ҒТАМР 29.19.16; 44.41 https://doi.org/10.26577/RCPh972202610

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 метатұрақты 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. Akylbaeva, 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.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

Keywords: perovskite solar cell, ionization energy losses, non-ionization energy losses, degradation.

А.К. Акылбаева, 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 платформаларда, 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.

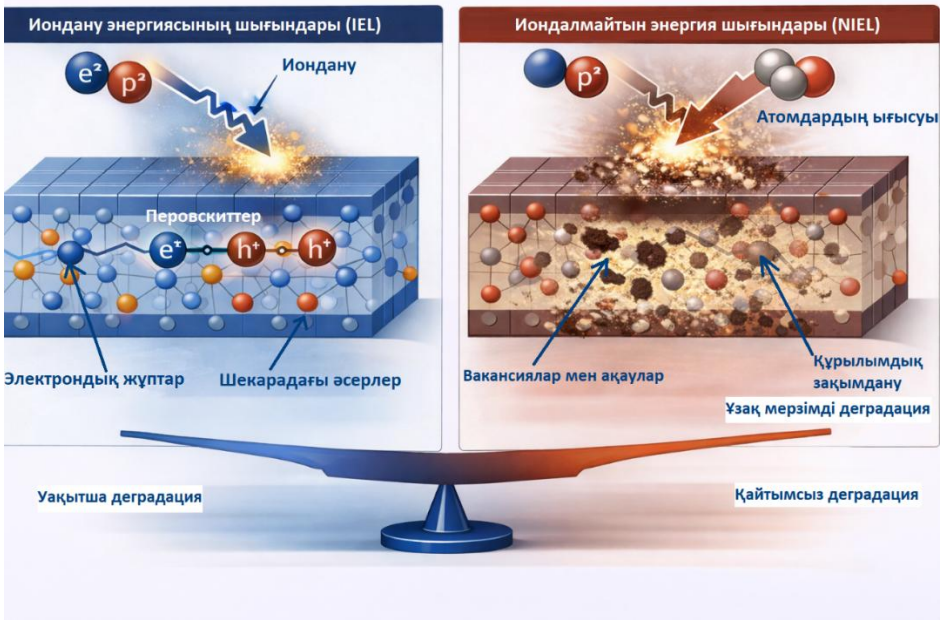
Иондану мен ионданбау әсерлерін салыстырмалы бағалау нақты әдіснамалық негізде жүргізілді. Бұл негіз мыналарды қамтиды: әртүрлі сәулелену жағдайларындағы фотоэлектрлік параметрлердің өзгерістерін салыстыру, сәулеленуге дейінгі және кейінгі сипаттамаларды талдау, қалпына келу динамикасын зерттеу, NIEL 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 қаттылықты 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.

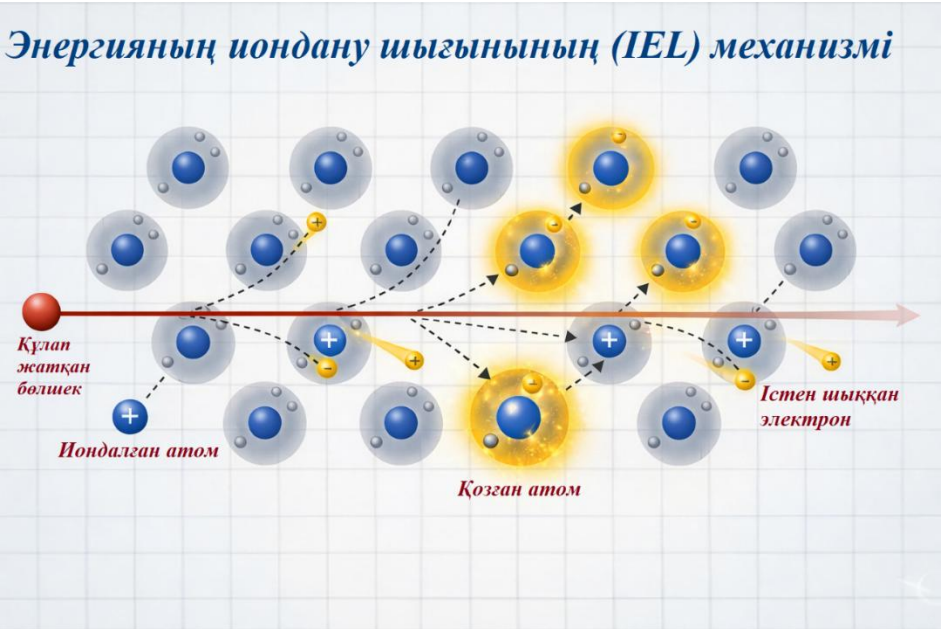
Кремний мен III–V жүйелерінде де иондану әсерлері бар, бірақ ондағы физика басқа. Негізгі

проблема p–n 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 (>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 (~300–600 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

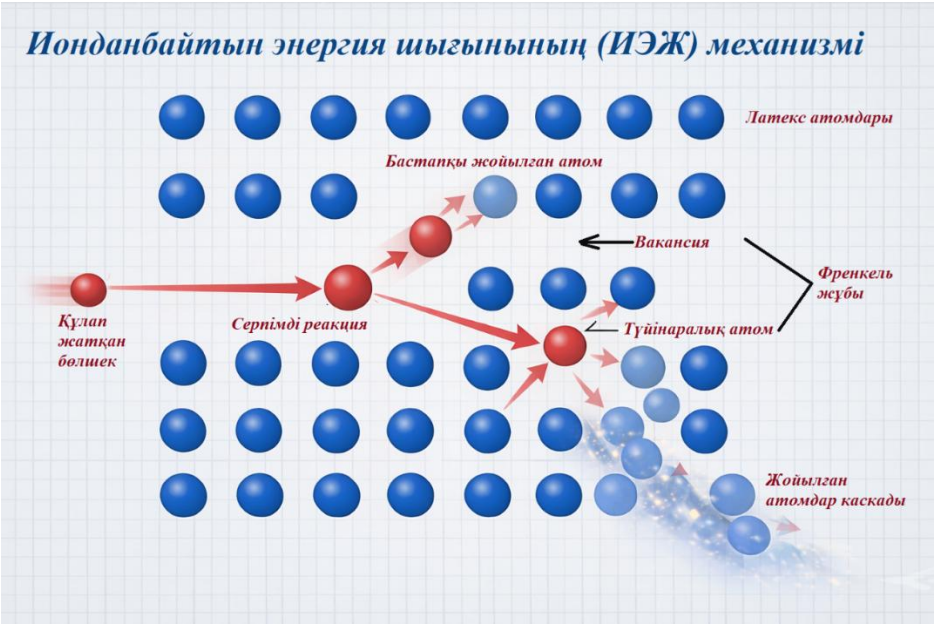
кеңістіктік түрде шоғырланған болады. Бұл атомдық ығысулар мен тор ақауларының тиімді түзілуіне әкеледі [36,37].

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. Галоидтар 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. Verduci, G. D'Angelo, Advances in Perovskites for Photovoltaic Applications in Space, *ACS Energy Lett.* **7**, 2490–2514 (2022). https://doi.org/10.1021/acsenergylett.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. Soltau, 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. Srour, 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/pip.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/aerospace12111015
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 $CH_3NH_3PbI_3$ 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 $CH_3NH_3PbI_3$ 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/smll.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. Yerezhep, 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/advs.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. Inguimbert, K. Lemière, 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/smll.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 Yessentay – Senior Lector, 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:

Айгерим Акылбаева – PhD, СНС, 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.*