

M. Baxtiyorova

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti 2-bosqich magistranti. O'zbekiston Respublikasi, Xorazm viloyati, Urganch shahri

O.J. Matchanov

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti, Geodeziya, kartografiya va kadastr kafedrası dotsenti, g.f.f.d (PhD). O'zbekiston Respublikasi, Xorazm viloyati, Urganch shahri

XORAZM VOHASI ATMOSFERA HAVOSI TARKIBI DAVRIY O'ZGARISHINING GEOFAZOVIY TAHLILI

Annitatsiya. Ushbu maqola geofazoviy texnologiyalar asosida atmosfera havosining tarkibiy elementlarini davriy o'zgarishini o'rganishga qaratilgan markazlar, institutlar va tadqiqotlarning qisqacha sharxiga asoslangan.

Kalit so'zlar: Geofazoviy texnologiyalar, CO, NO₂, SO₂, TRIPOMI.

M. Bakhtiyorova

2nd-year Master's Student, Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni. Republic of Uzbekistan, Khorezm Region, Urgench City

O.J. Matchanov

Associate Professor, Department of Geodesy, Cartography and Cadastre, Urgench State University named after Abu Rayhan Beruni, PhD in Geographical Sciences. Republic of Uzbekistan, Khorezm Region, Urgench City

GEOSPATIAL ANALYSIS OF PERIODIC CHANGES IN THE ATMOSPHERIC COMPOSITION OF THE KHOREZM OASIS

Abstract. This article provides a brief review of centers, institutes, and research studies focused on the investigation of periodic changes in atmospheric composition using geospatial technologies.

Keywords: Geospatial technologies, CO, NO₂, SO₂, TROPOMI.

Bugungi kunda geofazoviy texnologiyalar davlatlar miqyosidagi mavjud geoeologik muammolar yechimi topishda keng qo'llanilmoqda. Ayniqsa, undan atmosfera tarkibini davriy o'zgarishini o'rganish uchun ham keng foydalanilmoqda. Ushbu masala doirasida esa dunyo miqyosida ko'plab ilmiy tadqiqot markazlari faoliyat yuritadi. Jumladan, Mauna Loa Observatoriyasi (MLO, AQSh)¹, Global Atmosfera Kuzatuv Observatoriyasi (Kanada)², NOAA

¹ Mauna Loa Observatoriyasi (MLO, AQSh). <https://gml.noaa.gov/obop/mlo/>

² Global Atmosfera Kuzatuv Observatoriyasi. www.canada.ca/en/environment-climate-change.html

Global Monitoring Laboratoriyasi (GML, AQSh)³, NOAA Kimyoviy Fanlar Laboratoriyasi (CSL, AQSh)⁴, Yevropa Ittifoqi Atmosfera Observatoriyasi-Qo'shma Tadqiqot Markazi (JRC, Italiya)⁵, Global Atmosfera Kuzatuv Dasturi (WMO, Xalqaro)⁶, Sonnblick Observatoriyasi (Avstriya)⁷, Kipr Atmosfera Observatoriyasi (CAO, Kipr)⁸, Yevropa Monitoring va Baholash Dasturi stansiyalari (EMEP & JRC, Yevropa ittifoqi)⁹, NASA Goddard Kosmik Parvoz Markazi Atmosfera Kimyosi Bo'limi (AQSh)¹⁰, Fransiya Milliy Atmosfera Tadqiqotlari Markazi (CNRM, Fransiya)¹¹, Yevropa Kosmik Agentligi Atmosfera Monitoring Markazi (ESA AMC, Yevropa ittifoqi)¹² va boshqalar.

Atmosfera tarkibining davriy o'zgarishlarini geofazoviy texnologiyalar asosida o'rganishga qaratilgan maxsus quyidagi ilmiy-tadqiqot institutlari ham mavjud: Max Planck Atmosfera Kimyosi Instituti (MPIC, Germaniya)¹³, Japoniyaning Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (NIES, Yaponiya)¹⁴, Buyuk Britaniya Meteorologiya Ofisi Atmosfera Tadqiqotlari Bo'limi (Buyuk Britaniya)¹⁵, Italiyaning Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (ISAC-CNR, Italiya)¹⁶, Xitoy Fanlar Akademiyasining Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (Xitoy)¹⁷, Kanadaning Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (ECCC, Kanada)¹⁸, Yevropa

³ NOAA Global Monitoring Laboratoriyasi (GML, AQSh). <https://www.gml.noaa.gov/>

⁴ NOAA Kimyoviy Fanlar Laboratoriyasi (CSL, AQSh). <https://www.esrl.noaa.gov/csl/>

⁵ Yevropa Kosmik Agentligi Atmosfera Monitoring Markazi (ESA AMC, Yevropa ittifoqi).

⁶ Global Atmosfera Kuzatuv Dasturi (GAW, Xalqaro). <https://community.wmo.int/activity-areas/gaw>

⁷ Sonnblick Observatoriyasi (Avstriya). <https://www.sonnblick.net/>

⁸ Kipr Atmosfera Observatoriyasi (CAO, Kipr). <https://www.cyi.ac.cy/cao/>

⁹ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Atmospheric_Monitoring_Centre Yevropa Monitoring va Baholash Dasturi stansiyalari (EMEP & JRC, Yevropa ittifoqi) <https://www.emep.int/>

¹⁰ NASA Goddard Kosmik Parvoz Markazi Atmosfera Kimyosi Bo'limi (AQSh). <https://www.giss.nasa.gov/>

¹¹ Fransiya Milliy Atmosfera Tadqiqotlari Markazi (CNRM, Fransiya). <https://www.cnrm.meteo.fr/>

¹² Yevropa Ittifoqi Atmosfera Observatoriyasi – Qo'shma Tadqiqot Markazi (JRC, Italiya). European Union Atmospheric Observatory – Joint Research Centre (JRC, Italy) <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/>

¹³ Max Planck Atmosfera Kimyosi Instituti (MPIC, Germaniya). <https://www.mpic.de>

¹⁴ Japoniyaning Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (NIES, Yaponiya). <https://www.nies.go.jp>

¹⁵ Buyuk Britaniya Meteorologiya Ofisi Atmosfera Tadqiqotlari Bo'limi (UK Met Office, Buyuk Britaniya). <https://www.metoffice.gov.uk/research/>

¹⁶ Italiyaning Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (ISAC-CNR, Italiya). <https://www.isac.cnr.it>

¹⁷ Xitoy Fanlar Akademiyasining Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (IAP, Xitoy). <http://english.iap.cas.cn>

¹⁸ Kanadaning Atmosfera Tadqiqotlari Instituti (Environment and Climate Change Canada - ECCC). <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change.html>

Komissiyasi Atmosfera Kimyosi Tadqiqot Instituti (JRC, Italiya)¹⁹, Belgiya Kosmik Aeronomiya Qirollik Instituti (BIRA-IASB, Belgiya)²⁰, Fransiyaning Atmosfera Kimyosi va Iqlim Tadqiqotlari Instituti (LSCE, Fransiya)²¹ va boshqalar.

Keyingi vaqtlarda dunyo miqyosida alohida mamlakatlar kesimida hamda tadqiqotchilar mustaqil ravishda ham hududlardagi atmosfera muammolarga bog'liq tadqiqotlarni ham olib bormoqdalar:

Wei va boshqalar (2022) ning tadqiqotida Xitoy hududi bo'ylab yer sathidagi NO₂ konsentratsiyalarini yuqori aniqlikda baholash maqsadida spatiotemporal sun'iy intellekt (AI) modellaridan foydalanish taklif qilingan. Tadqiqotchilar sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari va yer usti kuzatuv ma'lumotlarini integratsiyalash orqali atmosfera tarkibi monitoringining aniqligini sezilarli darajada oshirishga erishgan. Ushbu yondashuv NO₂ emissiyalarining asosiy manbalarini aniqlash, havoning ifloslanish darajasini nazorat qilish va ekologik monitoring tizimlarini takomillashtirishda samarali vosita sifatida tavsiya qilingan.

Fioletov va boshqalar (2022) tomonidan olib borilgan tadqiqotda TROPOMI sun'iy yo'ldoshidan olingan ma'lumotlar asosida azot dioksidi (NO₂) ifloslanishining shahar, sanoat hududlari kesimida global miqyosda tahlil qilingan. Tadqiqot natijalari NO₂ konsentratsiyasining mavsumiy o'zgarishlari mavjudligini ko'rsatgan, shuningdek, shahar va sanoat hududlarida uning darajasi boshqa hududlariga nisbatan sezilarli darajada yuqoriligi ilmiy asosda aniqlangan. Mazkur yondashuv global miqyosda antropogen emissiyalarni monitoring qilish hamda havoning sifatini baholash jarayonida muhim ahamiyat kasb etgan.

Ahmad va boshqalar (2024) tadqiqotida atmosfera tarkibidagi azot dioksidi (NO₂) konsentratsiyasini aniqlashda ilg'or yondashuv taklif etilgan. Tadqiqotchilar GEMS sun'iy yo'ldoshidan olingan ustun NO₂ ma'lumotlarini (ya'ni, ma'lum bir hudud ustida butun atmosfera qatlamlarida to'plangan NO₂ ning umumiy miqdori)

¹⁹ Evropa Komissiyasi Atmosfera Kimyosi Tadqiqot Instituti (JRC, Italiya). <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/>

²⁰ Belgiya Kosmik Aeronomiya Qirollik Instituti (BIRA-IASB, Belgiya). <https://www.aeronomie.be>

²¹ Fransiyaning Atmosfera Kimyosi va Iqlim Institutlari (LSCE, Frantsiya). <https://www.lsce.ipsl.fr>

yer sathidagi NO₂ konsentratsiyasiga aniqlik bilan konvertatsiya qilish uchun “nested XGBoost model”i ishlab chiqilganini ta’kidlagan. Ushbu model fazoviy va vaqtinchalik omillarni hisobga olgan holda, Xitoy hududi bo’ylab NO₂ ning tarqalish dinamikasini yuqori aniqlik bilan aniqlash imkonini bergan. Natijada, atmosfera monitoringi hamda havoning ifloslanish darajasini baholash tizimlarida qo’llaniladigan ma’lumotlarning ishonchliligi sezilarli darajada oshirilgan.

Acker va boshqalar (2025) o’z tadqiqotlarida sun’iy yo’ldosh orqali olingan NO₂ ma’lumotlarining yer sathidagi kuzatuv stansiyalari ma’lumotlari bilan qiyosiy o’rganganlar. Tadqiqot natijalari sun’iy yo’ldosh ma’lumotlari ko’p hollarda yer usti o’lchovlari bilan yaxshi mos kelishini, biroq ayrim hududlarda sezilarli tafovutlar mavjudligini ko’rsatgan. Mualliflar ushbu tafovutlarning asosiy sababi sifatida atmosferadagi fazoviy va vaqtinchalik o’zgarishlar hamda kuzatuv usullaridagi metodologik farqlarni keltirib o’tgan. Tadqiqot sun’iy yo’ldosh monitoringini yanada takomillashtirish hamda yer usti o’lchovlarini qo’llab-quvvatlash zarurligini ilmiy isbotlagan.

Ko’pchilik tadqiqotlar esa turli hududlar va davrlarida oltingugurt dioksidi (SO₂) darajasini geofazoviy texnologiyalar yordamida aniqlashga qaratilgan:

Yanfang Hou va boshqalar (2018) o’z tadqiqotida TRIPOMI sun’iy yo’ldoshi ma’lumotlari asosida 2007–2016-yillarda Jing-Jin-Ji mintaqasida SO₂ ustun konsentratsiyasini tahlil qilganlar. Natijalar SO₂ darajasi 47.6% ga kamayganini, qishda eng yuqori va yozda eng past darajada bo’lishini ko’rsatgan. Sanoat markazlarida kamayish 55% ga yetgan, bu esa hukumat tomonidan amalga oshirilgan emissiya nazorati siyosatining samarali bo’lganidan dalolat bergan.

Troy D. Thornberry va boshqalarning (2018) tadqiqotlarida "NASA POSIDON missiyasi doirasidagi 2016 yilgi samolyot kuzatuvlari asosida G’arbiy Tinch okeani tropik tropopauza mintaqasida SO₂ gazining fon darajasini aniqlaganlar. Ular olgan natijalar SO₂ ning o’rtacha darajasi 5 pptv atrofida ekanini, ba’zi hollarda vulqon faolligi va antropogen manbalar natijasida 86 pptv gacha oshishini ko’rsatgan. Ushbu natijalar stratosferaga SO₂ kirishining nisbatan

kichik ulushga ega ekanini, ammo vaqtinchalik yuqori konsentratsiyalar mahalliy va global havo sifatiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkinligini isbotlagan.

Hossamaldeen Mohamed va boshqalarning (2025) izlanishlarida Sentinel-5P sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari asosida besh yil davomida CO, NO₂, SO₂ va PM2.5 konsentratsiyalarining mavsumiy o'zgarishlari va uzoq muddatli tendensiyalarini tahlil qilganlar. Tadqiqot natijalariga ko'ra, SO₂ konsentratsiyasi qish faslida va sanoat hududlarida eng yuqori bo'lgan, ba'zi yillarda esa oshish tendensiyasi kuzatilgan. Google Earth Engine (GEE) va GIS texnologiyalari yordamida ifloslanishning fazoviy hududiy tarqalishi aniqlanib, natijalar ekologik siyosatni rejalashtirishda foydali ekani ta'kidlangan.

Walquer Huacani va boshqalarning (2025) ishlarida Peruning Apurimac mintaqasida Sentinel-5P ma'lumotlari yordamida CO, NO₂ va SO₂ gazlarining fazoviy-taqsimot va vaqtinchalik dinamikasini o'rganilgan. Tadqiqot natijalari sanoat va transport manbalarining ifloslanish darajasiga katta ta'sir ko'rsatishini aniqlangan.

Yuqoridagi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, olimlar o'z hududlaridagi ekologik muammolarni chuqur o'rganishga e'tibor qaratishgan. Orol havzasidan ko'tariluvchi chang, Sharqiy Osiyo va G'arbiy Erondagi chang bo'ronlari, Nyu-Yorkdagi metan emissiyalari va boshqalar mahalliy sharoit bilan bog'liq holda tahlil qilingan. Bu tadqiqotlar atmosfera tarkibidagi aerozollar va gazlarning hududiy va mavsumiy o'zgarishlarini aniqlash hamda ularning salbiy ta'sirini kamaytirishga ilmiy asos bo'lgan.

Mohammad Rahimi va boshqalar (2020) G'arbiy Eron hududidagi chang bo'ronlarining kelib chiqishi va rivojlanishini sun'iy yo'ldosh tasvirlari asosida baholashgan. Tadqiqot natijalari chang bo'ronlarini oldindan prognoz qilish va ularning manbalarini aniqlashda masofaviy kuzatuvlarning ahamiyatini tasdiqlashini ko'rsatgan.

Katarzyna Kozicka va boshqalar (2021) o'z tadqiqotlarida guruch yetishtiriladigan hududlarda 2019–2021 yillar oralig'ida CH₄ konsentratsiyasining makon va vaqt bo'yicha o'zgarishini tahlil qilishgan. Tadqiqot natijalari CH₄

emissiyasining yilma-yil va fasllar bo'yicha sezilarli tebranishlarga ega ekanligini hamda ushbu jarayon qishloq xo'jaligi amaliyotlari va iqlim sharoitlariga bog'liqligini ko'rsatgan.

Zhuo Chen va boshqalar (2022) o'zlarining "Dust emission and transport in the Aral Sea region" nomli maqolasida Orol dengizi hududida chang (aerozol) chiqishi va uning atmosfera orqali tarqalishini o'rganganlar. Tadqiqot natijalari shamol kuchi oshganida chang emissiyasi ham ko'payishini, ayniqsa mayda zarrachalar soni ortishini ko'rsatgan. Tog'li va shag'al qoplangan hududlarda chang chiqishi yuqori bo'lsa-da, shag'al qatlami qalin bo'lgan joylarda uni tarqalishining kamayishi aniqlangan. Tadqiqotchilar chang ko'tarilishining asosiy sababini yer eroziyasi va tabiiy jarayonlar bilan izohlaganlar.

Ali Darvishi Boloorani va boshqalar (2023) o'z tadqiqotlarida Eronning qishloq hududlarida qum va chang bo'ronlariga nisbatan zaiflikni GIS asosidagi integratsiyalashgan yondashuv yordamida baholashgan. Tadqiqotchilar GIS texnologiyasi orqali turli ma'lumot qatlamlarini birlashtirib, shu xavfga nisbatan zaif hududlarni aniq va samarali aniqlash imkonini yaratganlar. Tadqiqot natijalari janubi-sharqiy va janubiy hududlarning eng yuqori zaiflik darajasiga ega ekanligini ko'rsatgan va siyosiy qarorlar qabul qilish jarayonida ushbu natijalar muhim ahamiyat kasb etishi ta'kidlangan.

Shu Li va boshqalar (2023) Markaziy Osiyodagi kuchli chang bo'roni sinoptik kuzatuvlar va sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari yordamida o'rganilgan. Tadqiqot natijalari sinoptik va masofaviy sezish usullarining birgalikdagi qo'llanilishi chang bo'ronlarini samarali aniqlash va tahlil qilish imkonini berishini isbotlagan.

Qin J. Y. va boshqalar (2024) Sentinel-5P sun'iy yo'ldoshidan olingan CH₄ ustun konsentratsiyalari va GEOS-Chem modeli yordamida global miqyosda yer sathidagi CH₄ konsentratsiyalarini baholaganlar. Tadqiqot natijalari taklif etilgan yondashuvning yuqori aniqlikka ega ekanligini ko'rsatgan. Kuzatuvlar bilan 0.93 korrelyatsiya va 29.93 ppb RMSE qayd etilgan.

Steffen Vanselow va boshqalar (2024) TROPOMI instrumenti ma'lumotlari asosida 2018–2021 yillarda doimiy ravishda yuqori metan konsentratsiyasiga ega bo'lgan 217 ta hududni avtomatik aniqlashgan. Tadqiqot natijalari ushbu hududlar global CH₄ emissiyalarining taxminan 20% ini tashkil etishini ko'rsatgan.

Zhang Y. va boshqalar (2025) izlanishlarida esa Sharqiy Osiyo mintaqasida chang bo'ronlarini kuzatishda turli masofaviy sezuvchilar, xususan Sentinel-5P sun'iy yo'ldoshidan olingan Aerosol Indeksi (AI) samaradorligini baholashgan. Tadqiqot natijalari AI indikatorining chang bo'ronlarini aniqlashda yuqori aniqlikka ega ekanligini tasdiqlagan.

Mackenzie M. N. va boshqalar (2025) AQShning Nyu-York shtatida havo orqali o'lchovlar asosida metan va karbonat angidrid emissiyalarini baholashgan. Tadqiqotchilar "mass balance" yondashuvi yordamida sanoat, shahar va qishloq xo'jaligi manbalaridan kelayotgan gazlarni aniqlik bilan o'lchashgan va metan emissiyalarining rasmiy statistikaga nisbatan yuqoriligini aniqlashgan.

Johannes Blechschmidt va boshqalar (2025) Orolqum cho'lida yuzaga kelgan tuzli chang bo'ronini bir nechta sun'iy yo'ldosh sensorlari yordamida tahlil qilishgan va ma'lumotlarning mosligini baholashgan. Tadqiqot natijalari ko'p sensorli ma'lumotlarning chang bo'ronlarini aniqlash va ularning tarqalishini o'rganishda samarali ekanligini ko'rsatgan. Ushbu tadqiqotchilar keyinchalik Orolqumdagi chang bo'ronining atmosferadagi oqimlari va ularning Yevro-Atlantika mintaqasiga ta'sirini sinoptik va sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari yordamida tahlil qilishgan. Tadqiqot natijalari bo'ronlarni oldindan bashorat qilish va ularning oqibatlarini kamaytirish imkonini berishini ko'rsatgan.

Yuqorida keltirilgan tadqiqotlar va ilmiy markazlarning faoliyati shuni ko'rsatadiki, geofazoviy texnologiyalar xususan, sun'iy yo'ldosh kuzatuvlari (Sentinel-5P, TROPOMI), Google Earth Engine (GEE) va geoinformatsion tizimlar (GIS) hududiy, mavsumiy va yillik o'zgarishlarni aniqlashda yuqori samaradorlikka ega bo'lib, ular yordamida olingan natijalar hududlardagi atmosfera tarkibidagi elementlarning o'zgarishini davriy o'rganishga imkon bergan.

Xulosa. Xorazm vohasi o'zining geografik joylashuvi, iqlimiy sharoiti va Orol dengizi hududiga yaqinligi sababli atmosfera havosining tarkibi va uning davriy o'zgarishlarini o'rganish uchun muhim tadqiqot hududi hisoblanadi. Unda atmosfera havosini ifloslantiruvchi asosiy kimyoviy elementlar orasida azot dioksidi (NO_2), oltingugurt dioksidi (SO_2), karbon monoksidi (CO) va mayda chang zarralari ($\text{PM}_{2.5}$) kabilarni alohida o'rganish maqsadga muvofiq. Ushbu elementlarning davriy o'zgarishini geofazoviy texnologiyalar yordamida tahlil qilish hududning ekologik holati, aholi salomatligi va atrof-muhit monitoringini samarali tashkil etish uchun muhim hisoblanadi. Atmosferadagi gaz va chang zarralarining mavsumiy va yillik o'zgarishlarini aniqlash orqali transport, sanoat faoliyati va qishloq xo'jaligi kabilarning unga ta'sirini o'rganish mumkin. Bundan tashqari, Orol dengizidan keladigan chang-tuz bo'ronlari hududning havosini qo'shimcha ifloslantiradi.

Hududni kuzatishda Sentinel, Landsat va MODIS sun'iy yo'ldoshlar tizimlari ma'lumotlaridan foydalanish eng samarali va tezkor yondashuv hisoblanadi. Ularning ma'lumotlari yuqori fazoviy va davriy aniqlikni ta'minlab, NO_2 , SO_2 , CO va $\text{PM}_{2.5}$ kabi ifloslantiruvchi elementlarning tarqalishini va konsentratsiyalarini tezkor va aniq baholash imkonini berishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Ahmad, N., Lin, C., Lau, A. K. H., Kim, J., Zhang, T., Yu, F., Li, C., Li, Y., Fung, J. C. H., & Lao, X. Q. (2024). Estimation of ground-level NO_2 and its spatiotemporal variations in China using GEMS measurements and a nested machine learning model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(16), 9645–9665. <https://doi.org/10.5194/acp-24-9645-2024>
2. Acker, S., Holloway, T., and Harkey, M. (2025). Satellite detection of NO_2 distributions using TROPOMI and TEMPO and comparison with ground-based concentration measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 8271–8288. <https://doi.org/10.5194/acp-25-8271-2025>
3. Broomandi, P., & Mohammadpour, P. (2023). A synoptic- and remote sensing-based analysis of a severe dust storm event over Central Asia. *Aerosol and Air Quality Research*, 23, 1–14. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220309>
4. Chen, Z., Gao, X., & Lei, J. (2022). Dust emission and transport in the Aral Sea region. *Geoderma*, 428, 116177. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116177>

5. Darvishi Boloorani, A., Kaskaoutis, D. G., & Fathian, A. (2023). Assessment of rural vulnerability to sand and dust storms in Iran: An integrated GIS-based approach. *Atmosphere*, 14(2), 281. <https://doi.org/10.3390/atmos14020281>
6. Fioletov, V., McLinden, C. A., & Li, C. (2022). Quantifying urban, industrial, and background changes in NO₂ during the COVID-19 lockdown using TROPOMI satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(7), 4201–4222. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4201-2022>
7. Grzybowski, P. T., Kłos, A., Sobik-Szołtysek, J., & Kłos, R. (2023). Estimations of the ground-level NO₂ concentrations using Sentinel-5P and ML methods. *Remote Sensing*, 15(2), 378. <https://doi.org/10.3390/rs15020378>
8. Hou, Y., Wang, J., Liu, H., & Zhang, L. (2018). Analysis of the sulfur dioxide column concentration over Jing-Jin-Ji, China, based on satellite observations (2007–2016). *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(5), 1991–1999. <https://doi.org/10.15244/pjoes/77035>
9. Huacani, W., Zuloaga, R., Sanchez, D., Meza, N. P., Aguirre, F., Yari, H., Vilca, E., & Luque, E. (2025). Analysis of atmospheric air pollutants (CO, NO₂, and SO₂) through Sentinel-5P images in Google Earth Engine, Apurimac region, period 2020–2023. Preprints, 202508.0712. <https://doi.org/10.20944/preprints202508.0712.v1>
10. Kozicka, K., Gozdowski, D., & Wójcik-Gront, E. (2021). Spatial-temporal changes of methane content in the atmosphere for selected countries and regions with high methane emission from rice cultivation. *Atmosphere*, 12(9), 1382. <https://doi.org/10.3390/atmos12091382>
11. Mohamed, H., Hassan, A., & Elhag, A. (2025). A five-year study using Sentinel-5P data observing seasonal dynamics and long-term trends of atmospheric pollutants. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 10(2), 262–271. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1587122>
12. Mohammadpour, K., Niyogi, D., & Kumar, P. (2025). Monitoring and simulation of a 7-day dust episode and vertical dust cross-sections over the Middle East. *Atmospheric Environment*, 300, 119893. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.119893>
13. Nowlan, M. M., & McKain, K. (2025). Aerial estimates of methane and carbon dioxide emission rates using a mass balance approach in New York State. *Earth System Science Data*, 17, 4555–4574. <https://doi.org/10.5194/essd-17-4555-2025>
14. Rahimi, M., Kaskaoutis, D. G., & Fathian, A. (2020). Evaluation of the origin and synoptic analysis of dust storm phenomena using satellite image processing in western Iran. *Aeolian Research*, 45, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100112>
15. Rollins, R., Thornberry, T., & Thornhill, K. (2018). SO₂ observations and sources in the western Pacific tropical tropopause region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(22), 12,934–12,952. <https://doi.org/10.1029/2018JD029635>

16. Vanselow, S., & Kuhlmann, G. (2024). Automated detection of regions with persistently enhanced methane concentrations using Sentinel-5P (2018–2021). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 10441–10470. <https://doi.org/10.5194/acp-24-10441-2024>
17. Wei, J., Liu, S., Li, Z., & Zhang, L. (2022). Ground-level NO₂ surveillance from space across China for high resolution using interpretable spatiotemporally weighted artificial intelligence. *Environmental Science & Technology*, 56(14), 9988–9998. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03834>
18. Xi, X., Blechschmidt, J., & Sokolik, I. N. (2025). Analysis of a saline dust storm from the Aralkum Desert – Part 2: Attribution of dust emissions and atmospheric transport pathways. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 7430–7451. <https://doi.org/10.5194/acp-25-7430-2025>
19. Xi, X., Blechschmidt, J., & Sokolik, I. N. (2025). Analysis of a saline dust storm from the Aralkum Desert – Part 1: Consistency between multisensor satellite aerosol products. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 7403–7429. <https://doi.org/10.5194/acp-25-7403-2025>
20. Zhang, Y., Wang, N., & Jin, S. (2025). Performance and evaluation of remote sensing satellites for monitoring dust weather in East Asia. *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-992>