



*Yusufjon TILLAYEV,*

*Astronomiya instituti katta ilmiy xodimi, f.-m.f.n., O‘zbekiston Milliy universiteti dotsenti*

*Ikrom XURRAMOV,*

*Astronomiya instituti kichik ilmiy xodimi, magistrant*

*E-mail: yusuf@astrin.uz*

*F.-m.f.d T.Axunov taqrizi asosida*

## ASSESSMENT OF INTEGRAL AMOUNT OF WATER AT THE MAIDANAK OBSERVATORY BASED ON ERA5 DATA

Annotation

This study investigates the annual and seasonal variations of Integrated Water Vapor (IWV) over the Maidanak Astronomical Observatory during 2016–2018 using ERA5 reanalysis data. ERA5 TCWV (Total Column Water Vapor) values were adjusted for altitude by applying the GPWV-H (Height-adjusted Ground Precipitable Water Vapor) methodology. In the calculations, a constant scale height (H) parameter was assumed. The obtained IWV values were compared with GNSS meteorological observations, showing a high degree of agreement. The analysis revealed that discrepancies were relatively larger in summer, which can be explained by the seasonal variability of the H parameter. The results indicate that the proposed approach can be an effective tool not only for Maidanak, but also for complex terrains without GNSS stations, to estimate IWV based on ERA5 data.

**Keywords:** ERA5, IWV, TCWV, GPWV-H, GNSS, Maidanak.

## ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ НА ОБСЕРВАТОРИИ МАЙДАНАК НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ERA5

Аннотация

В данном исследовании на основе данных реанализа ERA5 были проанализированы годовые и сезонные изменения интегрального количества воды (IWV) в атмосфере над Майданакской астрономической обсерваторией в период 2016–2018 гг. Значения ERA5 TCWV (Total Column Water Vapor) были приведены к высоте с использованием методики GPWV-H (Height-adjusted Ground Precipitable Water Vapor). В расчетах параметр масштаба высоты (H) принимался постоянным. Полученные значения IWV были сопоставлены с результатами метеорологических наблюдений GNSS, что показало высокую степень согласованности. Анализ выявил, что расхождения были относительно большими в летние месяцы, что объясняется сезонной изменчивостью параметра H. Результаты исследования показывают, что предложенный подход может быть эффективным инструментом не только для Майданака, но и для сложных рельефных районов без GNSS-станций для оценки IWV на основе данных ERA5.

**Ключевые слова:** ERA5, IWV, TCWV, GPWV-H, GNSS, Майданак.

## MAYDANAK OBSERVATORIASIDA ERA5 MA'LUMOTLARI ASOSIDA INTEGRAL SUV MIQDORINI BAHOLASH

Annotatsiya

Mazkur tadqiqotda 2016–2018 yillar davomida Maydanak astronomik observatoriyasi ustidagi atmosfera qatlamida integral suv miqdori (ISM)ning yillik va fasliy o'zgarishlari ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida tahlil qilindi. ERA5 TCWV (Total Column Water Vapor) qiymatlari GPWV-H (Height-adjusted Ground Precipitable Water Vapor) metodikasi yordamida balandlikka moslashtirildi. Hisob-kitoblarda scale height (H) parametri doimiy qiymatda qabul qilindi. Olingan ISM qiymatlari GNSS meteorologiyasi natijalari bilan taqqoslanib, yuqori darajadagi muvofiqlik kuzatildi. Tahlillar yoz oylarida tafovutlarning nisbatan katta ekanligini ko'rsatdi, bu esa H parametrining fasliy o'zgarishi bilan izohlandi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, taklif etilgan yondashuv nafaqat Maydanak, balki GNSS stansiyalari mavjud bo'lmagan relyefli hududlarda ham ERA5 ma'lumotlari asosida ISMni aniqlashda samarali vosita bo'lishi mumkin.

**Kalit so'zlar:** ERA5, ISM, TCWV, GPWV-H, GNSS, Maydanak.

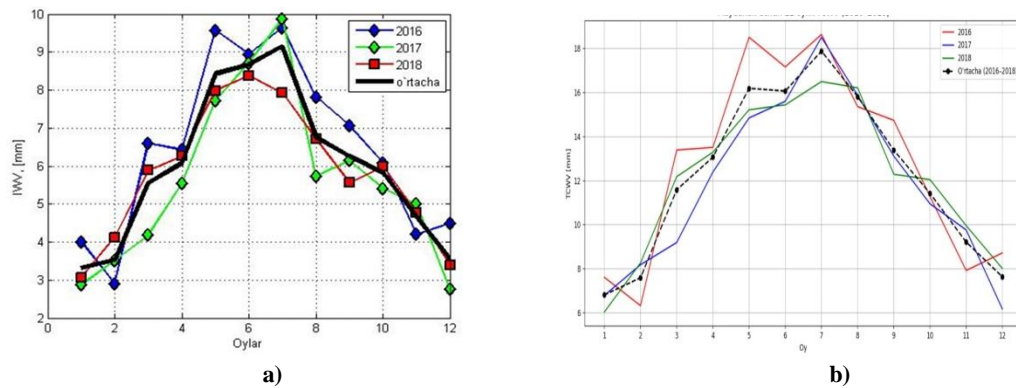
**Kirish.** Atmosferadagi suv bug'i miqdori astronomik kuzatuvlar sifatiga bevosita ta'sir ko'rsatadigan muhim fizik omillardan biridir. Ayniqsa, infraqizil diapazonda olib boriladigan kuzatuvlarda suv bug'i kuchli yutuvchi komponent bo'lib, u yulduzlar, galaktikalar va boshqa osmon jismlaridan kelayotgan elektromagnit nurlanishning atmosfera orqali o'tishini cheklaydi. Atmosferadagi suv bug'i qancha ko'p bo'lsa, nurlanishning yutilishi shuncha kuchayadi va natijada kuzatuvlar aniqligi pasayadi. Shu sababli, har qanday astronomik stansiya yoki observatoriya faoliyati doirasida mazkur parametrning doimiy ravishda hisoblab borilishi muhim ahamiyatga ega.

Integral suv miqdori (inglizchada IWV - Integrated Water Vapor) - bu  $1 \text{ sm}^2$  yuzaga ega atmosfera ustunidagi barcha suv bug'lari to'liq kondensatsiyalansa hosil bo'ladigan suv qatlamining balandligi (millimetr yoki santimetrda) sifatida ifodalanadi. Teleskop yo'nalishi bo'yicha ISM miqdori kamaygan sari, atmosferaning optik shaffoligi ortadi [1]. Turli manbalarda atmosfera namligi miqdorini ifodalovchi parametrlar ISM turlicha atamalar bilan yuritiladi. Masalan, radiosan ma'lumotlariga asoslangan

hisoblashlarda bu miqdor odatda IWV (Integrated Water Vapor) yoki PWV (Precipitable Water Vapor) deb ataladi, ERA5 reanaliz ma'lumotlarida esa unga mos keluvchi parametr TCWV (Total Column Water Vapor) nomi bilan yuritiladi.

**Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili.** ISM odatda radioson (ob-havo parametrlarini o'lovchi shar) ma'lumotlari asosida aniqlanadi [3,4]. Ammo tog'li hududlarda radioson kuzatuv stansiyalarining yetishmasligi yoki mavjud emasligi bu boradagi tahlillarni cheklaydi. Shu sababli, ISM ni aniqlashda GPS, GNSS yoki MODIS kabi masofadan zondlash usullaridan foydalanish taklif etiladi [5,6]. Shuningdek, ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida hisoblash usuli ham keng qo'llanilmoqda. Bu borada bir qancha tadqiqotlar yaxshi natijalar bergan. Masalan, Kumar va boshqalar Varanasi hududida GPS orqali aniqlangan ISM bilan ERA-Interim reanalizi natijalari orasida 0.86 korrelyatsiya koeffitsiyenti mavjudligini aniqlaganlar [7]. Xitoyda esa MODIS-PWV bilan ERA5 asosida hisoblangan ISM o'rtasidagi korrelyatsiya 0.9 dan yuqori bo'lib, ayrim hududlar uchun 0.98 ga yetgan. ISM ning uzoq muddatli o'zgarishlari O'rta Yer dengizi sohillari, Alp tog'lari, shuningdek Shimoliy va Markaziy Yevropada juda yuqori korrelyatsiya koeffitsiyentlari bilan (0.97 dan ortiq) tavsiflanadi [8]. Ushbu natijalar va ilmiy maqolalardan kelib chiqqan holda biz Maydanak hududida ISM ni o'zgarishini ERA5 ma'lumotlari orqali hisobladik va natijalarni taqqosladik.

**Tadqiqot metodologiyasi.** Maydanak hududi uchun atmosferadagi namlikni aniqlash uchun GNSS (Global Navigation Satellite System) metrologiya orqali bir necha yillik ma'lumotlar tahlil qilingan, lekin 2016-2018-yillardagi ma'lumotlar to'liq bo'lganligi bois biz ushbu yillarda hisoblangan qiymatlardan foydalangan holda ERA5 ma'lumotlarini tahlil qildik va qiymatlar bir-biriga mos kelishini tekshirdik.



1- rasm. a) GNSS orqali hisoblangan ISM, b) ERA5 orqali hisoblangan ISM

Ushbu 1-rasmda 2016-2018 yillar oralig'ida Maydanak hududida ISMni yillik o'zgarishi GNSS metrologiya va ERA5 orqali aniqlangan qiymatlari tasvirlangan. Ko'rish mumkinki (1.a-rasm) Maydanak uchun ISMni yillik o'zgarishi 5mm atrofida bo'lib asosiy o'zgarish yoz oylarida (maksimal 10mm) kuzatilgan. Kuz va bahor oylarida qiymatlar o'rtacha, qishda esa eng minimal ISM kuzatilgan. Ammo ERA5 (1.b-rasm) orqali aniqlangan natijalar esa ancha yuqori (ISM yillik o'rtacha qiymati 10-11mm) qiymatni ko'rsatmoqda. GNSS orqali hisoblangan qiymatlar 3-10mm oralig'ida o'zgartgan bo'lsa, ERA5 da 6-18mm atrofida ko'rsatilgan.

GNSS meteorologiyasi yuqori aniqlikka ega bo'lsa-da, u har doim ham amaliy foydalanish uchun yetarli emas. Chunki bu usul faqat doimiy ishlaydigan GNSS stansiyalariga bog'liq bo'lib, ko'plab baland tog'li yoki chekka hududlarda bunday stansiyalar mavjud emas. Natijada atmosfera holatini baholashda ma'lumot yetishmovchiligi yuzaga keladi. Shu nuqtai nazardan, ERA5 reanaliz ma'lumotlaridan foydalanish vaqt va mablag' jihatidan samarali yechim hisoblanadi. Biroq ERA5 ma'lumotlarini to'g'ridan-to'g'ri qo'llash tog'li hududlarda xatoliklarga olib keladi, chunki ular balandlik farqlarini inobatga olmaydi. Buni 1.b-rasm natijalari ancha farqli ekanligidan ko'rish mumkin. Shu sababli ERA5 ma'lumotlari uchun maxsus balandlikka moslashtirish zarur.

**Tahlil va natijalar.** Ushbu tadqiqotda ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida Maydanak rasadxonasi hududi uchun Integral Suv Miqdori (ISM) qiymatlari hisoblandi. Reanaliz ma'lumotlaridan foydalanganda, ayniqsa tog'li hududlarda, real atmosfera sharoitlarini to'liq aks ettirmaslik muammosi yuzaga keladi (1.b-rasm). Bu holat, asosan, grid nuqtalarining relyef bilan farqi tufayli ISM qiymatlarining ortiqcha baholanishiga olib keladi. ERA5 TCWV (Total Column Water Vapor) qiymatlari  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  grid bo'yicha taqdim etilgan bo'lib, bu nuqtalardagi balandliklar haqiqiy observatoriya joylashgan nuqtaning balandligidan farq qiladi. Shu sababli, tog'li hududlardagi ISM qiymatlarini ishonchli baholash uchun balandlikka moslashtirish zarur.

Relyef ta'sirini hisobga olish uchun quyidagi (1) formula qo'llanildi:

$$GPWV = TCWV * \exp\left(-\frac{\delta z}{H_1}\right) \quad (1)$$

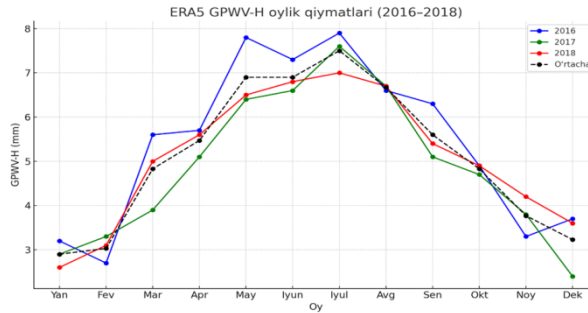
Ushbu formula bir qancha ilmiy maqolalarda foydalanilgan bo'lib GPWV-H (Height-adjusted Ground Precipitable Water Vapor) nomi bilan ataladi. Ya'ni ISMni balandlikka moslashtiruvchi formula.

bu yerda:

- **TCWV** – ERA5 reanaliz ma'lumotidagi integral suv miqdori, birligi  $\text{kg/m}^2$  va bu birlik mm ga ekvivalent [2],
- **$\delta z$**  – observatoriya va grid nuqtasi orasidagi balandlik farqi (m),
- **$H_1$**  – suv bug'ining tarqalish balandligi (scale height), odatda 2278 m deb olinadi [1].

Bu modelda, balandlik oshgani sari ISM eksponental ravishda kamayadi. Shu sababli, Maydanak observatoriyasining yuqori balandligi hisobga olinganda, TCWV qiymatlarini ushbu formulaga asoslangan holda moslashtirish orqali real sharoitga yaqin ISM qiymatlari olinadi

O'zgartirishlarni hisobga olgan holda, GPWV-H formulasi yordamida Maydanak hududi uchun 2016–2018 yillar oralig'idagi ISM qiymatlari hisoblandi va grafik ko'rinishida tasvirlandi (2-rasm). Ushbu grafikda har bir yil davomida oylik ISM qiymatlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi aks ettirilgan bo'lib, balandlikka tuzatish kiritilganidan keyin TCWV (ERA5) ma'lumotlari sezilarli darajada kamaygani kuzatildi.



2-rasm. GPWV-H (ERA5 ma'lumotlari asosida balandlikka moslangan ISM).

Grafikdan ko'rinib turibdiki, GPWV-H orqali hisoblangan ISM qiymatlari (2-rasm) GNSS ma'lumotlariga (1.a-rasm) ancha yaqin qiymatlarni bergan. Kuz va qish oylarida deyarli bir xilda o'zgargan bo'lsa, yoz oylarida qiymatlarda biroz tafovvut bor. Bu esa shuni anglatadiki ERA5 ma'lumotlari balandlikka moslashtirish orqali tuzatish amalga oshirilsa, u holda ISM qiymatlari haqiqiy qiymatlarga yaqin qiymatlar olish mumkin (1-jadval).

1-jadval. kuzatuv ma'lumotlari (GNSS) va ERA5 balandlikka moslangan (GPWV) jadval.

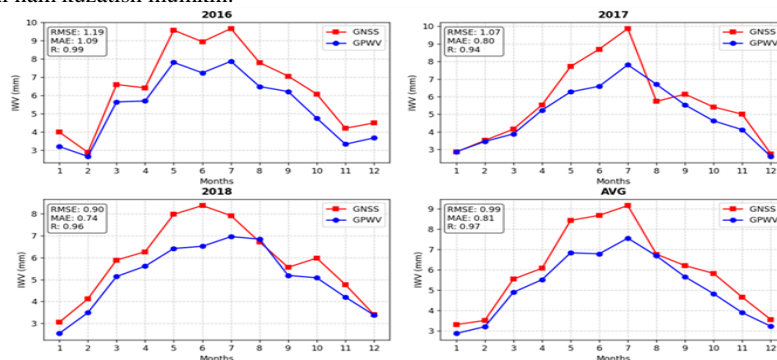
Oy	2016 (GPWV)	2016 (GNSS)	2017 (GPWV)	2017 (GNSS)	2018 (GPWV)	2018 (GNSS)	O'rtacha (GPWV)	O'rtacha (GNSS)
1	3.21	4.0	2.86	2.85	2.54	3.05	2.87	3.30
2	2.67	2.89	3.45	3.51	3.49	4.12	3.2	3.51
3	5.65	6.6	3.88	4.15	5.14	5.89	4.89	5.54
4	5.70	6.42	5.23	5.53	5.61	6.27	5.51	6.07
5	7.81	9.57	6.27	7.71	6.42	7.98	6.83	8.42
6	7.24	8.94	6.59	8.7	6.52	8.38	6.78	8.67
7	7.87	9.66	7.81	9.87	6.96	7.92	7.55	9.15
8	6.49	7.8	6.70	5.73	6.85	6.72	6.68	6.76
9	6.22	7.06	5.53	6.14	5.19	5.56	5.65	6.2
10	4.76	6.08	4.62	5.41	5.08	5.98	4.82	5.82
11	3.34	4.21	4.12	5.0	4.2	4.77	3.89	4.65
12	3.68	4.5	2.60	2.75	3.38	3.4	3.22	3.55

Jadvaldan ko'rish mumkinki, GNSS va ERA5 balandlikka moslangan ISM qiymatlar bir biriga yaqin. Kuz va qish oylarida deyarli bir xilda o'zgarish kuzatilgan ayniqsa 2017-yil uchun qiymatlar bir xilda boshlanib, yil yakunida deyarli bir xilda yakunlangan. Shuningdek GNSS va ERA5 balandlikka moslangan ISM eng minimal qiymat (barcha davrlarda) oktabrdan-mart oyigacha bo'lgan davrda kuzatilgan va bu davr kuzatish uchun eng optimal davr desak bo'ladi. Qolaversa kunlar isishi bilan (maydan-avgustgacha) ISM ning qiymati ortib borishini ham ko'rish mumkin va bu ilmiy xulosalarga to'liq mos keladi.

GNSS va GPWV-H orqali hisoblangan ISM qiymatlarini taqqoslaganimizda (1-jadval), moslashtirilgan qiymatlar GNSSda o'lgan haqiqiy qiymatlarga yaqinlashganini ko'rdik. Ushbu qiymatlar uchun aniqlangan xatolik ko'rsatkichlari quyidagicha: Korrelyatsiya koeffitsienti:  $r = 0.97$  — bu juda kuchli chiziqli bog'liqlik mavjudligini bildiradi, RMSE (o'rtacha kvadratik og'ish): 0.99mm, MAE (o'rtacha absolyut xatolig): 0.81mm bu esa, olingan natijalarni amaliyotda qo'llash uchun yetarli ekanligini bildiradi.

Dastlabki holatda, ya'ni moslashtirilmagan ERA5 ma'lumotlari (1.b-rasm) GNSS qiymatlaridan (1.a-rasm) 2–6 mm ga yuqoriroq baholandi. Bu takidlaganimizdek ERA5 balandlikni hisobga olmasligidan kelib chiqqan edi. Balandlikka moslash orqali esa (2-rasm) ko'rish mumkinki bog'liqlik yuqori darajada ortib yillik o'rtacha xatolik MAE = 0.81mm tashkil etdi.

Xuddi shu hisob-kitoblarni yillik o'rtacha kesimda ko'rib chiqsak (3-rasm), GPWV-H usulining barqarorligi va yillik trendlarga mos kelishini ham kuzatish mumkin.



3-rasm. 2016-2018 yillar uchun ISMni o'zgarishi GNSS(qizil) va GPWV-H(ko'k)

Ushbu taqqoslashlardan ko'rinib turibdiki Maydanak hududi uchun ISMni qiymati yillik 3-8 mm atrofida o'zgarar ekan (o'rtacha 5mm). Eng katta qiymat yoz oylarida (maydan - avgustgacha) kuzatiladi, Qishda ISM nisbatan pastroq bo'lib (3-3.5mm), kuzatuv uchun eng maqul fasl deyish mumkin (ISM pastligi jihatidan). Qolaversa 3-rasm taqqoslashdan bizni yana bir narsa e'tiborimizni tortdi ya'ni eng katta og'ishlar yoz oylarida kuzatilgan. Bu holat ilgari ta'kidlab o'tilganidek, H (scale height) qiymatining faslga bog'liqligi bilan izohlanadi. Yoz oylarida havo haroratining ortishi bilan atmosferadagi suv bug'ining tarqalish balandligi ham ortadi va bu esa H qiymatini o'zgartiradi.

Grafiklar chizish uchun biz mavsumiy o'rtacha qiymatlarga mos keluvchi, ilmiy adabiyotlarda keng qo'llaniladigan  $H=2278$  m qiymatidan foydalandik. Ushbu yondashuv natijasida olingan grafiklar past xatolik darajasi bilan ajralib turadi va ilmiy loyihalar yoki amaliy kuzatuvlar uchun ishonchli asos bo'la oladi.

Ko'plab hududlarda kuzatuv stansiyalari mavjud emas yoki haqiqiy kuzatuv ma'lumotlarini olish uchun texnik sharoitlar yetishmaydi. Bunday holatlarda, ayniqsa tog'li yoki murakkab relyefga ega joylarda, balandlikka moslashtirilgan hisob-kitoblar orqali ISM qiymatlarini baholash ancha afzalliklarga ega. Zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning aksariyati ham shunday yondashuvni tanlaydi ya'ni ERA5 yoki boshqa global ma'lumot manbalaridan foydalanib, balandlik va boshqa meteorologik omillarni inobatga olgan holda moslashtirishlar olib boriladi. So'ngra esa kuzatuv uchun eng mos joylar aniqlanadi, albatta boshqa meteorologik va geografik parametrlar bilan birgalikda baholangan holda.

**Xulosa va takliflar.** Ushbu tadqiqotda Maydanak astronomik hududi uchun 2016–2018 yillarga oid ERA5 TCWV ma'lumotlari GPWV-H formulasi yordamida qiymatlar olindi va GNSS orqali o'lchangan ISM qiymatlari bilan solishtirildi. GPWV-H orqali hisoblangan qiymatlar o'lchangan natijalariga yaqin ekanligini ko'rsatdi. Ayniqsa, statistik tahlillar ( $r = 0.97$ ,  $RMSE = 0.99\text{mm}$ ,  $ME = 0.81\text{mm}$ ) bu metodikaning ishonchligini tasdiqlaydi.

Eng katta og'ishlar yoz oylarida kuzatilgan bo'lib, bu holat havoning mavsumiy o'zgarishi bilan bog'liq. Bizning ishda  $H = 2278\text{m}$  (bu qiymat ko'plab ilmiy loyihalarga tanlangan standart qiymat) qiymati asosida grafiklar tasvirlandi va yillik o'rtacha xatolik  $MAE = 0.81\text{mm}$  chiqdi. Agar H ning mavsumiy qiymatlari inobatga olinsa xatolik 0.3-0.8mm atrofida chiqishi va Yoz oylarida qiymatlar yetarlicha aniqlikda baholashi mumkin. Maydanak hududida ISM ning o'zgarishi yillik 5mm atrofida bo'lib bu [1] maqoladagi hududlar bilan solishtirganda yillik ISM o'zgarishi nisbatan barqarorligini ko'rish mumkin.

Tadqiqot faqat 2016–2018 yillarni o'z ichiga olgan bo'lsa-da, natijalar haqiqiy kuzatuv ma'lumotlariga yaqinligi shuni ko'rsatadiki, ushbu yondashuv orqali keyingi yillar yoki boshqa joylar uchun ham ISM qiymatlarini ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida hisoblab topish mumkin. Bu ayniqsa, real kuzatuv stansiyalari mavjud bo'lmagan hududlarda balandlikka moslashtirish yondashuvini muhim va foydali qiladi.

#### ADABIYOTLAR

1. Artem Yu. Shikhovtsev, Pavel G. Kovadlo, Vladimir B. Khaikin and Alexander V. Kiselev Precipitable Water Vapor and Fractional Clear Sky Statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal Region *Remote Sens.* 2022, 14, 6221
2. R. R. Nelson, D. Crisp, L. E. Ott, C. W. O'Dell and others. High-accuracy measurements of total column water vapor from the Orbiting Carbon Observatory-2 *Geophysical Research Letters* (Volume 43, Issue 23, 2016)
3. Li, Z.; Muller, J.-P.; Cross, P. Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003, 108, 4651.
4. Hu, H.; Yang, R.; Lee, W.-C.; Cao, Y.; Mao, J.; Gao, L. Multi-sensor study of precipitable water vapor and atmospheric profiling from microwave radiometer, GNSS/MET, radiosonde, and ECMWF reanalysis in Beijing. *J. Appl. Remote Sens.* 2020, 14, 044514.
5. Gurbuz, G.; Akgul, V.; Gormus, K.S.; Kutoglu, S.H. Assessment of precipitable water vapor over Turkey using GLONASS and GPS. *J. Atmos.-Sol.-Terr. Phys.* 2021, 222, 105712.
6. Zhu, D.; Zhang, K.; Yang, L.; Wu, S.; Li, L. Evaluation and calibration of MODIS near-infrared precipitable water vapor over China using GNSS observations and ERA-5 reanalysis dataset. *Remote Sens.* 2021, 13, 2761.
7. Kumar, A.; Kumar, S.; Pratap, V.; Singh, A.K. Performance of water vapour retrieval from MODIS and ECMWF and their validation with ground based GPS measurements over Varanasi. *J. Earth Syst. Sci.* 2021, 130, 41.
8. Yuan, P.; Hunegnaw, A.; Alshawaf, F.; Awange, J.; Klos, A.; Teferle, F.N.; Kutterer, H. Feasibility of ERA5 integrated water vapor trends for climate change analysis in continental Europe: An evaluation with GPS (1994–2019) by considering statistical significance. *Remote Sens. Environ.* 2021, 260, 112416.