

К.Ш. Жумадилов¹, А.А. Жадыранова^{1*}, Ж.А. Байгазинов²,

Д.К. Аншокова¹, Н.Ж. Мухамедияров²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Қазақстан

*e-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ИНВЕРСИЯЛАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ПАВЛОДАР ҚАЛАСЫНДАҒЫ АУА ЛАСТАНАУЫНА ӘСЕРІ

Бұл мақалада Қазақстанның ірі өнеркәсіп орталықтарының бірі Павлодар қаласының ауасының ластануы мен оған температура инверсияларының әсері қарастырылады. Павлодар жылуэлектр орталығы (ЖЭС), ірі химиялық және металлургиялық кәсіпорындардағы жақын аймақтар мен негізгі тасымалдану бағыттары талқыланады. Зиянды компоненттердің едәуір бөлігі қолайсыз метеорологиялық факторлар жағдайында түзілетіні, олардың ішінде температуралық инверсиялар шешуші рөл атқаратыны атап өтіледі. Бұл атмосфералық құбылыстар ауа қабаттарының тік бағытта қозғалысының табиғи процестерін бұзады, нәтижесінде ластанушы компоненттер жер қабатында жиналып, онда ұзақ уақыт сақталады. Зерттеу жұмысында температура инверсиясының қалыптасуының физикалық механизмдері, оның ішінде ауа тығыздығының өзгерісі, атмосфералық қабаттар арасындағы жылу алмасу, жел жылдамдығының биіктікке тәуелділігі, сондай-ақ тоқырау құбылыстарын туғызатын жер бедері мен қала құрылысының ерекшеліктері түсіндірілген. Ластанған атмосфераның химиялық құрамы қарастырылады: негізгі назар отынды жағы және өнеркәсіптік қондырғылардан бөлінетін РМ 2.5 ұсақ бөлшектерге, азот оксидтеріне, ауыр металдар, күкірт диоксидіне, көміртегі тотығына және басқа да қосылыстарға аударылады. Бұл компоненттер халықтың денсаулығына үлкен қауіп төндіреді, жедел және созылмалы респираторлық ауруларды тудырады және сонымен қатар, жүрек-қан тамыр, онкологиялық патологиялардың қауіпін арттырады. Алынған мәліметтер мен әлемдік тәжірибені талдау негізінде тұрақты температура инверсиялары жағдайында ауаның ластануын азайтудың ғылыми негізделген тәсілдері ұсынылған. Мақаланың негізгі бағыты тұрақты температура жағдайында өнеркәсіптік өндірістің атмосфераға әсерін бағалау болып табылады. Сондай-ақ инверсиялардың жиілігі мен ұзақтығы, олардың маусымға және климаттың өзгерісіне тәуелділігі талданады.

Түйін сөздер: температураның инверсиясы, ауаның ластануы, Павлодар, РМ2.5 бөлшегі, жылу электр станциясы, жел бағыттары, халық денсаулығы, ластануды азайту тәсілдері, зиянды компоненттер, ауыр металдар, жер бедері.

K.Sh. Zhumadilov¹, A.A. Zhadyranova^{1*}, Zh.A. Baygazinov²,
D.K. Anshokova¹, N.Zh. Mukhamediarov²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²JSC «Nuclear Technologies Park», Kurchatov, Kazakhstan

*e-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

Temperature inversions and their impact on air pollution in Pavlodar city

This article examines air pollution in the city of Pavlodar, one of Kazakhstan's major industrial centers, and the impact of temperature inversions on it. The Pavlodar Thermal Power Plant (TPP), nearby areas of large chemical and metallurgical enterprises, and the main transportation routes are discussed. It is noted that a significant portion of harmful components is formed under unfavorable meteorological conditions, with temperature inversions playing a decisive role. These atmospheric phenomena disrupt the natural processes of vertical movement of air layers, resulting in the accumulation of pollutants near the ground and their prolonged persistence. The study explains the physical mechanisms of temperature inversion formation, including changes in air density, heat exchange between atmospheric layers, the dependence of wind speed on height, as well as features of the terrain and urban development that contribute to stagnation phenomena. The chemical composition of polluted air is considered: the main focus is on fuel combustion and emissions from industrial facilities of fine particulate matter PM 2.5, nitrogen oxides, heavy metals, sulfur dioxide, carbon monoxide, and other compounds. These components pose

the risk of cardiovascular and oncological pathologies. Based on the obtained data and the analysis of global experience, scientifically grounded methods for reducing air pollution under conditions of stable temperature inversion are proposed. The main focus of the article is assessing the impact of industrial production on the atmosphere under conditions of stable temperature. The frequency and duration of inversions are also analyzed, as well as their dependence on the season and climate changes.

Keywords: temperature inversion, air pollution, Pavlodar, PM2.5 particles, thermal power plant, wind directions, public health, air pollution mitigation, heavy metals.

К.Ш. Жумадилов¹, А.А. Жадыранова^{1*}, Ж.А. Байгазинов²,
Д.К. Аншокова¹, Н.Ж. Мухамедияров²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан

²АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан

*e-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

Температурные инверсии и их влияние на загрязнение воздуха в городе Павлодар

В этой статье рассматривается загрязнение воздуха в городе Павлодар, одном из крупных промышленных центров Казахстана, и влияние на него температурных инверсий. Обсуждаются Павлодарская теплоэлектростанция (ТЭС), близлежащие районы крупных химических и металлургических предприятий и основные направления транспортировки. Отмечается, что значительная часть вредных компонентов образуется при неблагоприятных метеорологических условиях, при этом решающую роль играют температурные инверсии. Эти атмосферные явления нарушают естественные процессы вертикального движения воздушных слоев, в результате чего загрязняющие компоненты накапливаются у земной поверхности и сохраняются там длительное время. В исследовании объясняются физические механизмы формирования температурной инверсии, включая изменение плотности воздуха, теплообмен между атмосферными слоями, зависимость скорости ветра от высоты, а также особенности рельефа и городской застройки, вызывающие явления застоя. Рассматривается химический состав загрязнённой атмосферы: основное внимание уделяется сжиганию топлива и выбросам с промышленных установок мелкодисперсных частиц PM 2.5, оксидов азота, тяжёлых металлов, диоксида серы, оксида углерода и других соединений. Эти компоненты представляют большую опасность для здоровья населения, вызывают острые и хронические респираторные заболевания, а также повышают риск сердечно-сосудистых и онкологических патологий. На основе полученных данных и анализа мирового опыта предложены научно обоснованные методы снижения загрязнения воздуха при условиях стабильной температурной инверсии. Основное направление статьи – оценка воздействия промышленного производства на атмосферу в условиях стабильной температуры. Также анализируются частота и продолжительность инверсий, их зависимость от сезона и изменений климата.

Ключевые слова: температурная инверсия, загрязнение воздуха, Павлодар, частицы PM2.5, тепловая электростанция, направления ветра, здоровье населения, методы снижения загрязнения, тяжелые металлы.

Кіріспе

Өнеркәсіптік қалалардағы ауаның ластануы қазіргі заманның ең өзекті экологиялық проблемаларының бірі болып табылады. PM 2.5 және өзге де ластаушы компоненттерге ерекше назар аударылады, олар халықтың денсаулығына елеулі әсер етеді. Қазақстанның ірі өнеркәсіп орталықтарының бірі – Павлодар қаласы да бұдан алыс емес. Павлодар жылу электр орталығы (ЖЭС) және металлургиялық зауыттар сияқты ірі кәсіпорындардың қызметі салдарынан қала ластаушы компоненттердің, соның ішінде ауыр металдар мен қатты бөлшектердің айтарлықтай бөлінуінен қала тұрғындары зардап шегеді. Жағдайды ушықтыратын маңызды фак-

тор ол, ауаның қалыпты айналымын болдырмайтын, атмосферадағы ластаушы заттарды ұстайтын температуралық инверсиялардың болуы болып табылады [1].

Зерттеулер көрсеткендей, Павлодар қаласында ауаның ластану деңгейі жоғары, әсіресе өнеркәсіптік нысандарға іргелес аумақтарда. Географиялық ақпараттық жүйелерді пайдалану ластаушы заттардың кеңістікте таралуын нақты көрсетуге және олардың қаланың әртүрлі бөліктерінде шоғырлануын анықтауға мүмкіндік береді [2]. Сарапшылар ластаушы компоненттердің, соның ішінде жылу электр станцияларының шығындыларының көбеюіне байланысты, ластанудың айтарлықтай бөлігі қаланың тұрғын аудандарында, әсіресе температура

инверсиялары барынша айқын болатын суық мезгілдерде жиналатынын атап өтті. Бұндай жағдайлар атмосфераның төменгі қабаттарында ластаушы компоненттердің жиналуына ықпал етеді, бұл ауаның сапасын айтарлықтай нашарлатады және халық арасында түрлі аурулардың қаупін арттырады.

Павлодар облысында ауаны ластайтын бірнеше негізгі кәсіпорындар орналасқан, олардың негізгілері жылу энергия станциялары (ЖЭС), металлургиялық зауыттар мен көмір шахталары болып табылады. Облыста үш ірі жылу энергия станциясы жұмыс істейді: Павлодар жылу орталығы-1, ЖЭС-2, ЖЭС-3, олар атмосфераға ластаушы компоненттерді шығарудың маңызды көздері болып табылады. Бұл зауыттар көмірді жағады, ол ауаға қатты бөлшектерді, көмірқышқыл газын және басқа да зиянды компоненттерді, соның ішінде ауыр металдар мен азот оксидтерін шығарады.

Материалдар және негізгі әдістер

Атмосфера РМ 2.5, ауыр металдардың және өнеркәсіптік көздерден шығатын оксидтердің шығарындыларымен ластанған. Бұл ластаушы компоненттердің кеңістікте таралуы атмосфералық қабаттағы турбулентті тасымалдау және дисперсия физикасымен анықталады. Ластаушы компоненттердің дисперсиясын сипаттайтын негізгі модельдердің бірі келесідей жазылған диффузия теңдеуіне негізделген кері Гаусс үлгісі болып табылады

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \nabla C = K_H \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S, \quad (1)$$

Мұндағы, C – ластаушы компоненттердің концентрациясы, $\vec{u}$ – жел жылдамдығының векторы, K_H және K_V – көлденең және тік бағыттағы турбулентті диффузия коэффициенттері, S – ластаушы көзі [3]. Бұл формула ластаушы компоненттердің желмен тасымалдануын ғана емес, сонымен қатар олардың дисперсиясын сипаттайды, бұл көздерге жақын тұнуға бейім ауыр металдардың әсерін бағалау үшін өте маңызды.

Атмосферада ластаушы компоненттердің таралуы мен жиналуын анықтататын физикалық процестер әсіресе температуралық инверсиялар мен беткі қабаттың әлсіз турбуленттілігі жағдайында айқын көрінеді. Температураның

инверсиясы кезінде жер бетіне жақын орналасқан суық ауа жылы ауа қабатының астында қалып, тік араласу шектелген тұрақты стратификацияны тудырады. Мұндай жағдайда өнеркәсіптік көздерден бөлінділер, соның ішінде РМ 2.5 бөлшектері, күкірт диоксиді және басқа да ауыр металдар атмосфераның төменгі қабаттарында жиналады [4, 5]. Физикалық тұрғыдан алғанда, мұндай процестер молекулалық және турбуленттік диффузияны ескере отырып, ластаушы компоненттерді тің тасымалдану теңдеуі арқылы сипатталады

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_V \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial(wC)}{\partial z}, \quad (2)$$

Мұндағы, w – тік ауа жылдамдығы болып табылады. Температураның инверсиясы кезінде K_V күрт төмендейді және ауаның тік қозғалысы іс жүзінде болмайды, бұл ластаушы заттардың жиналуына алып келеді.

Температураның инверсиясы ластаушы заттардың тік тасымалдануына кедергі жасайды. Бұл процесс әсіресе РМ 2.5 және ауыр металдар үшін өауіпті, себебі олар жердің төменгі қабатында шоғырланады. Тұрақты инверсиялар ашық ауа райында және топырақтың кешкі салқындауы кезінде қалыптасады, бұл температура инверсиясын тудырады

$$\frac{dt}{dz} > 0, \quad (3)$$

Яғни температура биіктікке қарай артады. Бұл ретте құбырлар мен желдеткіш саңылауларыдан шығатын ластаушы компоненттер инверсия қабатынан жоғары көтеріле алмайды және қалалық атмосферада жиналады [4].

Жел бағытының диаграммасы желдің басым бағыты мен жылдамдығын көрсетеді, бұл ластанудың тұрғын үйлерге қарай ауысуын талдау кезінде өте маңызды. Әлсіз желдер (< 1 м/с) тоқырауға және бастапқы аймақта ластаушы заттардың жиналуына алып келеді. Бұл әсіресе РМ 2.5 және басқада да ауыр металдарға қатысты, олардың тұну жылдамдығы төмен және алыс қашықтыққа тасымалдану мүмкіндігі жоғары. Бағытты тасымалдануды бағалау үшін желдің орташа векторы анықталады

$$\vec{u}_{\text{орт}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{u}_i, \quad (4)$$

Машиналық оқытуға негізделген болжамды модельдер ластаушы компоненттердің концентрациясын болжау үшін метеорологиялық факторлар мен эмиссия сипаттамаларын ескереді, соның ішінде көп компонентті қоспалары бар күрделі сценарийлер [6].

Негізгі ластаушы компоненттерді бірі – РМ 2.5, мөлшері 2,5 мкм-ге дейінгі бөлшектер, олар кішкентай болғандықтан, өкпенің ең терең жерлеріне еніп, қанға ене алады. Физикалық тұрғыда бұл бөлшектер ауада бола отырып, диффузия арқылы және жел мен температура инверсиясының әсерінен тасымалдануы мүмкін. Соңғылары атмосфераның төменгі қабаттарында ластаушы заттардың жиналуына жағдай жасай отырып, тыныс аду кеңістігінде РМ 2.5 концентрациясын арттырады. Бұл бөлшектердің денсаулыққа әсері тыныс алу жолдарындағы қабыну процестерінің күшеюінде, жүрек-қан тамырлары ауруларының қауіпін жоғарлатып, өкпе газ алмасуының бұзылуында, сонымен қатар созылмалы өкпе ауруларының дамуына әкеледі [6, 7].

Жылу электр станцияларында көмірді жағу кезінде бөлінетін күкірт диоксиді жоғары химиялық белсенділікке ие және тыныс алу жолындағы сумен тез әрекеттесіп, күкірт қышқылын түзеді. Бұл процесс шырышты қабықтарды тітіркендіреді және қабынуды тудырады, ол өз кезегінде тыныс алу жолдарының нашарлауына әкеледі. CO_2 сонымен қатар температураның инверсиясы кезінде атмосфераның төменгі қабаттарында ұсталып қалуы мүмкін аэрозольдердің түзілуіне ықпал кетеді, қаланың төменгі орналасқан аудандарында ауаның ластанауының әсерін арттырады [8]. Мұндай инверсиялар ластаушы компоненттерді тік қозғалысын физикалық түрде шектеп, олардың жер бетіне жақын аумақта ұстайды. Бұл ауадағы SO_2 концентрациясын арттырады, бұл өз кезегінде бронхит, астма сияқты созылмалы респираторлық ауруларға, сондай-ақ жүрек-қан тамырлары ауруларының дамуына әкелуі мүмкін, себебі SO_2 тамыр қабырғаларында қабыну ықтималдылығын арттырады [9, 10]. Физикалық түрде CO ауада оңай таралады, ал температуралық инверсия жағдайында оның атмосфераның төменгі қабаттарындағы концентрациясы айтарлықтай артады [11-13]. Бұл компоненттердің ағзада жиналу қабілеті бар, бұл созылмалы улануға және жасушалардың бұзылуына әкеледі. Кадмий бүйрек пен өкпені

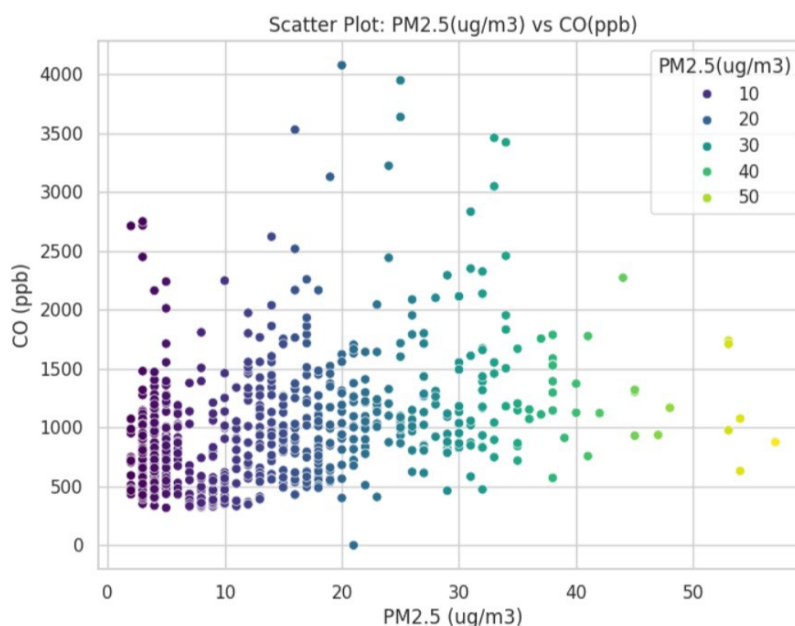
зақымдайды, ал сынып орталық жүйке жүйесіне әсер етіп неврологиялық бұзылулар мен есте сақтау қабілетінің бұзылуына әкеледі. Бұл ауыр металдар басқа ластанаушы компоненттер сияқты атмосфераға еніп, диффузиялық және жел ағындары арқылы тарай алады, сонымен қатар ластаушы компоненттер ауаның беткі қабатында жиналған кезде олардың концентрациясы температуралық инверсия жағдайында жоғарылайды [14-15].

Температура инверсиялары ластаушы заттардың дисперсиянда шешуші рөл атқарады, себебі олар тік айналымға кедергі келтіретін тұрақты ауа қабаттарын жасайды және ластаушы компоненттерді жер бетіне жақын ұстайды. Бұл құбылыс әсіресе қыста, атмосфераның төменгі қабаттарында қалатын суық ауа барлық шығындыларды жинақтағанда, олардың концентрациясының жоғарлауына әкеледі. Осылайша, ластаушы компоненттер бөлінділер көздері шоғырланған жерлерде қалады, бұл олардың адамдардың денсаулығына әсерін арттырады [15, 16].

Нәтижелер мен талқылаулар

Ауа сапасын жақсарту бағдарламалары өнеркәсіптік нысандардың ластаушы заттардың әсерін азайтуда маңызды рөл атқарады. Негізгі бағыттардың бірі – өнеркәсіптік кәсіпорындарды дамыту мен пайдаланудың тұрақты әдістерін енгізу. Бұған технологияларды жаңарту, энергия тиімділігін арттыру және таза энергия көздеріне көшу кіреді, бұл өз кезегінде атмосфераға зиянды заттардың шығарылуын азайтады. Маңызды аспект – қалдықтар атмосфераға шығарылатын емес, қайта өңделетін жабық өндірістік циклдарды құру, бұл ластану деңгейін төмендетеді [17].

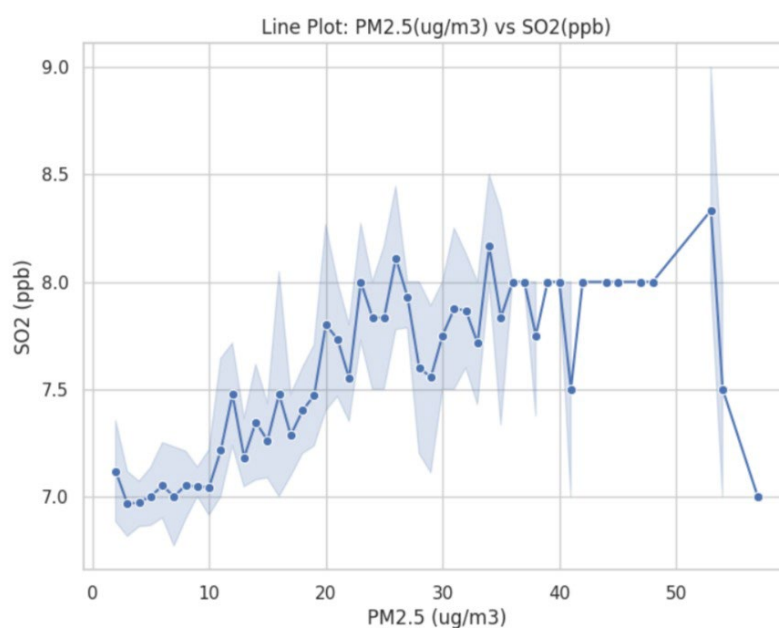
Ауа сапасын жақсартудың тағы бір тәсілі – Қытайдың көмірден газға көшу бағдарламасы аясындағыдай көмірден табиғи газға ауысу сияқты таза энергия көздерін пайдалану. Бұл ауысу көмірқышқыл газының, күкірт оксидтерінің және басқа да ластаушы заттардың шығарындыларын айтарлықтай азайтады, бұл ірі өнеркәсіптік қалалардағы ауа сапасына ұзақ мерзімді оң әсер етеді. Мұндай технологияларды басқа елдерде, соның ішінде Қазақстанда енгізу өнеркәсіптік аймақтардағы ауа сапасын жақсарту стратегиясының маңызды бөлігіне айналуы мүмкін [18].



1-сурет – Шашырау схемасы: Павлодар атмосферасындағы PM2.5 және CO концентрациясы арасындағы байланыс

Сонымен қатар, ауаның ластануын тиімді бақылау үшін желдің үлгілері сияқты қалалық климаттың әсерін ескеру маңызды. Жел ағындарын ескере отырып, қалалық ортаны жобалау ластаушы заттардың таралуына айтарлықтай әсер етуі мүмкін, ал тұрғын және өнеркәсіптік

аймақтарды дұрыс орналастыру ауадағы ластаушы заттардың концентрациясын азайтуға көмектеседі. Мұндай факторларды стратегиялық қала жоспарлауына енгізу салауатты ортаны құруға және халықтың денсаулығына қауіптерді азайтуға көмектеседі [19].



2-сурет – Температуралық инверсия жағдайындағы PM2.5 пен SO₂ деңгейлерінің арасындағы сызықтық байланыс

(1-сурет) $PM_{2.5}$ ($мкг/м^3$) және CO (ppb) арасындағы байланысты көрсетеді, деректер $PM_{2.5}$ деңгейлері бойынша топтастырылған. Айқын тенденция байқалады: $PM_{2.5}$ концентрациясы жоғарылаған сайын CO деңгейі де артады. (2-сурет) $PM_{2.5}$ және SO_2 (ppb) арасындағы байланысты көрсетеді, мұнда SO_2 деңгейлерінің біркелкі өсуі $PM_{2.5}$ белгілі бір шекке дейін жоғарылағанда байқалады. Бұл тәуелділіктер температураның инверсиясының нәтижесі болуы мүмкін, онда суық ауа атмосфераның төменгі қабаттарында ластаушы заттарды «ұстап», олардың таралуына жол бермейді. Инверсиялар әсіресе қысқы кезеңдегі Павлодар қаласына тән, мұнда төмен температура кезінде концентрация шыңдарын бақылауға болады. Осылайша, екі графикте температура инверсияларының

Қорытынды

Температура инверсиялары ластаушы заттардың, әсіресе $PM_{2.5}$ бөлшектерінің деңгейі рұқсат етілген деңгейден айтарлықтай асып түсетін Павлодар қаласы сияқты өнеркәсіптік қалаларда ауаның ластануында маңызды рөл атқарады. Инверсиялар, суық ауа жылы қабаттар арасында ұсталғанда, атмосфералық тұрақтандыруды тудырады, бұл ауаның тік араласуына жол бермейді және атмосфераның төменгі қабаттарында ластаушы заттардың сақталуына алып келеді. Бұл жер қабатында ластаушы бөлшектердің жиналуын арттырады, бұл әсіресе Павлодар қаласы сияқты халық тығыз орналасқан және өнеркәсіптік аудандарда қауіпті, ластаудың негізгі көздері жылу электр станциялары мен басқа да өнеркәсіптік кәсіпорындар болып келеді. Құрамында күкірт, азот оксидтері және ауыр металдар бар осы көздерден шығарындылар температура инверсияларымен қосылып, адам денсаулығы мен қоршаған ортаға қауіпті атмосфераны құрайды.

Сонымен бірге, Павлодар қаласының атмосфералық ауасының ластануын тиімді төмендету үшін атмосфераға ластаушы заттардың таралуына әсер ететін физикалық процестерді ескеру маңызды. Мысалы, температура инверсия деректерін және олардың турбулентті ауа араластыру механизмдеріне әсерін пайдалану ластануды болжауға көмектеседі. Инверсия кезінде $PM_{2.5}$ сияқты ластаушы заттар жер қабатында қалып, олардың жиналуына және ауа сапасының төмендеуіне алып келеді. Ластаушы компоненттердің дисперсиясын жел режимі, температура және ылғалдылық сияқты факторларды ескере отырып онтайландыру ластануды басқарудың тиімді стратегиясының маңызды бөлігі болып табылады. Ластаушы заттардың дисперсиясын модельдеуді, соның ішінде кері Гаусс үлгісін пайдалану ластанған аумақтарды дәлірек болжауға және олардың адамдарға әсерін барынша азайтуға мүмкіндік береді. Динамикалық атмосфералық модельдеу және ауа ағынының тік құрылымын қарастыру сияқты физикалық әдістерді пайдалану өнеркәсіптік деңгейде шығарындыларды жоспарлауға және басқаруға көмектеседі. Бұл әдістер өнеркәсіптік экологияның инновацияларымен біріктіріліп, ластануды азайтуға ғана емес, сонымен қатар оның жергілікті климаттық және ауа райы жағдайында таралуының физикалық ерекшеліктерін ескере отырып, ауаны тазарту үшін оңтайлы жағдайлар жасауға мүмкіндік береді.

Алғыс

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің бағдарламалық-нысаналы қаржыландыруы аясында жүзеге асырылды (ЖТН №BR27101493) – «Ластау көздерінің таралуын анықтау негізінде Қазақстанның өнеркәсіптік қалаларында ауаның ластануын азайту стратегияларын жасау» жобасы бойынша.

References

1. Safarov, R. (2023). *Spatial distribution of PM_{5} and PM_{10} pollutants in residential area of pavlodar, kazakhstan*. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series Chemistry and Technology, Series 3*, 15-30. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1491.202>
2. Safarov, R. (2024). *Spatial Analysis of Air Pollutants in an Industrial City Using GIS-Based Techniques: A Case Study of Pavlodar, Kazakhstan*. *Sustainability*, 16(17), 7834. <https://doi.org/10.3390/su16177834>
3. Lushi, E. (2010). *An inverse Gaussian plume approach for estimating atmospheric pollutant emissions from multiple point sources*. *Atmospheric Environment*, 44(8), 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.039>

4. Xu, X. (2020). *Land use regression modelling of PM_{2.5} spatial variations in different seasons in urban areas*. *Science of the Total Environment*, 730, 139065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140744>
5. Feng, X. (2020). *Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and their impact on air pollution in the Sichuan Basin*. *Science of the Total Environment*, 726, 138579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138579>
6. Han, J. (2023). *Machine learning for urban air quality analytics: A survey*. *arXiv preprint arXiv:2310.09620*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.09620>
7. Cho, E. (2021). *Distribution and Influencing Factors of Airborne Bacteria in Public Facilities Used by Pollution-Sensitive Population: A Meta-Analysis*. *Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7504. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147504>
8. Young, S. S. (2020). *Evaluation of ambient air quality data for epidemiological research: A case study of measurement uncertainty*. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 114, 104647. <https://doi.org/10.1080/10408444.2019.1576587>
9. Fatkhutdinova, L. M. (2021). *Environmental risk factors for respiratory diseases in industrial regions*. *Kazan Medical Journal*, 102(6), 956–962. <https://doi.org/10.17816/KMJ2021-862>
10. Nakhratova, V. (2020). *Impact of air pollution with particulate particles on the risk of cardiovascular diseases (review)*. *Human Ecology*, 6, 42–48. <https://doi.org/10.17816/humeco104609>
11. Antonelli, J. (2016). *Low-Concentration PM₅ and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study*. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 834–840. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409459>
12. Larsen, A. (2020). *Exposure to air pollution and its effects on cognitive performance: A meta-analysis*. *Environmental Research*, 183, 109206. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109206>
1. Brody, M. (2023). *Particulate air pollution in Tashkent and consequences to population health*. *Hygiene and Sanitation*, 102(5), 457–462. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-1-13-16>
2. Song, (2017). *Health burden attributable to ambient PM_{2.5} in China*. *Environmental Pollution*, 223, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.060>
3. Lin, H. (2017). *Long-term exposure to ambient PM_{2.5} and hypertension: A systematic review and meta-analysis*. *Hypertension*, 69(5), 806–812. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.116.08839>
4. Lelieveld, J. (2015). *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale*. *Nature*, 525(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
5. Mukhopadhyay, A. (2014). *Control of industrial air pollution through sustainable development*. *Environment, Development and Sustainability*, 16(1), 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9473-x>
6. Leng, X. (2022). *Assessing the effect of the coal-to-gas program on air pollution: evidence from China*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 24027–24042. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23739-6>
7. Xiong, J. (2023). *City Wind Impact on Air Pollution Control for Urban Planning with Different Time-Scale Considerations: A Case Study in Chengdu, China*. *Atmosphere*, 14(7), 1087. <https://doi.org/10.3390/atmos14071087>

Авторлар туралы мәлімет:

Жумадилов Касым Шаймарданович – PhD докторы, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Физика-техникалық факультеттің ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасының меңгерушісі, ORCID ID: 0000-0002-0205-4585 (Астана, Қазақстан, e-mail: zhumadilovk@gmail.com).

Жадыранова Алия Амирбековна – PhD, жалпы және теориялық физика кафедрасының доценті (м.а.), Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, ORCID ID: 0000-0003-1153-3438 (Астана, Қазақстан, e-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com).

Бағазинов Жанат Абылканович – PhD, биология ғылымдарының кандидаты, «Ядролық технологиялар паркі» АҚ басқарма төрағасы, ORCID ID: 0000-0002-0348-8473 (Курчатов, Қазақстан, e-mail: zh.baigazinov@gmail.com).

Анишкова Дина Куанышқызы – магистрант, жалпы және теориялық физика кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, ORCID ID: 0009-0005-1329-492X (Астана, Қазақстан, e-mail: anshokova06@gmail.com).

Мухамедияров Нұрлан Жумагазыевич – химия магистрі, «Ядролық технологиялар паркі» АҚ, ORCID ID: 0000-0001-5073-5978 (Курчатов, Қазақстан, e-mail: nurlan.eventumlab@gmail.com).

Information about authors:

Kassym Shaimardanovich Zhumadilov – PhD, Professor, Head of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, Faculty of Physics and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: zhumadilovk@gmail.com).

Aliya Amirbekovna Zhadyranova – PhD, Acting Associate Professor, Department of General and Theoretical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com).

Zhanat Abylkanovich Baigazinov – PhD, Candidate of Biological Sciences, Chairman of the Board, JSC “Park of Nuclear Technologies” (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: zh.baigazinov@gmail.com).

Dina Kuanyshevna Anshokova – Master’s student, Department of General and Theoretical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: anshokova06@gmail.com).

Nurlan Zhumagazyevich Mukhamediarov – Master of Chemistry, JSC «Park of Nuclear Technologies» (Kurchatov, Kazakhstan, e-mail: nurlan.eventumlab@gmail.com).

Сведения об авторах:

Жумадилов Касым Шаймарданович – PhD-доктор, профессор, заведующий международной кафедрой ядерной физики, новых материалов и технологий физико-технического факультета Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: zhumadilovk@gmail.com).

Жадыранова Алия Амирбековна – PhD, и. о. доцента кафедры общей и теоретической физики Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com).

Байгазинов Жанат Абылканович – PhD, кандидат биологических наук, председатель правления АО «Парк ядерных технологий» (Курчатов, Казахстан, e-mail: zh.baigazinov@gmail.com).

Аниокова Дина Куанышевна – магистрант кафедры общей и теоретической физики Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: anshokova06@gmail.com).

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич – магистр химии, АО «Парк ядерных технологий» (Курчатов, Казахстан, e-mail: nurlan.eventumlab@gmail.com).

Қарастырылуға 16.04.25 түсті
Қабылданды 02.11.25