық мәндерді алу үшін келесі есептеу әдістемесі қолданылды. Әрбір студенттер тобы бойынша (HS, SS және

HHSS) тиісті физика бөлімі бойынша қорытынды балдар үлгерімінің үш деңгейі бойынша бөлінді: жоғарғы деңгей- 90-100 балл, орта деңгей – 75-89 балл және төмен деңгей – 50-74 балл.



2-сурет. Топтар бойынша тапсырмалар нәтижелерінің орташа балы

Кесте 2 – Әртүрлі интеллект топтарындағы студенттердің «механика» және «электр және магнетизм» бойынша үлгерім деңгейлері

	«Механика»			«Электр және магнетизм»		
	90-100%	75-89%	50-74%	90-100%	75-89%	50-74%
HS	57,1%	42,9%	0%	85,7%	14,3%	0%
SS	37,5%	62,5%	0%	37,5%	62,5%	0%
HHSS	16,7%	58,3%	25%	0%	75%	25%

Осылайша, Hard Skills тобында «Механика» бөлімі бойынша студенттердің 57,1%-ы 90-100 балл аралығында нәтиже көрсетті, 42,9%-ы 75-89 балл аралығында болды, ал бірде-бір студент 75 балдан төмен нәтиже көрсеткен жоқ. «Электр

және магнетизм» бөлімі бойынша Hard Skills тобының көрсеткіштері жақсарды. Soft Skills тобында нәтижелер өзгеріссіз қалды. Ал Hard/Soft Skills тобында көрсеткіштердің төмендеуі байқалды.

Талқылау

Жүргізілген зерттеу нәтижелері студенттердің когнитивтік профилінің физиканы, әсіресе «механика» және «электр және магнетизм» бөлімдерін меңгеру барысында академиялық жетістік қалыптастырудағы маңызды рөлін растайды. Алынған деректер басым интеллект түріндегі айырмашылықтар оқу материалын меңгерудің когнитивтік стратегияларының ерекшеліктерін айқындайтынын және соның нәтижесінде білім жетістіктерінің деңгейіне әсер ететінін көрсетеді.

Әртүрлі интеллект типтері бар студенттердің академиялық жетістіктерін салыстыру когнитивтік қабілеттер тобы мен физиканың әртүрлі бөлімдерін меңгеру табыстылығы арасында айқын тәуелділік бар екенін көрсетеді. Атап айтқанда, Hard Skills интеллекттері (логика-

математикалық, визуалды-кеңістіктік, натуралистік, кинестетикалық) басым студенттердің тест тапсырмаларын орындау және физикалық есептерді шығару бойынша жоғары нәтижелері осы интеллект түрлерінің есептерді шешуге, абстрактілі модельдеуге және себеп-салдарлық байланыстарды анықтауға қажетті аналитикалық және операциялық ойлау компоненттерімен тығыз байланысын көрсетеді. Бұл деректер интеллекттің когнитивтік-аналитикалық бағыттылығы физика-математикалық пәндердегі академиялық табыстылықтың негізгі предикторы болып табылатынын дәлелдейді. Педагогикалық тұрғыдан алғанда, бұл оқу стратегияларын саралаудың қажеттілігін білдіреді: аталған типтегі студенттер үшін күрделілігі жоғары тапсырмалар, физикалық процестерді модельдеу,

деректерді талдауды және модель құруды талап ететін зерттеу жобалары анағұрлым тиімді болып табылады.

Сонымен қатар, Soft Skills интеллекттері (тұлғашылық, тұлғаралық, экзистенциалдық) басым топ жоғары көрсеткіштерден сәл ғана төмен нәтижелер көрсетті. Бұл оқыту үдерісінде тұлғалық және метакогнитивтік факторлардың компенсаторлық рөлі бар екендігін көрсететін маңызды қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Өзін-өзі рефлексиялау қабілеті, дамыған эмоциялық қабылдау және басқа адамдармен өзара әрекетке бағыттылық абстрактілі-логикалық стратегиялардың жеткіліксіздігін ішінара өтеп, ішкі мотивация мен тиімді өзін-өзі ұйымдастыру стратегияларын қалыптастыруға ықпал етеді. Осы санаттағы студенттер үшін топтық оқыту элементтерін, пікірталастарды, рөлдік тапсырмаларды және рефлексивтік күнделіктер жүргізуді қолдану орынды, себебі бұл олардың коммуникация, эмпатия және өзін-өзі талдау сияқты күшті жақтарын физикалық мазмұн аясында жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Ерекше қызығушылық үшінші – интеллекттің аралас профилі бар топты білдіреді, олардың нәтижелері айтарлықтай төмен болды. Бұл фактіні тұрақты ақпарат өңдеу стратегияларын қамтамасыз ететін айқын доминанттың болмауымен сипатталатын когнитивтік диффузияның көрінісі ретінде түсіндіруге болады. Hard және Soft компоненттері бірдей деңгейде дамыған студенттерге кеңірек, бірақ аз маманданған когнитивтік стратегиялар жиынтығы тән болуы мүмкін, бұл әрқашан тар бағытталған логико-аналитикалық әрекетті талап ететін тапсырмаларда тиімді бола бермейді.

Қорытындылар мен ұсыныстар

Зерттеу нәтижелері студенттердің басым интеллект типі «механика» және «электр және магнетизм» бөлімдерін меңгеру табыстылығына елеулі әсер ететінін көрсетті. Ең жоғары көрсеткіш Hard Skills интеллекттері басым білім алушыларда байқалды, ал аралас профильдегі студенттер салыстырмалы түрде төмен нәтижелер көрсетті. Бұл қосымша педагогикалық қолдаудың қажеттілігін көрсетеді.

Осыған байланысты оқу үдерісін ұйымдастыруда студенттердің когнитивтік ерекшеліктерін ескеру ұсынылады: білім алушылар саны көп топтарды Hard Skills дамыту мақсатында аралас типтегі топтар құру, ал шағын топтарда білім беру бағдарламаларын жекелендіру және бағалау критерийлерін

Сонымен қатар, топ ішіндегі жекелеген жоғары нәтижелер әртүрлі интеллект түрлерінің синергетикалық үйлесімі мақсатты педагогикалық қолдау жағдайында тиімді болуы мүмкін екенін көрсетеді. Мұндай қолдау метатану мен өзін-өзі реттеу дағдыларын дамытуға бағытталуы тиіс. Бұл топ үшін әсіресе жеке оқу стратегияларын қалыптастыру, метакогнитивтік дағдыларды (жоспарлау, бақылау, өз әрекеттерін бағалау) дамыту және абстрактілі модельдер мен олардың практикалық қолданылуы арасындағы байланыстарға назар аудару маңызды.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері көптік интеллект теориясы қағидаларын физиканы оқыту үдерісіне интеграциялаудың тиімділігін растайды. Оқытушыларға келесі ұсыныстар беріледі:

1) Егер үлкен топта оқу бағдарламасын жекелендіру қиын болса және курс барысында нақты Hard Skills қалыптастыру мақсаты қойылса, аралас типтегі топтарды құру ұсынылады.

2) Әрбір білім алушының көптік интеллект ерекшеліктерін ескеру үшін бейімделген бағалау критерийлері бар жекелендірілген оқу бағдарламаларын қолдану қажет.

Осылайша, зерттеу нәтижелері студенттердің интеллект типтерін ескере отырып, физиканы оқытуда білім беру стратегияларын саралаудың маңыздылығын дәлелдейді. Визуализация, модельдеу, жобалық және пәнаралық іс-әрекеттерді қолдану, сондай-ақ метакогнитивтік дағдыларды дамыту әртүрлі когнитивтік профильдері бар студенттердің оқу материалын тиімді меңгеруіне және академиялық жетістіктерін арттыруға ықпал етеді.

бейімдеу қажет. Сараланған оқыту әдістерін қолдану және метакогнитивтік дағдыларды дамыту физиканы меңгерудің тиімділігін арттыруға және жалпы академиялық жетістіктерін деңгейін көтеруге мүмкіндік береді.

Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылады (Грант № AP26101969 - «Жаһандану, цифрландыру және инклюзивті білім беру жағдайында инновациялық - белсенді оқытушыны даярлаудың және оның кәсіби дамуының синергетикалық моделін әзірлеу және енгізу»).

Авторлар үлесі

Игенбаева Ә.С.: әдебиетке шолу жүргізу және педагогикалық тәжірибе жүргізу және мәлімет жинақтау, **Нұрғалиева Қ.Е.:** жалпы зерттеудің координациясы және әдіснамасы, **Карстина С.Г.:** педагогикалық тәжірибе нәтижелерін саралау, **Шагеева Ф.Т.:** қорытынды талқылау.

Әдебиеттер

1. H. Gardner, S. Moran, The Science of Multiple Intelligences Theory: A Response to Lynn Waterhouse, *Educ. Psychol.* **41**(4), 227–232 (2006). https://doi.org/10.1207/s15326985ep4104_2
2. S. Kassiavera, A. Suparmi, C. Cari, S. Sukarmin, Application of RASCH Model in Two-Tier Test for Assessing Critical Thinking in Physics Education, *J. Balt. Sci. Educ.* **23**(6), 1227–1242 (2024). <https://doi.org/10.33225/jbse/24.23.1227>
3. A. Klean, J.R. Batlolona, Gardner Intelligence in Physics Students in Maluku, Indonesia, *J. Penelit. Pendidik IPA* **9**(1), 305–314 (2023). <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i1.2383>
4. M. Grežo, I. Sarmány-Schuller, It Is Not Enough to Be Smart: On Explaining the Relation Between Intelligence and Complex Problem Solving, *Technol. Knowl. Learn.* **27**(1), 69–89 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10758-021-09498-2>
5. H. Gardner, Multiple Intelligences: The Theory in Practice, (Basic Books, New York, 1993), 320 p.
6. R.J. Sternberg, L.-F. Zhang (Eds.), Perspectives on Thinking, Learning, and Cognitive Styles, Lawrence Erlbaum Associates, (Mahwah, NJ, 2001), 286 p. <https://doi.org/10.4324/9781410605986>
7. T. Armstrong, Multiple Intelligences in the Classroom, 3rd ed., ASCD, (Alexandria, VA, 2009), 246 p.
8. S. Karstina, The Role of Group Project-Based Learning in Engineering Training, in Learning in the Age of Digital and Green Transition, edited by M.E. Auer, W. Pachatz, T. Rüttmann, *Lect. Notes Netw. Syst.* **634**, 239–245 (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-26190-9_24
9. S. Karstina, A. Tussupbekova, E. Mussenova, A Structural Approach to the Assessment and Development of Engineering Students' Professional Skills, *Front. Educ.* **10**, 1661526 (2025). <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1661526>
10. A.C. Brualdi, Multiple Intelligences: Gardner's Theory, ERIC Digest No. ED410226, ERIC Clearinghouse on Assessment and Evaluation (1996). Available at: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED410226.pdf>
11. L. Campbell, B. Campbell, D. Dickinson, Teaching and Learning through Multiple Intelligences, 3rd ed., Pearson Education, (Boston, MA, 2003), 368 p.
12. S.G. Karstina, Application of Integrated Learning Technologies in Engineering Training, in *Futureproofing Engineering Education for Global Responsibility*, edited by M.E. Auer, T. Rüttmann, *Lect. Notes Netw. Syst.* **1260**, 630–637 (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-031-85652-5_62
13. M. Shafiq, M.A. Sami, N. Bano, R. Bano, M. Rashid, Artificial Intelligence in Physics Education: Transforming Learning from Primary to University Level, *Indus J. Soc. Sci.* **3**(1), 717–733 (2025). <https://doi.org/10.59075/ijss.v3i1.807>
14. S.S. Fauziah, Y. Guntara, R.F. Septiyanto, Development of PHYVAR (Physics in 3D Virtual Reality) on Solar Energy Material to Support Students' Spatial Intelligence, *J. Pendidik. Fis. Dan Teknol.* **10**(1), 55–70 (2024). <https://doi.org/10.29303/jpft.v10i1.6647>
15. S. Karstina, Applying a Level Assessment System in Group Project-Based Learning for Teachers of Engineering Disciplines, in *Towards a Hybrid, Flexible and Socially Engaged Higher Education*, edited by M.E. Auer, U.R. Cukierman, E. Vendrell Vidal, E. Tovar Caro, *Lect. Notes Netw. Syst.* **900**, 343–354 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-52667-1_33
16. K. Nurgaliyeva, K. Mirkhamitova, A. Gabdullina, A. Igenbayeva, Analysis of Students Satisfaction with Distance Learning and the Advantages and Disadvantages of Laboratory Works with Computer Simulation of Electronic Analog Circuits, *Proc. 18th Conf. Electr. Mach., Drives Power Syst. (ELMA)*, 237–240 (2023). <https://doi.org/10.1109/ELMA58392.2023.10202322>
17. Г.Р. Хусаинова, С.Г. Карстина, М.Ф. Галиханов, Оценка готовности преподавателей к инновационной профессионально-педагогической деятельности, *Высшее образование в России* **31**(7), 42–60 (2022). [G.R. Khusainova, S.G. Karstina, M.F. Galikhanov, Assessing Educators' Readiness for Innovative Professional and Pedagogical Activities, *Vyshee Obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia* **31**(7), 42–60 (2022). (in Russ)]. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2022-31-7-42-60>
18. T. Bakytказы, K. Nurgaliyeva, N. Janysbek, N. Zhumanazarova, Purpose and Characteristics of STEM Education in Both the United States and Kazakhstan, *Lect. Notes Netw. Syst.* **1261**, 260–267 (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-031-85649-5_26
19. Ә.С. Игенбаева, Анализ и оценка ключевых компетентностей студентов естественнонаучного направления в контексте требований современного рынка труда, *Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Фараби әлемі»*, 3–5 апреля 2025. [A.S. Igenbayeva, Analysis and Assessment of Key Competencies of Natural Science Students in the Context of Modern Labor Market Requirements, *Proc. Int. Sci. Conf. Students Young Scientists "Farabi Alemi"*, 3–5 April (2025). (in Russ)]

20. А.С. Игенбаева, Қ.Е. Нұрғалиева, С.Г. Карстина, Анализ формирования hard и soft skills в образовательных программах по направлению подготовки «физика» в вузах Казахстана, *Өрлеу. Ұздіксіз білім жаршысы – Өрлеу. Вестник непрерывного образования* 4(51), 119-129 (2025) [A.S. Igenbayeva, K.E. Nurgaliyeva, S.G. Karstina, Analysis of Hard and Soft Skills Formation in Educational Programs in Physics at Universities of Kazakhstan, *Orleu. Vesti Nepreryvnogo Obrazovaniya* 4(51), 119–129 (2025). (in Russ)] <https://doi.org/10.69927/VUYK3292>

21. К.Е. Нурғалиева, А.С. Игенбаева, Использование компьютерных технологий для оценки знаний и навыков, Инженерные технологии для устойчивого развития и интеграции науки, производства и образования, IV: Инновационные технологии инженерной педагогики, *Материалы Международной научно-практической конференции*, Тамбов, Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 122-125 (2020). [K.E. Nurgaliyeva, A.S. Igenbayeva, Use of Computer Technologies for Knowledge and Skills Assessment, in *Engineering Technologies for Sustainable Development and Integration of Science, Industry and Education*, Vol. IV: Innovative Technologies of Engineering Pedagogy, Proc. Int. Sci.-Pract. Conf., 122–125 (2020). (in Russ)].

22. Ә.С. Игенбаева, Білім деңгейін тест арқылы анықтау және оның артықшылығы мен кемшілігін талдау, *Студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференциясы «Фараби әлемі»*, Алматы, 8-11 сәуір, 414 (2019). [A.S. Igenbayeva, Determining the Level of Knowledge through Testing and Analysis of Its Advantages and Disadvantages, Proc. Int. Sci. Conf. Students and Young Scientists “Farabi Alemi”, 414 (2019) (in Kaz.)].

Авторлар туралы мәлімет:

Ә.С. Игенбаева – магистр, оқытушы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, (Алматы, Қазақстан; e-mail: igenbayeva.assel@gmail.com)

Қ.Е. Нұрғалиева (автор-корреспондент) – ф.-м.ғ.к., ассистент-профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, (Алматы, Қазақстан; e-mail: knurgaliyeva@kaznu.kz)

С.Г. Карстина – ф.-м.ғ.д., профессор, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті. (Қарағанды, Қазақстан; e-mail: Skarstina@mail.ru)

Ф.Т. Шагеева – Педагогика ғылымдарының докторы, профессор, Казан ұлттық зерттеу технологиялық университеті, (Казань, Россия; e-mail: faridash@bk.ru)

Information about authors:

A.S. Igenbayeva – Master, Lecturer, Abai Kazakh National Pedagogical University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: igenbayeva.assel@gmail.com)

K.E. Nurgaliyeva (corresponding author) – Candidate of phys-math sciences, Assistant-professor, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan; e-mail: knurgaliyeva@kaznu.kz)

S.G. Karstina – Doctor of Phys-Math Sciences, Professor, Buketov Karaganda National Research University, (Karaganda, Kazakhstan; e-mail: Skarstina@mail.ru)

F.T. Shageeva – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Kazan National Research Technological University, (Kazan, Russia; e-mail: faridash@bk.ru)

Сведения об авторах:

Игенбаева А.С. – магистр, преподаватель, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, (Алматы, Қазақстан; e-mail: igenbayeva.assel@gmail.com)

Нұрғалиева К.Е. (автор-корреспондент) – к.ф.-м.н., ассистент-профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, (Алматы, Қазақстан; e-mail: knurgaliyeva@kaznu.kz)

Карстина С.Г. – д.ф.-м.н., профессор, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е. А. Букетова, (Караганда, Казахстан; e-mail: Skarstina@mail.ru)

Шагеева Ф.Т. – доктор педагогических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технологический университет, (Казань, Россия; e-mail: faridash@bk.ru)

Мақала тарихы: түсті: 5 ақпан 2026; түзетілді: 20 мамыр; қабылданды: 22 мамыр 2026.

Article history: received: 5 February 2026; revised: 20 April; accepted: 22 May 2026.

История статьи: поступила: 5 февраля 2026; после доработки 20 апреля; принята: 22 мая 2026.

МАЗМУНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ

Теориялық физика. Ядро және элементар бөлшектер физикасы. Астрофизика	Theoretical Physics. Nuclear and Elementary Particle Physics. Astrophysics	Теоретическая физика. Физика ядра и элементарных частиц. Астрофизика
<i>А. Мұратхан, Н. Шыңғысхан, А.С. Тәукенова, К. Дәуітхан, А.Т. Оразымбет</i>		
Квадрупольдік деформацияланған ықшам объектілер маңындағы жұқа аккрециялық дискілердің геометриялық құрылымы және оптикалық кескіні 4		
<i>Sh.T. Nurmakhmetova, N.L. Vaidman, S.A. Khokhlov, A.T. Agishev</i>		
Effective temperature calibration of galactic BA-type supergiants 18		
<i>А.У. Темиржанова, И. Рева, Д.М. Насирова, С.А. Шомиекова</i>		
Фотометрический мониторинг Сейфертовской галактики NGC 7469 27		
<i>С.К. Сахиев, Маулен Насурлла, Н. Буртебаев, Н.О. Садуев, Д.А. Исаев, Маржан Насурлла, Р.А. Ходжаев, К.А. Талпакова, А.К. Нурпейсов, С.А. Турганова</i>		
Изучение взаимодействия дейтронов с ядрами ^{13}C 33		
Плазма физикасы	Plasma Physics	Физика плазмы
<i>Д.Л. Алонцева, Б.Н. Азаматов, С.Г. Войнарович, А.В. Еrsaинова</i>		
Современные тенденции развития производства медицинских инструментов и имплантатов с использованием плазменных технологий модификации поверхности 44		
Конденсирленген күй физикасы және материалтану проблемалары. Наноғылым	Condensed Matter Physics and Materials Science Problems. Nanoscience	Физика конденсированного состояния и проблемы материаловедения. Нанонаука
<i>Ю.Н. Гордиенко, В.С. Бочков, А.Д. Ноканова, О.С. Букина, Ю.Ю. Бакланова, Э. Сапарбек</i>		
Низкотемпературная десорбция имитатора жидких радиоактивных отходов из перлита: влияние температуры и продувки по данным ТГА/ДСК-МС 62		
<i>A.Zh. Zhomartova, M. Kenessarin, K. Nazarov, S.E. Kichanov, R.S. Zhumatayev, J.-M. Deom, A. Smat, B. Mukhametuly</i>		
Microstructural and mineralogical analysis of Urysay-2 ceramics by X-ray microtomography and Raman spectroscopy 73		
<i>В.М. Юров, К.Н. Жангозин</i>		
Квантовая модель формирования нанокластеров и наноплёнок металлов платиновой группы в кварце: экспериментальная верификация перколяционной проводимости 84		
<i>A.Y. Kussainov, M.T. Kaliaskarova, I.K. Abizhanova Y.S. Molbossynov, L.B. Bayatanova, G.Zh. Zhunissova</i>		
Comparative analysis of WC-NiCr, Al_2O_3 -NiCr, and Cr_3C_2 -NiCr metal-ceramic coatings applied by HVOF and detonation spraying methods 94		
<i>А.К. Ақылбаева, Ж.Б. Омарова, А.М. Есентай, Д.Е. Ережес</i>		
Перовскит күн элементтерінің радиациялық төзімділігіне иондаушы және иондаушы емес энергия шығындарының әсері 104		

**Жылу физикасы және
теориялық жылу техникасы****Thermophysics and Theoretical
Heat Engineering****Теплофизика и
теоретическая теплотехника***В. Мукамеденқызы, Б. Ақбердиев*

Бинарлы газ қоспаларындағы механикалық тепе-теңдік тұрақтылығына температураның әсерін сандық модельдеу 114

Roohi Zafar, Muhammad Kamran, Tahir Malik and Kousar Shaheen

Characterizing environmental thermal fluctuations for use in true random number generators 124

**Жоғары мектепте физика
пәнін оқыту әдістемесі****Methods of teaching high
school physics****Методика преподавания
физики в высшей школе***Ә.С. Игенбаева, Қ.Е. Нұрғалиева, С.Г. Карстина, Ф.Т. Шагеева*

Гарднердің интеллект теориясы бойынша студенттердің интеллект түрлері мен жалпы физикадағы оқу жетістіктері арасындағы байланыс 132