

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-122-128>

УДК 504.064.36

ӨСКЕМЕН ҚАЛАСЫНЫҢ АТМОСФЕРАДАҒЫ ЛАСТАУШЫ БӨЛШЕКТЕР ДИНАМИКАСЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

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

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

² «Ядролық технологиялар паркі» АҚ, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

Мақалада Өскемен металлургиялық зауытынан (ӨМЗ) бөлінетін PM_{2,5} бөлшектеріне баса назар аударып, Өскемен қаласының атмосферасындағы ластанушы заттардың динамикасын сандық модельдеу қарастырылған. Модельдеу метеорологиялық жағдайлардың, топографиялық ерекшеліктердің және ластанудың антропогендік көздерінің әсерін ескеретін заманауи әдістерді қолдану арқылы жүзеге асырылады. Жылдың әртүрлі маусымдарында PM_{2,5} концентрациясын бағалауға, сондай-ақ олардың атмосфера сапасы мен халықтың денсаулығына әсерін талдауға ерекше назар аударылады. Модельдеу нәтижелері негізгі ластанушы аймақтарды анықтауға және бөлінділерді азайту бойынша шаралардың тиімділігін бағалауға көмектеседі. Жылдың басқа айларының деректерімен салыстырғанда, PM_{2,5} концентрациясының графиктері ластану деңгейлерінің маусымдық өзгерістерін көрсетеді, бұл жыл мезгіліне байланысты ластанушы компоненттердің әсерін дәлірек болжауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: сандық модельдеу, ауаның ластануы, PM_{2,5}, Өскемен, метеорологиялық жағдайлар, ауа сапасы, Өскемен металлургиялық зауыты.

КІРІСПЕ

Атмосфераның ластануы ең өзекті экологиялық проблемалардың бірі болып табылады, әсіресе өнер-кәсіптік аймақтарда. Шығыс Қазақстанда орналасқан Өскемен қаласында ауаның ластануы, әсіресе PM_{2,5} концентрациясының жоғарылауы халықтың өмір сүру сапасы мен денсаулығына айтарлықтай әсер етеді. Өскемен металлургиялық зауыты сияқты ластанушы көздер атмосфераға көп мөлшерде бөлшектерді шығаратын негізгі ластанушылар болып келеді. Осыған байланысты бұл қаланың ауасының ластану динамикасын зерттеу өзекті тақырып болып табылады, әсіресе ластанушы заттардың концентрациясына айтарлықтай әсер ететін маусымдық факторлардың өзгеруін ескере отырып [1].

Атмосфераны ластанушы заттарды сандық модельдеу ластанудың кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін бағалау үшін нақты деректер береді. Бұл зерттеулерде метеорологиялық факторлардың ластанушы заттардың таралуына әсерін бағалау үшін кеңістік-уақыттық талдау әдістері қолданылады [2].

Негізгі назар Өскемен металлургиялық зауытынан бөлінетін PM_{2,5} компоненттерін талдауға, олардың маусымдық өзгерістеріне және атмосфераның сапасына әсеріне бағытталған. Қолданылатын әдістер қаланың әртүрлі бөліктеріндегі ластанушы заттардың шоғырлануына температура инверсиялары, жел жылдамдығы және ылғалдылық сияқты әртүрлі факторлардың әсерін дәлірек болжауға мүмкіндік береді. Модельдеу нәтижелері ауа сапасын тиімді басқару және ластануды азайту стратегияларын әзірлеу үшін маңызды деректер береді.

МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ НЕГІЗГІ ӘДІСТЕР

Өскемен сияқты аудандарда PM_{2,5} ластануын дәлірек болжау үшін температура, ылғалдылық және жел жылдамдығы сияқты метеорологиялық факторлардың әсерін ескеру қажет. Осы параметрлерді ескеретін модельдер ластану деңгейін дәлірек болжауға мүмкіндік береді және қала ауасының сапасын жақсарту стратегияларын жасауға көмектеседі.

Ластануды бағалау үшін инверсиялық газ теңдеуіне негізделген ластанушы компоненттердің дисперсия моделін қолдануға болады. Атмосферадағы ластанушы заттардың концентрациясын бағалаудың негізгі теңдеуі [3]

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (1)$$

мұндағы $C(x, y, z)$ – (x, y, z) нүктесіндегі ластанушы компоненттің концентрациясы, Q – ластанушы заттың массалық бөліндісі, σ_y және σ_z – көлденең және тік таралу бағыттары бойынша ауытқулар, U – жел жылдамдығы. Атмосферадағы көпқабатты температура моделі арқылы ескерілетін температуралық инверсиялардың әсері де маңызды аспект болып табылады. Бұл жағдайда тік температура градиенттерін есепке алу ластанушы бөлшектердің таралуын дәлірек модельдеудің кілті болып табылады. Көпқабатты температура моделі мына теңдеумен сипатталады

$$T(z) = T_0 + \alpha z, \quad (2)$$

мұндағы $T(z)$ – z биіктіктегі температура, T_0 – жер деңгейіндегі температура, α – температура градиентінің коэффициенті [4].

Қосымша формула ластанушы компоненттердің концентрациясына желдің жылдамдығы мен ластанушы көзден қашықтыққа байланысты әсерін сипаттайды. Осы параметрді ескере отырып, ластанушы бөлшектердің концентрациясын есептеуге болады

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U (x^2 + y^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (3)$$

PM_{2.5} динамикасын тиімді сандық модельдеу атмосфералық стратификацияның ерекшеліктерін және метеорологиялық жағдайларды ескеруді талап етеді. Негізгі факторлардың бірі ауаның тік араласуын шектейтін және атмосфераның төменгі қабатында ластанушы заттардың жиналуына ықпал ететін температура инверсиясы болып табылады [5].

Қала ортасының құрылымы бөлшектердің таралуының орналасуына және инверсиясына әсер етеді. Тығыз даму, сонымен бірге, ірі өнеркәсіптік нысандардың болуы жел бағытын өзгертеді және ластанушы заттардың сақталуы мүмкін жабық аймақтарды құрайды. Бұл ерекшеліктерді компоненттердің тасымалдануы мен дисперсиясының үлгілерін құру кезінде ескеру қажет [6].

Инверсия жағдайында ластанушы заттардың концентрациясын бағалау үшін қолданылатын теңдеулердің бірі:

$$C = \frac{E}{Uh_i}, \quad (4)$$

мұндағы, h_i – инверсия қабатының биіктігі. Беткі қабаттағы ластану динамикасын сипаттау үшін ластанушы компоненттердің тасымалдау теңдеуі қолданылады

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (5)$$

мұндағы, K_z – турбулентті диффузия коэффициенті. Бұл теңдеулерді қолдану ластануды болжау кезінде метеорологиялық жағдайлар мен қалалық ортаның құрылымын ескеруге мүмкіндік береді. Бұл зиянды бөлшектердің концентрациясын бағалаудың дәлдігін арттырады және ауаның сапасын жақсарту және халықтың денсаулығын қорғау бойынша тиімді шараларды әзірлеуге көмектеседі.

Ауаның ластануы маусымға байланысты жиі өзгереді. Қыс мезгілінде бөлшектердің концентрациясы жоғарылайды, әсіресе температураның инверсиясы кезінде, жер бетіне жақын суық ауа жылы ауаны жоғарырақ ұстап, тұрақты атмосфераны қалыптастырады. Бұл ауаның қалыпты араласуын болдырмайды, ластанушы заттарды жер қабатында сақтайды.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУЫ

PM_{2.5} концентрациясын қалыптастыруда маусымдық өзгерістер де маңызды рөл атқарады. Қыс мезгіліне тән төмен температура мен әлсіз жел кезінде PM_{2.5} бөлшектері жиналуға бейім, өйткені олардың дисперсиясы және атмосферадан

шығарылуы шектеулі. Бұл қыс мезгілінде байқалатын ауаның жоғары ластануын түсіндіреді, әсіресе зауыттар мен көліктердің шығарындылары мәселені ушықтыратын өнеркәсіптік аймақтарда. Маңызды фактор желдің жылдамдығы болып табылады, ол ластанушы заттардың таралуына айтарлықтай әсер етуі мүмкін.

Төмен температура жағдайында PM_{2.5} концентрациясының артуын келесі графиктер арқылы көре аламыз. Мысалы, 2022–2023 жж. қыста ластану деңгейі біршама төмендей бастады және қыстың соңына қарай бірте-бірте өсті, ал 2023–2024 жылдары жоғарырақ «бастау» бастапқыда байқалды және ең жоғары мәндерге қаңтарда ерте жетті (1 сурет).

2022–2023 жылдарға арналған маусымдық таралу диаграммасы қысқы мәндердің жазғы минимумдардан айтарлықтай асып түсетінін көрсетеді және маусымдар арасындағы салыстырмалы айырмашылық осы кезеңде ең айқын көрсетілген (2 сурет).

2023–2024 жж. қысқы «бастау нүктесі» алдыңғы маусымға қарағанда жоғары болды, ал ең жоғары концентрацияға ерте қол жеткізу суық кезеңдегі ластанушы заттардың тұндыру динамикасының өзгеруі байқалады (3 сурет).

2023–2024 жылдарға арналған маусымдық үлестіру диаграммасы қыс пен жаздың айырмашылығы біршама қысқарғанымен, жалпы суретте қысқы шыңдар әлі де басым екенін көрсетеді (3 сурет).

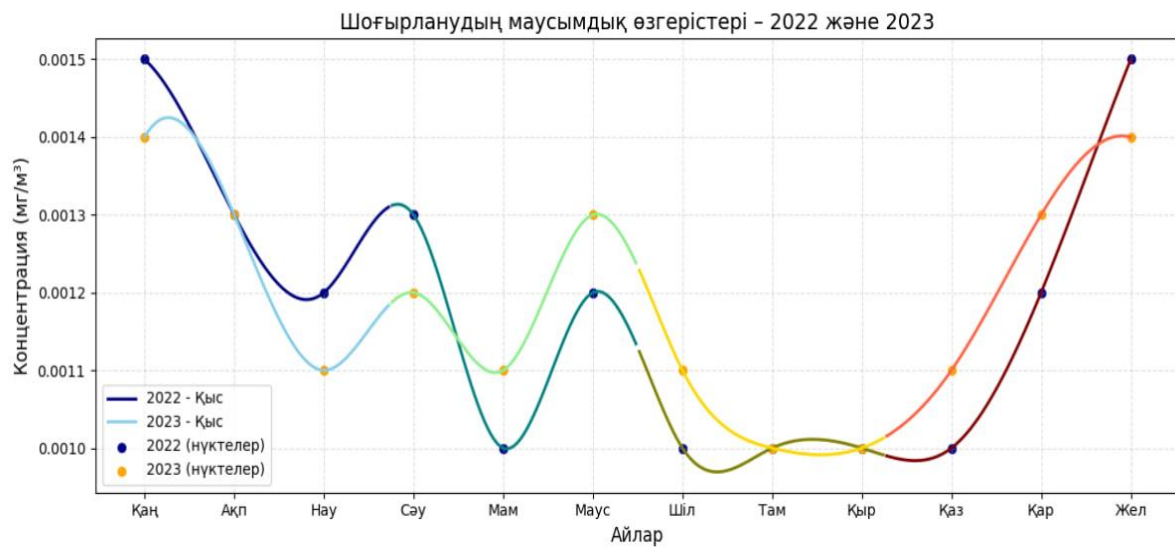
2024–2025 жылдар кезеңіне көшкенде, қысқы «бастапқы нүкте» 2023–2024 жылдармен салыстырғанда тіптен жоғары болды, ал ақпан-наурыз айларындағы өсу өткен жылғы көрсеткіштерден асып түсті (5 сурет).

Соңында, 2024–2025 маусымдық үлестіру диаграммасы жазғы минимумдардың біршама тұрақтануына қарамастан қысқы айырмашылық айтарлықтай болып қала беретінін растайды (6 сурет).

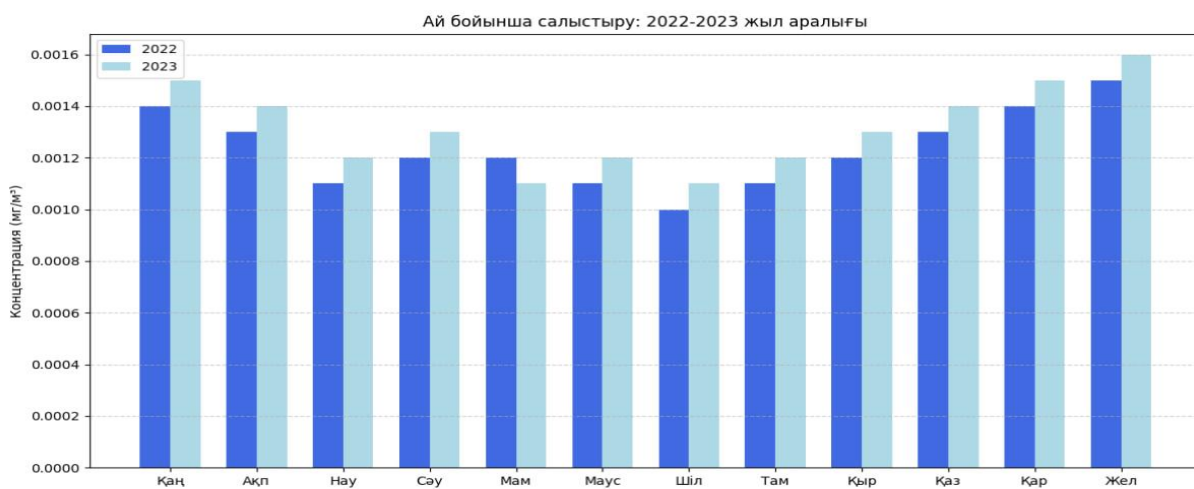
Осылайша, төрт маусымдағы деректерді талдау қысқы ең жоғары жүктемелердің басым болуымен тұрақты маусымдық динамикасын, сонымен қатар «бастапқы нүктенің» соңғы жылдардағы жоғары мәндерге өзгеруін көрсетеді. Бұл жыл бойына PM_{2.5} концентрациясын азайту және ауаның сапасын жақсарту бойынша кешенді стратегияларды әзірлеу қажеттілігін көрсетеді.

7 суретте Өскемен қаласындағы 2022–2025 жылдар аралығындағы PM_{2.5} концентрациясының маусымдық динамикасы көрсетілген. Талдау үшін қыс, көктем, жаз және күз кезеңдерін қамтитын машиналық оқыту әдістеріне негізделген қарапайым сызықтық модель пайдаланылды. Нәтижелер соңғы жылдары ауаның ластану деңгейінің төмендеуінің жалпы тенденциясын көрсетеді.

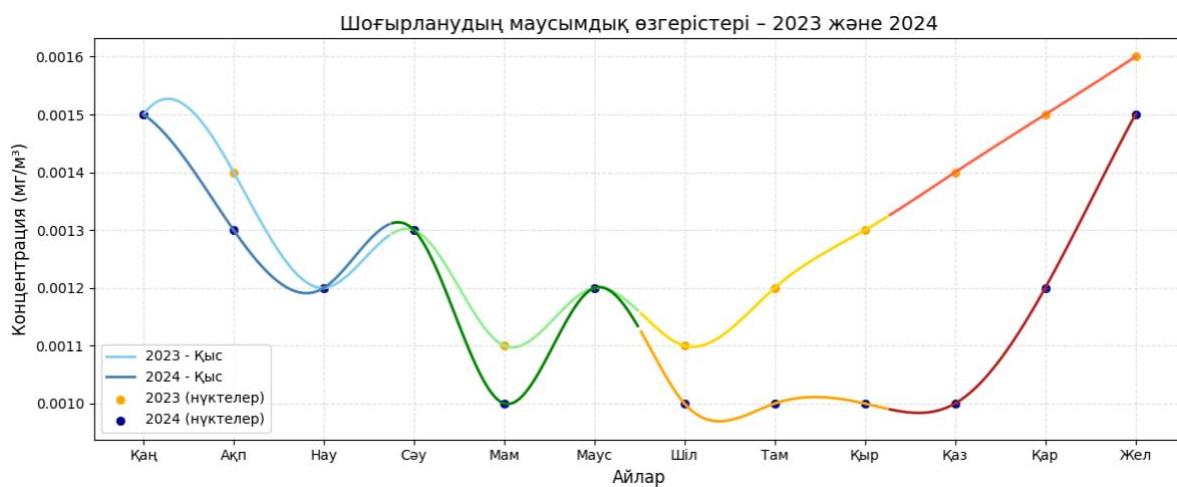
Бөлінділерді бақылау және ластану шыңдарын болжау бойынша шараларды уақтылы жүзеге асыру адамдарға зиянды әсерді барынша азайтады және қалада қолайлы қоршаған ортаны қамтамасыз етеді.



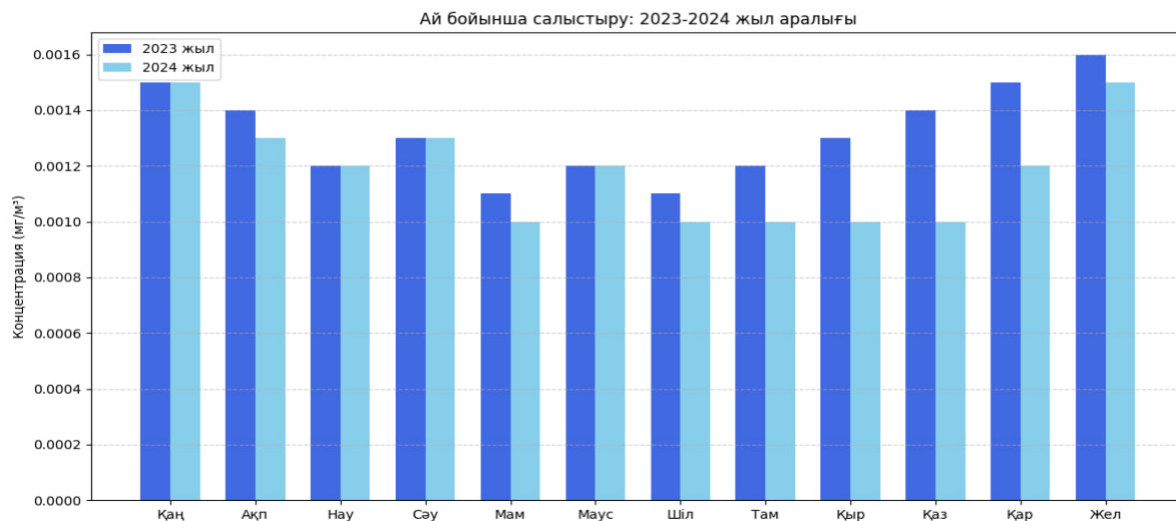
Сурет 1. РМ 2.5 концентрациясының 2022–2023 жылдары шоғырлану графигі



Сурет 2. РМ 2.5 концентрациясының 2022–2023 жылдарындағы маусымдық таралу диаграммасы



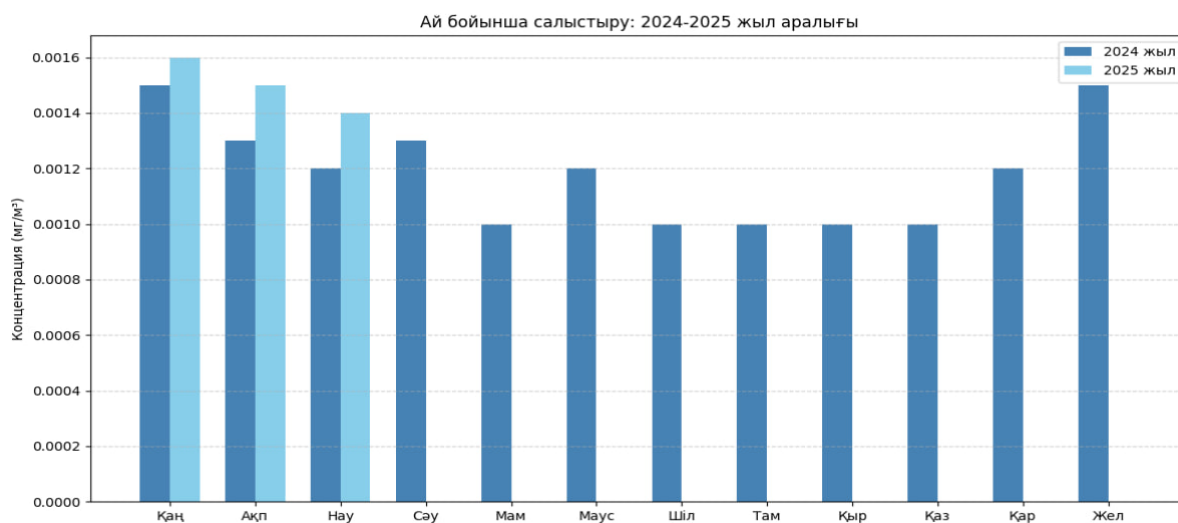
Сурет 3. РМ 2.5 концентрациясының 2023–2024 жылдары шоғырлану графигі



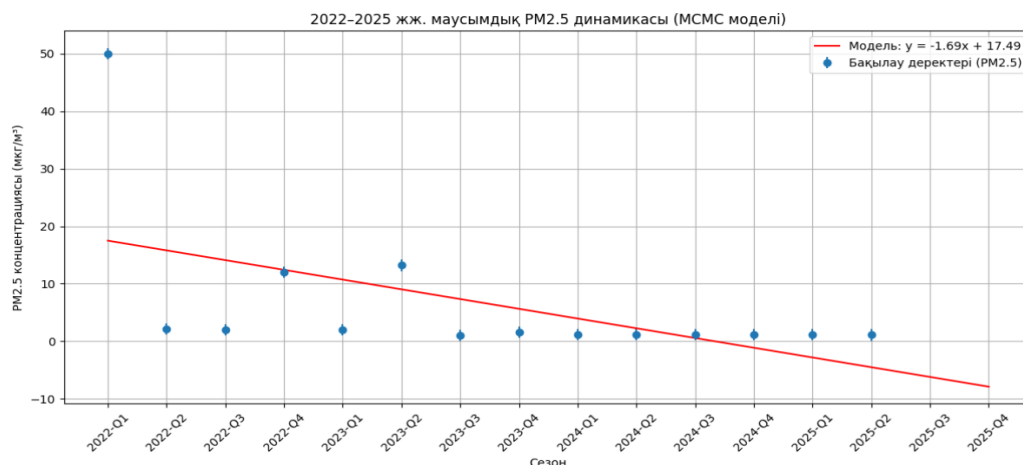
Сурет 4. РМ 2.5 концентрациясының 2023–2024 жылдарындағы маусымдық таралу диаграммасы



Сурет 5. РМ 2.5 концентрациясының 2024–2025 жылдары шоғырлану графигі



Сурет 6. РМ 2.5 концентрациясының 2024–2025 жылдарындағы маусымдық таралу диаграммасы



Сурет 7. Өскемен қаласындағы PM2,5 концентрациясының маусымдық динамикасы (2022–2025 ж.)

Қорытынды

Өскемен қаласының атмосферасындағы PM2.5 концентрациясының маусымдық динамикасын үш жылдық цикл бойынша талдау тұрақты үрдісті көрсетті: суық кезеңде ластану деңгейі жазғы маусымға қарағанда бірнеше есе жоғары болады, ал қысқы шыңдардың «бастапқы нүктесі» жыл сайын жоғары мәндерге ие [3–7]. Ұсақ бөлшектердің ең жоғары концентрациясы халықтың денсаулығына үлкен қауіп төндіреді: олар тыныс алу органдарының ауруларының дамуына ықпал етеді және жүрек-қан тамырлары асқынуларының, соның ішінде гипертония және басқа патологиялардың қаупін арттырады [8, 9].

PM2.5 деңгейін төмендету және адамға зиянды әсерді барынша азайту үшін озық тәжірибелер мен соңғы зерттеу нәтижелеріне негізделген стратегиялық шаралар кешенін жүзеге асыру қажет. Біріншіден, жоғары тиімді сүзгілерді пайдалана отырып, өнеркәсіптік эмиссия көздерін жаңарту және таза технологияларға ауысу қатты бөлшектердің бөлінділердің көлемін айтарлықтай азайтады [10]. Екіншіден, қалалық ортада жасыл аудандарды құру және кеңейту ауаның табиғи фильтрациясын күшейтеді [9].

Жергілікті метеорологиялық жағдайларға бейімделген қазіргі заманғы сандық модельдер мен машиналық оқыту әдістерін пайдалана отырып, ауа сапасын бақылау және болжау жүйесін жасау да маңызды болып табылады. Халықты PM2.5 концентрациясының шыңына жақындау туралы ескерту жеке қорғаныс шараларын алдын ала қабылдауға және созылмалы аурулардың өршу қаупін азайтуға 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 стратегиясын жасау» жобасы бойынша.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. Ассанов, Д., және басқалар. Өнеркәсіптік қаланың атмосфералық ластануын кеңістіктік және уақытша талдау — Усть-Каменогорск қаласындағы жағдайды зерттеу / Д. Ассанов, М. К. Қожахметов, А. Р. Қасымов, т.б. // Атмосфера журналы. – 2022. – Т. 13, мақала 1956.
2. Темірбеков, Н., және басқалар. Ластаушы заттардың фотохимиялық трансформациясын атмосфералық модельдеу: Усть-Каменогорск қаласындағы метеорологиялық жағдайлар мен тәуліктік циклдің әсері / Н. Темірбеков, Е. Молғаждаров, Д. Тамабай, А. Темірбеков. // Инженерлік мәселелерді математикалық модельдеу журналы. – 2023. – Т. 10, № 5, 1699–1705 б.
3. Луши Е. Бірнеше нүктелік көздерден атмосфераға ластанушы заттардың шығарылымын бағалау үшін кері Гаусс шлейф әдісі / Е. Луши, Дж. М. Стоки // Атмосфералық орта. – 2010. – Т. 44, № 8. – Б. 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.024>
4. Сюй Ц. Көпқабатты температуралық инверсия құрылымдары және олардың ауа сапасына ықтимал әсері / Ц. Сюй, Ц. Ли, С. Ли, Ы. Чжан // Жалпы ортаның ғылымы. – 2020. – Т. 730. – Б. 139065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139065>
5. Фэн С. Атмосфералық шекаралық қабаттағы температуралық инверсиялар және олардың Сычуань бассейніндегі ауа ластануына әсері / С. Фэн, С. Вэй, С. Ван // Жалпы ортаның ғылымы. – 2020. – Т. 730. – Б. 139065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139065>
6. Хан Ж. Қалалық ауа сапасын талдау үшін машиналық оқыту: шолу / Ж. Хан, У. Чжан, Х. Лиу, Х. Сюн // arXiv препринті arXiv:2310.09620. – 2023. – Б. 44. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.09620>
7. Чо Э. Қалалық орталарда PM2.5 концентрациясына метеорологиялық факторлардың әсері / Э. Чо, С. Ким // Қоршаған ортаны зерттеу және қоғамдық денсаулық халықаралық журналы. – 2021. – Т. 18, № 14. – Б. 7504. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147504>
8. Лин Х. Жұқа бөлшекті ауа ластануы және артериалдық қысым / Х. Лин және басқалар // Hypertension. – 2017. – Т. 69, № 5. – Б. 806–812. <https://doi.org/10.1161/hypertensionaha.116.08834>
9. Лелиевелд Ж. Амбиенттік ауа ластануынан дәрігерлік аурулардың ауыртпалығы: жаңа қауіп коэффициентте-

рі арқылы қайта бағалау / Ж. Лелиевелд және басқалар // Nature. – 2015. – Т. 525, № 7569. – Б. 367–371. – <https://doi.org/10.1038/nature15371>.

- 10 Мухопадхьяй А. Өнеркәсіптік аймақтарда бөлшектік ластануды азайтудың тұрақты стратегиялары / А. Мухопадхьяй және басқалар // Environmental Development and Sustainability. – 2014. – Т. 16, № 1. – Б. 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9477-y>

REFERENCES

1. Assanov, D., et al. Spatiotemporal Patterns of Air Pollution in an Industrialised City—A Case Study of Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan / D. Assanov, M. K. Kozhakhmetov, A. R. Kasyma, et al. // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13, Article 1956. – [MDPI].
2. Temirbekov, N., et al. Atmospheric Modelling of Photochemical Transformations of Pollutants: Impact of Weather Conditions and Diurnal Cycle (Case Study: Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan) / N. Temirbekov, Y. Malgazhdarov, D. Tamabay, A. Temirbekov // Mathematical Modelling of Engineering Problems. – 2023. – Vol. 10, Issue 5, P. 1699–1705.
3. Lushi E. An inverse Gaussian plume approach for estimating atmospheric pollutant emissions from multiple point sources / E. Lushi, J. M. Stockie // Atmospheric Environment. – 2010. – Vol. 44, No. 8. – P. 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.024>
4. Xu X. Multilayer temperature inversion structures and their potential impact on air quality / X. Xu, Q. Li, C. Li, Y. Zhang // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 730. – Art. 139065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139065>
5. Feng X. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and their impact on air pollution in the Sichuan Basin / X. Feng, S. Wei, S. Wang // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 730. – Art. 139065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139065>
6. Han J. Machine Learning for Urban Air Quality Analytics: A Survey / J. Han, W. Zhang, H. Liu, H. Xiong // arXiv preprint arXiv:2310.09620. – 2023. – P. 44. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.09620>
7. Cho E. Impact of Meteorological Factors on PM2.5 Concentrations in Urban Environments / E. Cho, S. Kim // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18, No. 14. – Art. 7504. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147504>
8. Lin H. Fine particulate air pollution and hypertension / H. Lin et al. // Hypertension. – 2017. – Vol. 69, No. 5. – P. 806–812. <https://doi.org/10.1161/hypertensionaha.116.08834>
9. Lelieveld J. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions / J. Lelieveld et al. // Nature. – 2015. – Vol. 525, No. 7569. – P. 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
10. Mukhopadhyay A. Sustainable strategies for particulate pollution mitigation in industrial regions / A. Mukhopadhyay et al. // Environmental Development and Sustainability. – 2014. – Vol. 16, No. 1. – P. 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9477-y>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

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

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

² АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: a.a.zhadyranova@gmail.com

В статье рассматривается численное моделирование динамики загрязняющих веществ в атмосфере города Усть-Каменогорска с акцентом на частицы PM_{2.5}, выделяемые Усть-Каменогорским металлургическим заводом (УМЗ). Моделирование проводится с использованием современных методов, учитывающих влияние метеорологических условий, топографических особенностей и антропогенных источников загрязнения. Особое внимание уделяется оценке концентраций PM_{2.5} в различные сезоны года, а также анализу их влияния на качество воздуха и здоровье населения. Результаты моделирования помогают выявить ключевые зоны загрязнения и оценить эффективность мер по снижению эмиссии. Сравнение с данными других месяцев года показывает сезонные колебания концентраций PM_{2.5}, что позволяет точнее прогнозировать воздействие загрязняющих компонентов в зависимости от времени года.

Ключевые слова: численное моделирование, загрязнение воздуха, PM_{2.5}, Усть-Каменогорск, метеорологические условия, качество воздуха, УМЗ.

NUMERICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF POLLUTANT PARTICLES
IN THE ATMOSPHERE OF UST-KAMENOGORSK

A. A. Zhadyranova^{1*}, K. Sh. Zhumadilov¹, Д. К. Anshokova¹,
Zh. A. Baigazinov², N. Zh. Mukhamediarov²

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

² *JSC “Park of Nuclear Technologies”, Kurchatov, Kazakhstan*

** E-mail for contacts: a.a.zhadyranova@gmail.com*

The article presents a numerical modeling study of the dynamics of pollutant particles in the atmosphere of Ust-Kamenogorsk, with a focus on PM_{2.5} emissions from the Ust-Kamenogorsk Metallurgical Plant (UKMP). The modeling employs advanced techniques that account for meteorological conditions, topographical features, and anthropogenic pollution sources. Special attention is given to estimating PM_{2.5} concentrations across different seasons and analyzing their impact on air quality and public health. The modeling results aid in identifying key pollution hotspots and evaluating the effectiveness of emission reduction measures. Comparison with data from other months reveals seasonal variations in PM_{2.5} levels, enabling more accurate forecasts of pollutant impacts depending on the time of year.

Keywords: *numerical modeling, air pollution, PM_{2.5}, Ust-Kamenogorsk, meteorological conditions, air quality, UKMP.*