



UDK 520.16

Ikrom XURRAMOV,
Astronomiya instituti stajyor-tatqiqotchisi
E-mail: ikromjonakramvich98@gmail.com
Yusufjon TILLAYEV,
Astronomiya instituti katta ilmiy xodimi, f.-m.f.n

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

ASSESSMENT OF INTEGRATED AMOUNT OF WATER FOR MAIDANAK CONSIDERING SEASONAL VARIATIONS OF THE H PARAMETER

Annotation

This article is devoted to the analysis of the annual and seasonal variations of the integrated amount of water (IWV) for the Maidanak astronomical observation site based on ERA5 reanalysis data. In the study, a height-adjustment method was applied, taking into account the seasonal variations of the scale height (H), which characterizes the vertical distribution of IWV. Using this methodology, the short-term seasonal variations of IWV values for 2016–2018, as well as the long-term dynamics for 2016–2025, were investigated and confirmed through graphical analysis. The obtained results allow for the assessment of the quality of astronomical observations at the Maidanak observatory and the identification of atmospheric limitations related to IWV. At the same time, this approach can also be applied to other mountainous astronomical observatories, enhancing the efficiency of their observational activities.

Keywords: IWV, GPWV-H, scale height, ERA5, TCWV, Maidanak observatory.

ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ ДЛЯ МАЙДАНАК С УЧЕТОМ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРА H

Аннотация

Данная статья посвящена анализу годовых и сезонных изменений интегрального содержания водяного пара (ИСВ) для астрономического наблюдательного района Майданак на основе реанализных данных ERA5. В исследовании применён метод высотной корректировки с учётом сезонных изменений масштабной высоты (H), характеризующей вертикальное распределение ИСВ. С использованием данной методики для значений ИСВ за 2016–2018 годы были изучены краткосрочные сезонные и долгосрочная динамика за период 2016–2025 годов, и это было подтверждено графическим анализом. Полученные результаты позволяют оценить качество астрономических наблюдений в обсерватории Майданак и определить ограничения атмосферы, связанные с ИСВ. В то же время данный подход может быть применён и к другим горным астрономическим обсерваториям, что способствует повышению эффективности их наблюдательной деятельности.

Ключевые слова: ИСВ, GPWV-H, масштабная высота, ERA5, Майданакская обсерватория

H PARAMETRINING MAVSUMIY O'ZGARISHINI INOBATGA OLIB, MAYDANAK UCHUN INTEGRAL SUV MIQDORINI BAHOLASH

Аннотация

Ushbu maqola Maydanak astronomik kuzatuv hududi uchun integral suv miqdori (ISM) ning yillik va fasliy o'zgarishlarini ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida tahlil qilishga bag'ishlangan. Tadqiqotda ISM vertikal taqsimotini tavsiflovchi ko'lam balandligi (H) ning fasliy o'zgarishlari inobatga olingan holda balandlikka moslashtirish usuli qo'llanildi. Mazkur metodika yordamida 2016–2018 yillar uchun ISM qiymatlari fasliy H o'zgarishlariga qisqa muddatli va 2016–2025 yillar oralig'idagi uzoq muddatli dinamikasi o'rganildi, hamda grafik tahlillar orqali tasdiqlandi. Olingan natijalar Maydanak rasadxonasida astronomik kuzatuvlar sifatini baholash va atmosferaning ISM bilan bog'liq cheklovlarini aniqlash imkonini beradi. Shu bilan birga, ushbu yondashuv boshqa tog'li hududlardagi astronomik observatoriyalar uchun ham qo'llanilishi mumkin bo'lib, ularning kuzatuv samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: ISM, GPWV-H, ko'lam balandligi, ERA5, TCWV, Maydanak observatoriyasi.

Kirish. Atmosferadagi suv bug'lari miqdori astronomik kuzatuvlar sifatiga bevosita ta'sir ko'rsatadigan muhim omillardan biridir. Integral Suv Miqdori (ISM) - bu 1 sm² maydonga ega atmosfera ustunidagi barcha suv bug'lari to'liq kondensatsiyalansa hosil bo'ladigan suv qatlamining balandligi bo'lib, odatda millimetr yoki santimetrda o'lchanadi. Teleskop yo'nalishi bo'yicha ISM miqdorining kamayishi, ayniqsa infraqizil va millimetr to'lqinlarda, atmosferaning optik shaffofligini oshiradi, bu esa kuzatuvlar aniqligini sezilarli darajada yaxshilaydi [1,2].

Maydanak observatoriyasi (balandligi ≈ 2600 m) uchun ISMni aniq baholash maqsadida ushbu tadqiqotda ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida, balandlikka moslashtirish usuli yordamida (GPWV-H – “Ground-level Precipitable Water Vapor with scale Height adjustment”) hisob-kitoblar olib borildi. Avvalgi maqolada TCWV (Total Column Water Vapor) qiymatlari vertikal yo'nalishda ekspo-pasayish modeli orqali balandlikka moslashtirilib uni GNSS(Global Navigation Satellite System) ma'lumotlari bilan solishtirilib qanchalar aniq baholashi ko'rsatilgan edi [1]. Mazkur tadqiqot esa bu yondashuvni yanada rivojlantirib, ISMning

fasliy o'zgaruvchanligini va H parametrining mavsumga qarab o'zgarishini inobatga olgan holda, Maydanak hududi uchun 2016–2018 yillardagi qisqa muddatli va 2016–2025 yillardagi uzoq muddatli ISM o'zgarishi GNSS ma'lumotlari orqali olingan ISM bilan taqqoslab tahlil qiladi [3].

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida turli meteorologik parametrlarni (masalan, TCWV – Total Column Water Vapor, TCC – Total Cloud Cover, CBH – Cloud Base Height) hisoblash mumkin. Biroq, bu ma'lumotlar to'g'ridan-to'g'ri balandlikni hisobga olmagan holda taqdim etilib, ular faqat grid katakcha balandligiga (orography) bog'langan. Shu sababli, tog'li hududlarda (xususan, Maydanak kabi observatoriya joylashgan hududlarda) bunday ma'lumotlardan bevosita foydalanish sezilarli xatoliklarga olib keladi [1,4]. Oldingi maqolada ERA5 ma'lumotlarini bevosita qo'llash qanday xatoliklarni keltirib chiqarishi ko'rsatib o'tilgan, shuningdek yanada aniqroq natijalarga erishish uchun H parametrining mavsumiy qiymatlarini inobatga olish zarurligi ta'kidlangan edi. Ma'lumki, H parametri fasllar davomida o'zgaradi va ushbu o'zgarishlarni hisobga olgan holda bir qator ilmiy tadqiqotlar hamda maqolalar e'lon qilingan [5,6].

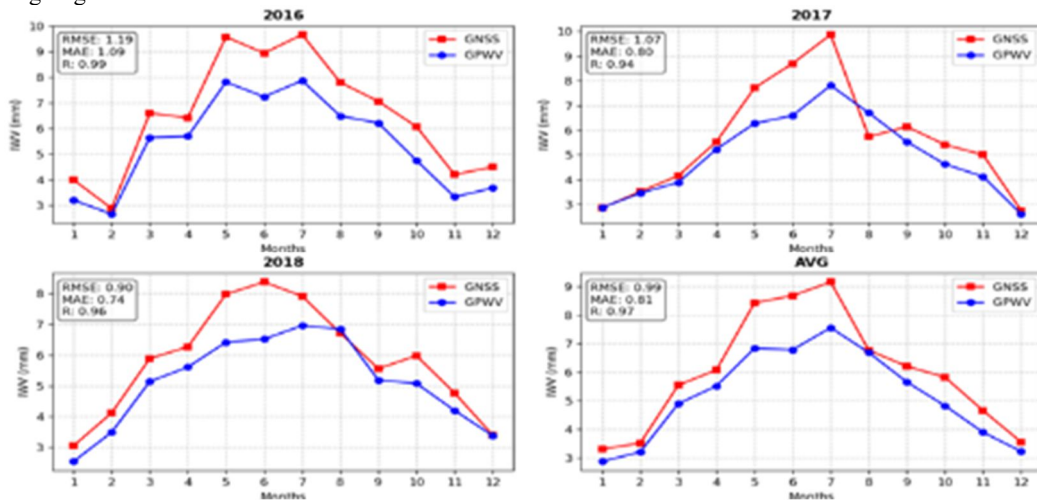
Tadqiqot metodologiyasi. ERA5 reanaliz ma'lumotlari asosida biz Maydanak hududi uchun ISMni aniqlagan edik. [1,4] Ushbu holatda ma'lumotlarni to'g'ridan-to'g'ri qo'llash qanday xatolikka olib kelishini va bu xatoliklarni bartaraf etish (relyefning ta'sirini hisobga olish) uchun quyidagi empirik formula qo'llanilgan edi:

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

bu yerda: TCWV – ERA5 reanaliz ma'lumotidagi integral suv bug'i miqdori, δz – observatoriya va grid nuqtasi orasidagi balandlik farqi (m), H – suv bug'ining tarqalish balandligi, odatda 2278 m deb olinadi [1,4].

Mazkur formuladan foydalanib, [1] maqola Maydanak hududi uchun 2016–2018 yillardagi ISM qiymatlarini balandlikka moslashtirib tahlil qilingan edi(1-rasm).

1-rasm. 2016-2018 yillar uchun Maydanak hududida ISMni GNSS(qizil) va balandlikka moslangan ERA5(ko'k) ma'lumotlar grafigi



Olingan grafiklardan korinib turibdiki, eng katta farq yoz oylarida kuzatilgan. Bu farqning asosiy sababi shundaki, avvalgi hisob-kitoblarda suv bug'ining tarqalish balandligi H butun yil davomida doimiy (2278 m) deb qabul qilingan. Aslida esa, H parametri fasllar bo'yicha o'zgarib turadi, va aynan yozda bu qiymat ancha katta bo'ladi, bu esa balandlikka moslashtirishda aniqlik pasayishiga olib keladi [6,7].

Grafikdan yana bir muhim kuzatuv shuki, GNSS ma'lumotlari bilan ERA5 asosida balandlikka moslashtirilgan GPWV-H qiymatlari bir-biriga yaqin kelgan (sentyabrdan-aprelgacha). Statistik baholash natijalariga ko'ra: MAE = 0.81 mm, RMSE = 0.99 mm, r = 0.97. Bu qiymatlar GPWV-H metodikasi orqali olingan natijalar real kuzatuvlar bilan yuqori darajada mos kelishini ko'rsatadi. Bu yondashuv hozirgi sharoitda yetarlicha ishonchli deb baholanishi mumkin. Shunga qaramay, ushbu maqolada biz H parametrining mavsumiy o'zgarishini hisobga olib, GPWV-H ni yanada aniqlashtirishga harakat qilamiz. Bunday yondashuv yoz oylarida kuzatilgan farqni kamaytirish va GPWV-H modelining real sharoitga yanada yaqinlashtirilishi uchun muhim ahamiyatga ega [3,8].

Tahlil va natijalar. H - bu atmosferadagi suv bug'ining balandlik bo'yicha kamayish tezligini ifodalovchi xarakteristik parametrdir. U odatda quyidagi fizik formula bilan aniqlanadi:

$$H = \frac{RT}{Mg} \tag{2}$$

bu yerda: R – universal gaz doimiysi, T – atmosfera harorati, M – suv bug'ining molyar massasi, g – erkin tushish tezlanishi.

Bu formuladan ko'rinib turibdiki, H haroratga bog'liq bo'lib, mavsumlar bo'yicha o'zgaradi. Masalan, sovuq davrlarda H kichik bo'lib, yozda esa yuqoriroq bo'ladi [6,7,9]. Amaliy hisoblarda H radiozond ma'lumotlari asosida aniqlanadi. Odatda bu qiymat 2200 dan 2700 m gacha o'zgaradi.(1-jadval)

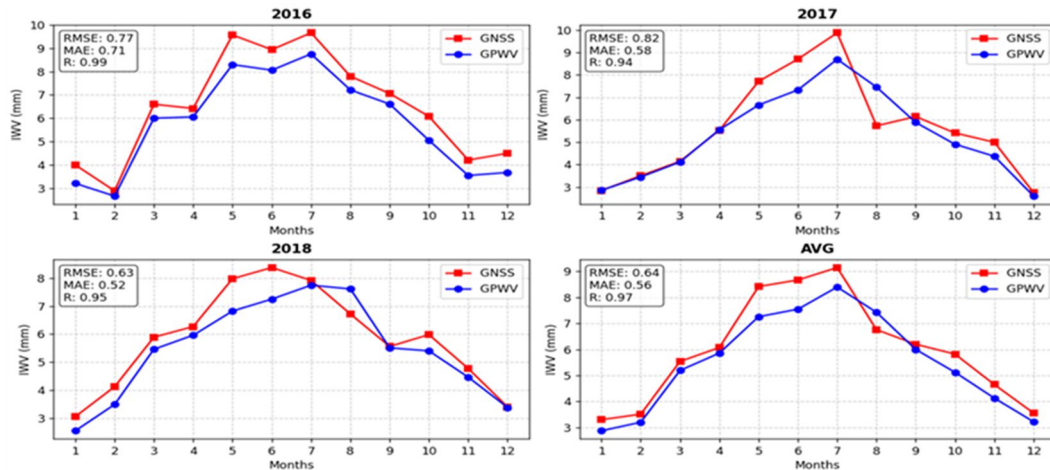
1-jadval. Ilmiy maqolalardan kelib chiqqan holda H₁ ning o'zgarish oralig'i.

Mintaqa	H (m)	Manba
Tropik iqlim	2600–2800 m	(Bevis et al., 1992)
Mo'tadil kenglik	2200–2400 m	(Liou, 2002; Bock et al., 2005)
Tog'li hududlar	2000–2300 m	(Kwon et al., 2007; Wang & Zhang, 2009)

Ilmiy maqolalarda, ayniqsa astronomik va meteorologik kuzatuvlar uchun ishlatiladigan loyiha hisoblarida esa $H = 2273$ m yoki $H = 2278$ m sifatida standart qiymat sifatida qabul qilinadi [4]. Birinchi maqolada, ilgari o'tkazilgan tadqiqotlarga asoslanib, Maydanak uchun $H = 2278$ m qiymatini tanladik. Biroq bu maqolada yoz oylaridagi farqlarni qisqartirish uchun biz mavsumiy o'zgarishlarni kiritish orqali hisobladik.

$$GPWC = TCWV * \exp\left(-\frac{\delta z}{H_{mavsum}}\right)$$

bu erda: $\delta z =$ o'zgarmasdan qoladi chunki ERA5 reanaliz ma'lumotlarida grid balandligi (orography) mavsum davomida o'zgarmaydi (ya'ni, bu single level bo'lib, vaqtga bog'liq emas). Faqat o'zgaradigan kattalik bu H_{mavsum} bo'lib mavsum o'zgarishi oralig'i *Qish: 2278, Bahor, Kuz: 2450, Yoz uchun 2600* tanlab olingan yuqorida keltirilgan jadval va ilmiy maqolalarga asosan [3,4]. Barchasini hisobga olgan holda biz 2016-2018 yil H_{mavsum} uchun grafik chizish orqali uni tahlil qildik (2-rasm). Grafiklardan ko'rish mumkinki yoz oylaridagi xatolik ancha kamaygan va deyarli haqiqiy qiymatlar bilan bir xilda.

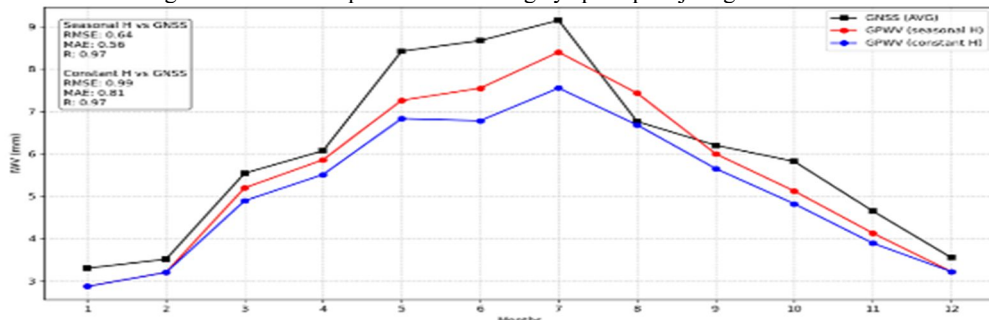


2-rasm 2016-2018 yillar uchun GNSS(qizil) va balandlikka moslangan H_{mavsum} (ko'k) uchun taqqoslash grafigi.

H_{mavsum} o'zgarishi kiritilgandan so'ng, grafikda aniqlik yanada oshgani ko'rinadi. Xususan, 3 yillik o'rtacha uchun chizilgan grafikni ko'radigan bo'lsak, avgust-aprel oylarida hisoblangan oylik o'rtacha qiymatlar GNSS ma'lumotlari bilan deyarli bir xil chiqqan. Qolaversa, yoz oylarida ham xatolik kamaygan va aniqlik darajasi oshgan. H ning mavsumiy o'zgarishlari kiritilgach, 3 yillik o'rtacha uchun quyidagi statistik ko'rsatkichlar olindi:

- $r = 0.97$
- $MAE = 0.56$ mm
- $RMSE = 0.64$ mm

Bu esa H ni doimiy deb olgan holatga qaraganda ancha yaxshi natija ekanligini ko'rsatadi. Agar GNSS, ERA5 H_{doimiy} , va H_{mavsum} asosida hisoblangan 3 yillik o'rtacha qiymatlar tahlil qilinsa (3-rasm), natijalardan ko'rinadiki, H parametrini mavsumga moslab olish orqali real o'lchovlarga yaqinroq natijalarga erishish mumkin.



3-rasm. 2016-2018 yil uchun oylik o'rtacha qiymatlar grafigi. GNSS(qora), H_{mavsum} (qizil) va H_{doimiy} (ko'k) o'zgarishi tasvirlangan.

Dastlab, H ning doimiy qiymatidan ($H = 2278$ m) foydalangan holda hisoblangan GPWV-H qiymatlarida o'rtacha xatolik 0.81 mm, o'rtacha kvadratik og'ish (RMSE) esa 0.99 mm ni tashkil etdi. Biroq H ning mavsumiy o'zgarishi hisobga olinganda (*qish: 2278 m, bahor/kuz: 2450 m, yoz: 2600 m*), natijalar yanada aniqroq bo'ldi - o'rtacha xatolik 0.56 mm, RMSE 0.64 mm gacha kamaydi. Har ikkala holatda ham korrelyatsiya koeffitsienti (r) doimiy ravishda 0.97 bo'lib, bu ERA5 hisob-kitoblarining GNSS o'lchovlari bilan yuqori darajada mosligini tasdiqlaydi. Bu natijalar shuni ko'rsatadiki, H parametrining mavsumiy dinamikasini hisobga olish GPWV-H qiymatlarining aniqligini sezilarli darajada oshiradi. Buni 3-rasmdan ko'rish mumkin, ayniqsa yoz oylarida doimiy H bilan sezilarli farq kuzatilgan, bu esa H parametrining oylik o'zgarishini hisobga olish zaruratini ko'rsatadi. Demak, kelgusida oylik H qiymatlaridan foydalanish orqali yanada aniqlashtirilgan natijalarga erishish mumkin.

Ushbu tadqiqotda qo'llanilgan GPWV-H (boshqacha aytganda, balandlikka moslashtirilgan ERA5 TCWV) usuli yordamida 2016-2025 yillar oralig'ida Maydanak observatoriyasi hududidagi yillik integral suv miqdori (ISM) o'zgarishi grafik shaklida tasvirlandi (4-rasm). Grafikdan ko'rinib turibdiki, Maydanak hududi uchun yillik o'rtacha ISM qiymati odatda 5 mm atrofida bo'ladi. Ayniqsa, 2021-yilda ushbu qiymat nisbatan kamayib, taxminan 4.8 mm bo'lgan. Umuman olganda,



4-rasm 2016-yildan 2025-yil iyun oyigacha bo'lgan davr mobaynida ISM ni yillik o'rtacha qiymatlari o'zgarishi

Maydanak observatoriyasi uchun ISM yillik o'rtacha qiymati 5 mm deb qabul qilish mumkin. Tadqiqot doirasida 2016-yildan 2025-yil iyun oyigacha bo'lgan ma'lumotlar o'rganildi. Shu sababli ham grafikda 2025-yil oxirida keskin pasayish kuzatilgan, bu esa ma'lumotlarning hali to'liq bo'lmasligi bilan izohlanadi. Shuningdek, $H_{mavsumiy}$ va doimiy H qiymatlari asosida hisoblangan GPWV- H natijalari real kuzatuv qiymatlariga qanchalik yaqinligini taqqoslab ko'rish mumkin bo'ldi. Bu o'rinda GNSS kuzatuv ma'lumotlari faqat 2016–2018 yillar uchun mavjud bo'lganligi sababli, qolgan yillar uchun faqat ERA5 reanaliz ma'lumotlariga tayanilgan holda ISM o'zgarishi baholandi(4-rasm).

Xulosa va takliflar. Mazkur tadqiqotda Maydanak Astronomik Observatoriyasi hududi uchun 2016–2025 yillar davomida ERA5 reanalizining TCWV ma'lumotlari asosida balandlikka moslashtirilgan GPWV- H qiymatlari hisoblandi va ular 2016–2018 yillardagi GNSS o'lchovlari bilan taqqoslandi. Hisoblashlarda H parametri ikki yondashuv bilan tanlandi: doimiy ($H = 2278$ m) va mavsumiy (H_{mavsum}) qiymatlar. Natijalar shuni ko'rsatdiki, doimiy H yondashuvi oddiy va amaliy jihatdan qulay bo'lib, o'rtacha xatolik 0.81 mm va RMSE 0.99 mm ni tashkil etdi. Bu yondashuv ayniqsa radiozond ma'lumotlari mavjud bo'lmagan joylar uchun samarali yechim sifatida tavsiya etiladi. Bundan tashqari, ushbu usul yuqori korrelyatsiya koeffitsienti ($r = 0.97$) bilan mustahkam bog'liqlikni ta'minladi. Buni 2016-2018 yillar uchun hisoblangan GNSS ma'lumotlari bilan taqqoslaganda ko'rdik(1-rasm)

Shu bilan birga, H_{mavsum} asosida hisoblash natijalari yanada aniqlik berdi: o'rtacha xatolik 0.56 mm gacha, RMSE esa 0.64 mm gacha kamaydi. Bu yondashuv real atmosferik sharoitlarni yaxshi aks ettirishini ko'rsatadi, ayniqsa ISM ning mavsumiy o'zgarishlari sezilarli bo'lgan davrlarda. (2-rasm).

Tadqiqot davomida Maydanak hududida ISM ning eng katta o'zgarishlari aynan yoz oylarida (may–avgust) kuzatilishi aniqlandi, bu davrda ISM qiymatlari 7–9 mm gacha oshgan. Boshqa fasllarda esa u 2.9–5.5 mm oralig'ida bo'lgan. Shu sababli, yoz mavsumida H qiymatini moslashtirish zarurati tug'iladi. Doimiy H bu holatda yetarlicha aniqlik bermasdan, 0.5–1.0 mm atrofida xatolik keltirib chiqaradi. H_{mavsum} yondashuvi esa ushbu xatolikni 0.3–0.8 mm gacha kamaytirishga imkon beradi. Shuningdek har ikkala yondashuv o'rtasidagi farq 0.2–0.4 mm atrofida bo'lib, bu metodikaning ilmiy va amaliy jihatdan foydali ekanini ko'rsatadi.

Yanada aniqlik talab etilgan hollarda H ni oylik aniqlash tavsiya etiladi. Chunki H qancha qisqa vaqt oralig'i uchun aniqlansa, GPWV- H qiymatlari shuncha real kuzatuv ma'lumotlariga yaqin bo'ladi. Biroq, bu yondashuv faqat radiozond (kuzatuv) ma'lumotlari mavjud hududlar uchun qo'llanishi mumkin, chunki H odatda shunday ma'lumotlarga asoslanib aniqlanadi. Agar hech bo'lmaganda bir yillik radiozond ISM ma'lumotlari mavjud bo'lsa, undan H_{mavsum} qiymatlarini chiqarib, ERA5 TCWV ma'lumotlari uchun butun davrda moslashtirish mumkin. Bu usul ehtiyotkorlik bilan qo'llansa, yuqori aniqlikni ta'minlaydi.

ADABIYOTLAR

1. Tillayev Y., Xurramov I. Maydanak observatoriyasida ERA5 ma'lumotlari asosida integral suv miqdorini baholash. O'zMU xabarlari. 2025
2. Yusufjon Tillayev. Atmospheric parameters affecting astronomical observations at the Maidanak Observatory. 2024, SPIE, 13098, 130982A
3. Rajabov Y., Tillayev Y. Maydanak observatoriyasi atmosferasidagi integral suv miqdori variatsiyalarini GPS-meteorologiya usuli orqali tadqiq qilish RIAK-XII. 2019
4. 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
5. Bevis, M., et al. (1992). GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 97(D14), 15787–15801.
6. Maohua Ding, Yunxiang Zhang, Zishen Li, and Jinjun Liu. Developments of Empirical Models for Vertical Adjustment of Precipitable Water Vapor Measured by GNSS. Remote Sensing, 2025, 17(3), 512
7. Azimov A. M., Tillayev Y. A., Hafizov A. R. and Tillayeva N. Y. Long-term Statistics of Meteorological Data at the Maidanak Astronomical Observatory. 2025, IOPscience
8. Tillayev Y., Azimov A., Hafizov A. Astronomical Seeing at Maidanak Observatory during the year 2018. Galaxies 2021, 9, 38. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Tillayev Y., Azimov A., Ehgamberdiev S., Ilyasov S. Astronomical Seeing and Meteorological Parameters at Maidanak Observatory. Atmosphere 2023, 14, 199. <https://doi.org/10.3390/atmos14020199>