



NATIONAL UNIVERSITY OF MONGOLIA
SCHOOL OF ARTS AND SCIENCES
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

Geographical Issues

Газарзүйн асуудлууд

Volume 26 (02)

ISSN: 2312-8534

2026

Ulaanbaatar

Spatiotemporal Pattern Dynamics of Air Pollution in Ulaanbaatar Using Sentinel 5P Satellite Data

Delgermaa Munkhtsetseg^{1,2}, Byambakhuu Gantumur^{1,2*}, Munkhzul Munkhbat^{1,2}

¹ Department of Geography, School of Arts and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 210646, Mongolia

² Laboratory of Geo-Informatics /GEO-iLAB/, Graduate School, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 210646, Mongolia

* Corresponding author: byambakhuu@num.edu.mn

Received: 2026.02.12

Revised: 2026.03.15

Accepted: 2026.03.19

Abstract

Ulaanbaatar is characterized by severe air pollution during the winter season due to meteorological and geographical conditions such as frequent temperature inversions, low wind speeds, and its basin-shaped topography, which favors the accumulation of pollutants. In addition, emissions from household coal combustion, thermal power plants, and increasing vehicle traffic significantly affect the city's air quality. Therefore, a comprehensive assessment of the spatial distribution and temporal variability of major air pollutants is essential for effective air quality management. In this study, Sentinel-5P (TROPOMI) satellite observations from the winter seasons (November–February) of 2018–2024 were used to evaluate the spatial distribution and temporal dynamics of nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), ozone (O₃), and the Absorbing Aerosol Index in Ulaanbaatar. Daily satellite products were processed using temporal averaging to generate monthly mean raster datasets. The spatial patterns of air pollutants were analyzed through spatial mapping and statistical methods, including boxplot analysis. The results indicate that NO₂, CO, and the Aerosol Index exhibit high concentrations in central urban districts, densely populated ger areas, around thermal power plants, and along major transportation corridors. In contrast, ozone (O₃) concentrations remain relatively low and stable during winter due to reduced photochemical activity. Furthermore, a temporary decrease in pollutant concentrations was observed during the COVID-19 lockdown period, followed by an increasing trend after economic activities resumed. This study demonstrates that satellite-based observations provide valuable information for developing spatial air pollution monitoring systems, identifying pollution hotspots, and supporting evidence-based urban air quality management and policy development in Ulaanbaatar.

Keywords: Air pollution, Sentinel-5P, Tropomi, Nitrogen dioxide, Carbon monoxide, Ozone, Absorbing aerosol index, Ulaanbaatar

Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлыг хиймэл дагуулын Sentinel 5P мэдээ ашиглан орон зай, цаг хугацааны тархалтын динамикийг зураглах асуудалд

©Мөнхцэцэг Дэлгэрмаа^{1,2}, Гангөмөр Бямбахуу^{1,2*}, Мөнхбат Мөнхзул^{1,2}

¹Газарзүйн тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар 210646, Монгол Улс

²Зайнаас тандан судлал, газарзүйн мэдээллийн системийн судалгааны лаборатори, Ахисан түвшиний сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар 210646, Монгол Улс

*Харилцагч зохиогч: byambakhuu@num.edu.mn

Хүлээн авсан: 2026.02.12

Засварласан: 2026.03.15

Зөвшөөрөгдсөн: 2026.03.19

Хураангуй

Улаанбаатар хот нь өвлийн улиралд температурын инверсийн өндөр давтамж, салхины хурд бага, хөндий хэлбэрийн рельеф зэрэг цаг уур газарзүйн нөхцөлөөс шалтгаалан агаарын бохирдол хуримтлагдах онцлогтой. Үүнээс гадна ахуйн нүүрсний шаталт, дулааны цахилгаан станцууд болон авто тээврийн ялгаруулалт нь хотын агаарын чанарт хүчтэй нөлөө үзүүлдэг. Иймээс агаарын бохирдуулагч бодисуудын орон зайн тархалт болон цаг хугацааны өөрчлөлтийг иж бүрэн үнэлэх нь агаарын чанарын удирдлагад чухал ач холбогдолтой юм. Энэхүү судалгаанд Sentinel-5P (TROPOMI) хиймэл дагуулын 2018–2024 оны өвлийн улирлын (11–2 сар) өгөгдлийг ашиглан Улаанбаатар хотын азотын давхар исэл (NO_2), нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO), озон (O_3) болон шингээгч аэрозолын индекс (Aerosol Index)-ийн орон зайн тархалт, цаг хугацааны динамикийг үнэлэв. Өдөр тутмын хиймэл дагуулын бүтээгдэхүүнийг хугацааны дундаж аргаар боловсруулж сарын дундаж raster өгөгдөл болгон нэгтгэв. Бохирдуулагч бодисуудын тархалтын хэв шинжийг орон зайн зураглал болон статистик шинжилгээ (boxplot) ашиглан үнэлсэн. Судалгааны үр дүнгээс харахад NO_2 , CO болон Aerosol Index нь хотын төвлөрсөн бүсүүд, гэр хорооллын нягт суурьшлын бүс, дулааны цахилгаан станцуудын орчим болон гол авто замын дагуу өндөр агууламжтай илэрч байна. Харин O_3 -ны агууламж өвлийн улиралд харьцангуй тогтвортой, бага түвшинд хадгалагдаж байгаа нь фотохимийн урвалын идэвхжил багатай байдалтай холбоотой байна. Мөн COVID-19 цар тахлын үеийн хөдөлгөөний хязгаарлалтын хугацаанд зарим бохирдуулагч бодисын агууламж буурч, эдийн засгийн үйл ажиллагаа хэвийн байдалдаа илжжсэнээс хойш дахин өсөх хандлага ажиглагдсан. Энэхүү судалгаа нь хиймэл дагуулын өгөгдөлд суурилсан агаарын бохирдлын орон зайн мониторингийг хөгжүүлэх, бохирдлын өндөр төвлөрөл бүхий бүсүүдийг тодорхойлох, хотын агаарын чанарын бодлого боловсруулахад чухал мэдээлэл өгөх боломжтойг харуулж байна.

Түлхүүр үгс: Агаарын бохирдол, Sentinel-5, Tropomi, Азотын давхар исэл, Нүүрстөрөгчийн дутуу исэл, Озон, шингээгч аэрозолын индекс, Улаанбаатар хот

© Зохиогчийн оруулсан хувь нэмэр: М.Дэлгэрмаа, Г.Бямбахуу: Онолын үндэслэл, үндсэн бичвэр, өгүүллтийн эх бэлтгэл, арга зүй боловсруулалт, М.Мөнхзул: өгөгдөл боловсруулалт, өгөгдөл цуглуулалт, Үр дүнгийн хяналт.

2312-8534/© 2026 Зохиогчийн бүх эрх хуулиар хамгаалагдсан.

Оршил

Агаарын бохирдол нь азотын давхар исэл (NO_2), хүхрийн давхар исэл (SO_2), нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO), озон (O_3), дэгдэмхий органик нэгдлүүд болон $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} зэрэг тоосонцор агаар мандалд хуримтлагдан хүний эрүүл мэнд, экосистем, хотын орчны чанарт сөрөг нөлөө үзүүлэх түвшинд хүрэх үзэгдэл юм. Дэлхийн эрүүл мэндийн байгууллагын “Дэлхийн агаарын чанарын удирдамж - 2021”-аа гаргаж, NO_2 , O_3 , SO_2 , CO болон тоосонцрын эрүүл мэндийн эрсдэлийг өмнөхөөс илүү хатуу түвшинд үнэлсэн нь хот суурин газрын агаарын чанарын мониторингийг сайжруулах шаардлагыг улам тодорхой болгосон.

Улаанбаатар хотын хувьд өвлийн улиралд агаарын бохирдол эрчимжих нь хотын физик газарзүйн байрлал, цаг уурын нөхцөл, эрчим хүчний хэрэглээний бүтэцтэй нягт холбоотой. Уулсаар хүрээлэгдсэн хөндий төрхтэй рельеф, температурын инверсийн өндөр давтамж, салхины хурд бага байх нөхцөл нь бохирдуулагч бодисууд агаар мандлын доод давхаргад хуримтлагдах таатай орчныг бүрдүүлдэг. Үүн дээр төвлөрсөн халаалтын сүлжээнд бүрэн холбогдоогүй гэр хорооллын нүүрс, түлшний шаталт, дулааны цахилгаан станцуудын ялгаруулалт, авто тээврийн өсөлт нэмэгдэн нөлөөлснөөр өвлийн улиралд агаарын бохирдол тогтмол өндөр түвшинд хүрдэг. Улаанбаатарын агаарын бохирдлын эрүүл мэнд, нийгэм-эдийн засгийн нөлөөллийг дотоодын болон олон улсын байгууллагууд удаа дараа онцолж ирсэн.

Сүүлийн жилүүдэд агаарын чанарын судалгаанд хиймэл дагуулын ажиглалтын өгөгдлийг өргөн ашиглах болсон бөгөөд Европын Сансрын Агентлагийн Sentinel-5P хиймэл дагуул дээрх TROPOMI багаж нь агаар мандлын найрлагын үндсэн үзүүлэлтүүдийг дэлхийн хэмжээнд өндөр орон зайн нарийвчлалтай ажиглах боломж олгож байна. TROPOMI нь NO_2 , O_3 , SO_2 , CO болон аэрозолын бүтээгдэхүүнийг тогтмол гаргадаг тул хот суурин газрын бохирдлын орон зайн ялгаа, улирлын давтагдах хэв шинж, урт хугацааны өөрчлөлтийг судлахад онцгой ач холбогдолтой.

Олон улсын судалгаанууд Sentinel-5P өгөгдөл нь хотын агаарын чанарын өөрчлөлтийг илрүүлэхэд өндөр үр ашигтайг харуулсан. Тухайлбал, Lamsal et al. (2021) нь Sentinel-5P хиймэл дагуулын азотын давхар исэл (NO_2)-ийн тропосферийн баганан агууламжийг GEOS-Chem загвартай хослуулан гадаргын түвшний азотын давхар исэл (NO_2) концентрацийг тодорхойлох аргыг боловсруулж, үр дүн нь газрын суурин хэмжилттэй тохирч байгааг тогтоосон. Goldberg et al. (2019) болон Bauwens et al. (2020) нарын судалгаагаар азотын давхар исэл (NO_2) болон нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) өндөр агууламж нь гол төлөв зам тээврийн нягтрал ихтэй хотын бүсүүдэд төвлөрдөг бөгөөд хөдөлгөөнт эх үүсвэр буурах үед эдгээр бохирдуулагчийн түвшин мэдэгдэхүйц багасдаг болохыг харуулсан байна. Мөн Borsdorff et al. (2018) нь Sentinel-5P нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) бүтээгдэхүүнийг ашиглан дэлхийн олон хотод нүүрстөрөгчийн дутуу ислийн улирлын болон орон зайн тархалтыг үнэлж, өндөр агууламж нь түлшний шаталтын эх үүсвэртэй шууд холбоотойг тогтоосон.

Үүнээс гадна Theys et al. (2019) нь Sentinel-5P-ийн өгөгдөлд тулгуурлан цахилгаан станц болон үйлдвэрлэлийн бүсүүд орчимд хүхэрлэг хий (SO_2)-ийн өндөр агууламжтай бүсүүдийг илрүүлсэн бол Verhoelst et al. (2021) нь Sentinel-5P-ийн нийт озоны хэмжилтийг газрын станцын өгөгдөлтэй харьцуулан баталгаажуулж, хиймэл дагуулын озоны бүтээгдэхүүний найдвартай байдлыг нотолсон байна.

Монгол орны хувьд Ganbat et al. (2022) нь газрын мониторингийн хэмжилт болон Sentinel-5P өгөгдлийг хослуулан COVID-19 цар тахлын хөл хорионы үеийн Улаанбаатар хотын агаарын чанарын өөрчлөлтийг үнэлж, хөл хорионы хугацаанд азотын давхар исэл (NO_2) болон нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) агууламж мэдэгдэхүйц буурсныг тогтоосон. Энэ нь авто тээврийн хөдөлгөөний хязгаарлалт агаарын бохирдлын түвшинд шууд нөлөөлж байгааг харуулсан. Нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) тархалтын хувьд Enkhjargal et al. (2022) нь Sentinel-

5P-ийн өгөгдөлд тулгуурлан Улаанбаатар хотын өвлийн улирлын нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) баганын дундаж агууламжийг зураглаж, газар ашиглалтын регрессийн загвартай уялдуулан үнэлснээр хиймэл дагуулын мэдээлэл нь хотын дотоод орон зайн ялгааг тодорхойлох, CO-ийн өндөр агууламж бүхий “hotspot” бүсүүдийг илрүүлэхэд үр дүнтэй болохыг харуулсан. Үүнээс гадна Sentinel-5P ажиглалт болон inverse modeling аргыг ашиглан Улаанбаатар хотын өвлийн улирлын антропоген ялгарлын хэмжээг илүү нарийвчлалтай үнэлж, өмнө ашиглагдаж байсан ялгарлын тооцооллын сан нь бодит ялгарлыг дутуу үнэлэх хандлагатай байгааг тогтоосон. Энэ нь хиймэл дагуулын ажиглалтын мэдээлэл агаарын бохирдлын эх үүсвэрийн хэмжээг үнэлэхэд чухал ач холбогдолтойг харуулж байна.

Гэсэн хэдий ч Улаанбаатар хотын нөхцөлд озон (O₃) болон шингээгч аэрозолын индекс (Absorbing Aerosol Index, AAI)-ийн орон зайн тархалт, улирлын давтагдах хэв шинжийг хиймэл дагуулын өгөгдөлд тулгуурлан системтэйгээр үнэлсэн судалгаа харьцангуй хязгаарлагдмал хэвээр байна. Иймээс хиймэл дагуулын өгөгдлийг ашиглан эдгээр үзүүлэлтүүдийн өвлийн улирлын орон зайн болон цаг хугацааны өөрчлөлтийг хамтатган үнэлэх шаардлага байсаар байна.

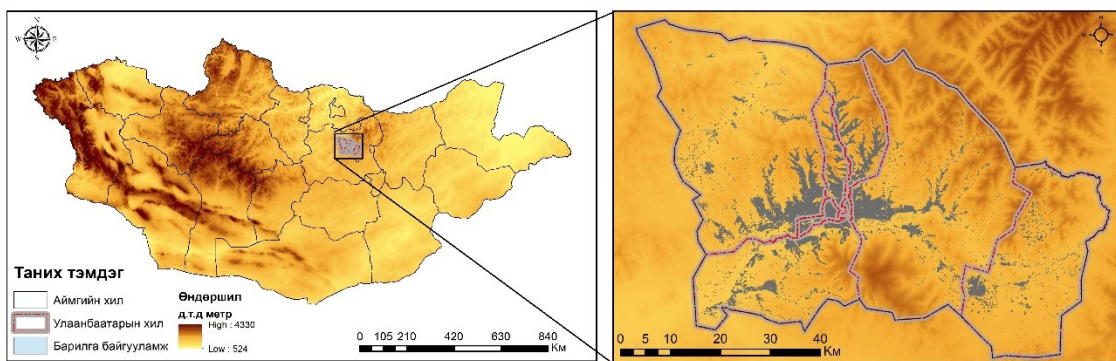
Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын талаар хийгдсэн өмнөх судалгаануудын ихэнх нь газрын мониторингийн станцын хэмжилт, бохирдуулагч бодисын химийн найрлага, эх үүсвэрийн бүтэц болон эрүүл мэндийн нөлөөлөлд төвлөрч ирсэн байдаг. Жишээлбэл, олон судалгаанд PM_{2.5} болон PM₁₀ тоосонцрын агууламж, химийн найрлага, эх үүсвэрийн хуваарилалт болон цаг уурын хүчин зүйлстэй хамаарлыг судалсан бол зарим судалгаанд газрын станцын мэдээлэлд тулгуурлан бохирдлын улирлын өөрчлөлтийг үнэлсэн байна. Гэсэн хэдий ч эдгээр судалгаанууд нь орон зайн хамрах хүрээ хязгаарлагдмал бөгөөд ихэвчлэн цөөн тооны мониторингийн станцын мэдээлэлд тулгуурладаг тул хотын хэмжээнд агаарын бохирдлын тархалтын нарийвчилсан орон зайн бүтэц бүрэн илэрхийлэгдэх боломж хязгаарлагдмал байдаг.

Харин энэхүү судалгаанд Sentinel-5P хиймэл дагуулын өгөгдлийг ашиглан Улаанбаатар хотын агаарын бохирдуулагч бодисуудын орон зайн тархалтыг олон жилийн хугацаанд системтэйгээр зурагласан нь өмнөх судалгаануудаас ялгарах онцлог юм. Хиймэл дагуулын өгөгдөл нь газрын станцын хэмжилтээс ялгаатайгаар хотын хэмжээнд тасралтгүй орон зайн хамрах хүрээг хангаж, бохирдлын тархалт өндөр бүсүүдийг илрүүлэх, бохирдлын төвлөрөл нь гэр хороолол, авто тээврийн замын сүлжээ болон дулааны цахилгаан станцын байршилтай хэрхэн уялдаж байгааг үнэлэх боломжийг олгодог.

Иймд хиймэл дагуулын зураглалд суурилсан энэхүү судалгаа нь Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын орон зайн динамикийг илүү өргөн цар хүрээтэй, системтэйгээр тодорхойлж, хотын агаарын чанарын мониторинг болон бохирдлыг бууруулах бодлогын шийдвэр гаргалтад шинжлэх ухааны чухал үндэслэл болох боломжтой.

Судалгааны талбай

Улаанбаатар хот нь Хэнтийн нурууны урд хэсэгт орших Баянзүрх, Богдхан, Сонгинохайрхан болон Чингэлтэй хайрхан уулсаар дөрвөн талаасаа хүрээлэгдсэн бөгөөд Туул, Сэлбэ голуудын бэлчирт орших Алтан тэвшийн хөндийд байрладаг (Баасантогтох, 2013; Доноров нар, 2021). Хотын дундаж өндөр нь далайн түвшнээс дээш 1300–1350 м орчим бөгөөд нийт 4704.4 км² нутаг дэвсгэрийг хамардаг (Nyam-Osor et al., 2024). Хотын бүтэц нь зүүн–баруун чиглэлд ойролцоогоор 40–45 км, умард–өмнөд чиглэлд 15–20 км тэлж суурьшсан онцлогтой (Gantumur et al., 2022; Yongzhen et al., 2022).



Зураг 1. Судалгааны талбайн байршил

Улаанбаатар хотын агаарын бохирдол нь нийгэм-эдийн засгийн өөрчлөлт, хотжилтын эрчимжилт, эрчим хүчний хэрэглээний бүтэц, мөн физик газарзүйн нөхцөл зэрэг хүчин зүйлсийн нийлмэл нөлөөгөөр олон жилийн хугацаанд үе шаттайгаар хуримтлагдсан үзэгдэл юм (World Bank, 2019; WHO, 2021). Хотын байршил нь уулсаар хүрээлэгдсэн хөндий хэлбэрийн рельефтэй тул өвлийн улиралд температурын инверс тогтмол үүсэж, агаарын босоо солилцоо саарах нөхцөл бүрддэг. Үүний улмаас бохирдуулагч бодисууд агаар мандлын доод давхаргад хуримтлагдаж, бохирдлын концентраци нэмэгдэх хандлагатай байдаг (World Bank, 2019; Soyol-Erdene et al., 2021).

Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын үүсэл, хөгжил нь нийгэм-эдийн засгийн өөрчлөлттэй нягт холбоотой бөгөөд үүнийг хөгжлийн хэд хэдэн үе шатанд авч үзэж болно.

1950–1980-аад оны үед төвлөрсөн аж үйлдвэржилт, дулааны цахилгаан станцуудын ашиглалт, төвлөрсөн халаалтын сүлжээнд холбогдоогүй гэр хорооллын тархалт нь агаарын бохирдлын эхлэл болсон хэдий ч тухайн үеийн хүн амын тоо болон автомашины хэрэглээ харьцангуй бага байсан тул бохирдлын түвшин өнөөгийнхөөс доогуур байжээ.

1990 оноос эхэлсэн зах зээлийн шилжилтийн үеэр хөдөө орон нутгаас нийслэл рүү чиглэсэн шилжилт хөдөлгөөн эрчимжиж, гэр хорооллын бүсүүд огцом тэлсэн. Төвлөрсөн халаалтын системд холбогдоогүй өрхийн тоо богино хугацаанд эрс нэмэгдэж, өрхийн дулааны хэрэгцээг хангахын тулд нүүрс болон хатуу түлшний хэрэглээ ихэссэн нь агаарын бохирдлын үндсэн шалтгаануудын нэг болсон (World Bank, 2019). Үүнтэй зэрэгцэн автомашины импорт нэмэгдэж, авто тээврийн ялгарлаас үүдэлтэй азотын давхар исэл (NO_2) болон нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO)-ийн хэмжээ өсөх хандлагатай болсон байна.

2000–2010 оны хооронд Улаанбаатар хотын агаарын бохирдол хамгийн хурдацтай өссөн үе гэж үздэг. Энэ хугацаанд гэр хорооллын өрхийн тоо огцом нэмэгдэж, түүхий нүүрсний хэрэглээ дээд түвшинд хүрсэнтэй холбоотойгоор агаар дахь нарийн ширхэгт тоосонцрын агууламж эрс өссөн байна. Газарзүйн хөндий хэлбэрийн рельеф болон өвлийн улиралд температурын инверсийн давтамж өндөр байдаг нөхцөлөөс шалтгаалан бохирдуулагч бодисууд хотын төв болон суурьшлын бүсүүдэд хуримтлагдаж, Улаанбаатар хот дэлхийн хамгийн их агаарын бохирдолтой хотуудын нэгээр тодорхойлогдож байв (UNICEF, 2018; World Bank, 2019).

2010–2020 оны хооронд Улаанбаатар хотод $\text{PM}_{2.5}$ болон PM_{10} -ын агууламж Дэлхийн эрүүл мэндийн байгууллагын зөвлөмжит хэмжээнээс 10–25 дахин давсан тохиолдлууд олон удаа бүртгэгдсэн нь агаарын бохирдол ноцтой түвшинд хүрснийг харуулж байна (WHO, 2021). Энэ хугацаанд агаарын бохирдолтой холбоотой амьсгалын замын болон зүрх судасны өвчлөл, дутуу нас баралт нэмэгдсэн тухай олон улсын болон дотоодын судалгаанууд мэдээлсэн байдаг (Lelieveld et al., 2015; WHO, 2021).

2020 оноос хойш Монгол Улсын Засгийн газар түүхий нүүрсний хэрэглээг хориглож, сайжруулсан шахмал түлш нэвтрүүлэх бодлогыг хэрэгжүүлснээр агаар дахь зарим

бохирдуулагчийн агууламж тодорхой хэмжээгээр буурсан гэж судалгаанууд мэдээлж байна (World Bank, 2022). Гэсэн хэдий ч автомашины тоо тасралтгүй өсөж, 2024 оны байдлаар Улаанбаатар хотод 700 мянга гаруй автомашин бүртгэгдсэн нь тээврийн ялгарлын нөлөө нэмэгдэхэд хүргэж байна. Мөн гэр хорооллын дэд бүтцийн шинэчлэл хангалтгүй байгаа нь агаарын чанарыг тогтвортой сайжруулахад саад болж байна.

Эдгээр нийгэм-эдийн засгийн болон физик газарзүйн хүчин зүйлсийн нийлмэл нөлөөгөөр Улаанбаатар хотын агаарын бохирдол өвлийн улиралд тогтмол өндөр түвшинд хүрдэг бөгөөд энэ нь хотын оршин суугчдын эрүүл мэнд, хүрээлэн буй орчин, тогтвортой хөгжлийн асуудалд ноцтой сорилт болж байна.



Зураг 2. Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын ерөнхий байдал (Шаргаморьт, Жигжид зуслан чиглэлээс авсан зураг, 2023.11.21)

Судалгааны өгөгдөл, арга зүй

Copernicus Sentinel-5 Precursor (S5P) хиймэл дагуул нь 2017 оны 10 дугаар сарын 13-нд хөөргөж, Европын холбооны Copernicus хөтөлбөрийн хүрээнд агаарын найрлага, агаарын чанар, уур амьсгал, озоны давхаргыг дэлхий даяар хянах анхны зориулалтын хиймэл дагуул болсон. Энэхүү дагуулын үндсэн зорилго нь 2017–2023 оны хооронд дэлхийн хэмжээнд агаарын өөрчлөлтийг өндөр нарийвчлалтайгаар хянах юм. Хөөргөсний дараах эхний зургаан сарын хугацаанд хиймэл дагуул болон газрын боловсруулах системүүдийг турших тусгай ажиллагаа явагдсан бөгөөд үндсэн үйл ажиллагаа 2018 оны 4 дүгээр сараас эхэлжээ (Copernicus Sentinel-5P mission overview, ESA, 2017).

Sentinel 5P дагуулын цорын ганц ачаа төхөөрөмж нь TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) бөгөөд уг багажийг Нидарланд улс Европын Сансрын Агентлагтай (ESA) хамтран хөгжүүлсэн (ESA, KNMI, 2018).

Хүснэгт 1. Хэмжилтийн долгионы мужууд

№	Спектрийн муж	Долгионы урт (нм)	Хэмждэг бодис / үзүүлэлт	Үндсэн зориулалт
1	Хэт ягаан ба харагдах гэрэл (UV–VIS)	270 – 500 нм	NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , HCHO (формальдегид), Aerosol index, Cloud fraction	Агаарын чанар, озоны давхарга, тропосферийн бохирдол, гэрэл шингээлт ба тархалт
2	Ойролцоох хэт улаан (NIR)	710 – 770 нм	O ₂ -A band, Clouds, Surface albedo	Гадаргын тусгал, үүшлилт, газрын гадаргын тодорхойлолт

3	Богино долгионы хэт улаан (SWIR)	2314 – 2382 нм	СО (Нүүрстөрөгчийн дутуу исэл), СН ₄ (Метан)	Хүлэмжийн хий, түлш шаталтын гаралтай ялгарлыг тодорхойлох
4	Хэт ягаан (Deer UV, тусгай горим)	~270 – 320 нм	О ₃ (озон)	Озоны давхаргын босоо тархалтыг хэмжих

Хэмжилтийн зарчим: TROPOMI нь идэвхгүй алсын тандалт (passive remote sensing) юм. Энэ нь нарны гэрэл дэлхийн гадарга болон агаар мандлаас ойж туссан ба цацарсан цацрагийг хэмжих замаар мэдээлэл цуглуулдаг.

Ажиллах горим: **Push-broom** буюу нэгэн зэрэг өргөн зурвасаар зураг авах горимтой.

Гэрэл нь хоёр хэмжээст **дүрс мэдрэгч (detector)** дээр тархаж,

- Сенсорын зураглах чиглэлийн дагуу перпендукуляр өнцгөөр зурагладаг.
- нөгөө чиглэлд нь **долгионы урт буюу спектрийн мэдээлэл** тус тус дүрслэгддэг.

Хэмжиж буй дэлхийн зурвас нь:

- **2600 км өргөн (дагуулын хөндлөн чиглэлд)**
- **1 пиксэлийн хэмжээ 7 км (дагуулын нислэгийн чиглэлд)** байдаг.

Тасралтгүй хэмжилт эхэлдэг тул хиймэл дагуул дэлхийг тасралтгүй зураглаж, дэлхийн хэмжээнд өгөгдөл цуглуулдаг. (Copernicus Sentinel-5P mission overview, ESA, 2017)

Улаанбаатар хотын агаарын бохирдол тархалтыг орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлтийн зураглалыг доорх аргаар зурагласан. (Зураг 4).

Энэхүү судалгаанд Европын Сансрын Агентлагийн Sentinel-5P хиймэл дагуул дээр байрлах TROPOMI багажийн агаарын чанарын бүтээгдэхүүнүүдийг ашигласан. Судалгаанд азотын давхар исэл (NO₂), нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO), озон (O₃) болон шингээгч аэрозолын индекс (Aerosol Index)-ийн өдөр тутмын Level-2 өгөгдлийг ашиглав.

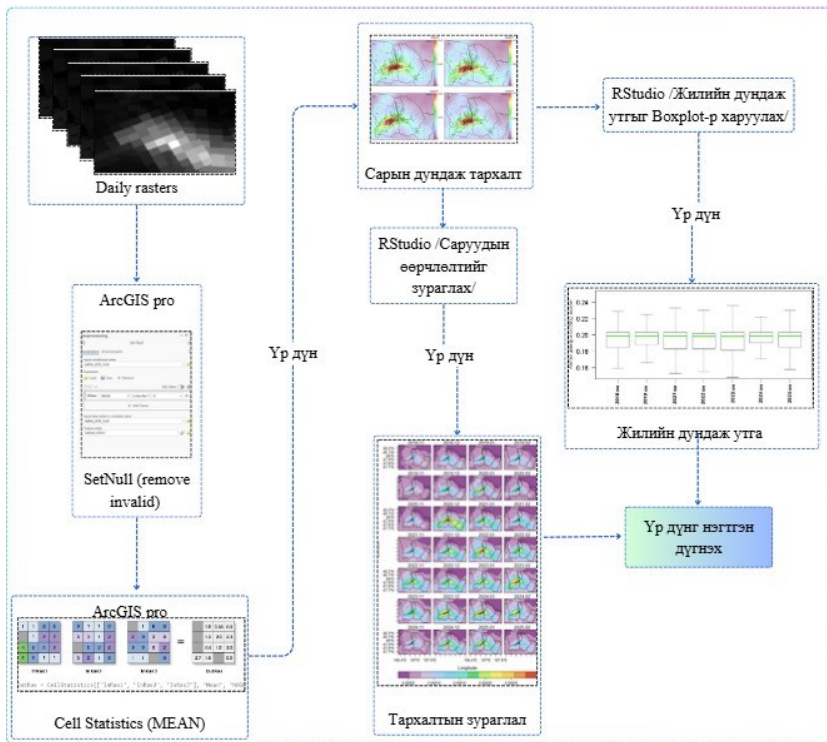
2018–2024 оны өвлийн улиралд хамаарах (11–2 сар) хиймэл дагуулын бүх ажиглалтыг шүүн авч, тухайн сарын дундаж утгыг хугацааны дундаж (temporal averaging) аргаар тооцоолов. Сарын дундажийг дараах томъёогоор илэрхийлнэ.

$$M_{Mean} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (1)$$

Энд:

- X_i = Тухайн өдрийн пикселийн утга, n = тухайн сард байгаа нийт зургий тоо юм.

Сарын дундаж raster өгөгдлүүдийг газарзүйн мэдээллийн системийн (GIS) орчинд боловсруулж, бохирдуулагч бодисуудын орон зайн тархалтыг зураглав. Мөн олон жилийн тархалтын өөрчлөлтийг үнэлэх зорилгоор статистик шинжилгээ хийж, boxplot аргаар тархалтын медиан болон хэлбэлзлийг харьцуулан үнэлэв.



Зураг 3. Судалгааны арга зүйн бүдүүвч

Судалгааны үр дүн

Азотын давхар исэл (NO₂)

Судалгааны үр дүнгээс харахад азотын давхар исэл (NO₂) орон зайн тархалт нь хотын төвлөрсөн бүс болон дулааны цахилгаан станцуудын орчимд тогтмол өндөр утгаар илэрч, дундаж үзүүлэлтүүд 7 жилийн хугацаанд тогтвортой өндөр түвшинд байгаа нь суурь ялгарлын эх үүсвэрүүдийн тогтмол нөлөөллийг илтгэж байна.

2018–2024 оны өвлийн улирлын азотын давхар исэл (NO₂) тархалтын зураглалд Улаанбаатарын агаарын бохирдлын голомт нь жил бүр тогтвортой давтагдаж, хамгийн өндөр эх үүсвэр нь ТЭЦ-3, ТЭЦ-4 болон төв замын дагуу байгаа бөгөөд гэр хорооллын ихтэй Баянхошуу, Хайлааст, Толгойт, Шар хад, Дамбадаржаа зэрэг бүсүүдэд нүүрс /түлш/-ний хэрэглээнээс шалтгаалан тогтмол өндөр утгатай байна. Мөн баруунаас зүүн чиглэлийн салхины нөлөөгөөр зүүн Улаанбаатар хуримтлалын гол бүс болжээ.

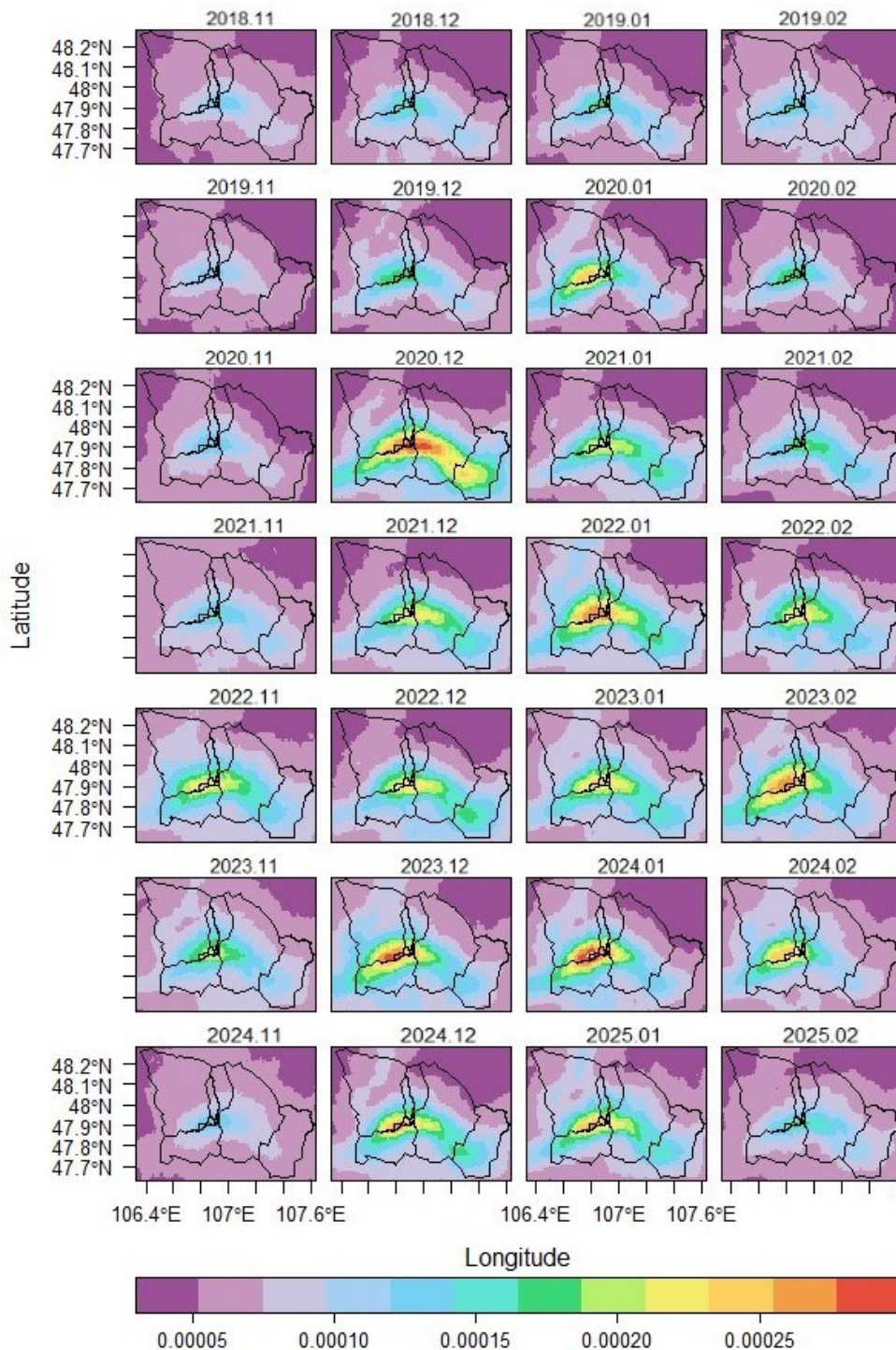
Жилийн динамик өөрчлөлтөөс харахад 2018 онд бохирдлын оргил шинж илэрч, 2019 онд харьцангуй буурсан бол 2020 онд COVID-19-ийн улмаас авто тээврийн хөдөлгөөн эрс багасан нь тархалтыг хамгийн бага түвшинд хүргэсэн. Харин 2021 оноос өсөлт дахин ажиглагдаж, ялангуяа 2023 онд ДЦС-уудын орчимд хамгийн өргөн бөгөөд өндөр утга 0.2мол/м² үүссэн байна. 2024 онд бохирдол бага зэрэг буурсан ч төвийн болон зүүн бүсийн хуримтлал үргэлжилж, Яармаг орчимд авто тээврийн өсөлтөөс шалтгаалсан шинэ хуримтлал илэрч байна (Зураг 5).

11-р сар: NO₂-ийн өндөр утгууд хотын төв орчимд төвлөрсөн байдалтайгаар илэрч, төвөөс зүүн болон баруун чиглэлд сунан тогтсон тархалт ажиглагдана. Энэ нь халаалтын улирал эхэлж байгаатай холбоотойгоор эх үүсвэрүүд идэвхжиж байгааг илэрхийлж байна.

12-р сар: Өндөр агууламжийн бүсийн талбай тэлж, төвийн хэсгээс гадна Баянгол–Хан-Уулын зааг болон Баянзүрхийн баруун хэсэгт нэмэгдсэн тархалт ажиглагдана.

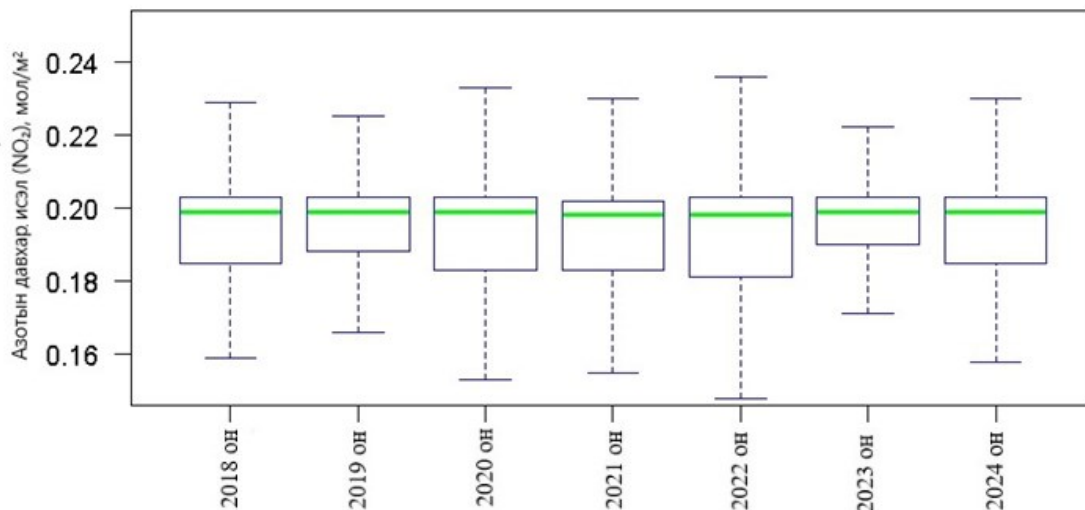
1-р сар: Бүх жилүүдэд хамгийн өргөн тархалттай, хамгийн өндөр утга хотын төв хэсгээр илэрч байна. Энэ нь өвлийн оргил хүйтний үед түлшний хэрэглээ хамгийн их байгаатай холбоотой.

2-р сар: 1-р сартай харьцуулахад зарим жилүүдэд өндөр утгын бүсийн хэмжээ бага зэрэг хумигдах хандлагатай боловч хотын төвд төвлөрөх хэв шинж хэвээр байна.



Зураг 4. Улаанбаатар хотын 2018-2024 оны 11- 2 сарын азотын давхар исэл (NO₂) тархалтын зураглал

Boxplot статистикийн үр дүн эдгээр зураглалын ажиглалтыг бүрэн баталгаажуулж, 7 жилийн турш медиан утга 0.19–0.2 мол/м² орчим тогтвортой хэвээр байх нь Улаанбаатарын өвлийн NO₂ бүтцийн хувьд буураагүйг нотолж байна.



Зураг 5. Азотын давхар исэл (2018-2024)

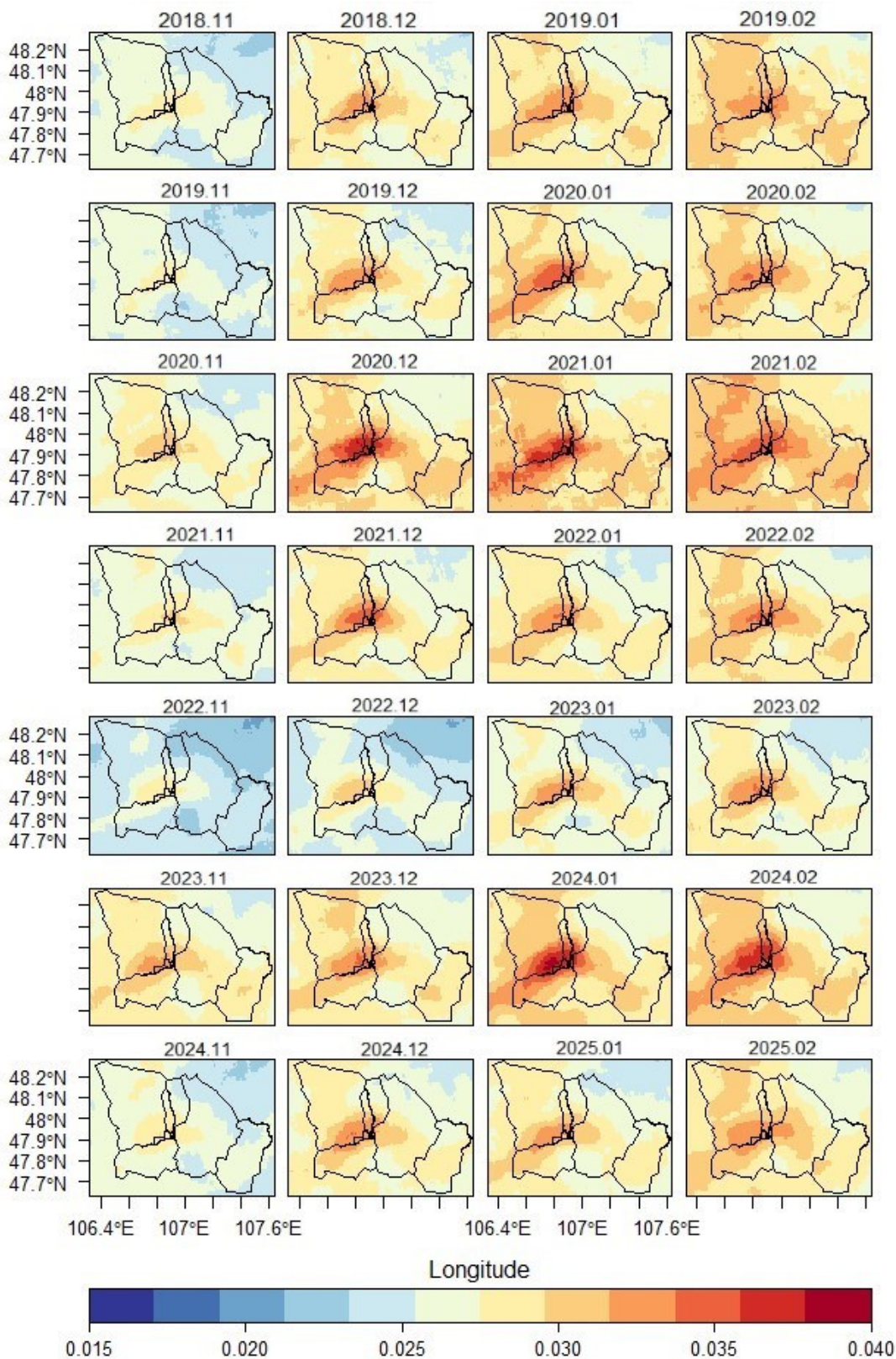
Хүхэрийн давхар исэл (SO₂) буюу хүхэрлэг хий

2018–2024 оны өвлийн улирлын хүхрийн давхар ислийн (SO₂) сарын дундаж тооцооллын үед зарим пикселүүдэд (valid) ажиглалтын утга байхгүйгээс шалтгаалан математик хуваалтын алдаа (division by zero) үүсэж, floating-point infinity (inf) болон хамгийн бага double утга (-1.79769e+308) илэрч байна. Энэ нь тухайн орон зайд тухайн хугацаанд чанарын шалгуур (QA filter) хангаагүй эсвэл өгөгдөл бүрэн байхгүй.

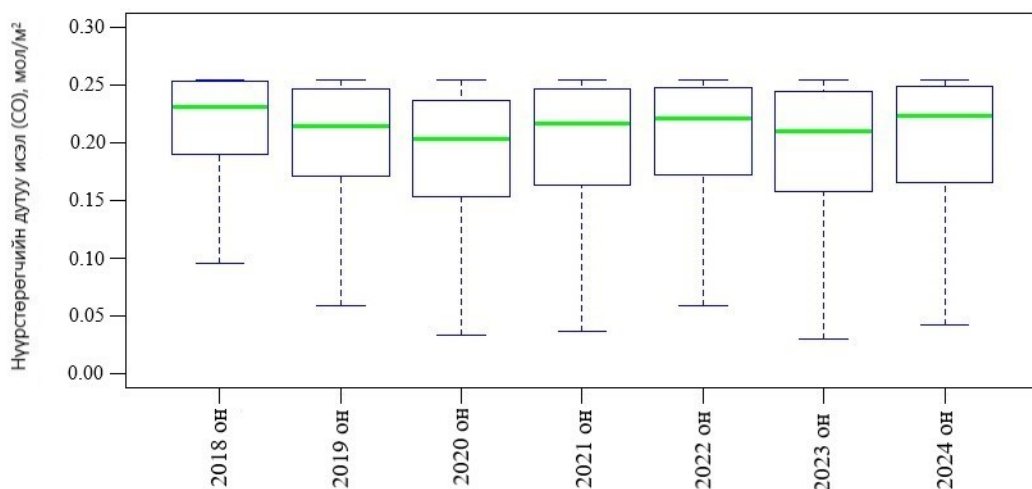
Нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) буюу угаарын хий

2018–2024 оны өвлийн улирлын Нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) сарын дундаж тархалтын зураглалуудыг харьцуулахад, бүх жилүүдэд хотын төвийн бүс, үндсэн хөндийн тэнхлэг, гэр хорооллын нягт суурьшлын бүс, хотын төвийн хонхор хотгор рельефтэй хэсгүүдэд өндөр агууламж тогтвортой байна. 2020 онд CO-н хамгийн бага түвшинд хүрч, улмаар 2022 оноос эхлэн өсөх хандлага ажиглагдсан нь тээврийн хэрэгслийн хөдөлгөөний эрчим дахин нэмэгдсэнтэй уялдаж байна. Энэ нь нүүрстөрөгчийн дутуу исэл болон азотын давхар исэл нь ижил төстэй эх үүсвэрээс үүдэлтэй, хоорондоо уялдаа холбоотой бохирдуулагчид болохыг харуулж байна.

11-р сард бохирдол үүсэж эхэлж хотын төвөөр өндөр агууламжууд нэмэгдэж хамрах хүрээ нь харьцангуй бага, 12-р сард өндөр агууламжтай бүсийн талбай мэдэгдэхүйц тэлж суурьшлын бүсүүд рүү тархсан, 1-р сард оргилдоо хүрч өндөр агууламжтай бүсийн талбай мэдэгдэхүйц тэлж байна. 2-р сард өндөр түвшинд хадгалагддаг улирлын хэв шинж бүх жилд давтагдсан нь өвлийн улиралд ахуйн түлшний шаталт болон температурын инверси нүүрстөрөгчийн дутуу исэл хуримтлалд голлох нөлөө үзүүлж байгааг нотолж байна (Зураг 6).



Зураг 6. Улаанбаатар хотын 2018-2024 оны 11-02 сарын Нүүрстөрөгчийн дутуу ислэл (CO) тархалтын зураглал



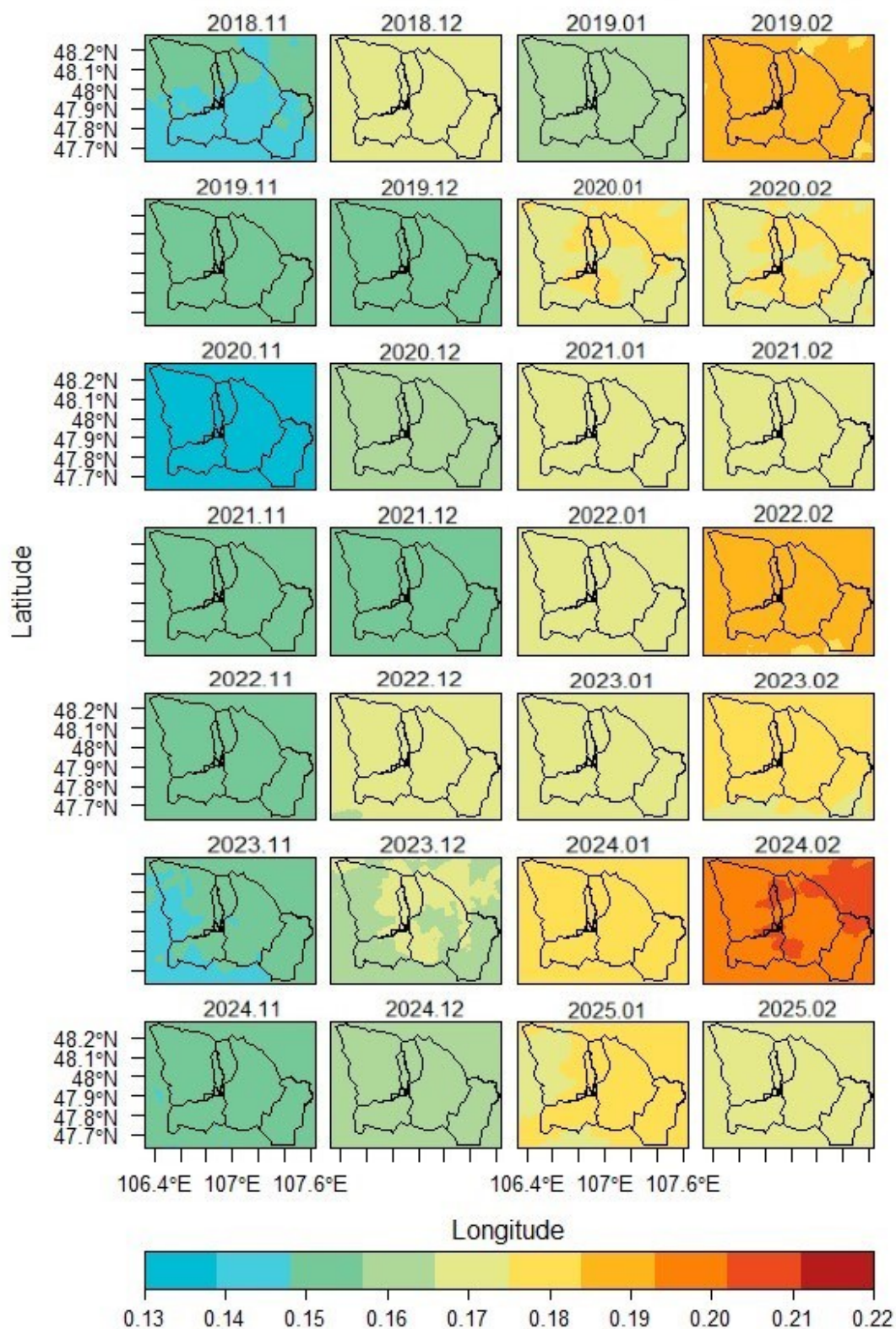
Зураг 7. Нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) /2018-2024/

Улаанбаатар хотын хэмжээнд CO агууламж олон жилийн турш харьцангуй тогтвортой өндөр түвшинд хадгалагдаж, медиан утга ойролцоогоор 0.20–0.23 mol/m² орчимд хэлбэлзэж байна. 2018–2019 онуудад Улаанбаатар хотын орчим дахь CO агууламжийн медиан утга харьцангуй өндөр түвшинд байсан боловч жилийн доторх хэлбэлзэл харьцангуй бага байна. Харин 2020–2021 онуудад медиан утга тодорхой хэмжээгээр буурч, тархалтын буурсан нь COVID-19 цар тахлын үеийн хөдөлгөөний хязгаарлалт, үйлдвэрлэл болон тээврийн салбарын идэвхжил буурсантай холбоотой. 2022–2024 онуудад медиан утга дахин өсөхийн зэрэгцээ тархалтын хэлбэлзэл өргөссөн нь хөдөлгөөний хязгаарлалт хэвийн байдалдаа шилжиж, хүний үйл ажиллагааны эрчимжилт нэмэгдсэнийг илтгэнэ.

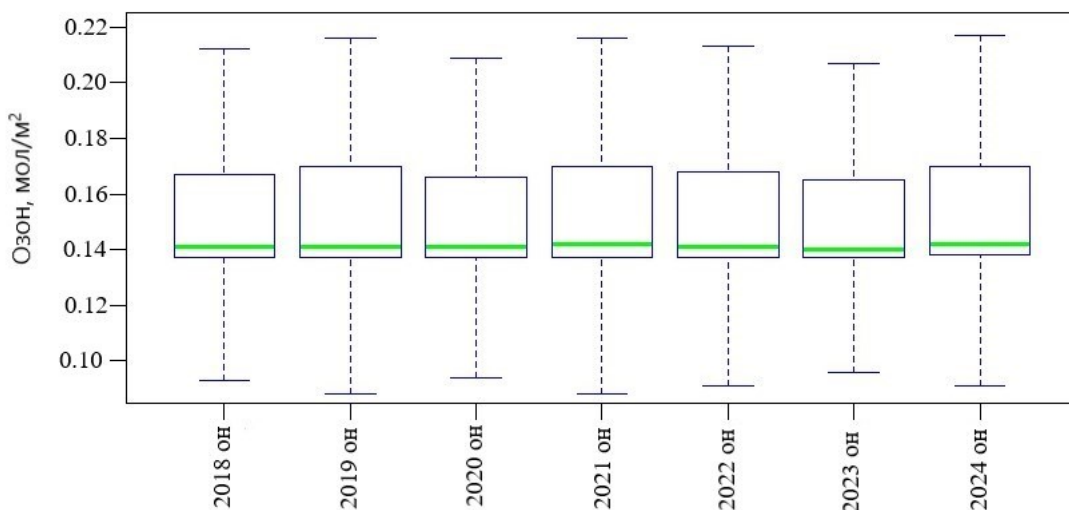
Озон (O₃)

2018–2024 оны өвлийн улирлын озон (O₃)-ы тархалтын үр дүнгээс харахад Улаанбаатар хотын хэмжээнд O₃-ийн агууламж харьцангуй бага түвшинд хадгалагдаж, жилүүдийн хооронд их хэмжээний огцом өөрчлөлт ажиглагдаагүй байна. Өвлийн улиралд нарны цацрагийн эрчим сул, фотохимийн урвалын идэвхжил багасдагтай холбоотойгоор O₃-ийн үүсэлт хязгаарлагдмал байдаг нь энэхүү үр дүнтэй нийцэж байна.

Орон зайн хувьд хотын төв болон бохирдуулагчийн эх үүсвэр ихтэй бүсүүдэд O₃-ийн утга харьцангуй бага, харин захын болон салхитай бүсүүдэд арай өндөр утга илэрч байна.



Зураг 8. Улаанбаатар хотын 2018-2024 оны 11-02 сарын озон (O₃) тархалтын зураглал



Зураг 9. Озоны жилийн дундаж /2018-2024/

2018–2025 оны өвлийн улирлын озон (O_3)-ы статистик үр дүнгээс харахад Улаанбаатар хотын хэмжээнд O_3 -ийн медиан утга ойролцоогоор 0.14 mol/m^2 орчимд хэлбэлзэж, судалгааны хугацаанд харьцангуй тогтвортой түвшинд хадгалагдаж байна. Жилүүдийн хооронд O_3 -ийн түвшинд их хэмжээний огцом өөрчлөлт ажиглагдаагүй.

Шингээгч аэрозолын индекс (Aerosol Index)

Шингээгч аэрозолын индекс (AAI) гэдэг нь агаар мандалд орших аэрозолуудын хэт ягаан туяаг шингээх шинж чанарт үндэслэн тооцоологддог индекс бөгөөд голчлон утаа, хар нүүрстөрөгч (black carbon), тоос, галт уулын үнс зэрэг шингээгч аэрозолуудын оршин байдал, тархалтыг илрүүлэхэд ашиглагддаг.

Ихэвчлэн дараах төрлийн аэрозолуудыг илрүүлдэг:

- Шаталтын гаралтай утаа (smoke)
- Хар нүүрстөрөгч (black carbon)
- Тоос (desert dust)
- Галт уулын үнс
- Үйлдвэрлэл, түлшний шаталтын аэрозол

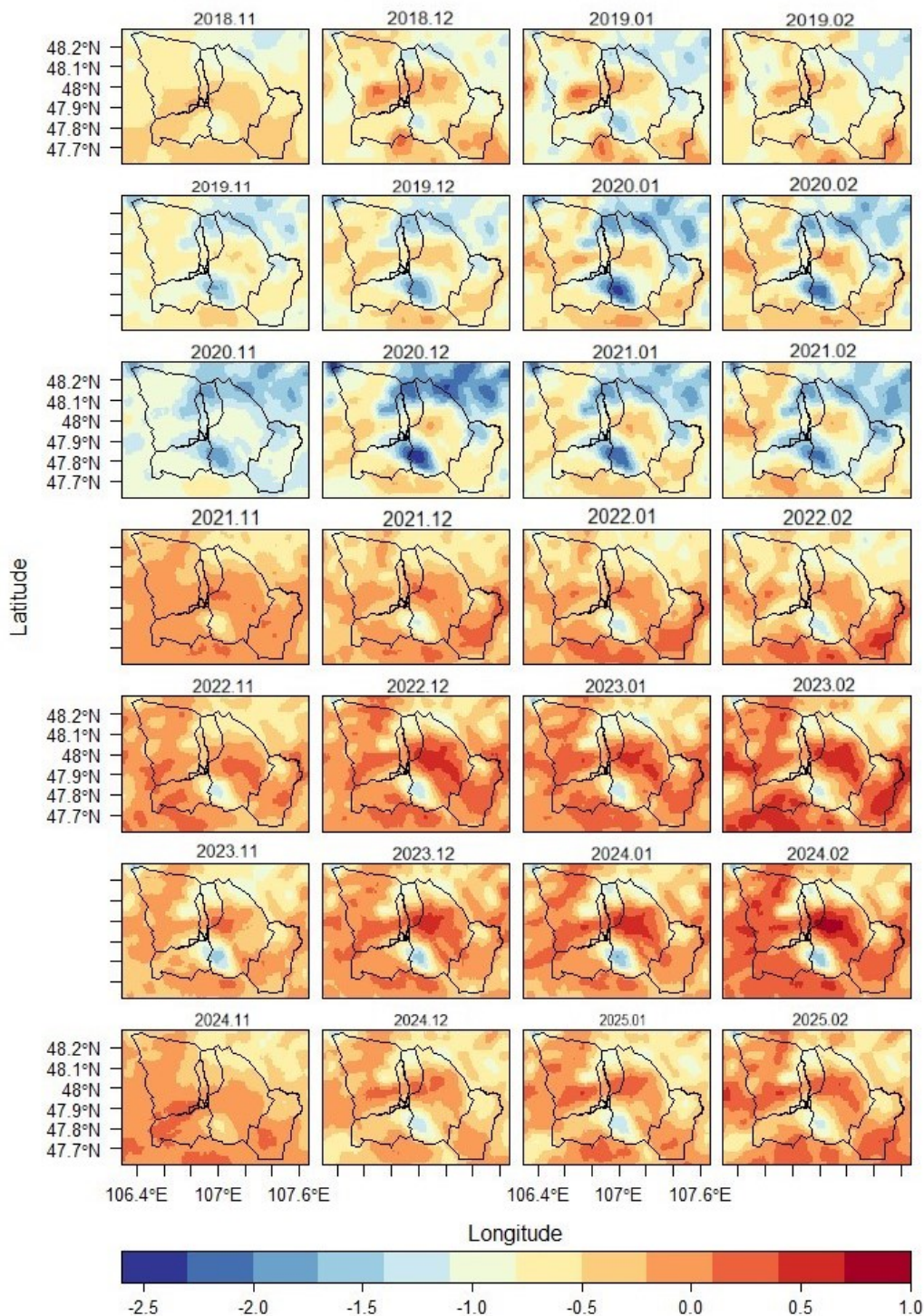
Sentinel-5P TROPOMI-ийн Absorbing Aerosol Index (AAI) нь шингээгч аэрозолын оршихуй, харьцангуй эрчмийг илэрхийлдэг нэгжгүй (dimensionless) индекс.

Хүснэгт 2. Утгын тайлбар

AI утга	Тайлбар
< 0	Цэвэр агаар, эсвэл шингээдэггүй аэрозол
0 – 1	Бага зэргийн шингээгч аэрозол
1 – 2	Дунд зэргийн
> 2	Их хэмжээний шингээгч аэрозол (утаа, тоос)
> 3	Хүчтэй утаа, тоосон шуурга, түймрийн утаа

Улаанбаатар хотын шингээгч аэрозолын индекс (Aerosol Index)-ийн орон зайн тархалт нь хотын төвлөрсөн бүсүүд, авто замын нягтаршилтай, дулааны цахилгаан станцуудын орчим болон гэр хороолол ихтэй бүсүүдэд тогтмол өндөр утгаар илэрч байна. Ялангуяа Баянхошуу, Хайлааст,

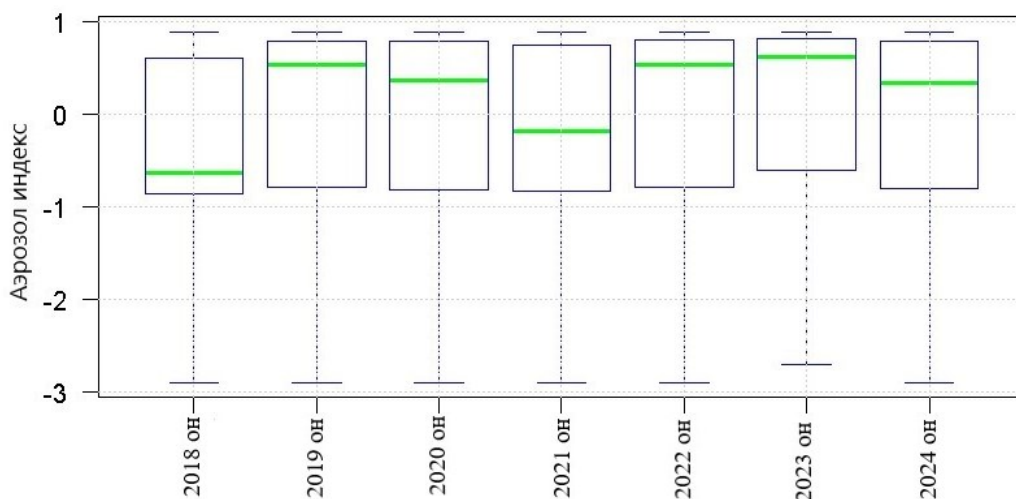
Толгойт, Шархад, Дамбадаржаа зэрэг хатуу түлшний хэрэглээ ихтэй бүсүүдэд аэрозолын хуримтлал давамгайлж ажиглагдаж, эдгээр нь шаталтын гаралтай шингээгч аэрозоол (утаа, тортог) голлон ялгарч байгааг илтгэнэ. Харин хотын захын болон салхитай, өндөрлөг хэсгүүдэд Aerosol Index харьцангуй бага утгатай байв.



Зураг 10. Улаанбаатар хотын 2018-2024 оны 11-02 сарын Аэрозоол индексийн тархалтын зураглал

Саруудын хоорондын өөрчлөлтөөс харахад 12 болон 1-р саруудад хамгийн өндөр, 11-р сард арай бага, 2-р сард харьцангуй буурах хандлагатай байна. Энэ нь халаалтын улирлын оргил үеэр түлшний хэрэглээ нэмэгдэж, температурын инверсийн давтамж ихэсдэгтэй холбоотой бөгөөд аэрозолын хуримтлал нэмэгдэх нөхцөлийг бүрдүүлнэ.

2018-2024 онд Aerosol Index-ийн дундаж түвшин харьцангуй тогтвортой хадгалагдаж байгаа нь Улаанбаатар хотод нүүрсний шаталтаас үүсэлтэй аэрозолын суурь эх үүсвэрүүд тасралтгүй нөлөөлж байгааг харуулж байна. Зарим жилүүдэд бага зэргийн бууралт ажиглагдсан ч нийт дундаж түвшинд огцом өөрчлөлт гараагүй нь агаарын бохирдлын асуудал суурь түвшинд хэвээр байгааг илтгэнэ.



Зураг 11. Аэрозол индексийн жилийн дундаж (2018-2024)

2018–2025 оны өвлийн улирлын шингээгч аэрозолын индекс (Aerosol Index)-ийн статистик үр дүнгээс харахад Улаанбаатар хотын хэмжээнд AI-ийн медиан утгууд ихэнх жилүүдэд тэгээс дээш буюу ойролцоогоор 0.3–0.6 орчимд хэлбэлзэж байна. Энэ нь өвлийн улиралд хотын агаар мандалд шингээгч аэрозол, тухайлбал утаа, тоос давамгайлж байгааг илтгэнэ.

2018 онд AI-ийн медиан утга сөрөг буюу харьцангуй бага түвшинд байсан бол 2019–2021 онд эерэг утгад шилжиж өссөн байна. 2022 онд медиан утга бага зэрэг буурч, тэг орчимд ойртсон бол 2023–2024 онд дахин өсөж, хамгийн өндөр утгууд ажиглагдсан. 2025 онд AI-ийн түвшин бага зэрэг буурсан боловч эерэг утгатай хэвээр байна.

COVID-19 цар тахлын өмнөх болон дараах үеийн харьцуулалт

2018–2019 онуудыг COVID-19-ийн өмнөх үе гэж үзвэл NO₂ болон CO-ийн медиан утга харьцангуй өндөр түвшинд байсан бөгөөд тархалтын хэлбэлзэл харьцангуй бага байна. Энэ нь тухайн үед хотын тээврийн урсгал, үйлдвэрлэл, үйлчилгээний салбар хэвийн түвшинд байсантай холбоотой.

2020–2021 онуудад COVID-19 цар тахлын улмаас хөдөлгөөний хязгаарлалт, үйлдвэрлэл болон тээврийн идэвхжил буурсны нөлөөгөөр NO₂ болон CO-ийн медиан утга тодорхой хэмжээгээр буурч, тархалтын хязгаар мэдэгдэхүйц хумигдсан байна. Энэ хандлага нь олон улсын судалгааны үр дүнтэй нийцэж байгаа бөгөөд цар тахлын үед хүний үйл ажиллагааны бууралт агаарын чанарт шууд эерэг нөлөө үзүүлснийг баталж байна.

AI-ийн хувьд мөн 2020–2021 онуудад сөрөг утга давамгайлж, аэрозолын шингээгч шинж чанар буурсан нь утааны ялгаруулалт багассантай холбоотой байж болзошгүй. Харин О₃-ийн медиан утга цар тахлын үед огцом буураагүй бөгөөд зарим саруудад харьцангуй тогтвортой эсвэл

бага зэрэг өссөн нь NO_2 -ийн бууралтаас шалтгаалсан фотохимийн тэнцвэрийн өөрчлөлттэй холбоотой байж болзошгүй.

2022–2024 онуудад эдийн засгийн үйл ажиллагаа хэвийн байдалдаа шилжихийн хэрээр NO_2 болон CO -ийн медиан утга дахин өсөж, тархалтын хүрээ өргөссөн нь тээврийн хөдөлгөөн нэмэгдсэнийг илтгэнэ. Үүний зэрэгцээ AI -ийн эерэг утга бүхий сарууд нэмэгдсэн нь утааны аэрозолын нөлөө дахин сэргэж байгааг харуулж байна.

Хэлэлцүүлэг

Судалгааны үр дүнгээс азотын давхар исэл, нүүрстөрөгчийн дутуу исэл болон Шингээгч аэрозолын индексийн орон зайн тархалт хоорондоо нягт уялдаатай байгаа нь эдгээр бохирдуулагчид шаталтын ижил төрлийн эх үүсвэрээс үүдэлтэйг илтгэнэ. Хотын төв болон гэр хорооллын бүсүүдэд азотын давхар исэл ба нүүрстөрөгчийн дутуу исэл медиан утга хотын захын бүсүүдтэй харьцуулахад дунджаар 25–40%-иар өндөр байгаа нь бохирдлын орон зайн төвлөрөл тодорхой байгааг харуулж байна. Мөн шингээгч аэрозолын индексийн эерэг утга давамгайлсан байдал нь шаталтын гаралтай шингээгч аэрозол, тухайлбал хар нүүрстөрөгч (black carbon)-ийн хувь нэмэр их байгааг илтгэж байна. Ийм төрлийн аэрозол нь эрүүл мэндэд ноцтой нөлөөтэй болохыг олон улсын судалгаанууд тогтоосон байдаг. (Cohen et al., 2017; WHO, 2021).

Цаг хугацааны динамикийн хувьд 12–1 дүгээр саруудад азотын давхар исэл (NO_2) болон нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO)-ийн сарын дундаж агууламж 11-р сартай харьцуулахад 15–30%-иар нэмэгдэж, харин 2-р сард 10–20%-иар буурсан нь халаалтын улирлын оргил үе болон температурын инверсийн давтамжтай уялдаж байна. Улаанбаатар хот нь уулсаар хүрээлэгдсэн хөндийд байрладаг тул өвлийн улиралд температурын инверс тогтмол үүсэж, агаарын босоо холилдолт сул болсноор бохирдуулагч бодисууд газрын гадаргад хуримтлагдах нөхцөл бүрддэг. Ийм топограф болон цаг уурын нөхцөл нь өвлийн улиралд агаарын бохирдол эрчимжих үндсэн хүчин зүйл болдгийг өмнөх судалгаанууд мөн тогтоосон байдаг (Wang et al., 2017; Guttikunda et al., 2020).

Энэ нь Улаанбаатар хотын өвлийн улирлын агаарын бохирдол нь зөвхөн ялгарлын эх үүсвэрээс гадна хотын газарзүй, атмосферийн тогтвортой нөхцөлтэй нягт холбоотойг харуулсан өмнөх судалгааны үр дүнтэй нийцэж байна. Тухайлбал, Улаанбаатарын хөндий хэлбэрийн рельеф, салхи багатай нөхцөл, мөн температурын инверсийн давхарга нь өвлийн улиралд атмосферийн тогтвортой байдал үүсгэж, бохирдуулагч бодисууд хотын төв хэсэгт удаан хугацаанд хуримтлагдах нөхцөлийг бүрдүүлдэг болохыг тогтоосон байна (Sumiya et al., 2022) Тухайн судалгаанд өвлийн улиралд салхигүй нөхцөл ажиглалтын 34–66%-д тохиолдож, температурын инверсийн улмаас агаарын холилдолт сулран бохирдол хотын төв хэсэгт удаан хугацаанд хадгалагддаг болохыг харуулжээ.

Нөгөө талаас, Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын эх үүсвэрийн бүтцийг авч үзвэл нүүрсний шаталт өвлийн улиралд бохирдлын гол хүчин зүйл хэвээр байна. Ялангуяа айл өрхийн зуух, дулааны цахилгаан станц болон бага оврын уурын зуухнууд нь агаарын бохирдлын үндсэн эх үүсвэрт тооцогддог. Ялгарлын тооцооллын судалгаануудын үр дүнгээс харахад тоосонцрын ялгарлын ойролцоогоор 36% нь дулааны цахилгаан станц, 25% нь айл өрхийн зуух, 17% нь бага оврын зуухнаас үүдэлтэй болохыг тогтоосон байдаг (Allen et al., 2013; Guttikunda et al., 2019). Иймээс өвлийн улиралд түлшний хэрэглээ нэмэгдэхийн хэрээр NO_2 , CO болон шаталтын гаралтай аэрозолын агууламж огцом нэмэгдэх хандлага ажиглагдаж байгаа бөгөөд энэ нь энэхүү судалгаанд илэрсэн бохирдуулагч бодисуудын улирлын өөрчлөлтийн хэв шинжтэй нийцэж байна.

Сүүлийн үеийн судалгаанууд Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын орон зайн тархалт нь хүн амын нягтрал, гэр хорооллын тархалт, хотын газрын ашиглалтын бүтэц болон авто тээврийн урсгалтай нягт холбоотой болохыг харуулсан. Жишээлбэл, машин сургалтын Random Forest загвар ашигласан судалгаанд $\text{PM}_{2.5}$ -ийн орон зайн тархалтыг $R^2 = 0.82$ нарийвчлалтай

тодорхойлсон нь бохирдлын орон зайн ялгааг өндөр нарийвчлалтай илрүүлэх боломжтойг харуулсан (Enebish et al., 2021). Мөн COVID-19 цар тахлын үеийн хөдөлгөөний хязгаарлалтын үед хиймэл дагуул болон газрын станцын мэдээлэлд тулгуурласан судалгаагаар NO₂ 45%, PM₁₀ 72%, PM_{2.5} 59% хүртэл буурсан нь хүний үйл ажиллагааны өөрчлөлт агаарын чанарт шууд нөлөөлж байгааг харуулсан (Ganbat et al., 2022).

Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын урт хугацааны чиг хандлагыг судалсан ажлуудад Хүхэрлэг хий болон PM_{2.5}-ийн агууламж тодорхой хэмжээгээр буурах хандлага ажиглагдсан боловч азотын давхар исэл болон бусад шаталтын гаралтай бохирдуулагч бодисууд тогтвортой хэвээр байгааг дурдсан байдаг. Мөн агаарын бохирдлын хугацааны цуваанд “long-memory” шинж илэрч байгаа нь бохирдлын түвшин богино хугацаанд огцом буурахгүй, харин урт хугацааны бодлогын арга хэмжээ шаардлагатайг харуулж байна (Ariunsaikhan et al., 2025).

Озон (O₃)-ын хувьд өвлийн улиралд харьцангуй тогтвортой, бага түвшинд хадгалагдаж байгаа нь фотохимийн урвалын идэвхжил багатай байдалтай холбоотой. NO₂ ихтэй орчинд озон задрах (NO titration) процесс давамгайлдаг тул өвлийн улиралд O₃-ийн агууламж харьцангуй бага байдаг. Энэ нь Улаанбаатар хотын өвлийн агаарын бохирдол нь хоёрдогч фотохимийн бохирдлоос илүүтэй шаталтын гаралтай анхдагч бохирдуулагчид давамгайлсан бүтэцтэй байгааг илтгэнэ. Ийм анхдагч бохирдуулагч давамгайлсан нөхцөл нь амьсгалын замын болон зүрх судасны өвчлөлийг нэмэгдүүлэх эрсдэлтэйг өмнөх судалгаанууд баталсан (Lelieveld et al., 2015; WHO, 2021).

Олон улсын туршлагаас харахад эх үүсвэрт чиглэсэн бүтцийн өөрчлөлт хамгийн үр дүнтэй арга хэмжээ болох нь нотлогдсон. БНХАУ-ын Бээжин хотод хэрэгжүүлсэн “Clean Air Action Plan”-ийн хүрээнд нүүрсний хэрэглээг бууруулж, цэвэр түлшинд шилжүүлсний үр дүнд NO₂ болон PM_{2.5}-ийн агууламж мэдэгдэхүйц буурсан (Zhang et al., 2019; Zheng et al., 2018). Мөн Европын хотуудад бага ялгарлын бүс (LEZ, ULEZ) хэрэгжүүлснээр зам дагуух NO₂ 10–40%-иар буурсан нь тээврийн бодлогын үр нөлөөг харуулсан (Holman et al., 2015).

Sentinel-5P хиймэл дагуулын өгөгдлийг ашигласнаар хотын хэмжээнд агаарын бохирдлын орон зайн тархалтыг тасралтгүй хамрах боломж бүрдэж, бохирдлын өндөр төвлөрөл бүхий бүсүүдийг тодорхойлох давуу талтай. Газрын мониторингийн станцын мэдээлэл нь өндөр нарийвчлалтай боловч орон зайн хамрах хүрээ хязгаарлагдмал байдаг бол хиймэл дагуулын ажиглалт нь хотын хэмжээнд жигд тархсан мэдээллийг олж авах боломжийг олгодог. Иймээс Sentinel-5P өгөгдөл нь газрын хэмжилттэй хослуулан ашиглахад агаарын бохирдлын орон зайн бүтэц болон цаг хугацааны өөрчлөлтийг илүү нарийвчлалтай үнэлэх боломжийг бүрдүүлдэг.

Иймээс Улаанбаатар хотын нөхцөлд агаарын бохирдлыг бууруулахад гэр хорооллын нүүрсний хэрэглээг үе шаттайгаар бууруулах, цахилгаан болон сэргээгдэх эрчим хүчний халаалтыг нэмэгдүүлэх, дулааны цахилгаан станцуудын ялгарлын хяналтыг сайжруулах, мөн авто тээврийн ялгарлын стандартыг боловсронгуй болгох зэрэг цогц арга хэмжээг зэрэг хэрэгжүүлэх шаардлагатай байна. Энэ хүрээнд хиймэл дагуулын ажиглалтын мэдээлэл нь агаарын бохирдлын орон зайн болон цаг хугацааны өөрчлөлтийг тасралтгүй хянах, мөн хэрэгжүүлж буй бодлого, арга хэмжээний үр нөлөөг үнэлэхэд чухал ач холбогдолтой юм.

Дүгнэлт

Энэхүү судалгаанд Sentinel-5P хиймэл дагуулын TROPOMI өгөгдлийг ашиглан Улаанбаатар хотын 2018–2024 оны өвлийн улирлын агаарын бохирдлын орон зай, цаг хугацааны динамикийг үнэлэв. Судалгааны үр дүнгээс азотын давхар исэл (NO₂), нүүрстөрөгчийн дутуу исэл (CO) болон шингээгч аэрозолын индекс (Aerosol Index) нь хотын төвлөрсөн бүсүүд, гэр хорооллын суурьшлын бүсүүд (Баянхошуу, Хайлааст, Толгойт, Шархад, Дамбадаржаа), дулааны цахилгаан станцуудын орчим болон авто замын дагуу өндөр агууламжтай тархаж байгааг тогтоов. Энэ нь ахуйн нүүрсний шаталт болон авто тээврийн ялгаруулалт Улаанбаатар хотын өвлийн агаарын бохирдлын үндсэн эх үүсвэр хэвээр байгааг илтгэнэ.

Цаг хугацааны шинжилгээнээс харахад бохирдлын түвшин 12–1 дүгээр саруудад хамгийн өндөр байж, өвлийн оргил хүйтний үед түлшний хэрэглээ нэмэгдэх болон температурын инверсийн давтамж ихсэхтэй холбоотой байна. Харин озон (O₃)-ы агууламж өвлийн улиралд харьцангуй бага, тогтвортой түвшинд хадгалагдаж байгаа нь фотохимийн урвалын идэвхжил багатай байдалтай холбоотой юм.

Иймээс Sentinel-5P хиймэл дагуулын өгөгдөл нь хотын хэмжээнд агаарын бохирдлын орон зайн тархалтыг үнэлэх, бохирдлын өндөр төвлөрөл бүхий бүсүүдийг тодорхойлох, агаарын чанарын менежментэд ашиглах боломжтой чухал мэдээллийн эх үүсвэр болохыг энэхүү судалгаа харуулж байна.

Талархал

Энэхүү судалгааг хийж гүйцэтгэхэд дэмжлэг үзүүлсэн МУИС-ийн ШУС болон Ахисан түвшний сургууль, Зайнаас тандан судлал, газарзүйн мэдээллийн системийн судалгааны лаборатори /GEO-iLAB/ болон “Эх Монголын Байгаль” ХХК-ийн хамт олонд талархал илэрхийлье.

Номзүй

1. Баасантогтох, О. (2013). Улаанбаатар хот: төвлөрөл ба асуудал. *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences*, 51-60.
2. Доноров, Д., Ганпүрэв, Д., Алтанболд, Э., Төгс-Эрдэнэ, Э., Энх-Амгалан, Д., Даваадорж, Д., Жаргалсайхан, Б. (2021). Барилгын сүүдэрлэлт, нарны шууд тусгал, эрчим хүчний хэрэглээний харилцан хамаарал (Орон сууцны хорооллын жишээн дээр). *Geographical Issues*, 21(1), 59-75.
3. УЦУОШГ – Судалгаа, мэдээллийн хүрээлэн. (2022). Улаанбаатар хотын агаарын бохирдлын прогнозын технологи. <https://sudalgaa.gov.mn/pdf/ulaanbaatar-khotyn-agaaryn-bokhirdlyn-prognozyn-tekhnologi-ojm>
4. Allen, R. W., Gombojav, E., Barkhasragchaa, B., Byambaa, T., Lkhasuren, O., Amram, O., ... & Janes, C. R. (2013). An assessment of air pollution and its attributable mortality in Ulaanbaatar, Mongolia. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6(1), 137-150.
5. Ariunsaikhan, A., Batbold, C., Chonokhuu, S., & Gil-Alana, L. A. (2025). Atmospheric pollution in Ulaanbaatar: Persistence and long-run trends. *Plos one*, 20(6), e0322991. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322991>
6. Bauwens, M., Compernelle, S., Stavrakou, T., Müller, J.-F., van Gent, J., Eskes, H., Levelt, P. F., van der A, R., Veeckind, J. P., Vlietinck, J., Yu, H., & Zehner, C. (2020). Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087978. <https://doi.org/10.1029/2020GL087978>
7. Borsdorff, T., de Brugh, J. A., Hu, H., Aben, I., Hasekamp, O., & Landgraf, J. (2018). Measuring carbon monoxide with TROPOMI: First results and a comparison with ECMWF-IFS analysis data. *Geophysical Research Letters*, 45(6), 2826–2832. <https://doi.org/10.1002/2018GL077045>

8. Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., & others. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
9. Copernicus Sentinel-5P Mission Performance Centre. (2025). *Quarterly validation report of the Copernicus Sentinel-5P mission: Total ozone column data*. European Space Agency. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s5p-mission>
10. Enebish, T., Chau, K., Jadamba, B., & Franklin, M. (2021). Predicting ambient PM_{2.5} concentrations in Ulaanbaatar, Mongolia with machine learning approaches. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 31(4), 699-708. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0257-8>
11. Enkhjargal, O., Tuyagerel, D., Tovuuorj, R., Khurelsukh, Z., & Sarangerel, E. (2024). Dispersion mapping of carbon monoxide (CO) derived from Sentinel-5P and evaluation with LUR model during winter in Ulaanbaatar, Mongolia. *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences*, 64(1), 1–10. <https://doi.org/10.5564/pmas.v64i01.3545>
12. Ganbat, G., Lee, H., Jo, H. W., Jadamba, B., & Karthe, D. (2022). Assessment of COVID-19 impacts on air quality in Ulaanbaatar, Mongolia, based on terrestrial and Sentinel-5P TROPOMI observations. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(1), 210288. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220196>
13. Gantumur, B., Wu, F., Vandansambuu, B., Tsegmid, B., Dalaibaatar, E., & Zhao, Y. (2022). Spatiotemporal dynamics of urban expansion and its simulation using CA-ANN model in Ulaanbaatar, Mongolia. *Geocarto International*, 37(2), 494-509. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723714>
14. Guttikunda, S. K., Goel, R., & Pant, P. (2014). Nature of air pollution, emission sources, and management in the Indian cities. *Atmospheric environment*, 95, 501-510.
15. Guttikunda, S. K., Nishadh, K. A., & Jawahar, P. (2019). Air pollution knowledge assessments (APnA) for 20 cities in Mongolia. *Urban Climate*, 29, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.006>
16. Holman, C., Harrison, R., & Querol, X. (2015). Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmospheric Environment*, 111, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.009>
17. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
18. Liu, F., Page, A., Strobe, S. A., Yoshida, Y., Choi, S., Zheng, B., ... & Joiner, J. (2020). Abrupt decline in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19. *Science Advances*, 6(28), eabc2992. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc2992>
19. Nyam-Osor, N., Dorilgjav, S., Magsar, A., Sumiya, E., Bumtsend, T., Shaariibuu, G., ... & Matsumoto, T. (2024). Estimation of Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment in Ulaanbaatar and a Potential Approach for Emission Reductions. In *EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems II* (pp. 127-141). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3897-1_9
20. Soyol-Erdene, T. O., Ganbat, G., & Baldorj, B. (2021). Urban air quality studies in Mongolia: pollution characteristics and future research needs. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(12), 210163.
21. Sumiya, E., Dorligjav, S., Purevtseren, M., Gombodorj, G., Byamba-Ochir, M., Dugerjav, O., ... & Tsegmid, B. (2022). Climate patterns affecting cold season air pollution of ulaanbaatar city, Mongolia. *Climate*, 11(1), 4. <https://doi.org/10.3390/cli11010004>
22. Theys, N., De Smedt, I., Yu, H., Danckaert, T., van Gent, J., Hörmann, C., Wagner, T., Hedelt, P., Bauer, H., Romahn, F., Pedergnana, M., Loyola, D., & Van Roozendaal, M. (2017). Sulfur dioxide

- retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: Algorithm theoretical basis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 119–153. <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
23. UNICEF. (2018). Mongolia's air pollution crisis: A call to action to protect children's health. UNICEF Mongolia.
 24. Veeffkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., & Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
 25. Venter, Z. S., Aunan, K., Chowdhury, S., & Lelieveld, J. (2020). COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(32), 18984–18990. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006853117>
 26. Verhoelst, T., Compernelle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H. J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A. (2021). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 481–510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
 27. Wang, M., Kai, K., Jin, Y., Sugimoto, N., & Dashdondog, B. (2017). Air particulate pollution in Ulaanbaatar, Mongolia: Variation in atmospheric conditions from autumn to winter. *Sola*, 13, 90-95. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-017>
 28. World Bank. (2019). *Air pollution in Ulaanbaatar: Initial assessment of current situation and effects of abatement measures*. World Bank.
 29. World Bank. (2022). *Mongolia air quality improvement program report*. World Bank.
 30. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
 31. Yongzhen, L., Byambakhuu, G., Battsengel, V., Sainbuyan, B., & Altanbold, E. (2022). Applicability Analysis of Nighttime Lights Data in the Development Research using DMSP/OLS and NPP/VIIRS satellite Imagery: An Example in Mongolia: Монгол орны хотуудын хөгжлийн түвшинг “DMSP/OLS” болон “NPP/VIIRS” хиймэл дагуулын шөнийн гэрлийн өгөгдөлд хийсэн чанарын шинжилгээ. *Geographical Issues*, 22(02), 93-103.
 32. Zhang, Q., He, K., & Huo, H. (2012). Cleaning China's air. *Nature*, 484(7393), 161-162. <https://doi.org/10.1038/484161a>
 33. Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., ... & Zhang, Q. (2018). Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(19), 14095-14111. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>