

УДК 523.53

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ЗВЕЗДЫ ТУС 5254-00839-1 ТРИТОНОМ В 2022 Г. В ОБСЕРВАТОРИИ САНГЛОХ

© 2024 г. Г. И. Кохирова^{a,*}, Ф. Д. Рахматуллаева^a, Д. Л. Горшанов^b,
В. Н. Львов^b, А. В. Девяткин^b

^aИнститут астрофизики Национальной академии наук Таджикистана,
Душанбе, Республика Таджикистан

^bГлавная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*e-mail: kokhirova2004@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2023 г.

После доработки 30.11. 2023 г.

Принята к публикации 10.01.2024 г.

Оптические наблюдения покрытия звезды ТУС 5254-00839-1 спутником Нептуна Тритоном были проведены 6 октября 2022 г. на телескопе Цейсс-1000 обсерватории Санглох (MPC code 193). В результате фотометрической обработки изображений, построена кривая блеска звезды и выявлено, что участки спада и подъема блеска имели конечную продолжительность от 15 до 24 с. Это, по-видимому, объясняется наличием атмосферы у Тритона. Кроме того, на полученной кривой блеска этого явления по нашим и другим наблюдениям выявляется “ступенька”, которая может свидетельствовать о возможном присутствии у покрываемой звезды тесного слабого объекта. В результате астрометрической обработки определены высокоточные координаты Тритона на средний момент покрытия, которые в пределах ошибок измерений совпали с его эфемеридным положением.

Ключевые слова: Тритон, покрытие звезды, наблюдения, фотометрия, кривая блеска, астрометрия, координаты

DOI: 10.31857/S0320930X24040088, EDN: LTYQGA

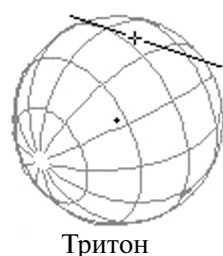
ВВЕДЕНИЕ

6 октября 2022 г. на Земле наблюдалось покрытие звезды из каталога ТУСНО-2 ТУС 5254-00839-1 спутником Нептуна Тритоном. Каталог GAIA DR3 содержит следующие координаты этой звезды: $\alpha = 23^{\text{h}} 36^{\text{m}} 52^{\text{s}}.448$, $\delta = 03^{\circ} 50' 09''.27$ (эпоха J2000). Ее звездная величина в полосе V, в соответствии с данными каталога ТУСНО-2, составляет 11.61^m. Полоса покрытия протянулась через середину Евразийского континента, проходя через Китай и Таджикистан. Ширина предсказанной траектории тени Тритона от северной до южной границы составила 1353 км (<http://occult.mit.edu/research/occultations/Triton/Triton.20221006>, 24.06.2023). С учетом того, что явление звездных покрытий является

одним из лучших средств исследования атмосфер планет и их спутников, сотрудники Института планетных наук (PSI) Массачусетского технологического института (MIT) и Лоуэлловской обсерватории инициировали организацию мировой наблюдательной кампании, обратившись к астрономам разных стран, включая Таджикистан, с предложением провести наблюдения этого явления. Научными целями наблюдательной кампании являются: уточнение параметров атмосферы Тритона на основе исследования пиков, спадов, “ступеней” или других особенностей кривой блеска; определение положения Тритона относительно небесной системы координат и его эфемериды, необходимых для наблюдений в будущих покрытиях; определение текущего точного

эффективного диаметра Тритона. В наблюдательной кампании приняли участие 19 обсерваторий Евразийского континента, среди них обсерватории в Благовещенске (Россия) и на Майданаке (Узбекистан).

Предложение коллег из США было поддержано в Таджикистане, и в Международной астрономической обсерватории Санглох Института астрофизики НАН Таджикистана 5–6 октября 2022 г. были проведены наблюдения затмения звезды Тритоном. Полученный наблюдательный материал был передан коллегам из Института планетных наук и Лувелловской обсерватории для исследования атмосферы Тритона и решения других задач, обозначенных в целях кампании. С учетом всесторонней научной ценности изучения данного затмения мы посчитали необходимым провести фотометрическую и астрометрическую редукцию полученных изображений и, используя полученные результаты, проанализировать особенности явления. Обработка ПЗС-кадров и анализ результатов выполнены совместно с сотрудниками Главной (Пулковской) астрономической обсерваторией РАН. Эфемеридные обстоятельства покрытия для обсерватории Санглох, полученные с помощью ПП ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012), представлены на рис. 1.



Начало 14:41:58 UT
Конец 14:43:46 UT
Продолжительность ~108 с

Тритон

+ 5254-00839-1

2022-10-06 14:43.0

Центр: RA = 233652.451 Dec = 055009.84

Кадр = 1.0"

Каталог: ТУС-21, Обсерватория: 193 Санглох

Рис. 1. Эфемериды явления покрытия звезды Тритоном 06.10.2022 г. для обсерватории Санглох.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Фотометрические наблюдения покрытия были проведены в обсерватории Санглох ($\varphi = 38^\circ 15' 40'' \text{N}$, $\lambda = 69^\circ 13' 04'' \text{E}$, $h = 2300 \text{ м}$, MPC code 193) на телескопе Цейсс-1000 (Кохинова и др., 2018). Телескоп оснащен ПЗС-камерой фирмы FLI, ПЗС-матрица которой содержит 1024×1024 пикселей размером $36 \times 36 \text{ мкм}$. Угловые размеры пикселя составляют $0''.6 \times 0''.6$. Также телескоп оснащен светофильтрами международной широкополосной системы Джонсона–Козинса *BVR*.

Для правильной интерпретации результатов наблюдений необходимо было, помимо построения кривой блеска покрытия, определить разность блеска Тритона и звезды, для чего выполнить их фотометрические наблюдения до и после явления, когда их изображения разделены достаточным расстоянием. Однако явление покрытия звезды Тритоном в Таджикистане происходило вскоре после заката Солнца, поэтому наблюдения до явления пришлось выполнять в предыдущую ночь. Таким образом, наблюдения выполнялись в течение двух ночей.

Накануне явления (5 октября 2022 г.) снималась короткая серия кадров (15 мин.) с фильтрами *R* и *I* и экспозициями по 5 с. Тритон и звезда находились на расстоянии друг от друга, достаточном для уверенных измерений.

В ночь явления (6 октября 2022 г.) было проведено две серии наблюдений только с фильтром *I* и экспозициями по 2 с. Из-за медленного считывания ПЗС-камеры интервал между экспозициями составлял около 8 с.

Первая серия наблюдений была проведена за 53 минуты до явления и закончилась через 1 ч. 15 мин. после него. В начале первой серии наблюдений расстояние между звездой и Тритоном позволяло измерить более яркую звезду, но не тусклый Тритон. Затем изображения этих объектов начали сливаться друг с другом, что не позволило измерить их правильным образом. Примерно за 18 мин. до покрытия изображения полностью слились, и измерения были выполнены для суммарного изображения. Примерно через 13 мин. после явления суммарное изображение начало деформироваться, что исказило результаты его измерения. Примерно через 38 мин. после явления изображения разделились, но находились близко друг к другу, что позволило измерить только более яркую звезду.

Во второй серии наблюдений, начавшейся через 1 ч. 20 мин. после явления и длившейся

примерно 35 мин., изображения разошлись достаточно далеко для уверенного измерения Тритона.

Обработка наблюдений выполнялась с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010). Выполнялась апертурная и PSF-фотометрия. Точность PSF-фотометрии в данном случае оказалась примерно в полтора раза лучше, поэтому ниже приведены именно ее результаты.

В качестве опорных объектов для дифференциальной фотометрии использовались две наиболее яркие звезды, изображения которых попали на все кадры всех серий наблюдений, а также Нептун. На рис. 2 приведен пример

кадра, полученного спустя 1 ч. 50 мин. после явления. На нем подписаны все измерявшиеся объекты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате фотометрической обработки получены кривые относительного блеска звезды и Тритона до и после явления, а также кривая блеска их суммарного изображения в отрезок времени, охватывающий явление; они приведены на рис. 3. В увеличенном масштабе кривая блеска покрытия, показывающая изменение суммарного блеска Тритона и звезды, приведена на рис. 4. На этих графиках по оси ординат

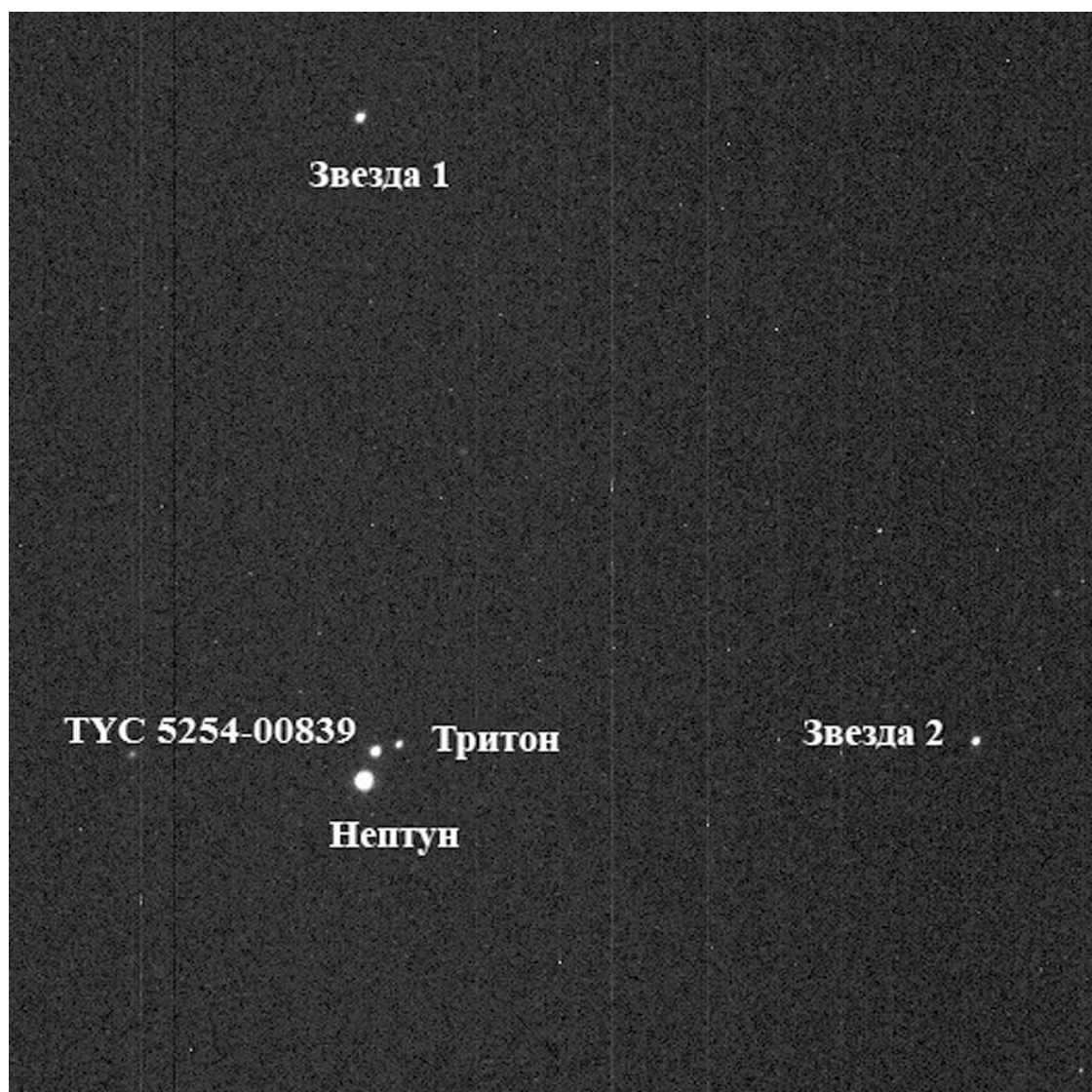


Рис. 2. Кадр с измеренными объектами, полученный 6 октября 2023 г. на телескопе Цейсс-1000 обсерватории Сан-глох после явления покрытия звезды Тритоном, длительность экспозиции с фильтром I – 2 с.

дан относительный блеск m в звездных величинах, по оси абсцисс — мировое время h в часах, ошибки фотометрических измерений нанесены в виде вертикальных баров.

Точность фотометрических измерений 5 октября значительно лучше, чем в последующую ночь, так как длительность экспозиций была в 2.5 раза больше. На левой панели рис. 3 бары ошибок ряда измерений звезды, соответствующие одному стандартному отклонению, приблизительно равны размерам точек на графике.

К сожалению, интервал между точками на кривой блеска покрытия весьма велик: около 8 с. Это не позволяет с нужной точностью определять моменты времени начала и конца различных участков кривой. Отчасти это компенсируется удовлетворительной фотометрической точностью.

На нисходящий и восходящий участки кривой блеска, соответствующие покрытию звезды атмосферой Тритона, попало по две точки

(рис. 4). Начало первого покрытия атмосферой произошло во временном интервале ($h:m:s$) между 14:40:42 и 14:40:50, конец — между 14:40:58 и 14:41:06 UTC. Начало второго атмосферного покрытия произошло между 14:42:08 и 14:42:16, конец — между 14:42:23 и 14:42:31 UTC. Соответственно, продолжительность спада блеска — между 16 и 24 с, продолжительность подъема блеска — между 15 и 23 с.

“Дно” кривой блеска покрытия, соответствующее интервалу времени, когда звезда полностью закрыта Тритоном, состоит из 9 точек, его продолжительность — от 62 до 78 с. Эфемеридные значения на момент покрытия следующие: угловая скорость Тритона — $0.065''/\text{мин.}$, угловой диаметр — $0''.129$ (вычисления выполнялись с помощью программного пакета ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012)). Таким образом, центральное покрытие должно было занять около 119 с. Из результатов наблюдений видно, что наблюдаемое покрытие было нецентральным.

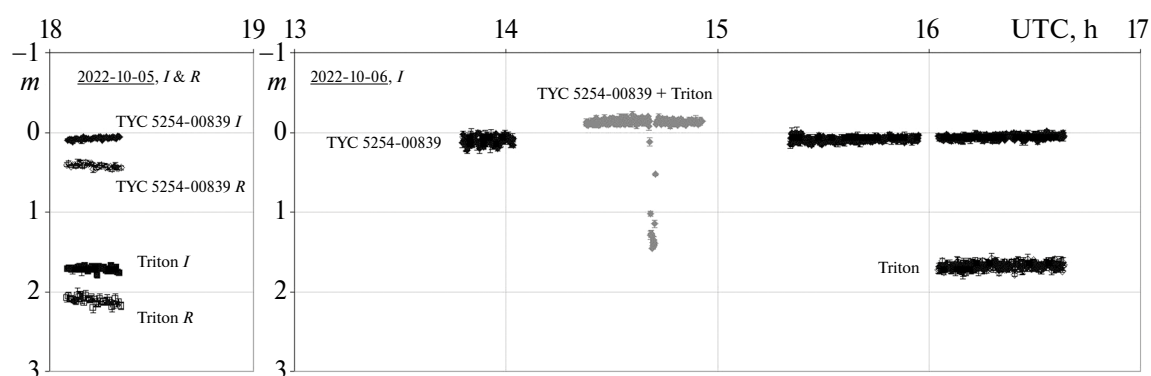


Рис. 3. Кривые относительного блеска звезды TYC 5254-00839-1 и Тритона до явления покрытия (левая панель) и после явления (правая панель), а также кривая блеска их суммарного изображения в отрезок времени, охватывающий явление (в центре правой панели).

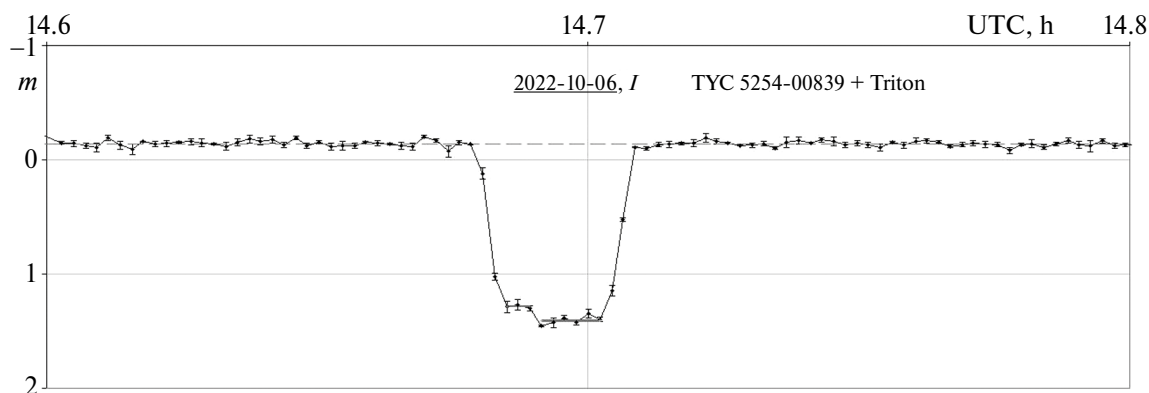


Рис. 4. Увеличенный масштаб кривой суммарного блеска покрытия Тритоном звезды TYC 5254-00839-1.

Средний момент покрытия — $14^h\ 41^m\ 37^s \pm 3^s$ UTC.

При этом “дно” кривой блеска почти плоское. При покрытиях звезд объектами, имеющими атмосферу, часто наблюдается повышение блеска вблизи середины покрытия (“центральная вспышка”), вызванное подсветкой атмосферы светом покрытой звезды. Однако в этот раз такого явления на кривой блеска не видно. Вместо этого уровень всего “дна” оказался выше, чем блеск одного Тритона (см. рис. 3).

Ниже приведены результаты анализа фотометрических особенностей явления в полосе I:

– Разность блеска Тритона и звезды, определенная до явления (накануне)	$1.639^m \pm 0.031^m$
– Разность блеска, определенная через полтора часа после явления	$1.620^m \pm 0.043^m$
– Средняя разность вне явления	$1.630^m \pm 0.037^m$
– Падение блеска во время явления составило	$1.501^m \pm 0.071^m$
– Разница между средней разностью вне явления и падением блеска во время явления равна	$0.129^m \pm 0.080^m$

Таким образом, во время покрытия не весь свет звезды был экранирован Тритоном. Часть его из-за рассеяния и преломления в атмосфере Тритона продолжала наблюдаться.

В начале “дна” кривой блеска покрытия есть “ступень”, состоящая из трех точек с высотой $0.118^m \pm 0.039^m$ относительно среднего уровня остальных шести точек “дна” (см. рис. 4). Длительность ее от 15 до 31 с.

На российском Интернет-форуме любителей астрономии есть сообщение от Ф.Д. Романова, посвященное наблюдениям данного покрытия (<https://astronomy.ru/forum/index.php/topic,283.3260.html>, 24.06.2023). По его просьбе наблюдения были выполнены в Yanqi Lake Observatory ($40^{\circ}\ 24'\ 29''.34\ N$, $116^{\circ}\ 40'\ 14''\ E$) в Пекине, Китай, на 0.7-метровом телескопе с f/6.5 (с фильтром R_C и экспозициями 1 с). Эти наблюдения были им обработаны, и получена кривая блеска явления (рис. 5). Интервалы между точками на этой кривой блеска составляют приблизительно 1.7 с, что позволяет более достоверно проследивать все этапы покрытия. Однако фотометрическая точность этой кривой заметно хуже, чем в настоящей работе.

На кривой блеска, построенной Ф.Д. Романовым, в начале “дна” также просматривается “ступень”. Из-за худшей фотометрической точности она видна не столь отчетливо, как на нашей кривой. Однако такое совпадение двух

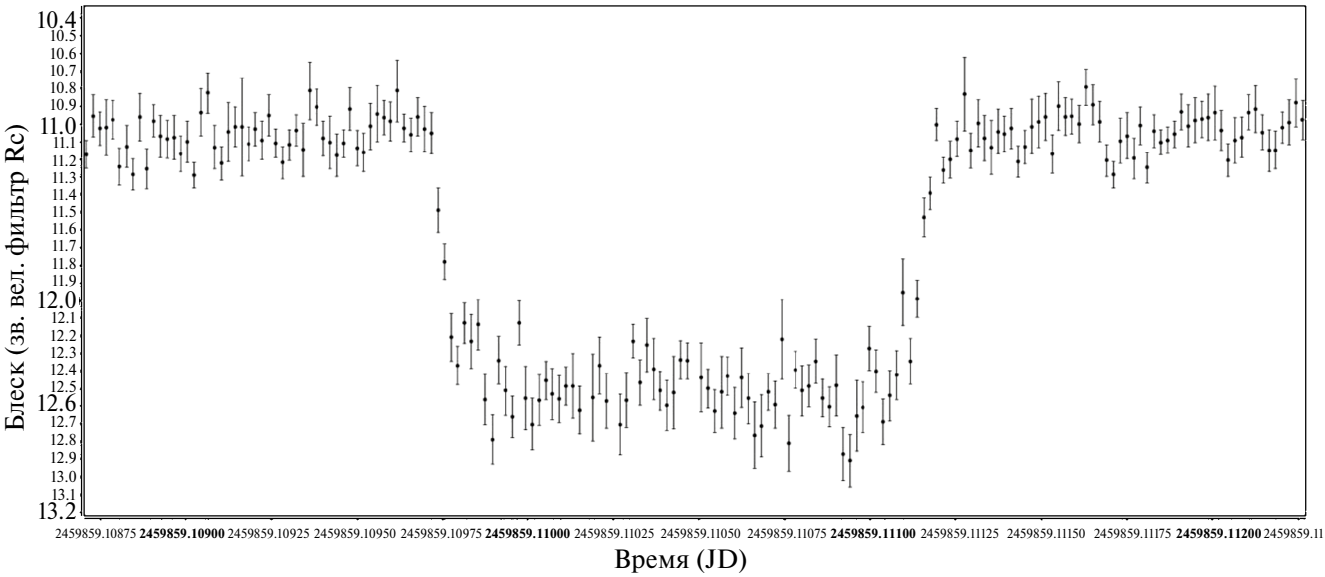


Рис. 5. Кривая блеска, полученная Ф.Д. Романовым по наблюдениям покрытия Тритоном звезды TYC 5254-00839-1 на обсерватории Yanqi Lake Observatory (Китай) (<https://astronomy.ru/forum/index.php/topic,283.3260.html>, 24.06.2023).

кривых позволяет предположить, что эта особенность вызвана не ошибками наблюдений и обработки, а присутствием вблизи покрываемой звезды тусклого компаньона, который был покрыт Тритоном на 15–30 с позже самой звезды. По оценкам, сделанным по нашей кривой блеска, расстояние компаньона от звезды может составлять $0''.016 - 0''.033$ и разность блеска $2^m - 3^m$.

В кривой блеска “ступень” могли бы вызвать следующие объекты: слабая звезда фона, неизвестный спутник звезды, слабый неизвестный спутник Нептуна, объект пояса Койпера и др. Используя ПП ЭПОС, мы определили, что если брать все известные на данный момент 1.3 млн астероидов, то в поле размером $1'$ никаких астероидов нет. Информации о двойственности звезды также нет. Поэтому, вопрос об этом слабом объекте остается открытым.

АСТРОМЕТРИЯ

Схема, поясняющая явление покрытия, приведена на рис. 6. Звезда (S на рис. 6) TYCHO-2 TYC 5254-00839-1 в каталоге GAIA DR3 имеет координаты на эпоху J2000 $\alpha = 23^h 36^m 52^s.448$, $\delta = -03^\circ 50' 09''.27$ и собственные движения $\mu_\alpha \cos \delta = 2.279$, $\mu_\delta = -22.923$ (в тысячных долях угловой секунды в год). С учетом собственного движения на дату 6 октября 2022 г. на средний момент покрытия $14^h 41^m 37^s$ (UTC) координаты звезды будут следующие: $\alpha = 23^h 36^m 52^s.451$, $\delta = -03^\circ 50' 09''.79$. Зная скорость видимого движения Тритона (0.001090 угловой секунды в секунду времени), можно найти хорду BE на его диске ($0''.0763$), которую звезда прошла за время покрытия (70 с).

Зная позиционный угол видимого движения ($255^\circ.2$) и видимый радиус Тритона ($0''.06437$), можно построить эту хорду и определить длину и направление отрезка CS ($0''.05185$, из треугольника CES), соединяющего центр спутника и положение звезды на средний момент покрытия. Тогда длина отрезка круга склонений SV будет равна $|CS| \cos \angle CSV = -0''.05$, а отрезка $CV = |CS| \sin \angle CSV = +0''.001$. Отсюда координаты Тритона на указанный момент таковы: $\alpha = 23^h 36^m 52^s.452$, $\delta = -03^\circ 50' 09''.84$, что соответствует величинам (О–С) соответственно $+0''.001$ и $+0''.02$.

В таблице для сравнения приведены эфемеридное (по данным PSI MIT и Ловелловской обсерватории) и измеренное нами положение Тритона на средний момент явления.

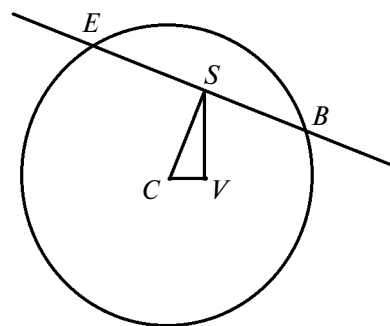


Рис. 6. Чертеж, поясняющий явление покрытия. Круг – видимый диск Тритона, C – его центр. Изображение звезды пересекает диск (позади него) по хорде BE , S – середина хорды, положение звезды в центральный момент покрытия. V – пересечение небесной параллели центра диска и круга склонений точки S .

Эфемеридное и измеренное по наблюдениям в обсерватории Санглов положение Тритона на средний момент покрытия

Положение опорной звезды (Gaia DR3)	α (J2000)	δ (J2000)	Средний момент покрытия (UTC)	Источник
Тритон.20221006 (каталог на эпоху покрытия)	$23^h 36^m 52^s.4514 \pm 0^s.0006$	$03^\circ 50' 09''.7954 \pm 0.0004$	$14^h 41^m 29^s \pm 27^s$	http://occult.mit.edu/research/occultations/Triton/Triton.20221006 , 24.06.2023
Тритон.20221006 (измерения)	$23^h 36^m 52^s.452 \pm 0^s.001$	$-03^\circ 50' 09''.84 \pm 0''.02$	$14^h 41^m 37^s \pm 3^s$	настоящая работа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На телескопе Цейсс-1000 обсерватории Санглох Института астрофизики НАН Таджикистана 5–6 октября 2022 г. были выполнены оптические наблюдения покрытия звезды ТУС 5254-00839-1 спутником Нептуна Тритон. Построены кривые блеска звезды и Тритона до и после явления, а также кривая блеска явления покрытия. Показано, что во время покрытия не весь свет звезды был экранирован Тритон. Часть его из-за рассеяния и преломления в атмосфере Тритона продолжала поступать на Землю. На кривой блеска этого явления выявлена “ступенька”, которая может быть вызвана присутствием вблизи у покрываемой звезды слабого объекта, природа которого неизвестна. Найден средний момент покрытия. Определены координаты Тритона на средний момент покрытия, практически совпадающие с его эфемеридным положением.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджетов Института астрофизики НАНТ и ГАО РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты “Апекс-I” и “Апекс-II” для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. С. 74–87. (Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Verestchagina I.A. APEX I and APEX II software packages for the reduction of astronomical CCD observations // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. № 1. P. 68–80.)
2. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 190–192. (Lvov V.N., Tsekmeister S.D. The use of the EPOS software package for research of the Solar System objects // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 177–179.)
3. Кохирова Г.И., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Горшанов Д.Л., Девяткин А.В., Хамроев У.Х., Буриев А.М. Определение орбиты астероида 2014 JO25 по наблюдениям в Таджикистане // ДАН РТ. 2018. Т. 61. № 5. С. 440–446.
4. <http://occult.mit.edu/research/occultations/Triton/Triton.20221006>, дата обращения 24.06.2023.
5. <https://astronomy.ru/forum/index.php/topic,283.3260.html>, 2023.