Qabul qilindi: 3-oktabr 2026-yil • Ma’qullandi: 8-oktabr 2026-yil • Nashr qilindi: 13-oktabr 2026-yil

UO‘K 523.4:520.82

EKZOSAYYORALAR TADQIQOTI: GJ 3470 b NING OPTIK KUZATUVLARI MISOLIDA

Xayrullayeva Hilola Ibodullo qizi

Abu Rayhon Beruniy Universiteti NTM Qarshi kampusi tyutori

Annotatsiya. Tezisda iliq sub-Neptun GJ 3470 b misolida ekzosayyoralarni optik tranzit kuzatish imkoniyatlari tahlil qilingan. Chop etilgan parametrlar asosida tranzitning yorqinlik egri chizig‘i modellashtirilgan: kutilayotgan tranzit chuqurligi taxminan 6,7 ppt, davomiyligi taxminan 1,9 soat. Atmosfera bo‘yicha asosiy natijalar umumlashtirilgan, Maydanak observatoriyasidan 2026–2027-yillar mavsumida to‘liq kuzatish mumkin bo‘lgan 10 ta tranzit hisoblangan.

Kalit so‘zlar: ekzosayyora, GJ 3470 b, tranzit fotometriya, M-karlik, sub-Neptun, Reley sochilishi, yorqinlik egri chizig‘i, Maydanak observatoriyasi.

Аннотация. На примере тёплого субнептуна GJ 3470 b анализируются возможности оптических транзитных наблюдений экзопланет: смоделирована кривая блеска (глубина ≈ 6,7 ppt, длительность ≈ 1,9 ч), обобщены результаты исследования атмосферы и рассчитаны 10 транзитов, наблюдаемых с обсерватории Майданак в 2026–2027 гг.

Ключевые слова: экзопланета, GJ 3470 b, транзитная фотометрия, М-карлик, субнептун, рэлеевское рассеяние, кривая блеска, обсерватория Майданак.

Abstract. Using the warm sub-Neptune GJ 3470 b, the article analyses optical transit observations of exoplanets: a light curve is modelled (depth ≈ 6.7 ppt, duration ≈ 1.9 h), atmospheric results are summarised, and 10 transits observable from Maidanak Observatory in 2026–2027 are computed.

Keywords: exoplanet, GJ 3470 b, transit photometry, M dwarf, sub-Neptune, Rayleigh

scattering, light curve, Maidanak Observatory.

Tranzit usulida sayyora yulduz diski oldidan o‘tganda yulduz yorqinligining davriy pasayishi qayd etiladi. Bu sayyoraning yulduzga nisbatan radiusi va orbita geometriyasini aniqlash imkonini beradi, turli to‘lqin uzunliklaridagi kuzatuvlar esa atmosfera tarkibini o‘rganishning asosiy usulidir.

GJ 3470 b ni 2012-yilda X. Bonfils va hammualliflari HARPS radial tezliklari bo‘yicha kashf etgan va TRAPPIST fotometriyasida tranzitini qayd etgan [1]. Sayyora yaqin (≈ 29 pk) va nisbatan yorqin (V = 12,3) M-karlik atrofida aylanadi. Yulduz kichikligi tufayli tranzit chuqur bo‘lib, obyekt o‘rtacha diametrli yerusti teleskoplari uchun ham qulay.

Maqsad – GJ 3470 b misolida optik tranzit kuzatuvlari imkoniyatlarini tahlil qilish, yorqinlik egri chizig‘ini modellashtirish va Maydanakdan kuzatish uchun qulay tranzitlarni bashorat qilish.

Parametrlar NASA Exoplanet Archive’dan olindi [2]: efemerida ExoFOP yechimidan, orbita nishabligi va a/R *Awiphan va b. ishidan [3], massa Kosiarek va b. natijalaridan [4]. Radiuslar nisbati k = Rp/R* chop etilgan radiuslar (Rp = 4,13 R⊕, R* = 0,4997 R⊙) bo‘yicha hisoblandi.

Yorqinlik egri chizig‘i Mandel–Agol formalizmida [5] batman paketi yordamida modellashtirildi [6]: aylanma orbita va kvadratik chekka qorayishi (R diapazoni uchun taxminiy $u_1 = 0{,}35$; $u_2 = 0{,}25$) qabul qilindi.

Kuzatish imkoniyatlari Maydanak observatoriyasi (38°40′ sh.k., 66°54′ sh.u., 2593 m) uchun baholandi [7]. Tranzit vaqtlari $Tc = T_0 + n \cdot P$ bo‘yicha, noaniqlik $\sigma = (\sigma T_0^2 + n^2 \sigma P^2)^{\wedge}½$ bo‘yicha, obyekt va Quyosh balandligi Astropy kutubxonasida hisoblandi. Shart: tranzit va 30 daqiqalik tayanch intervallarda obyekt balandligi > 30°, Quyosh < −12°.

1. Tizim parametrlari 1-jadvalda keltirilgan. Sayyoraning o‘rtacha zichligi (0,80 g/sm³) Neptunnikidan ancha past bo‘lib, qalin vodorod-geliy qobig‘idan dalolat beradi [3; 4].

1-jadval

GJ 3470 va GJ 3470 b ning asosiy parametrlari

Parametr	Qiymat	Manba
Yulduz massasi, M⊙ / radiusi, R⊙	0,498 ± 0,020 / 0,500 ± 0,015	[2]
Spektral sinf / effektiv harorat, K	M1,5 V / 3552 ± 157	[1; 2]
Masofa, pk / V kattaligi	29,42 ± 0,05 / 12,3	[1; 2]
Orbital davr P, sutka	3,33665106 ± 0,00000129	[2]
Tranzit epoxasi T_0, BJD	2459500,53574 ± 0,00012	[2]
Tranzit chuqurligi, % / davomiyligi, soat	0,677 ± 0,004 / 1,858 ± 0,032	[2]
Sayyora radiusi, R⊕ / muvozanat harorati, K	4,13 ± 0,15 / ≈ 595	[2]
Sayyora massasi, M⊕ / zichligi, g/sm³	13,9 ± 1,5 / 0,80 ± 0,13	[3; 4]
Orbita nishabligi, ° / a/R*	89,13 (+0,26/−0,34) / 13,98 (+0,20/−0,28)	[3]

2. Tranzit modeli. Hisoblangan k = 0,0757, zarba parametri b = (a/R*)·cos i ≈ 0,21. Chekka qorayishi bilan modelning maksimal chuqurligi 6,75 ppt, davomiyligi 1,92 soat bo‘ldi (1a-rasm), bu ExoFOP qiymatlariga (0,677 %; 1,86 soat) mos keladi [2]. Chekka qorayishisiz chuqurlik k^2 = 5,73 ppt bo‘lib, uni hisobga olmaslik radiusni noto‘g‘ri baholashga olib keladi.

3. Atmosfera tadqiqotlari 2-jadvalda umumlashtirilgan. Optik diapazon uchun eng

muhim natija – LBT da ko‘k va qizil filtrlarda bir vaqtda o‘tkazilgan kuzatuvlarda aniqlangan va keyinchalik tasdiqlangan Releу sochilishi [8; 9].

2-jadval

GJ 3470 b atmosferasini o‘rganish bo‘yicha asosiy natijalar

Tadqiqot	Usul / diapazon	Asosiy natija
Nascimbeni va b., 2013 [8]	Yerusti fotometriya (LBT), optik	Releу sochilishi: radius ko‘k nurda kattaroq
Dragomir va b., 2015 [9]	Ko‘p filtrli optik fotometriya	Releу sochilishi tasdiqlangan
Bourrier va b., 2018 [10]	UB spektroskopiya (HST, Lyman-α)	Neytral vodorodning kengaygan yuqori atmosferasi
Benneke va b., 2019 [11]	HST va Spitzer transmissiya va tutilish spektri	Past metallik, metan kam, suv izlari
Pallé va b., 2020 [12]	He I 10830 Å spektroskopiyasi	Geliy chiqib ketishi (atmosfera yo‘qotilishi)
Beatty va b., 2024 [13]	JWST spektroskopiyasi	SO_2, CH_4 va CO_2 aniqlangan

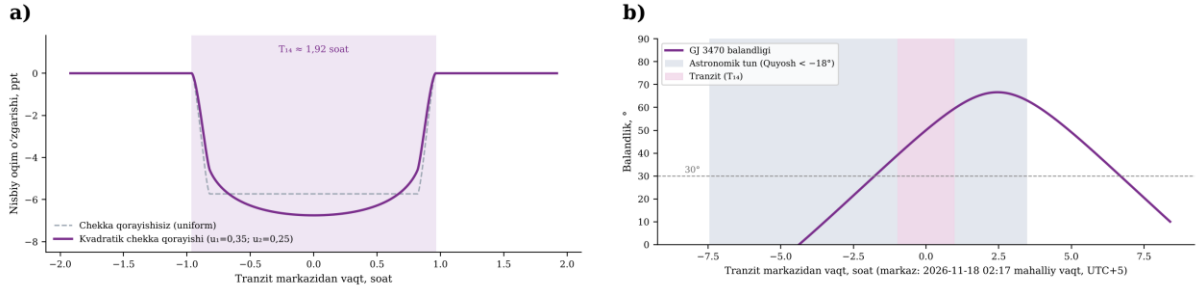
4. Maydanak observatoriyasidan kuzatish. GJ 3470 (og‘ishi +15°23′) Maydanakda taxminan 67° gacha ko‘tariladi. 2026-yil 15-oktabrdan 2027-yil 30-aprelgacha shartlarga javob beradigan 10 ta tranzit aniqlandi, bashorat noaniqligi 1,05–1,13 daqiqa (3-jadval, 1b-rasm).

3-jadval

Maydanak observatoriyasidan to‘liq kuzatiladigan GJ 3470 b tranzitlari (2026–

2027-yillar mavsumi)

Epoxa n	Tranzit markazi, UTC	Mahalliy vaqt (UTC+5)	Markazdagi balandlik, °	Minimal balandlik, °	σ, daq.
558	2026-11-17 21:17	2026-11-18 02:17	50,0	33,6	1,05
561	2026-11-27 21:31	2026-11-28 02:31	58,8	43,8	1,06
564	2026-12-07 21:45	2026-12-08 02:45	65,0	53,4	1,06
567	2026-12-17 22:00	2026-12-18 03:00	66,5	57,7	1,07
570	2026-12-27 22:14	2026-12-28 03:14	62,4	48,8	1,07
573	2027-01-06 22:28	2027-01-07 03:28	54,6	38,8	1,08
593	2027-03-14 16:04	2027-03-14 21:04	66,6	59,6	1,12
596	2027-03-24 16:18	2027-03-24 21:18	63,9	51,2	1,12
599	2027-04-03 16:33	2027-04-03 21:33	56,8	41,4	1,13
602	2027-04-13 16:47	2027-04-13 21:47	47,7	31,0	1,13



1-rasm. a) GJ 3470 b tranzitining modellashtirilgan yorqinlik egri chizig‘i; b) 2026-yil 17/18-noyabr tunida GJ 3470 ning Maydanakdagi balandligi va tranzit vaqti

Tranzit chuqurligi ≈ 7,3 mmag bo‘lgani uchun 1–2 mmag aniqlikdagi differensial fotometriya yetarli: bunga V = 12,3 yulduz uchun 1–1,5 m teleskoplarda erishiladi, tranzit hatto 0,6 m TRAPPIST da qayd etilgan [1]. Davomiylik 2 soatdan kam bo‘lgani uchun

tranzit bir tunda to‘liq kuzatiladi.

Ko‘p rangli fotometriya Reley sochilishi orqali atmosferani o‘rganish imkonini beradi [8; 9], ammo radiusning to‘lqin uzunligiga bog‘liq o‘zgarishi kichik bo‘lgani uchun bir necha tranzitni birlashtirish va chekka qorayishini aniq modellashtirish zarur (1a-rasm). Muntazam kuzatuvlar efemeridani yangilash va tranzit vaqtlari o‘zgarishlarini tahlil qilish uchun ham qimmatli [3].

Cheklovlar: aylanma orbita (chop etilgan e ≈ 0,11 noaniq) va taxminiy chekka qorayishi koeffitsiyentlari qabul qilingan, ob-havo va Oy holati hisobga olinmagan.

Xulosa. GJ 3470 b – zichligi past bo‘lgan iliq sub-Neptun. U Yerga yaqin joylashgan kichik M-karlik yulduz atrofida aylanadi, shu sababli tranzit kuzatuvlari uchun eng qulay obyektlardan biri hisoblanadi. Chop etilgan parametrlar asosida tuzilgan modelga ko‘ra, tranzit chuqurligi taxminan 6,75 ppt, davomiyligi esa taxminan 1,9 soatni tashkil etadi. Bunday tranzitni ishonchli qayd etish uchun 1–2 mmag aniqlikdagi fotometriya yetarli. Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, 2026–2027-yillar mavsumida Maydanak observatoriyasidan 10 ta tranzitni to‘liq kuzatish mumkin, ularning vaqti esa taxminan 1,1 daqiqa aniqlik bilan bashorat qilinadi. Bu GJ 3470 b ni mahalliy teleskoplarda ekzosayyoralarni o‘rganish uchun mos obyekt sifatida tavsiya etish imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Bonfils X., Gillon M., Udry S. et al. A hot Uranus transiting the nearby M dwarf GJ 3470. Detected with HARPS velocimetry. Captured in transit with TRAPPIST photometry // Astronomy & Astrophysics. – 2012. – Vol. 546. – A27.

2. NASA Exoplanet Archive. GJ 3470 Overview. – URL: https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/GJ%203470

3. Awiphan S., Kerins E., Pichadee S. et al. Transit timing variation and transmission spectroscopy analyses of the hot Neptune GJ3470b // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – Vol. 463, No. 3. – P. 2574–2582.

4. Kosiarek M.R., Crossfield I.J.M., Hardegree-Ullman K.K. et al. Bright opportunities for atmospheric characterization of small planets: masses and radii of K2-3 b, c, and d and

GJ3470 b from radial velocity measurements and Spitzer transits // The Astronomical Journal. – 2019. – Vol. 157, No. 3. – 97.

5. Mandel K., Agol E. Analytic light curves for planetary transit searches // The Astrophysical Journal. – 2002. – Vol. 580, No. 2. – P. L171–L175.

6. Kreidberg L. batman: BAsic Transit Model cAlculatioN in Python // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2015. – Vol. 127, No. 957. – P. 1161–1165.

7. Nascimbeni V., Piotto G., Pagano I. et al. The blue sky of GJ3470b: the atmosphere of a low-mass planet unveiled by ground-based photometry // Astronomy & Astrophysics. – 2013. – Vol. 559. – A32.

8. Dragomir D., Benneke B., Pearson K.A. et al. Rayleigh scattering in the atmosphere of the warm exo-Neptune GJ 3470b // The Astrophysical Journal. – 2015. – Vol. 814, No. 2. – 102.

9. Bourrier V., Lecavelier des Etangs A., Ehrenreich D. et al. Hubble PanCET: an extended upper atmosphere of neutral hydrogen around the warm Neptune GJ 3470b // Astronomy & Astrophysics. – 2018. – Vol. 620. – A147.

10. Benneke B., Knutson H.A., Lothringer J. et al. A sub-Neptune exoplanet with a low-metallicity methane-depleted atmosphere and Mie-scattering clouds // Nature Astronomy. – 2019. – Vol. 3. – P. 813–821.

11. Pallé E., Nortmann L., Casasayas-Barris N. et al. A He I upper atmosphere around the warm Neptune GJ 3470 b // Astronomy & Astrophysics. – 2020. – Vol. 638. – A61.

12. Beatty T.G., Welbanks L., Schlawin E. et al. Sulfur dioxide and other molecular species in the atmosphere of the sub-Neptune GJ 3470 b // The Astrophysical Journal Letters. – 2024. – DOI: 10.3847/2041-8213/ad55e9.