



XҒТАР 37.23.17

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-115-135>

Шолу мақаласы

PM-2.5 аэрозольдеріндегі бериллий -7 (^7Be) атмосфералық белсенділігі: қолданылуы, тенденциялары және экологиялық перспективалары

А.О. Мухаметжанова¹, К.Ш. Жумадилов^{*1}, А.А. Баграмова¹, Ж.А. Байгазинов²,
Ж.О. Насилов¹, М.Т. Касымжанов¹, А.И. Иванников³, В.Ф. Степаненко³, М. Хоши⁴

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасы, Астана, Қазақстан

²"Ядролық технологиялар паркі" АҚ Қазақстан Республикасы, Курчатов қаласы, Абай облысы

³Ресей Федерациясының Денсаулық сақтау Министрлігінің «ФМЗО» Федералдық Мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы А.Ф. Цыба атындағы МРФО, Обнинск қаласы, Ресей Федерациясы

⁴Хиросима университеті, Хиросима, Жапония

(E-mail: zhumadilovk@gmail.com)

Аңдатпа. Мақалада PM2.5 аэрозоль бөлшектеріндегі космогендік бериллий-7 (^7Be) радионуклидінің атмосфералық белсенділігі туралы соңғы зерттеулердің егжей-тегжейлі талдауы келтірілген. Атмосфераның жоғары қабаттарында ғарыштық сәулелердің өзара әрекеттесуі нәтижесінде пайда болған ^7Be аэрозольдер мен онымен байланысты ластаушы заттардың тасымалдануы мен трансформациясын бақылау және тропосфера мен стратосфера арасындағы алмасу механизмдерін зерттеу үшін пайдаланылуы мүмкін сезімтал және бірегей трассер болып табылады. Шолу мақала ^7Be физикалық және химиялық қасиеттерін қарастырады, оны анықтаудың күрделі аналитикалық әдістерін, соның ішінде гамма-спектрометрияны сипаттайды және оның ауа-райына және PM2.5 негізгі көздеріне байланысты маусымдық және аймақтық ауытқуларын қарастырады. Шолу ауа сапасын бағалау, тәуекелдерді басқару және келісілген халықаралық атмосфераны бақылау және ластануды азайту стратегияларын әзірлеу үшін ^7Be пайдаланудың ғылыми және практикалық маңыздылығын көрсетеді. ^7Be -ді аэрозольдердің трансшекаралық тасымалын сандық анықтау және ұсақ бөлшектердің ластануының қоршаған ортаға және халықтың денсаулығына әсерін, бағалау құралы ретінде пайдалануға ерекше назар аударылады. Мақалада сонымен қатар атмосфералық бақылау желісі мен модельдеу жүйесіндегі ^7Be деректерінің интеграциясы талқыланады, соңғы жетістіктермен қатар қазіргі проблемалар баса айтылады.

Түйін сөздер: бериллий-7 (^7Be); аэрозольдер; PM2.5; атмосфералық мониторинг; экологиялық бағалау; радиоизотоптық индикаторлар; ластану тенденциялары.

Жіберілді 20.05.2025. Өзгертілді 02.06.2025. Қабылданды 02.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025

¹ *хат-хабар авторы

Кіріспе

Атмосфералық ауаның ластануы адам денсаулығы мен климаттық жүйелерге тікелей әсер ететін жаһандық экологиялық проблемалардың бірі болып қала береді. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (ДДҰ) мәліметтері бойынша, жер халқының 99%-ы PM_{2.5} тоқтатылған бөлшектерінің концентрациясы қауіпсіз деңгейден (5 мкг/м³) асатын жерлерде тұрады және жыл сайын ауаның ластануынан шамамен 7 миллион адам қайтыс болады [1]. Орталық Азиядағы жағдай ерекше алаңдатады: Душанбе, Ташкент және Бішкек қалалары өнеркәсіптік шығарындылармен, қатты отынды пайдаланумен және аэрозольдердің трансшекаралық тасымалымен байланысты PM_{2.5} деңгейі бойынша әлемдегі ең ластанған 30 астананың қатарына үнемі кіреді [2]. Атмосфералық процестерді бақылау контекстінде бериллий-7 (⁷Be) сияқты радионуклидтер шешуші рөл атқарады. ⁷Be аэрозоль бөлшектерінің бетіне адсорбцияланады, бұл оны PM_{2.5} динамикасын зерттеу үшін тамаша көрсеткіш етеді-өкпе альвеолалары мен қан ағымына ену қабілетіне байланысты денсаулыққа ең үлкен қауіп төндіретін фракция [1].

Бұл мақалада төменде көрсетілген тапсырмаларға бойынша шолу жасалынады:
маусымдық және географиялық вариация контекстіндегі ⁷Be механизмдерін талдау;
PM_{2.5}-те ⁷Be анықтау әдістеріне шолу (гамма-спектрометрия, радиохимиялық талдау);
⁷Be концентрациясы, метеорологиялық факторлар және аэрозоль көздері арасындағы байланысты анықтау;

ластанудың трансшекаралық тасымалын болжаудағы және тәуекелдерді азайту стратегияларын әзірлеудегі ⁷Be рөлін бағалау.

Әдеби шолу. ⁷Be-нің физика-химиялық қасиеттері және оны анықтау әдістері

Бериллий-7 (⁷Be) – жартылай ыдырау кезеңі шамамен 53,3 күн болатын радиоактивті бериллий изотопы, ол атмосфераның жоғарғы қабаттарында ғарыштық сәулелердің азот, оттегі және көміртек ядроларымен өзара әрекеттесуі нәтижесінде түзіледі [3]. Оның түзілуінің негізгі механизмі – ғарыш текті жоғарыэнергиялық протондар мен нейтрондар атмосфера атомдарынан нуклондарды шығарып, ⁷Be элементін түзеді. ⁷Be-дің атмосферадағы концентрациясы геомагниттік ендікке, күн белсенділігіне және биіктікке байланысты, ал ең жоғары мәнге орта ендіктер мен тропосфераның жоғарғы қабаттарында жетеді [3]. Қысқа жартылай ыдырау кезеңі мен антропогендік көздердің болмауына байланысты ⁷Be – атмосфералық процестер мен аэрозоль тасымалын зерттеуге арналған бірегей табиғи маркер.

⁷Be-нің физика-химиялық қасиеттері оның атмосфералық аэрозольдердің бетіне адсорбциялануымен тығыз байланысты және негізінен PM_{2.5} фракциясында байқалады. Стратосферада түзілген ⁷Be диаметрі 2,5 мкм-ден кіші майда дисперсті бөлшектермен тез байланысады, бұл оның аэрозольдермен бірге тасымалдануын қамтамасыз етеді және атмосферадағы ластану динамикасы мен тік алмасуды зерттеуге мүмкіндік береді [4]. Сонымен қатар, ⁷Be жоғары химиялық тұрақтылыққа ие, ауадағы басқа компоненттермен белсенді реакцияларға түспейді, бұл оның бөлшектер құрамында шөгуге дейін сақталуын қамтамасыз етеді. Бериллий-7 (⁷Be) – атмосферадағы мөлшері антропогендік факторларға іс жүзінде тәуелсіз сирек радионуклидтердің бірі, бұл оны бірегей табиғи

индикаторға айналдырады [5]. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000) деректеріне сәйкес, ^7Be түзілуінің жаһандық орташа деңгейі шамамен $810 \text{ атом}/\text{м}^2/\text{с}$, ал оның тропосферадағы орташа концентрациясы – $12,5 \text{ мБк}/\text{м}^3$ [5]. Оңтүстік Федералды Университеті мен Харьков физика-техникалық институтының зерттеулері фотоядерлік реакциялардың жалпы ^7Be балансына қосқан үлесі скалывание реакцияларымен салыстырғанда аса маңызды емес екенін көрсеткен, бірақ бұл механизмді толығымен жоққа шығаруға болмайды [6]. ^7Be түзілу жылдамдығы биіктікке ғана емес, ендікке де, сондай-ақ Жердің магнит өрісі арқылы ғарыштық сәулелер ағынын модуляциялайтын 11 жылдық күн циклінің фазасына байланысты өзгеріп отырады [5]. Осылайша, ^7Be – қысқа жартылай ыдырау кезеңі бар (53,3 күн) космогендік радионуклид, бұл оның белсенділігін және атмосфералық процестерге жоғары сезімталдығын қамтамасыз етеді. Оның түзілуі орта және жоғары ендіктер үшін жақсы зерттелген, бірақ Орталық Азия мен басқа континенттік аймақтар үшін нақты бағалаулар өте сирек кездеседі, бұл халықаралық зерттеулерде елеулі олқылық бар екенін көрсетеді.

Аэрозольдердегі ^7Be белсенділігін анықтау

^7Be белсенділігін аэрозольдерде анықтау негізінен гамма-спектрометрия әдісімен жүзеге асырылады, ол ^7Be ыдырауы кезінде шығарылатын $477,6 \text{ кэВ}$ энергияға тән гамма-сәулеленуді тіркеуге негізделген [4]. Талдау үшін NaI(Tl) негізіндегі сцинтилляциялық детекторлар және жоғары ажыратымдылықты жартылай өткізгіш HPGe (High-Purity Germanium) детекторлары қолданылады, себебі олар пикаралық ерекшелік пен дәлдігі және жоғары сезімталдықты қамтамасыз етеді. Үлгілерді дайындау – аэрозольдерді сүзгілерге жинау, кейіннен кептіру және белсенділіктің жоғалуын азайту үшін герметизациялауды қамтиды. ^7Be -ні бөліп алу үшін радиохимиялық әдістер сирек қолданылады, өйткені олар күрделі және көп еңбек сіңіруді талап етеді, дегенмен төмен концентрацияларда қосымша дәлдік береді [4]. Қазіргі заманғы гамма-спектрометрия әдістері ^7Be -ні үнемі бақылауға мүмкіндік береді және нәтижелердің зертханалар арасындағы жоғары қайталанғыштығы мен салыстырмалылығын қамтамасыз етеді.

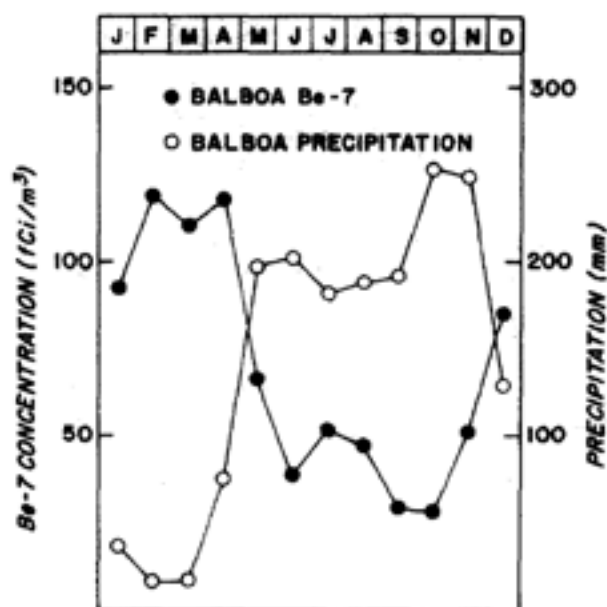
^7Be мен аэрозольдердің, әсіресе $\text{PM}_{2.5}$ байланысы

Түзілгеннен кейін ^7Be субмикрондық аэрозоль бөлшектеріне, негізінен $0,07\text{--}2 \text{ мкм}$ диапазонында, тез адсорбцияланады, бұл аэрозольдердің «аккумуляциялық» (accumulation) модуліне сәйкес келеді [5]. Бұл $\text{PM}_{2.5}$ фракциясы үшін өте маңызды, себебі бұл фракция диаметрі $2,5 \text{ мкм}$ -ден кіші бөлшектерді қамтиды және адамның тыныс алу жолдарына терең ену қабілетімен ерекшеленеді [7]. Әдебиет деректерінде ^7Be сорбцияланатын бөлшектердің аэродинамикалық диаметрі $0,33\text{--}1,15 \text{ мкм}$ -ге дейін ауытқитыны көрсетілген, бұл $\text{PM}_{2.5}$ диапазонын толығымен қамтиды [5]. Bondietti және авторластарының (1984, 1987) зерттеулері ^7Be аэрозольдер бетіне түзілуінен кейін бірден конденсацияланатынын, содан соң бөлшектердің коагуляциясы мен өсу процестеріне қатысатынын, бұл оның кейінгі таралуына және атмосферадан құрғақ немесе ылғалды тұндыру арқылы шығарылуына әсер ететінін көрсетті. Маңызды аспект – ^7Be басқа табиғи радионуклидтер (^{22}Na , ^{210}Pb) сияқты аэрозольдердің атмосферадағы өмір сүру уақытына, тұну жылдамдығына және өсімдіктермен сіңірілу тиімділігіне баға беру үшін

маркер ретінде қолданылуы мүмкін [5]. Алайда ^{7}Be -нің $\text{PM}_{2.5}$ ішіндегі таралуына арналған зерттеулердің көпшілігі Еуропа, Солтүстік Америка және Шығыс Азияда жүргізілген. Орталық Азия үшін, $\text{PM}_{2.5}$ ластану деңгейі жоғары болғанымен, мұндай жұмыстар өте аз, бұл аймақтық ерекшеліктерді жаһандық үрдістермен салыстыруды қиындатады.

Географиялық және маусымдық өзгергіштік

^{7}Be концентрациясы атмосферада географиялық және маусымдық айқын өзгергіштікке ие, бұл жаһандық (күн циклі, ендік, биіктік) және жергілікті (метеорологиялық жағдайлар, жауын-шашын) факторларға байланысты [8]. Еуропада (Бильбао, Испания) жүргізілген зерттеулерде ^{7}Be ең жоғары мәндері қаңтардан қыркүйекке дейін, ақпанда шарықтау шегімен және шілде–тамызда екінші максимуммен байқалатыны, ал ең төмен мәндер қарқынды жауын-шашын кезінде (қараша–желтоқсан) тіркелетіні көрсетілген. Бұл график түрінде де көрсетілген (1-сурет) [8]. ^{7}Be белсенділігі мен күн дақтарының саны арасындағы күшті теріс корреляция ($r = -0,93$) радионуклид генерациясына күн циклінің әсерін дәлелдейді.



Сурет 1. Балбоадағы орташа айлық концентрация ^{7}Be және орташа айлық жауын шашын

Ескерту: деректер негізінде жасалған [8]

Feely және авторлар (1989) анықтағандай, ^{7}Be радионуклидінің жер бетіне жақын ауадағы маусымдық ауытқулары кем дегенде төрт фактормен түсіндіріледі [8]:

Қыс мезгілінің соңында және көктемде стратосфералық ауаның тропосфераға тасымалдану жылдамдығының артуы;

Жылы кезеңде тропосфера тұрақтылығының төмендеуі, бұл тік алмасуға ықпал етеді;

Әсіресе жоғары ендіктерде ауа массаларының траекторияларының өзгеруі;

Аэрозольдердің шайылу жылдамдығын анықтайтын жауын-шашынның маусымдық тербелістері [8].

Солтүстік жартышарда ^7Be радионуклиді концентрациясының максимумдары көбінесе көктемде және жазда, ал минимумдары – күзде және қыста тіркеледі [9]. Оңтүстік жартышарда маусымдық шектер керісінше фазамен сипатталады. Орталық Азия үшін климаттың жоғары континенттілігіне қарамастан, мұндай заңдылықтар әзірге фрагментті түрде ғана сипатталған, бұл ұзақмерзімді мониторингтік зерттеулерді жүргізуді қажет етеді [10][8].

^7Be радионуклидин атмосфералық тасымалдау индикаторы ретінде пайдалану

^7Be табиғи трассер ретінде аэрозольдердің тасымалдану үдерістерін, стратосфера мен тропосфера арасындағы алмасуды зерттеуде, сондай-ақ бөлшектердің атмосферадағы өмір сүру уақытын бағалауда кеңінен қолданылады [11]. Оның табиғи шығу тегі және антропогендік көздердің болмауы фондық ағындарды жергілікті ластанулардан ажыратуға мүмкіндік береді. Martell (1970) және Young & Silker (1980) алғашқылардың бірі болып ^7Be аэрозольдердің тропосферада болу уақытына, тұну жылдамдығына және көлденең әрі тік тасымал ауқымдарына баға беруде қолдануға болатынын көрсетті. Қазіргі зерттеулерде ^7Be атмосфералық тасымалдау модельдерімен (мысалы, HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model)) және спутниктік деректермен бірге трансшекаралық PM2.5 ағындарын бақылау, климаттық модельдерді верификациялау және ауаны ластау деңгейін төмендету шараларының тиімділігін бағалау мақсатында пайдаланылады [12][13].

Соңғы жылдары ^7Be деректерін басқа радионуклидтермен (^{210}Pb , ^{137}Cs) және химиялық маркерлермен біріктіру арқылы аэрозоль көздері мен тасымал жолдарын неғұрлым дәл сәйкестендіруге ерекше назар аударылуда. Мысалы, AERONET және EMEP мәліметтері негізінде жүргізілген зерттеулерде ^7Be және PM2.5 біріктірілген талдауы Сахарадан шаңның алысқа тасымалдану эпизодтарын, Сібірдегі өрттерді және Еуропа мен Шығыс Азиядағы трансшекаралық ластануды анықтауға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Алайда, Орталық Азияда Арал мен шөлдер сияқты ірі шаң көздерінің болуына қарамастан, ^7Be қолданып аэрозольдердің трассировкасын жүргізетін зерттеулер жоқтың қасы. Бұл PM2.5-тің аймақтық деңгейіне трансшекаралық тасымалдың үлесін бағалау мүмкіндігін шектейді және ауа сапасын басқарудың тиімді стратегияларын әзірлеуді қиындатады [10][8].

Аэрозольдердегі ^7Be -ні бақылау мен талдаудың заманауи әдістері

Соңғы жылдары ^7Be деректерін спутниктік мониторинг нәтижелерімен (MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)) және атмосфералық үдерістерді сандық модельдеумен біріктіру әдістері белсенді дамып келеді. Бұл аэрозольдердің кең ауқымды тасымалдану эпизодтарын бақылауға, ластанудың өршуін болжауға және PM2.5 деңгейін төмендетуге бағытталған табиғи және антропогендік шаралардың тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді [8]. Соған қарамастан, Орталық Азияны қоса алғанда, кейбір аймақтарда ^7Be мониторингінің дамыған желісі жоқ, бұл кешенді талдау жүргізу және халықаралық деректермен салыстыру мүмкіндіктерін едәуір шектейді. PM2.5 аэрозольдеріндегі ^7Be бойынша халықаралық зерттеулер аэрозольдердің түзілу, тасымалдану және тұну үдерістерін түсінуге, сондай-ақ атмосфералық мониторинг әдістерін дамытуға айтарлықтай үлес қосты. Әсіресе Еуропа, Солтүстік Америка және Шығыс Азия аймақтары

жақсызерттелген, онда ұзақ мерзімді бақылау қатарлары, дамыған станциялар желісі және модельдер мен спутниктік деректермен интеграция бар [10]. Шетелдік зерттеулердің күшті жақтарына мыналарды жатқызуға болады: ^{7}Be концентрацияларына әсер ететін факторларды кешенді талдау [8]; заманауи трассировка және модельдеу әдістерін пайдалану; ^{7}Be деректерін химиялық және радионуклидтік маркерлермен біріктіру [10]. Алайда шешілмеген мәселелер де бар: климаттық жағдайлары шекті аймақтардың (Орталық Азия, Таяу Шығыс, Африка) жеткіліксіз зерттелуі; климаттық трендтермен салыстыру үшін ұзақ мерзімді қатарлардың тапшылығы; PM2.5 жергілікті көздерінің ^{7}Be динамикасына әсеріне арналған зерттеулердің жетіспеушілігі. Жалпы алғанда, болашақ зерттеулерді дамыту үшін ^{7}Be мониторингінің географиясын кеңейту, оны басқа маркерлер мен модельдермен интеграциялау, сондай-ақ климаттық және антропогендік факторлардың радионуклидтің атмосферадағы таралуына әсерін тереңірек талдау қажет [9].

Зерттеу әдістемесі

Сүзу әдістері және сүзгі түрлері

PM2.5 аэрозольдерін іріктеу үшін әлемдік практикада автоматтандырылған және жартылай автоматтандырылған қондырғыларды пайдалана отырып сүзу әдістері кеңінен қолданылады. Негізгі принцип – диаметрі 2,5 мкм-ден кем бөлшектерді ұстап қалатын тесіктері бар сүзгілер арқылы ауаны өткізу [14][15]. Сүзгілердің ең кең таралған материалдарына мыналар жатады: *шыны талшықты сүзгілер* (мысалы, ФПП-15) – жоғары жинақтау тиімділігімен және төмен фондық белсенділігімен ерекшеленеді [16] [17]; *политетрафторэтилен* (PTFE) сүзгілері – гидрофобты, химиялық әсерлерге төзімді, бұл гравиметриялық талдау кезіндегі қателіктерді барынша азайтады (2-суретте жақсы көрсетілген) [18][19]; *кварц сүзгілері* – термиялық төзімді, органикалық көміртекті талдау үшін қолданылады [18][19].



Сурет 2. Сүзгілерді пайдалану әдісі

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [18]

PTFE және кварц сүзгілерін салыстыру нәтижесінде PM2.5-тің орташа концентрациясы PTFE-де 52,9%-ға төмен екені анықталды, бұл олардың гидрофобты қасиеттерімен түсіндіріледі, себебі бұл ылғалдылықтың әсерін азайтады [18].

Автоматтандырылған сынама алу станциялары

AirPhoton Automated Filter Sampling Station және Partisol® Plus 2025 сияқты автоматтандырылған жүйелер электронды басқару, сорғылар және ауа ағынын бақылау жүйелерімен (16,67 л/мин) жабдықталған, бұл сынама алуды стандарттауға мүмкіндік береді [14][17]. Бұл станциялар PM2.5 массалық концентрациясына гравиметриялық талдау жүргізу үшін үздіксіз 24-48 сағаттық сынама алуға мүмкіндік береді [17]. Артықшылықтары: адами фактордың әсерін азайту; сынама алу жағдайларын тұрақтандыру үшін температураны реттегіштермен біріктіру мүмкіндігі [17]. Еуропа мен АҚШ-та мұндай жүйелер EN 12341:2014 директивасы және Federal Reference Method (FRM) талаптарына сәйкес мониторингтің негізін құрайды [20].

Шектеулі ресурстары бар аймақтардағы қолмен басқарылатын әдістер

Жоғары технологиялық жабдықтарға қолжетімділігі шектеулі аймақтарда (мысалы, Қазақстан) қолмен басқарылатын мобильді қондырғылар қолданылады. Олар стандартты шыны талшықты сүзгілер мен вакуумды сорғыларды пайдаланады, бұл төмен шығынмен жеткілікті дәлдікті қамтамасыз етеді [16]. Мысалы: төмен көлемді LV сэмплерлер (Low Volume samplers) – 2–4 сағат бойы сынама алып, кейін зертханада өлшеу [18]; EPA (Environmental Protection Agency (АҚШ)) және ДДҰ (ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения)) нұсқаулықтарына сәйкес келетін жеңілдетілген хаттамалар [20]. Қолмен басқарылатын әдістердің кемшіліктері: еңбек сыйымдылығы жоғары; тасымалдау кезінде сүзгілердің контаминация қаупі бар [16].

Әдіс таңдау бойынша ұсыныстар

Дәл әрі ұзақ мерзімді мониторинг үшін автоматтандырылған жүйелер (PTFE-сүзгілер + гравиметрия) тиімді [14].

Бюджеті шектеулі аймақтарда шыны талшықты сүзгілері бар қолмен басқарылатын LV-сэмплерлер қолайлы [18].

PM2.5-тің органикалық компоненттерін талдау үшін кварц сүзгілері оңтайлы [20].

PM2.5-ті іріктеу әдістері техникалық мүмкіндіктер мен зерттеу мақсаттарына байланысты өзгереді. Автоматтандырылған жүйелердің дамуы және хаттамалардың стандартталуы (EN 12341(European Norm 12341:2014), FRM) мәліметтердің дәлдігін арттырады, алайда дамушы елдерде қолмен басқарылатын әдістер өзектілігін сақтап отыр [17][20].

⁷Be анықтау әдістері

Талдаудың негізгі кезеңдері:

- Сынамаларды дайындау: аэрозольдер жиналған сүзгілерді кептіріп, белсенділіктің жоғалуын барынша азайту үшін герметикалық орау.
- Гамма-спектрлерді өлшеу: NaI(Tl) кристалдарына негізделген сцинтилляциялық детекторларды немесе жоғары энергия ажыратымдылығын қамтамасыз ететін HPGe (германиевые) жартылай өткізгіш детекторларды қолдану.
- Спектрометрлерді стандартты көздермен калибрлеу.

– Мәліметтерді өңдеу: мамандандырылған бағдарламаларда (мысалы, RAD (Radiological Assistance Software) Assist) пиковая энергияларды анықтап, ${}^7\text{Be}$ белсенділігін Бк/м³ бірлігінде есептеу.

Кейбір зерттеулерде ${}^7\text{Be}$ -ні сынамалардан бөліп алу үшін радиохимиялық әдістер де қолданылады, алайда олар еңбек шығыны жоғары болғандықтан, күнделікті мониторингте сирек пайдаланылады. Осыған байланысты 1 – кестеде PM2.5-те ${}^7\text{Be}$ қасиеттеріне байланысты салыстырмалы ақпарат көрсетілген.

1-кесте: PM2.5-те ${}^7\text{Be}$ іріктеу мен талдаудың негізгі әдістерін салыстыру

Әдіс	Сипаттау	Артықшылықтары	Шектеулер	Қазақстан үшін қолдану мүмкіндігі
Шыны Талшықты сүзгілерде сүзу	AFP-15 сүзгілері мен аналогтары арқылы аэрозольдерді таңдау	PM2.5 жинаудың қарапайымдылығы, қол жетімділігі, жоғары тиімділігі	Ұзақ жинау қажет, белсенділіктің жоғалуы мүмкін	Жоғары, көптеген зертханаларда бар
Автоматтандырылған станциялар	Ауа ағынын бақылайтын электр желдеткіші	Стандарттау, ұзақ үздіксіз жинау	Жоғары құны, техникалық қызмет көрсету қажеттілігі	Орташа, инвестицияны қажет етеді
Гамма-спектрометриясы NaI(Tl)	662 кэВ кезінде ~7-8% ажыратымдылығы бар сцинтилляциялық детекторлар	Қол жетімділік, жылдам талдау	Төмен ажыратымдылық, ықтимал кедергілер	Жоғары, жиі қолданылады
Гамма-спектрометриясы HPGe	Жоғары ажыратымдылықтағы жартылай өткізгіш детекторлар (~1-2 кэВ)	Жоғары дәлдік, шыңдарды бөлектеу	Құны, салқындату қажеттілігі	Шектеулі, мамандандырылған зертханаларды қажет етеді
Радиохимиялық талдау	Сынамалардан ${}^7\text{Be}$ химиялық оқшаулау	Жоғары сезімталдық, дәлдік	Талдаудың күрделілігі, ұзақтығы	Төмен, сирек қолданылады
Тасымалдау модельдері (HYSPLIT, FLEXPART)	Аэрозоль және ${}^7\text{Be}$ траекторияларын сандық модельдеу	Көлікті талдау, болжау	Метеодеректер мен есептеу ресурстарын қажет етеді	Мамандардың қатысуымен жоғары

Аэрозольдер мен ${}^7\text{Be}$ тасымалдау модельдерін қолдану

${}^7\text{Be}$ және PM2.5 динамикасын және көздерін талдау үшін көптеген елдерде атмосфералық тасымалдаудың сандық модельдері қолданылады, мысалы, HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) және FLEXPART. Бұл модельдер ауа

массаларының траекторияларын қалпына келтіруге, әртүрлі аймақтардың аэрозоль концентрацияларына қосқан үлесін бағалауға және ластану эпизодтарын болжауға мүмкіндік береді. ^7Be өлшеулерімен біріктірілген модельдерді пайдалану аэрозольдердің көздері мен тасымалдау жолдарын анықтау дәлдігін арттырады, бұл әсіресе Орталық Азия сияқты трансшекаралық ластануға ұшыраған аймақтар үшін маңызды.

Статистикалық өңдеу және деректерді талдау

Нәтижелерді өңдеу мыналарды қамтиды: ^7Be , PM2.5 концентрациялары мен метеорологиялық параметрлер (температура, ылғалдылық, жел жылдамдығы) арасындағы корреляциялық талдау; маусымдық және жылдық трендтік талдау – заңдылықтарды анықтау үшін; ластану көздерін бөлу үшін факторлық талдау және кластерлеу әдістерін қолдану; нәтижелерді халықаралық ауа сапасы стандарттарымен (ДДҰ (ВОЗ), ЕЕА) салыстыру.

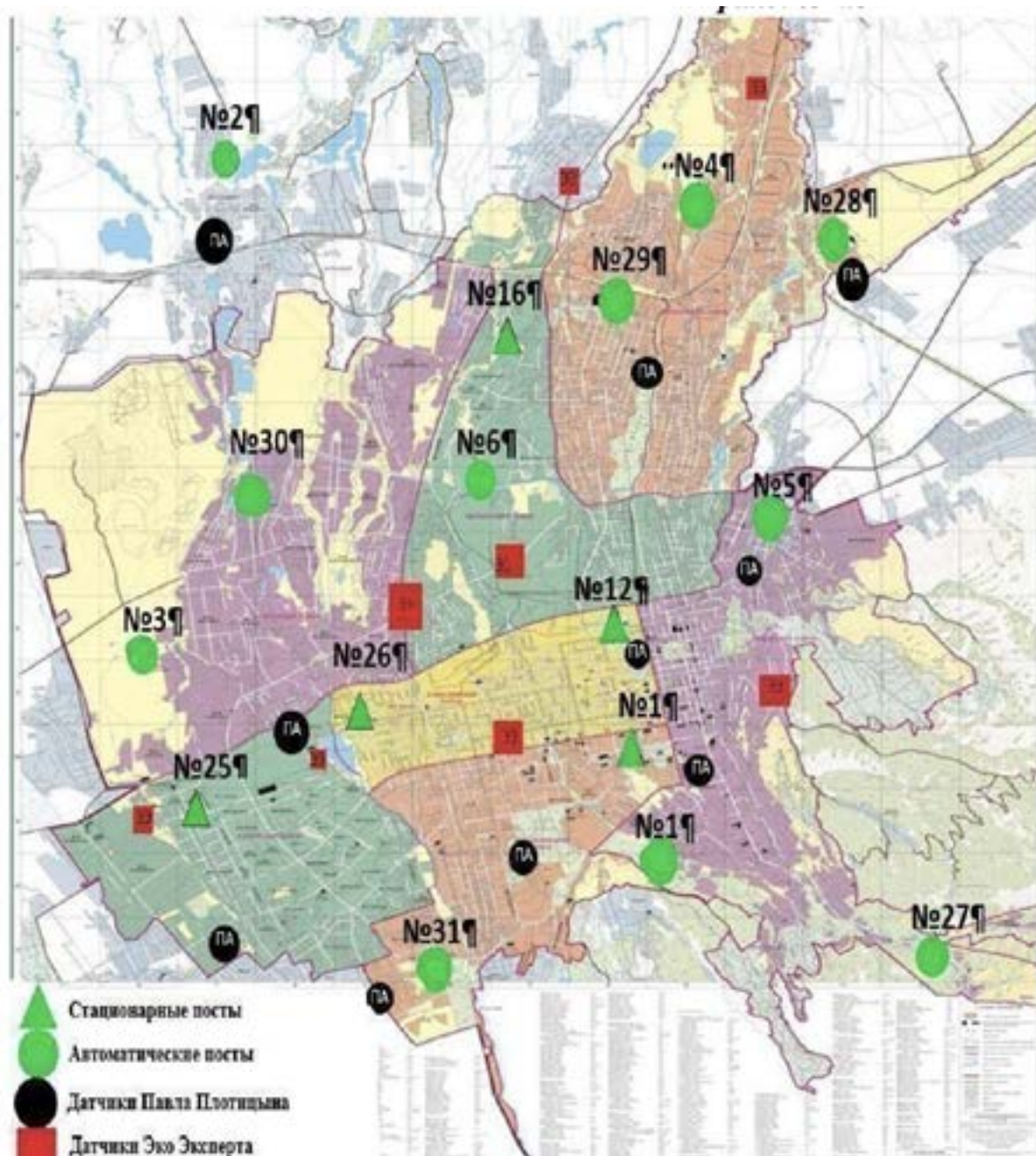
Қазіргі әдістердің жаңалығы мен дәлдігі

Аэрозольдердегі ^7Be -ні іріктеу және талдаудың қазіргі әдістері жоғары дәлдік пен сезімталдықпен ерекшеленеді, бұл детекторларды (HPGe) және атмосфералық үдерістерді модельдеуді қолдану арқылы жүзеге асады. Сынамаларды іріктеудің автоматтандырылуы және спектрлердің цифрлық өңделуі нақты уақыт режимінде деректер алуға мүмкіндік береді, бұл мониторинг пен болжау мүмкіндіктерін едәуір кеңейтеді. Атап айтқанда, Қазақстанда келесі біріктірілген әдістерді енгізу перспективалы болып табылады: қолжетімді фильтрациялық қондырғыларды пайдалану және кейіннен NaI(Tl) гамма-спектрометрлерінде талдау жүргізу, сондай-ақ HPGe-детекторларымен зертханаларды біртіндеп дамыту. HYSPLIT модельдерімен бірлесіп қолдану PM2.5 және ^7Be көздері мен тасымалын бағалау сапасын арттыруға мүмкіндік береді. Осылайша, PM2.5 құрамындағы ^7Be -ні зерттеуге арналған әдістемелік құралдар сынама алудың тексерілген және заманауи технологияларын, жоғары дәлдіктегі гамма-спектрометриялық талдауды және сандық модельдеуді қамтиды, бұл ^7Be -нің атмосфералық белсенділігін және оның экологиялық салдарын кешенді зерттеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер және пікірталас

Әр түрлі аймақтардағы PM2.5 құрамындағы ^7Be мазмұнының кеңістіктік және уақыттық тенденциялары PM2.5 аэрозольдеріндегі бериллий-7 (^7Be) концентрацияларын талдау айтарлықтай аймақтық және маусымдық өзгерістер бар екенін көрсетеді. Бұл өзгерістер жаһандық атмосфералық үдерістермен де, жергілікті ластану көздерімен де байланысты. Солтүстік Америкада, Еуропада және Азияда жүргізілген бірқатар зерттеулерде атмосфералық аэрозольдердегі ^7Be концентрациясы орта есеппен 3-тен 7 мБк/м³ аралығында өзгередіні анықталған. Мысалы, Детройт (АҚШ) және Уэльва (Испания) қалалары бойынша деректер шамамен 4,8-4,9 мБк/м³ деңгейінде, бұл Португалия мен Үндістандағы нәтижелермен салыстырылады, онда концентрациялар 4,0-6,9 мБк/м³ аралығында. Орталық Азияда, соның ішінде Қазақстанда, PM2.5 құрамындағы ^7Be тікелей өлшемдері әлі жеткіліксіз. Мысал ретінде Алматы қаласының атмосфералық ауасының ластануын бақылаудың стационарлық желісінің орналасу схемасы 3-суретте анық көрсетілген. Алайда PM2.5 концентрациясы бойынша мәліметтер ластанудың

жоғары деңгейін көрсетеді – Қазақстандағы $PM_{2.5}$ -тің жылдық орташа концентрациясы шамамен $22,2 \text{ мкг/м}^3$, бұл ДДҰ (ВОЗ) ұсынған нормадан 4 есе артық. Бұл $PM_{2.5}$ аэрозольдеріндегі ^{70}Se мазмұнының маусымдық және метеорологиялық жағдайларға, сондай-ақ трансшекаралық тасымал мен жергілікті шаң мен ластаушы көздердің әсеріне байланысты едәуір өзгеруі мүмкін екенін көрсетеді [21][22].



Сурет 3. Алматы қаласының атмосфералық ауасының ластануын бақылаудың стационарлық желісінің орналасу схемасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [21]

^7Be концентрациясының маусымдық трендтері және ауа циркуляциясымен байланысы

PM2.5 аэрозольдеріндегі ^7Be концентрациясының маусымдық динамикасы көктем мен жаз мезгілдерінде айқын максимумдармен сипатталады, бұл әртүрлі аймақтардағы мәліметтермен расталады. Мысалы, Севастопольде ^7Be концентрациясының маусымдық орташа мәні атмосфералық жауын-шашын мен аэрозольдерде көктем-жаз мезгілінде ең жоғары деңгейге жетсе, күз-қыс мезгілінде минимумға дейін төмендейді. Осындай маусымдық заңдылықтар Еуропада да байқалады, мұнда көктемгі шыңдар стратосфералық ауаның тропосфераға қарай күшейтілген тасымалымен және тік ауысу үдерісінің артуымен байланысты. Бұл деректер ^7Be концентрацияларының маусымдық ауытқулары ауа массаларының циркуляциясы мен метеорологиялық жағдайлармен тығыз байланысты деген гипотезаны растайды. Атап айтқанда, көктем мен жаз мезгілінде тік ауа алмасуының қарқындылығы ^7Be -нің атмосфераның жоғарғы қабаттарынан жер бетіне түсуіне ықпал етеді, бұл оның концентрациясының жоғарылауына алып келеді. Сонымен қатар, суық кезеңдегі жауын-шашын мен дымқыл тұнба аэрозольдердің шаюына себеп болып, ^7Be деңгейін төмендетеді. Осыған орай, ^7Be -ні бақылау ауа массаларының динамикасы мен тропосфера мен стратосфера арасындағы алмасу үдерістерінің индикаторы ретінде қолданылуы мүмкін, сондай-ақ PM2.5 ластануының маусымдық ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік береді.

PM2.5 көздерін анықтауға арналған ^7Be қолданылуы

^7Be өзінің ғарыштық (космогенді) табиғатына және антропогендік көздерінің болмауына байланысты PM2.5 аэрозольдерінің шығу тегі мен тасымалдану жолдарын бағалауға арналған табиғи маркер ретінде қызмет ете алады. Техногендік ластағыштардан, мысалы, цезий-137 (^{137}Cs) немесе қорғасын-210 (^{210}Pb) айырмашылығы – олар жергілікті өнеркәсіптік шығарындылар нәтижесінде жиналуы мүмкін, ал ^7Be ауа массаларының жаһандық және аймақтық тасымалдану үдерістерін көрсетеді. ^{137}Cs және ^{210}Pb -пен салыстыру кезінде ^7Be жаңа аэрозольдер үшін индикатор ретінде артықшылыққа ие, себебі оның жартылай ыдырау кезеңі 53,3 күнді құрайды, бұл атмосферада қысқа уақыт сақталатын аэрозольдерді бақылауға мүмкіндік береді. Ал ^{210}Pb жартылай ыдырау уақыты шамамен 22 жыл болғандықтан, ол ластағыштардың ұзақ мерзімді жиналуын және жергілікті шығарындыларды бағалауға жақсырақ жарайды. Осыған байланысты ^7Be трансшекаралық PM2.5 тасымалын анықтауға, сондай-ақ аэрозольдердің конденсация және коагуляция сияқты екінші реттік түзілу үдерістерін бағалауға арналған тиімді құрал бола алады. Бұл, әсіресе, өнеркәсіп қарқынды дамып жатқан және күрделі географиясы бар Қазақстан аймағы үшін маңызды. Яғни уақытылы көрсеткіштердің алынуы да маңызды, 4-суретте ҚР ауданында атмосфералық ауаның өзгерісін бақылайтын елді мекендердің орналасу орындары көрсетілген.



Сурет 4. Қазақстан Республикасының аумағында атмосфералық ауаның жай-күйін бақылайтын елді мекендердің орналасу схемасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [22]

Анықталған заңдылықтардың денсаулық пен қоршаған ортаға төнетін қауіптерді бағалауға әсері

PM_{2.5} құрамындағы ⁷Be-нің кеңістіктік-уақыттық үрдістерін түсіну экологиялық және санитарлық қауіптерді бағалау үшін тікелей маңызға ие. Себебі PM_{2.5} – тыныс алу және жүрек-қантамыр жүйесіне әсер ету тұрғысынан аэрозольдердің ең қауіпті фракцияларының бірі болып табылады. Осы бөлшектердің көздері мен таралу жолдарын білу ластануды азайтуға бағытталған неғұрлым тиімді шараларды әзірлеуге мүмкіндік береді. Қазақстан мен көршілес өңірлер бойынша деректер PM_{2.5} концентрацияларының жиі нормадан асып түсетінін көрсетеді, бұл экстремалды ластану жағдайларымен расталады. ⁷Be-ні индикатор ретінде пайдалану аймақтық және трансшекаралық көздердің үлесін нақтылауға мүмкіндік береді, бұл ауа сапасын жақсарту мен халықтың денсаулығын қорғауға бағытталған ұлттық бағдарламаларды әзірлеу үшін маңызды.

Халықаралық зерттеулермен салыстыру және жаһандық пен аймақтық ерекшеліктерді анықтау

Әлемнің әртүрлі өңірлерінен алынған деректерді салыстыру ⁷Be-нің PM_{2.5} құрамындағы концентрациялары мен олардың маусымдық ауытқуларының ұқсас сипатқа ие екенін, бірақ сонымен қатар әр өңірдің климаттық және антропогендік ерекшеліктерін бейнелейтінін көрсетеді. Еуропа мен Солтүстік Америкада, мұнда мониторинг желісі жақсы дамыған, ⁷Be-нің маусымдық шыңдары көктемгі тасымалдармен және жазғы тік ауысумен байланысты, ал минимумдар – күзгі-қысқы жауын-шашынмен байланысты.

Орталық Азияда, климаты анағұрлым континенталды және құрғақ болып келетін, шаңды дауылдар мен трансшекаралық тасымалдың әсері айқын байқалатын өңірде, ^7Be бойынша деректер әзірге шектеулі, бұл мониторингті кеңейтуді қажет етеді. Бұл өңірде ^7Be шаңды аэрозольдер мен антропогендік шығарындылардың әсерін бағалауға арналған аса сезімтал маркер бола алады деген болжам жасауға мүмкіндік береді. Жалпы салыстырмалы ақпарат 2-кестеде, факторлармен қарастырылған.

Кесте 2. PM2.5-Тегі ^7Be концентрациясын және әлемнің әртүрлі аймақтарындағы маусымдық трендтерді салыстыру

Аймақ	PM2.5-те ^7Be концентрациясы (мБк/м ³)	Маусымдық шыңдар	Әсер етудің негізгі факторлары
Детройт, США	4,8	Көктем, жаз	Тік алмасу, күн белсенділігі
Уэльва, Испания	4,9	Көктем, жаз	Ауа массаларын тасымалдау, жауын-шашын
Малага, Испания	4,2	Көктем, жаз	Климаттық ерекшеліктері, жауын-шашын
Мангалор, Индия	6,9	Көктем, жаз	Муссондық процестер, жергілікті көздер
Қазақстан	Деректер жоқ, PM2.5 - 22,2 мкг/м ³	Болжам бойынша көктем	Трансшекаралық тасымалдау, шаңды дауылдар

Шолудың деректері ^7Be элементі PM2.5 аэрозольдерінің динамикасын, олардың көздері мен таралу жолдарын зерттеу үшін тиімді табиғи индикатор болып табылатынын растайды. ^7Be концентрацияларының маусымдық шарықтау кезеңдері көктем мен жаз мезгілдеріндегі тік алмасудың күшеюімен және ауа массаларының циркуляциясымен байланысты, ал минимумдар – күзгі-қысқы жауын-шашын мен аэрозольдердің жуылып кетуімен байланысты. Сәйкесінше, ^7Be трансшекаралық тасымалдың және аэрозольдердің екінші реттік түзілу процестерінің үлесін бағалауға арналған сенімді маркер ретінде қолданылуы мүмкін, бұл ауа сапасы жоғары деңгейде ластанған өңірлер үшін, мысалы, Орталық Азия үшін аса өзекті. ^7Be бойынша алынған деректерді басқа радионуклидтік және химиялық индикаторлармен, сондай-ақ атмосфералық тасымалдау модельдерімен біріктіру экологиялық қауіптерді бағалау дәлдігін арттырып, ластануды азайту мен халықтың денсаулығын қорғауға бағытталған тиімдірек шараларды әзірлеуге мүмкіндік береді.

Қорытынды

Осы шолу мақаласында ^7Be изотопын PM2.5 аэрозоль бөлшектерінде бақылау атмосфералық тасымалдау, ластану көздері және маусымдық динамика туралы маңызды

мәліметтер беретінін көрсетеді. Бұл мәліметтер әсіресе Қазақстан мен Орталық Азия үшін аса өзекті. Аймақтағы тұрақты жоғары РМ2.5 деңгейі – жергілікті шығарындылармен қатар шекара аралық шаң тасымалының әсерінен туындайтын – өңірлік ерекшеліктерге бейімделген заманауи мониторинг әдістерінің қажеттілігін көрсетеді. ⁷Be изотопын метеорологиялық деректермен және модельдеумен бірге пайдалану аэрозольдердің таралу жолдарын қадағалау және алыс қашықтықтағы тасымал әсерін бағалау үшін жаһандық деңгейде тиімді әдіс ретінде танылған, алайда мұндай зерттеулер Қазақстанда әлі де сирек кездеседі. Аталған жетіспеушіліктердің орнын толтыру үшін ⁷Be бақылау желілерін кеңейту, үнемді үлгілеу және гамма-спектрометриялық әдістерді енгізу, сондай-ақ радионуклидтік деректерді химиялық маркерлермен және спутниктік бақылаулармен біріктіру қажет. Бұл қадамдар ластану көздерін дәл анықтауға және қауіп-қатерлерді бағалауға мүмкіндік береді, нәтижесінде ауа сапасын басқарудың ғылыми негізделген тәсілдері қамтамасыз етіледі. Соңында, ⁷Be изотопын Қазақстанда трассер ретінде жүйелі пайдалану РМ2.5 ластануының табиғатын терең түсінуге, өңірлік саясатты қалыптастыруға және қоғамдық денсаулық пен қоршаған ортаны қорғауға бағытталған нақты стратегияларды әзірлеуге елеулі үлес қоса алады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Жұмыс 2024 жылғы 9 қыркүйектегі № 189/ГФ24-26 келісім бойынша Ғылым және жоғары білім министрлігінің АР23488651, ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру жобасының қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды, сондай-ақ Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігінің бағдарламалық-мақсаттық қаржыландыру шеңберінде жүзеге асырылды (BR27101493, 05.02.2025 ж. No 29/ПЦФ-25-26).

Авторлардың қосқан үлестері

Мухаметжанова А.О., Жумадилов К.Ш., Баграмова А.А. – зерттеу, әдістеме, түпнұсқалық жазу, бақылау, ресурстар, шолу;

Байгазинов Ж.А., Насилов Ж.О., Касымжанов М.Т., Иванников А.И., Степаненко В.Ф., Хоши М. – концептуализация, визуализация, редакциялау және қаржыландыру.

Әдебиеттер тізімі

1. Новые глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха направлены на спасение миллионов жизней от загрязнения воздуха, Всемирная организация здравоохранения, қол жетімді адресі: <https://www.who.int/europe/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

2. Central Asian countries join forces to combat air pollution – the first high-level political dialogue has started, қол жетімді адресі: <https://www.newscentralasia.net/2024/06/20/central-asian-countries-join-forces-to-combat-air-pollution-the-first-high-level-political-dialogue-has-started/>

3. Дымова О.А., Демышев С.Г. Вычислительный комплекс для моделирования состояния Черного моря, Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию

и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018, с. 472–475 (2018), қол жетімді адресі: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/advert/100041124>

4. Кременчуцкий Д.А. *Временная изменчивость отношения концентраций бериллия-7 в дождевых осадках и в атмосфере в Севастопольском регионе*, Морской гидрофизический журнал, Т. 40, № 2 (236), 271–283 б.(2024), қол жетімді адресі: <https://mgrfz.pf/static/assets/files/2024/02/20240207.pdf>

5. C. Papastefanou, *Beryllium-7 aerosols in ambient air*, Aerosol and Air Quality Research 9(2), 187–197 б. (2009). DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0047>

6. Ученые ЮФУ исследовали механизмы образования радиоизотопа бериллия-7 в атмосфере, Южный федеральный университет, пресс-служба ЮФУ, қол жетімді адресі: <https://sfedu.ru/press-center/news/52305>

7. *Что такое взвешенные частицы PM 2.5 и действительно ли они опасны?*, қол жетімді адресі: https://kaz.breeeth.com/blog/ochistitelivozdukha/chto_takoe_chasticy_pm_25/

8. Feely H.W., Larsen R.J., Sanderson C.G. *Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air*, Journal of Environmental Radioactivity 9(3), 223-249 б. (1989). DOI: [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(89\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0265-931X(89)90046-5)

9. M.A. Hernández-Ceballos, *et al.*, *Latitudinal variability of atmospheric ^7Be* , Tellus B, 68:29534 (2016). DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v68.29534>

10. *CALIOP-Based Quantification of Central Asian Dust Transport*, қол жетімді адресі: <https://atmos.lzu.edu.cn/upload/1/cms/content/editor/1728612784824.pdf>

11. Alegría N. *et al.*, *Meteorological factors controlling ^7Be activity concentrations in the atmospheric surface layer in Northern Spain*, Atmosphere 11(12), 1340 б. (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11121340>

12. H. Liu, *et al.*, *Using ^7Be to assess cross-tropopause transport*, Atmos. Chem. Phys. 16, 4641–4659 б. (2016). DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-4641-2016>

13. S. Kikuchi, *et al.*, *Size distribution of aerosols attached by ^7Be* , қол жетімді адресі: <https://indico.nucleares.unam.mx/event/4/session/82/contribution/559/material/slides/0.pdf>

14. *AirPhoton Automated Filter Sampling Station*, қол жетімді адресі: https://www.grasp-earth.com/wp-content/uploads/2023/11/airphoton_aeroexplorer_fact_sheet.pdf

15. *Envicontrol Automatic Sampling System*, қол жетімді адресі: <https://envicontrol.com/news/general/automatic-sampling-system-for-fine-particulate-matter>

16. *Guidelines for Manual Sampling & Analyses*, қол жетімді адресі: <https://mpcb.mizoram.gov.in/uploads/attachments/94d36b3ae1c0495183c24201c430d578/guidelines-for-the-measurement-of-ambient-air-pollutants-vol-i-manual-sampling-analyses.pdf>

17. *Washington State Department of Ecology*, PM_{2.5} & PM₁₀ 2025 Sequential Sampler SOP, қол жетімді адресі: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1802020.pdf>

18. S. Sorn, *et al.*, *Comparison of PM_{2.5} Mass Concentration from Two Filter Types*, қол жетімді адресі: https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/291513/1/2024_ET2-08.pdf

19. *INDAAF Aerosol Sampling Protocol*, қол жетімді адресі: <https://indaaf.obs-mip.fr/measurements/aerosol-2/>

20. Y. Wang, *et al.*, *Effect of aerosol sampling conditions on PM_{2.5} accuracy*, J. Aerosol Sci., (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106012>

21. Бюллетень состояния загрязнения окружающей среды: Алматы и Алматинская область, март 2025, Казгидромет, қол жетімді адресі: https://www.kazhydromet.kz/uploads/files_calendar/7873/file/67ffaa603b116almaty-i-almatinskaya-oblast-rus-2025-mart-1.pdf

22. Аналитический отчет по мониторингу качества воздуха в Казахстане, Кыргызстане, Узбекистане и Таджикистане, қол жетімді адресі: <https://ecounion.kz/wpcontent/uploads/2021/09/обн.Аналитика-мониторинга-воздуха-по-4-странам-Казахстан-Кыргызстан-Узбекистан-Таджикистан.pdf>

А.О. Мухаметжанова¹, К.Ш. Жумадилов^{*1}, А.А. Баграмова¹, Ж.А. Байгазинов², Ж.О. Насилов¹, М.Т. Касымжанов¹, А.И. Иванников³, В.Ф. Степаненко³, М. Хоши⁴

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

Международная кафедра ядерной физики, новых материалов и технологий, Астана, Казахстан

²АО "Парк ядерных технологий" Республика Казахстан, Область Абай, г. Курчатова, ул. Курчатова, 18/1;

³Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «НМЗО» министерства здравоохранения Российской Федерации МРНЦ им. А. Ф. Цыба, г. Обнинск;

⁴Университет Хиросима, Хиросима, Япония

(E-mail: zhumadilovk@gmail.com)

Атмосферная активность бериллия-7 (^7Be) в аэрозолях PM2.5: применение, тенденции и экологические перспективы

Аннотация. В статье представлен подробный анализ последних исследований атмосферной активности космогенного радионуклида бериллия-7 (^7Be) в аэрозольных частицах PM2.5. Образующийся в высоких слоях атмосферы в результате взаимодействия космических лучей ^7Be является чувствительным и уникальным трассером, который может быть использован для отслеживания переноса и трансформации аэрозолей и связанных с ними загрязняющих веществ, а также для изучения механизмов обмена между тропосферой и стратосферой. В обзоре рассматриваются физические и химические свойства ^7Be , описываются сложные аналитические методы его обнаружения, включая гамма-спектрометрию, и рассматриваются его сезонные и региональные колебания в связи с погодными условиями и основными источниками PM2.5. В обзоре подчеркивается научная и практическая важность использования ^7Be для оценки качества воздуха, управления рисками и разработки скоординированных международных стратегий мониторинга атмосферы и снижения загрязнения. Особое внимание уделено использованию ^7Be в качестве инструмента для количественного определения трансграничного переноса аэрозолей и оценки последствий загрязнения мелкодисперсными частицами для окружающей среды и здоровья населения. В статье также обсуждается интеграция данных ^7Be в сети атмосферного мониторинга и системы моделирования, подчеркиваются как последние достижения, так и текущие проблемы.

Ключевые слова: бериллий-7 (^7Be); аэрозоли; PM2.5; атмосферный мониторинг; экологическая оценка; радиоизотопные индикаторы; тенденции загрязнения.

A.O. Mukhametzhanova¹, K.Sh. Zhumadilov^{*1}, A.A. Bagramova¹, Zh.A. Baigazinov²,
Zh.O. Nasilov¹, M.T. Kasymzhanov¹, A.I. Ivannikov³, V.F. Stepanenko³, M. Hoshi⁴

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University,

International department of nuclear physics, new materials and technologies, Astana, Kazakhstan

²JSC "Nuclear Technology Park"

Republic of Kazakhstan, Abai region, Kurchatov,

³Branch of the Federal State Budgetary Institution "NMZO " of the Ministry of Health of the Russian Federation A.F. Tsyba MRSC, Obninsk;

⁴Hiroshima University, Hiroshima, Japan

(E-mail: zhumadilovk@gmail.com)

Atmospheric Activity of Beryllium-7 (^7Be) in PM2.5 Aerosols: Applications, Trends, and Environmental Perspectives

Abstract. A thorough analysis of recent studies on the atmospheric activity of the cosmogenic radionuclide beryllium-7 (^7Be) in PM2.5 aerosol particles is given in this article. Produced in the high atmosphere by cosmic ray interactions, ^7Be is a sensitive and unique tracer that may be used to track the transport and transformation of aerosols and related contaminants, as well as to study exchange mechanisms between the troposphere and stratosphere. The review discusses the physical and chemical properties of ^7Be , describes sophisticated analytical techniques for its detection, including gamma spectrometry, and looks at its seasonal and regional fluctuation in connection to weather patterns and PM2.5 main sources. This review highlights the scientific and practical importance of using ^7Be in air quality assessment, risk management, and the development of coordinated international strategies for atmospheric monitoring and pollution mitigation. Specific attention is given to the use of ^7Be as a tool for quantifying transboundary aerosol transport and for assessing the environmental and public health implications of fine particulate pollution. The article also discusses the integration of ^7Be data into atmospheric monitoring networks and modeling frameworks, highlighting both recent advancements and ongoing challenges.

Keywords: beryllium-7 (^7Be), aerosols, PM2.5, atmospheric monitoring, environmental assessment, radioisotopic indicators, pollution trends.

References

1. Vsemirnaya organizacija zdavoohraneniya. Novye global'nye rekomendacii VOZ po kachestvu vozduha napravleny na spasenie millionov zhiznej ot zagrjazneniya vozduha [New WHO global air quality guidelines aim to save millions of lives from air pollution], Vsemirnaya organizatsiya zdavookhraneniya [World Health Organization], available at: <https://www.who.int/europe/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> [In Russian]
2. Central Asian countries join forces to combat air pollution – the first high-level political dialogue has started, available at: <https://www.newscentralasia.net/2024/06/20/central-asian-countries-join-forces-to-combat-air-pollution-the-first-high-level-political-dialogue-has-started/>
3. O.A. Dymova, S.G. Demyshev, Vychislitel'nyj kompleks dlja modelirovaniya sostojaniya Chernogo morja [Computational system for modeling the state of the Black Sea], Mezhdunarodnaja konferenciya

i shkola molodyh uchenykh po izmerenijam, modelirovaniyu i informacionnym sistemam dlja izuchenija okruzhajushhej sredy[International Conference and School for Young Scientists on Measurement, Modeling and Information Systems for Environmental Studies]: ENVIROMIS-2018, pp. 472–475 (2018), available at: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/advert/100041124> [In Russian]

4. D.A. Kremenchuckij, *Vremennaja izmenchivost' otnoshenija koncentracij berillija-7 v dozhdevykh osadkah i v atmosfere v Sevastopol'skom regione*[Temporal variability of beryllium-7 concentration ratios in precipitation and in the atmosphere in the Sevastopol region], *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*[Marine Hydrophysical Journal] № 40(2), pp. 271–283 (2024), available at: <https://mrфж.рф/static/assets/files/2024/02/20240207.pdf> [In Russian]

5. C. Papastefanou, *Beryllium-7 aerosols in ambient air*, *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 9, No. 2, s. 187–197 (2009), <https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0047>

6. *Uchenye JuFU issledovali mehanizmy obrazovaniya radioizotopa berillija-7 v atmosfere* [Scientists of SFedU studied the mechanisms of formation of the beryllium-7 radioisotope in the atmosphere], *Yuzhnyy federal'nyy universitet, press-sluzhba JuFU* [Southern Federal University, SFedU Press Service], available at: <https://sfedu.ru/press-center/news/52305> [In Russian]

7. *Chto takoe vzveshennyye chasticy PM 2.5 i dejstvitel'no li oni opasny?* [What are PM2.5 suspended particles and are they really dangerous?], available at: https://kaz.breeeth.com/blog/ochistitelivozdukha/chto_takoe_chasticy_pm_25/ [In Russian]

8. Feely H.W., Larsen R.J., Sanderson C.G. *Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air*, *Journal of Environmental Radioactivity* 9(3), pp. 223–249 (1989). DOI: [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(89\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0265-931X(89)90046-5)

9. M.A. Hernández-Ceballos, et al., *Latitudinal variability of atmospheric ⁷Be*, *Tellus B*, 68:29534 (2016). DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v68.29534>

10. *CALIOP-Based Quantification of Central Asian Dust Transport*, available at: <https://atmos.lzu.edu.cn/upload/1/cms/content/editor/1728612784824.pdf>

11. Alegría N. et al., *Meteorological factors controlling ⁷Be activity concentrations in the atmospheric surface layer in Northern Spain*, *Atmosphere* 11(12), pp.1340 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11121340>

12. H. Liu, et al., *Using ⁷Be to assess cross-tropopause transport*, *Atmos. Chem. Phys.* 16, pp. 4641–4659 (2016). DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-4641-2016>

13. S. Kikuchi, et al., *Size distribution of aerosols attached by ⁷Be*, available at: <https://indico.nucleares.unam.mx/event/4/session/82/contribution/559/material/slides/0.pdf>

14. *AirPhoton Automated Filter Sampling Station*, available at: https://www.grasp-earth.com/wp-content/uploads/2023/11/airphoton_aeroexplorer_fact_sheet.pdf

15. *Envicontrol Automatic Sampling System*, available at: <https://envicontrol.com/news/general/automatic-sampling-system-for-fine-particulate-matter>

16. *Guidelines for Manual Sampling & Analyses*, available at: <https://mpcb.mizoram.gov.in/uploads/attachments/94d36b3ae1c0495183c24201c430d578/guidelines-for-the-measurement-of-ambient-air-pollutants-vol-i-manual-sampling-analyses.pdf>

17. *Washington State Department of Ecology, PM2.5 & PM10 2025 Sequential Sampler SOP*, available at: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1802020.pdf>

18. S. Sorn, et al., *Comparison of PM2.5 Mass Concentration from Two Filter Types*, available at: https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/291513/1/2024_ET2-08.pdf

19. *INDAAF Aerosol Sampling Protocol*, available at: <https://indaaf.obs-mip.fr/measurements/aerosol-2/>

20. Y. Wang, et al., *Effect of aerosol sampling conditions on PM_{2.5} accuracy*, J. Aerosol Sci., (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106012>

21. *Byulleten sostoyaniya zagryazneniya okruzhayushchey sredy: Almaty i Almatinskaya oblast, mart 2025* [Environmental Pollution Status Bulletin: Almaty and Almaty Region, March 2025], Kazgidromet[Kazhydromet], available at: https://www.kazhydromet.kz/uploads/files_calendar/7873/file/67ffaa603b116almaty-i-almatinskaya-oblast-rus-2025-mart-1.pdf [In Russian]

22. *Analiticheskiy otchet po monitoringu kachestva vozdukha v Kazakhstane, Kyrgyzstane, Uzbekistane i Tadzhikistane* [Analytical report on air quality monitoring in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Uzbekistan, and Tajikistan], available at: <https://ecounion.kz/wpcontent/uploads/2021/09/обн.Аналитика-мониторинга-воздуха-по-4-странам-Казахстан-Кыргызстан-Узбекистан-Таджикистан.pdf> [In Russian]

Авторлар туралы мәліметтер:

Мұхаметжанова А.О. – ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасының магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Жұмаділов Қ.Ш. – хат-хабар авторы, PhD, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Баграмова А.А. – ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының халықаралық кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Байғазинов Ж.А. – PhD. «Ядролық технологиялар паркі» АҚ басқарма төрағасы, Курчатов көшесі 18/1, Курчатов қ., Абай облысы, Қазақстан

Насилов Ж.О. – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің докторанты, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Қасымжанов М.Т. – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің докторанты, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Иванников А.И. – биология ғылымдарының докторы, профессор, медициналық-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, А.Ф.Гумилев атындағы Цыба медициналық ғылыми-зерттеу орталығы – РФ Денсаулық сақтау министрлігінің «Ұлттық медициналық радиология ғылыми орталығы» Федералдық мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы, Ресей

Степаненко В.Ф. – биология ғылымдарының докторы, профессор, А.Ф.Цыба МРРК медициналық-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының меңгерушісі – РФ Денсаулық сақтау министрлігінің «Ұлттық радиология ғылыми-зерттеу орталығы» Федералдық мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы, Ресей

Хоши М. – Хиросима университетінің құрметті профессоры, Хиросима, Жапония.

Мухаметжанова А.О. – магистрант, международная кафедра ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Жумадилов К.Ш. – автор для корреспонденции, PhD, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Баграмова А.А. – преподаватель международной кафедры «Ядерная физика, новые материалы и технологии», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Байгазинов Ж.А. – Ph.D. Председатель правления АО «Парк ядерных технологий», ул. Курчатова, 18/1, г. Курчатов, Область Абай, Казахстан.

Насилов Ж.О. – PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Касымжанов М.Т. – PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Иванников А.И. – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории медико-экологической дозиметрии и радиационной безопасности МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Россия.

Степаненко В.Ф. – доктор биологических наук, профессор, заведующий лаборатории медико-экологической дозиметрии и радиационной безопасности МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Россия.

Хоши М. – почетный профессор Университета Хиросимы, Хиросима, Япония.

Mukhametzhanova A.O. – master's student, International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Zhumadilov K.Sh. – corresponding author, PhD, professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

Bagramova A.A. – lecturer in the International Department of the Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Baygazinov Zh.A. – Ph.D. Chairman of the Board of JSC "Park of Nuclear Technologies", Kurchatov Street 18/1, Kurchatov, Abay Region, Kazakhstan

Nasilov Zh.O. – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan Street, 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Kasymzhanov M.T. – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan Street, 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Ivannikov A.I. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher, Laboratory of Medical and Ecological Dosimetry and Radiation Safety, A.F. Tsyba Medical Research Center - branch of the Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Radiology" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Russia

Stepanenko V.F. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Medical and Environmental Dosimetry and Radiation Safety of the A.F. Tsyba MRRC - branch of the Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Radiology" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Russia

Hoshi M. – Emeritus Professor, University of Hiroshima, Hiroshima, Japan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).