

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ЯДРА КОМЕТЫ C/2017 K2 (PAN-STARRS) НА БОЛЬШИХ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ^{1,2} С.Н. Сафарзода, ¹Д.К. Аюбов, ^{1,3}С.К. Амиралиев¹Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими³Таджикский национальный университет

Наблюдение кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS), проведенное в 2021 году с помощью телескопа AZT-8 (ГисАО), показало рост яркости и расширение комы по мере ее приближения к Солнцу. На основе динамического метода были рассчитаны радиус, объем и масса пыли в коме. Полученные данные, включая скорость сублимации (H₂O, CO₂), свидетельствуют о том, что на расстоянии более 5 а.е. главным механизмом активности является сублимация летучих соединений, в частности фазовый переход аморфного льда в обычный.

Ключевые слова: комета C/2017 K2 (Pan-STARRS), фотометрия, кома, сублимация.**ТАДҶИҚИ ҶАҶОЛНОКИИ ҲАСТАИ КОМЕТАИ C/2017 K2 (PAN-STARRS) ДАР МАСОҶАҶОИ ДҶҮРИ ОҶТОБМАРКАЗӢ****С.Н. Сафарзода, Д.К. Аюбов, С.К. Амиралиев**

Мушоҳидаҳои кометаи C/2017 K2 (Pan-STARRS), ки соли 2021 бо истифода аз телескопи AZT-8 (РАҶ) анҷом дода шуданд, афзоиши дурахшони ва васеъшавии қомаи Ҳангоми наздикшавии он ба Оғтоб нишон медиҳанд. Бо истифода аз усули динамики, радиус, ҳаҷм ва массаи ҷанг дар қома ҳисоб карда шуд. Маълумоти бадастомада, аз ҷумла суръати сублиматсияи H₂O ва CO₂, нишон медиҳанд, ки дар масофаҳои бештар аз 5 а.е. механизми асосии ҷаҷолнокии сублиматсияи пайвастиҳои зудбӯшаванда, бахусус гузариши марҳилаи яхи аморфи ба яхи одди ба ҳисоб меравад.

Калидвожаҳо: кометаи C/2017 K2 (Pan-STARRS), кометаҳо, фотометрия, қома, сублиматсия.**INVESTIGATION OF THE NUCLEAR ACTIVITY OF COMET C/2017 K2 (PAN-STARRS) AT LARGE HELIOCENTRIC DISTANCES****S.N. Safarzoda, D.K. Ayubov, S.K. Amiraliev**

Observation of comet C/2017 K2 (Pan-STARRS) conducted in 2021 using the AZT-8 telescope (GISAO) showed an increase in brightness and an expansion of the coma as it approached the Sun. Using a dynamical method, the radius, volume, and dust mass in the coma were calculated. The obtained data, including the sublimation rates of H₂O and CO₂, indicate that at distances greater than 5 AU, the main mechanism driving activity is the sublimation of volatile compounds, particularly the phase transition of amorphous ice to crystalline ice.

Keywords: Comet C/2017 K2 (Pan-STARRS), photometry, coma, sublimation.**Введение**

Комета C/2017 K2 (Pan-STARRS) является долгопериодической, открыта 21 мая 2017 года за орбитой Сатурна [1]. Основной причиной обнаружения кометы на таком большом расстоянии стала неожиданная активность ядра. Известно, что кометы представляют собой ледяные остатки планеты аккреции и, как широко распространено мнение, являются самыми чистыми по составу объектами в Солнечной системе. Они сохранились с момента образования 4,6 млрд лет назад в поясе Койпера и облаке Оорта, при температурах ниже ~40 К и ~10 К соответственно [2]. Большинство известных комет проявляют активность только внутри орбиты Юпитера, где происходит сублимация наиболее распространённого кометного летучего вещества (водяного льда) [3]. Однако активность иногда наблюдается и у более далёких комет [4, 5], чему было предложено множество объяснений, в частности экзотермическая кристаллизация аморфного льда [6]. Другие предположения включают реакции нестабильных радикалов, образующихся при длительной бомбардировке космическими лучами или метеороидными роями [7, 8]. Комета привлекла особое внимание исследователей благодаря своей необычной активности на значительных расстояниях от Солнца [9-11]. Комету C/2017 K2 в отличие от других комет зафиксировали с признаками активности на расстоянии свыше 16 а.е. от Солнца [12]. Подобная ранняя активность имеет принципиальное значение для понимания физики ядра, процессов сублимации, а также влияния межпланетной среды на поверхностные слои ядра [13, 14]. По поводу механизмов активности комет на больших расстояниях нет единого мнения, поэтому встречается разногласие между исследователями комет.

Наблюдения кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS) в Гиссарской астрономической обсерватории

Наблюдения проводились с использованием телескопа AZT-8 (ГисАО) Института астрофизики НАНТ. Наблюдение кометы C/2017 K2 (PANSTARRS) осуществлялось с помощью ПЗС FLI ProLine PL09000 с турелями фильтров системы Джонсона-Конзиса - BVRI. ПЗС - камера установлена на фокусе Ньютона AZT-8 и имеет фокус 28.2 м, размер и поля камеры равны 3056×3056 пикселей и 44.7×44.7 минутной дуги, а масштаб камеры 1.8 секундной дуги на пиксель. Для уменьшения уровня шумов ПЗС - камера аппаратуры обычно охлаждается до температуры -20° С. Чтобы исключить темновой сигнал в течение наблюдательной ночи снимаются кадры «Dark», которые при обработке вычитаются из рабочих кадров. Для получения снимков с равномерным полем используется кадры «Flat», наблюдаемые при вечерних или утренних сумерках. Для учёта ошибок матриц ПЗС - камер всегда снимаются кадры «Bias», которые также

использовались в обработке кадров. Радиус комы определялся по уровню поверхностной яркости, соответствующему фоновому значению. Геоцентрическое расстояние использовалось для перевода угловых размеров в физические (км). Результаты наблюдения кометы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Наблюдательные данные кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS)

Дата наблюдения	r , а.е.	Δ , а.е.	ϕ , град.	$\lambda_{\odot}$, град.
26.08.2021	5.37972	5.50596	10°.56885	151°.418696
27.08.2021	5.38055	5.49701	10°.58685	151°.478764
28.08.2021	5.38137	5.48892	10°.60205	151°.533033
29.08.2021	5.38231	5.48023	10°.61765	151°.591300
30.08.2021	5.38327	5.47195	10°.63155	151°.646803
01.09.2021	5.38543	5.45490	10°.65725	151°.761089
02.09.2021	5.38659	5.44638	10°.66865	151°.818203
07.09.2021	5.39313	5.40366	10°.70965	152°.104205
09.09.2021	5.39602	5.38663	10°.71840	152°.218130

В таблице 1 приведена дата наблюдения, гелиоцентрическое и геоцентрическое расстояние ядра кометы от Солнца и Земли соответственно, угол фазы кометы и долгота Солнца.

В период наблюдения с 26 августа по 9 сентября 2021 года были получены более 800 изображений на четырех фильтрах. Поскольку комета выявила активность на расстоянии более 6 а.е. от Солнца, мы использовали только фильтр R с целью выявления пылевых образований вокруг ядра кометы.

Обработка наблюдения кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS)

Полученные изображения кометы позволили проанализировать полученный наблюдательный материал. В соответствии с методиками, применяемыми в астрометрических исследованиях [15, 16], изменения размеров и структуры комы определялись на основе измерений визуального угла и соответствующего расчёта расстояния до кометы.

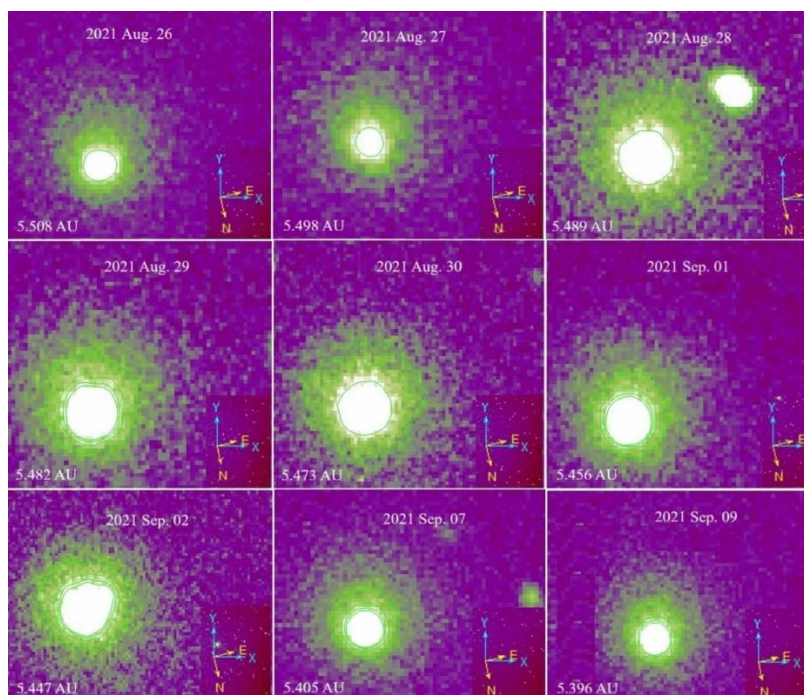


Рисунок 1 – Изменение морфологии комы кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS), наблюдавшейся с помощью телескопа АЗТ-8 (ГисАО) в 2021 г.

Такой подход обеспечивает количественную оценку динамики расширения комы и позволяет выявить тенденции, связанные с активностью ядра на больших гелиоцентрических расстояниях. Нами была проведена работа, аналогичная исследованию авторов [12], для выявления активных зон ядра кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS). Морфологические свойства кометы позволили нам определить характеристики ее комы (рис. 1).

На рисунке 1 приведена серия сложенных снимков кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS) в фильтре R с экспозицией 60 секунд. В верхней части каждого изображения дана дата наблюдения, а в нижней части

указано гелиоцентрическое расстояние (в астрономических единицах) и оси ориентации (N — север, E_x — восток) в правом нижнем углу каждого кадра. Из рисунков видно, что по мере приближения кометы к Солнцу яркость комы сильно меняется.

Расстояния и радиусы комы в каждую дату наблюдений были определены и проанализированы с использованием методов точной астрометрической обработки. Для этого применялись измерения угловых размеров комы, их последующее преобразование в линейные величины с учётом гелиоцентрического и геоцентрического расстояний кометы на момент наблюдений. Такой подход позволил получить объективные оценки динамики расширения газопылевой оболочки. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамические изменения параметров комы и значения $Af(\rho)$ кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS)

Дата наблюдения	Радиус комы, рх	$Af(\rho)_{\text{к}}$, см	Радиус фотометрического ядра кометы, рх	$Af(\rho)_{\text{я}}$, см
26.08.2021	10".63	9940	3".00	35443
27.08.2021	10".10	11537	2".69	43250
28.08.2021	18".40	10380	5".50	34687
29.08.2021	18".75	11767	5".15	42797
30.08.2021	18".97	10979	5".75	36168
01.09.2021	14".86	10874	4".47	47829
02.09.2021	25".44	13711	6".89	50579
07.09.2021	15".72	13803	3".63	59699
09.09.2021	9".46	11221	2".07	51215

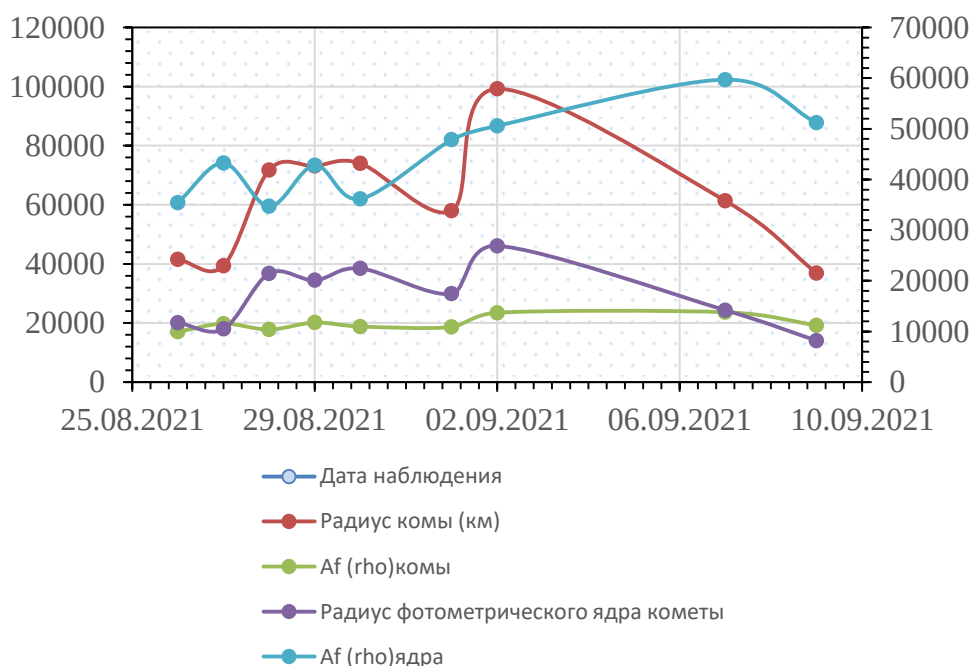


Рисунок 2 – Изменение радиуса комы, $Af(\rho)_{\text{комы}}$, радиус фотометрического ядра и $Af(\rho)_{\text{ядра}}$ кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS) от даты наблюдения

Средняя скорость расширения комы составила 1.25 м/с, что согласуется с данными по другим кометам, включая 67P/Чурюмова–Герасименко [16]. Объем комы рассчитывался, предполагая сферическую форму. Для оценки массы пыли применен динамический метод [17]. Фактический радиус комы R определялся на основе визуального угла θ и расстояния до кометы Δ , например, при измеренном визуальном угле 0.0033809 град. радиус комы рассчитывался с учётом текущего расстояния до кометы [17].

Энергия, необходимая для сублимации вещества определённой массы, определялась с использованием удельной теплоты сублимации L для конкретного вещества [17].

Энергия фотоионизации E , необходимая для анализа ионного компонента комы, определялась в соответствии с [17] и [18]. Для водорода энергия на одну молекулу составляет 13.6 эВ (2.18×10^{-18} Дж).

Результаты наблюдения (смотрите табл. 2) демонстрируют, что в течение двухнедельного периода радиус комы увеличился с ~36 900 км до ~99 250 км. Вариация изменения радиуса комы лежит в пределах

62 350 км. Это увеличение наглядно отражено на графике (Рис. 2), при этом только 9 сентября наблюдается небольшое снижение, связанное с неблагоприятными атмосферными условиями. Постепенное и стабильное увеличение радиуса комы указывает на равномерное расширение вещества в пространстве [11].

Используя наблюдательные данные, были рассчитаны параметры кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS), представленные в таблице 2.

Полученные результаты показывают, что ядро кометы способно выбрасывать значительное количество вещества даже на больших гелиоцентрических расстояниях ($r = 5.37\div 5.39$ а.е.), при этом сублимация лёгких соединений, таких как CO и CO₂, является основной причиной её активности кометы. Аналогичные работы были выполнены авторами Kossacki, K. J., - Szutowicz, S., Boehnhardt, H. для кометы C/1995 O1 Hale-Bopp и D/1993 F2 [13, 20].

Таблица 2 – Физические расчеты кометы C/2017 K2 (Pan-STARRS)

Дата	R, км	V, км ³	t_d , с	M_d , кг	Q_d , кг/с	E_{CO} , Дж	E_{H_2O} , Дж
26.08.2021	41500	0.299×10^{15}	0.830×10^5	4.320×10^9	5.205×10^4	1.166×10^{15}	1.201×10^{16}
27.08.2021	39400	0.256×10^{15}	0.788×10^5	4.760×10^9	6.041×10^4	1.285×10^{15}	1.333×10^{16}
28.08.2021	71800	1.550×10^{15}	1.436×10^5	7.805×10^9	5.435×10^4	2.107×10^{15}	2.185×10^{16}
29.08.2021	73140	1.639×10^{15}	1.463×10^5	9.013×10^9	6.161×10^4	2.433×10^{15}	2.524×10^{16}
30.08.2021	74000	1.697×10^{15}	1.480×10^5	8.508×10^9	5.749×10^4	2.297×10^{15}	2.382×10^{16}
01.09.2021	58000	0.817×10^{15}	1.160×10^5	6.605×10^9	5.694×10^4	1.783×10^{15}	1.849×10^{16}
02.09.2021	99240	4.094×10^{15}	1.985×10^5	14.25×10^9	7.179×10^4	3.847×10^{15}	3.990×10^{16}
07.09.2021	61350	0.967×10^{15}	1.227×10^5	8.868×10^9	7.227×10^4	2.394×10^{15}	2.483×10^{16}
09.09.2021	36902	0.211×10^{15}	0.738×10^5	4.336×10^9	5.875×10^4	1.171×10^{15}	1.214×10^{16}

В таблице 2 приведен радиус комы в момент наблюдения в км, объём комы в км³, время расширение комы в секундах, масса выброшенного вещества в кг, для каждой даты наблюдения, скорость распространения массы вещества, энергия сублимации CO и H₂O в Дж.

По мнению Jewitt, активность кометы на расстоянии более 16 а.е. свидетельствует о том, что только сублимация воды не может быть её единственной причиной [12]. Исследования показывают, что проявление активности ядра кометы на таких значительных расстояниях, вероятно, связано с наличием легко сублимирующихся соединений, таких как CO и CO₂, а также с особенностями структуры ядра. Jewitt со своими коллегами и Hui со своими коллегами показали, что ядро C/2017 K2 отличается стабильной холодной активностью и постепенным выбросом лёгких газов в межпланетное пространство [10, 11]. Учитывая, что в этот период комета находилась на расстоянии более 800 миллионов км от Земли, такое расширение и рост комы являются заметным и редким явлением.

Одновременно увеличение визуального радиуса комы (с 36900 до 99250 км) и фотометрического ядра (с 8150 до 26900 км) отражает расширение активной области и объём выбрасываемого вещества, говорит о фазовом переходе аморфного льда в обычный. По мнению Сафарова, такой лед выделяет определенную энергию, что приводит к трещинам внутри и насыщенности [8]. Термодинамические модели и анализ высококачественных изображений могли бы дополнительно показать внутренние особенности ядра и форму комы, что следует учитывать в будущих исследованиях.

С учётом радиуса комы и средней плотности выброшенного вещества общий объём комы в период наблюдений составил примерно 9.84×10^{14} км³. На этой основе объёма общая масса вещества в коме равна 7.61×10^9 кг, а скорость его распространения достигает 5.85×10^4 кг/с. Результаты указывают на то, что ядро кометы выбрасывает огромное количество вещества в межпланетное пространство на гелиоцентрических расстояниях 5.38538 а.е.

Полученные результаты показывают, что комета обладает большим запасом энергии и сублимирующихся веществ, что позволяет её активности проявляться на значительных расстояниях от Солнца.

Основные выводы и обсуждение результатов

Детальный анализ наблюдательных данных и астрометрических расчётов по комете C/2017 K2 (Panstarrs) показал, что данный уникальный астрономический объект характеризуется ранней и продолжительной активностью, а также устойчивым формированием комы на больших гелиоцентрических расстояниях. Средняя скорость расширения комы (1.25 м/с), её регулярное увеличение радиуса и проявление активности на расстояниях более 5 а.е. от Земли свидетельствуют о богатом содержании в ядре летучих веществ с низкой температурой сублимации.

Величины скорости расширения, потери массы и энергии сублимации указывают на то, что физические процессы в ядре и коме адаптированы к условиям холодной межпланетной среды. Результаты исследования показывают, что комета C/2017 K2 (Pan-STARRS) обладает устойчивой и долговременной активностью, а также стабильным расширением вещества в межпланетном пространстве, что имеет важное значение для понимания процессов сублимации и распространения газопылевых частиц с поверхности ядра.

Рост радиуса комы и её визуальных характеристик способствует более глубокому пониманию морфологических и динамических свойств кометы. Проведённое исследование вносит значительный вклад в изучение процессов сублимации, влияния космической среды и механизмов распространения вещества вокруг ядра.

Комета C/2017 K2 (Pan-STARRS) выступает как естественная лаборатория физических процессов в условиях холодного космоса и имеет высокую научную ценность для дальнейших исследований в области кометной астрономии, динамики атмосферы комы и физики кометных ядер.

Кроме того, данное исследование представляет важный шаг в понимании воздействия межпланетной среды на ядро кометы, роли солнечного излучения и моделирования процессов распространения вещества. Эти результаты могут служить основой для будущих исследований в области физики и астрономии комет [20, 21].

Рецензент: Сафаров А.Г. — к.ф.-м.н., заведующий кафедрой астрономии физического факультета Таджикского национального университета.

Литература

1. Comet C/2017 K2 (PANSTARRS): Complete Information & Live Data. <https://theskylive.com/c2017k2-info> (Дата обращения 20.10.2025).
2. Jewitt, D. A Comet Active Beyond the Crystallization Zone / D. Jewitt, M.-T. Hui, M. Mutchler, H. Weaver, J. Li, J. Agarwal // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – Vol. 847. – No 2. – Pp. 20. – DOI [10.3847/2041-8213/aa88b4](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa88b4)
3. Whipple, F. L. A comet model. I. The acceleration of comet Encke / F. L. Whipple // Harvard College Observatory. – 1950. – Pp. 20. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1950ApJ...111..375W>
4. Jewitt, D. The active centaurs / D. Jewitt // The Astronomical Journal. – 2009. – V. 137, – No 5. – Pp. 4296. – DOI: [10.1088/0004-6256/137/5/4296](https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/5/4296)
5. Womack, M. CO and other volatiles in distantly active comets // M.a Womack, G. Sarid, K. Wierzbos // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2017. – V.129, – No 973. – Pp. 20. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1538-3873/129/973/031001>
6. Prialnik, D. Gas release in comet nuclei / D. Prialnik, A. Bar-Nun // Astrophysical Journal. – 1990. – V. 363. – No 1. – Pp. 274-282.
7. Сафаров, А. Г. Столкновение ядер комет с метеороидными роями и их последствия / А. Г. Сафаров // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2024. – № 1. – С. 75-87. – EDN EGFXSXV.
8. Сафаров, А.Г. Некоторые аспекты вспышечной активности ядер комет / Сафаров А.Г. // Proceedings of International Conference Fundamental and Applied Research in Physics, – NUUZ. – May 16-17. – 2025. – P. 162-164.
9. Yang, B. Discovery of carbon monoxide in distant comet C/2017 K2 (PANSTARRS) / B. Yang, D. Jewitt, et al. // The Astrophysical Journal Letters. – 2021. – V. 914. – No 1. – Pp. L17. – DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac03b7>
10. Jewitt, D. The Long-Distance Activity of Comet C/2017 K2 (PANSTARRS) / D. Jewitt, Y. Kim, J. Luu, et al. // The Astrophysical Journal. – 2021. – V. 161. – No 4. – Pp. 188. – DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2e9a>
11. Hui, M. T. Physical Properties and Activity of Distant Comet C/2017 K2 (PANSTARRS) / M.-T. Hui, D. Jewitt, D. Clark, et al. // A&A. – 2022. – V. 657, – A40. – DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142329>
12. Jewitt, D. Cometary Activity Begins at Kuiper Belt Distances: Evidence from C/2017 K2 / D. Jewitt, Y. Kim, M. Mutchler, J. Agarwal, J. Li, H. Weaver // The Astronomical Journal. – 2021. – V.161. – No 188, – Pp.11. – DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abe4cf>
13. Kossacki, K. J. Activity of Distant Comets: CO and CO₂ Sublimation / K. J. Kossacki, S. Szutowicz, // Icarus. – 2013. – V. 225. – Pp. 111–119.
14. Meech, K. J. A Brief Visit from a Red and Extremely Distant Comet / K. J. Meech, et al. // Nature. – 2017. – V.552. – P. 378–381. – DOI: <https://doi.org/10.1038/nature25020>
15. A'Hearn, M. F. EPOXI at Comet Hartley 2 / M. F. A'Hearn, et al // Science. – 2011. – V.332. – Pp. 1396–1400. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1204054>
16. Ayubov, D. K. Study of the velocities of ejection of jets from the nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko based on the results of observations in Tajikistan / D. K. Ayubov, A. Gh. Safarov // Uzbek Journal of Modern Physics. – 2025. – V. 2. – No. 1. – Pp. 51-55.
17. Tipler, P. A. Modern Physics. / P. A. Tipler, R. A. Llewellyn // Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. – W. H. Freeman and Company, (5th ed.). – 2007. – ISBN: 978-1-4292-0124-7.
18. Griffiths, D. J. Introduction to Quantum Mechanics / Griffiths, D. J. // – Pearson Prentice Hall, (2th ed.). – ISBN: 978-0-13-111892-8.

19. Boehnhardt, H. Comets II / Boehnhardt, H., M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.) // University of Arizona Press, Tucson. – 2004. – Pp. 301-316.

20. Karen J Meech. CO-driven activity in Comet C/2017 K2 (PANSTARRS). / Karen J Meech, Jan T Kleya, Olivier Hainaut, Marco Micheli, James Bauer, et al. // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – V. 849. – No 1. – Pp. L8. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa921f>

21. Аюбов, Д. К. Вариация кривых блеск фотометрических параметров некоторых активных комет семейства Юпитера / Д. К. Аюбов, Х. Ф. Худжаназаров // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 2(66). – С. 17-23. – EDN NAGDZW.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН –СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ –INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Сафарзода Сангин Ниёз	Сафарзода Сангин Ниёз	Safarzoda Sangin Niyoz
Ходими илмӣ	Научный сотрудник	Researcher
Институти астрофизикаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистан	Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: safarov.sangin@mail.ru		
TJ	RU	EN
Аюбов Дониш Қосимович	Аюбов Дониш Косимович	Ayubov Donish Kosimovich
Ходими илмӣ	Научный сотрудник	Researcher
Институти астрофизикаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистан	Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: donishmand@mail.ru		
TJ	RU	EN
Амиралиев Сулаймон Каримхонович	Амиралиев Сулаймон Каримхонович	Amiraliyev Sulaimon Karimkhonovich
Докторанти PhD	PhD - докторант	PhD - student
E-mail: a.sulaimon@mail.ru		