Article



# Исследование скоростей выброса газопылевых частиц из ядра кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко по результатам наблюдение в Таджикистане

Д.К. Аюбов \*1 D, А.Г. Сафаров <sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Институт астрофизики НАН Таджикистана, Душанбе, 736063, Таджикистан
- <sup>2</sup> Таджикский национальный университет, Душанбе, 734025, Таджикистан donishmand@mail.ru (Д.А.), aj.safarov@gmail.com (А.С.)
- \* Correspondence: donishmand@mail.ru; Tel.: +992 50 1168377 (Д.А.)

#### Аннотация:

На основе наблюдения кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко с 5 по 8 октября 2021 года из Международной астрономической обсерватории Санглох, Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, проведен анализ полученных цифровых изображений.

При детальном анализе на фильтре R с экспозицией 180 секунд выявлено газопылевые джеты. Определен распределение скоростей выброса частиц по методу Whipple и скорость выброса газопылевых частиц по методу Jones. По изменением положений джетов определен период вращения кометного ядра вокруг своей оси, который равен 11h 48m.

На основе построенных изофот кометы 67Р установлен активность ядра. По результатам изофот выявлен точной распределении яркости кометы от центра до периферии, хвост отчетливо видно.

Определен тепловой скорости молекул H<sub>2</sub>O, CO, O<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>, построено график зависимости температуры от молекулярной массы. На основе фотометрической обработки был определен размер фотометрического ядра кометы 67P на фильтре R равно 4,51 км, объем ядра 22, 587 км<sup>3</sup>, общая плотность ядра равен 4,51 г/см<sup>3</sup>.

Полученные результаты на оптическом телескопе, очень близки к данным, полученными космическим аппаратом Розетта.

**Ключевые слова:** комета 67Р/Чурюмова-Герасименко, ядро, изофот, активность, газопылевой джет, выброс вещества, пылевые частицы, скорость выброса, пылевой хвост.

# Study of the velocities of ejection of jet from the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko based on the results of observations in Tajikistan

# Donish K.Ayubov \*1 , Abduljalol Gh.Safarov 20

- <sup>1</sup> Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, 736063, Tajikistan
- Tajik National University, Dushanbe, 734025, Republic of Tajikistan
- donishmand@mail.ru (D.A.,), donishmand@mail.ru (A.S.,)

# Abstract:

Based on observations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from October 5 to 8, 2021, conducted at the Sanglokh International Astronomical Observatory of the Institute of Astrophysics, National Academy of Sciences of Tajikistan, an analysis of the obtained digital images was carried out. A detailed analysis using the R filter with an exposure time of 180 seconds revealed gas-dust jets. The distribution of particle ejection velocities was determined using the Whipple method, and the ejection velocity of gas-dust particles was determined using the Jones method. By tracking changes

Цитирование: Д.К. Аюбов, А.Г. Сафаров. Исследование скоростей выброса газопылевых частиц из ядра кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко по результатам наблюдение в Таджикистане. **2025**, 2, 1, 6. https://doi.org/

Полученный: 10.01.2025 Исправленный: 18.01.2025 Принято: 25.01.2025 Опубликованный: 30.01.2025

**Copyright:** © 2025 by the authors. Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attri- bution (CC BY) license (https:// creativecommons.org/licenses/by/ 4.0/). in the positions of the jets, the rotation period of the comet's nucleus around its axis was determined to be 11 hours, 48 minutes.

Based on the constructed isophotes of comet 67P, the activity of the nucleus was established. The isophote analysis revealed an accurate brightness distribution of the comet from the center to the periphery, with the tail clearly visible.

The thermal velocities of  $H_2O$ , CO,  $O_2$ , and  $CO_2$  molecules were determined, and a graph of the temperature dependence on molecular mass was constructed. Based on photometric processing, the size of the comet 67P's photometric nucleus using the R filter was determined to be 4.51 km, the volume of the nucleus was 22.587 km<sup>3</sup>, and the overall density of the nucleus was found to be 4.51 g/cm<sup>3</sup>.

The results obtained using the optical telescope are very close to those acquired by the Rosetta spacecraft.

**Keywords:** comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, nucleus, isophote, activity, gas-dust jets, dust particles, ejection velocity, dust tail.

#### Введение

Комета была открыта 20 сентября 1969 года советским астрономом Климом Ивановичем Чурюмовым в Киеве на фотопластинках другой кометы -32Р/Комас Сола, снятых Светланой Герасименко в сентябре в Алма-Атинской обсерватории (первый снимок, на котором видна комета, был сделан 11 сентября 1969 года) [1]. Оказалось, что комета является короткопериодической и входит в семейства Юпитера. Далее, комета получает обозначение 67Р/Чурюмова-Герасименко (далее в тексте 67Р). По некоторым расчётам комета 67Р за счёт возмущений больших планет изменила свою орбиту, переходя из пояса Койпера-Эджворта во внутрь Солнечной системы [2]. Анализ эволюции параметров орбит кометы 67Р устанавливает, что до 1840 годов расстояние перигелия орбиты было более 4 а.е. После сближения с Юпитером в том же году уменьшилась расстояние перигелия орбиты кометы 67Р. Постепенно, расстояния от кометы до Солнца продолжал уменьшаться, а в 1959 году, опять Юпитер уменьшил расстоянии от 2.77 а.е. до 1.29 а.е. Комета имеет пористую структуру и 75-85% её объёма составляет пустота. Температура на освещённой стороне колеблется между -183 и -143 °C [3]. Поверхность кометы покрыта пылью, под которой находится твёрдая кора из спрессованной пыли и льда [4]. Постоянное магнитное поле на комете отсутствует [3].

Данные о характеристиках ядра кометы в настоящее время уточняются по результатам экспедиции космического аппарата «Розетта». Ядро имеет неправильную форму, и в первом приближении может быть описано как состоящее из двух скреплённых между собою частей. Размеры этих фрагментов оцениваются как 4.1×3.2×1.3 км (большая часть) и 2.5×2.5×2.0 км (меньшая часть), объём – в 25 км<sup>3</sup> [2,4]. Такая форма связана с происхождением кометы в результате слияния двух других небесных тел. Части кометы образовались по отдельности, после чего столкнулись между собой. По мнению учёных, столкновение произошло при небольшой относительной скорости двух тел - около 1.5 м/с [5].

Из-за неравномерного сезонного освещения, полушарии кометы сильно отличаются. Южный полюс, который на протяжении 1/2 её орбитального пути (5,5 лет) находится в состоянии изоляции от Солнца, бодр и выделяет много пыли и газа [4]. Однако он теряет довольно много холодному северному полушарию, которое вследствие этого испаряется, но часть оседает на него. В результате, северное полушарие этого засыпано пылью, в то время как на юге пыли относительно мало и поверхность относительно более твёрдая [5].

Наблюдения кометы и обработка результатов. Во время сближения кометы с Землей и Солнцем создались благоприятные условия для ее наблюдений, 5–8 октября 2021 г. нами проведены наблюдения кометы 67Р на телескопе Цейсс-1000 МАОС Института астрофизики НАНТ. Наблюдения кометы выполнялась с помощью ПЗС–камеры FLI 16803 серии ProLine с использованием широкополосных фотометрических фильтров системы Джонсона–Козинса – BVRI, при этом экспозиции составляли от 30 до 180 секунд. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура была охлаждена до температуры -20 °C. Чтобы исключить темновой сигнал в течение наблюдательной ночи были получены кадры «Dark», которые при обработке вычитались из рабочих кадров. Для получения снимков с равномерным полем

были использованы кадры «Flat», наблюденные при вечерних или утренних сумерках. Для учета ошибок матриц ПЗС-камер снимались кадры «Bias», которые также использовались в обработке кадров.



**Рис. 1.** Комета 67Р, полученный в МАОС **Fig. 1.** Comet 67P, obtained at IAOS

Первичная обработка кадров для определение экваториальных координат и уточнение элементов орбит на основе наших наблюдений выполнены на программе Astrometrics [6] и АПЕКС-П [7]. Для уточнения орбит использована программа Find\_orb [8]. Далее, для проведения выявление звездных величин во всех фильтрах и выявление некоторых параметров ядра проведено фотометрии на программе MaxIm DL5. Эти результаты были опубликованы авторами с коллегами в [9].

Для получения изображений, показанных на рисунке 1, мы использовали фильтр Larson-Sekanina на базе программы AstroArt для выявления газопылевых струй в момент наблюдений. Фильтры Larson-Sekanina показывают изменение структуры хвостов. Данный метод улучшает выделение радиальных и асимметричных выбросов из кометного ядра, удаляя фоновую симметрию комы (атмосферы) кометы. Сначала, на программы AstroArt уточнили количество пикселей в верхней части струй, на полученном масштабе получается расстояний. Пиксели даются в арксекундах на пиксель, зная расстояние кометы в ночь наблюдений умножим на полученный пикселей. Отсюда, полученный результат делим на 206265 (количество секунд в радиане). Так, мы определяем длину струй на конкретный фильтр. Отсюда, легко вычисляется скорость выброса газопылевых. По современным данным, скорость выброса частиц лежат в пределах от 1 км/с до 2 км/с, тогда это газовый джет, если скорость лежит в пределах от 0.1 км/с до 1 км/с тогда это пылевые струи выбрасывается [10]. На рисунке 2 показано на каком диапазоне хорошо видны джеты. Каждый рисунок это отдельный ночь (рис. 2а-5 октября, 26-6 октября, 2с-7 октября и 2д-8 октября 2021 года.) на фильтр R с экспозицией 180 секунд.

Впервые в конце 80-ых годов прошлого столетия Sekanina [11] впервые обратил внимание на формирование пылевых джетов. Он [11,15] рассматривал ряд моделей, объясняющий причину появление джетов у комет. Sekanina исследуя несколько периодических комет, в том числе 1Р/Галлея, 2Р/Энке [13,15] выдвинул несколько механизмов их формирований, такие как – термический нагрев, кристаллизации аморфного водяного льда и нестабильность структуры ядра. Он также рассматривал модели вращения кометного ядра, на основе наблюдений кометы 109Р/Свифт-Туттля [15]. Согласно ледяной модели кометного ядра Whipple [16,17], частицы

выбрасываются из поверхности ядра силой давления сублимирующих газов. В этом случае скорости выброса частиц будут зависеть от их массы и плотности.

Формулы, предложенными Whipple, определяет скорость частиц на бесконечном. В некоторых случаях, например, команда Розетты на основе приборов OSIRIS, VLT, изучая распределение частиц от 4,5 а.е. до 2,9 а.е., показали, что в результате обычной сублимации скорости частиц достигают  $1\div1,5$  м/с, при размере от 0,1 до 10 мм [10]. Такие скорости называются термическими.



**Рис. 2.** Суммированный кадр на фильтре R для четырех ночей, с использованием фильтров Larson-Sekanina

Fig. 2. Summed frame in the R filter over four nights, using Larson-Sekanina filters

Рабочие формулы который предложил Whipple для определения скорости выброса сферических частиц, имеют такой вид:

$$V_{\infty} = 656 \times \sqrt{\frac{1}{n\rho_g s r^{9/4}}} \times \sqrt{R_k}, \quad V_{\infty} = 3.28 \sqrt{\frac{1}{\rho_{nsr} r^{9/4}} - 0.052 \times R_k} \times \sqrt{R_k}$$

где  $\rho_d$  – плотность частицы и  $\rho_c$  – плотность ядра кометы в г/см<sup>3</sup>, *s* – размер частицы в мм, *r* – расстояние выброса в а.е.,  $R_k$  – размер ядра кометы в км. При этом скорость выброса получится в м/с. Коэффициент 1/*n* в модельных расчетах считается единицей. В наших расчетах размер частиц оценивается от 0.001 см до 10 см. В моделях Whipple, впервые рассматривается как аналитический модель, за счет сублимации. Разработанные формулы Whipple для скорости частиц рассматривается как функция размера. Причиной выбора метода Whipple заключается в том, что за счет обычной скорости выброса предположительно можно определять скорость вращения ядра вокруг своей оси. Поэтому, в наших расчетах значения размеров частиц лежит в определенных диапазонах. Далее в своих расчетах мы принимали во внимание модель Jones [18]. В модели Jones можно принимает во внимание зависимости температуры от расстояния Солнца. При расчетах температура поверхности ядра кометы определяется балансом падающей солнечной энергии и энергии, идущей на сублимацию. Поскольку выброс вещества в основном идет только с солнечной стороны, тогда формула для определения скорости выброса принимает такой вид:

$$V_{\infty} = 20.3 R_c^{1/2} m^{-1/6} \rho_d^{-1/3} r^{-1.038}$$

в формуле  $\rho_d$  дается в кг/см<sup>3</sup>, *m* в кг, *r* в а.е. и  $R_c$  в км.

В ходе Европейской космической миссии «Розетта» к комете 67Р получены совершенно новые данные о структуре ядра кометы. Установлено, что комета 67Р имеет пористую структуру и 75–85% и температура на освещённой стороне ядра сильно колеблется между -183 и -143 °С. Принимая во внимание данные полученных КА Розетты, мы определили скорость выброса

газопылевых струй для 5–8 октября 2021. На основе идеи Jones [18] нами выбран диапазон размер частиц (от  $10^{-3}$  см до 1 см) для каждого полученной изображения.

Скорости выбросов газопылевых частиц вокруг ядра кометы 67Р промежуточна и лежат в диапазоне от 35,7 м/с до 417 м/с (по модели Whipple), а скорость газопылевой джетов для сферических частиц на основе модели Jones [18] более 8 м/с. Как видно из рисунка 3, те частицы, который их размер меньше то и скорость больше, а те частицы с большими размерами с наименышими скоростями. Причина такого различие зависит от начального импульса. Но, дело не только в импульсе, основной механизм различии скоростей является состав частиц. Корпускулярный поток, бомбардируя выброшенных частиц только на расстоянии более 6 радиусов кометы ионизирует некоторых молекул. При этом некоторые частица ионизируют положительные заряды, а некоторый, наоборот. В ходе мисси Розетта установлено, что изза неравномерного сезонного освещения, полушария кометы заметно отличаются. Южный полюс, который на протяжении большей части орбиты кометы (5,5 лет) находится в состоянии полярной ночи, богат водой и углекислым газом [10,19]. Однако он теряет довольно много вещества в течение короткого времени из-за непрерывной выбросы вещества в области шейки. Большая часть вещества испаряется от воздействия корпускулярного потока Солнце, но часть оседает на северном полушарии, которое следствие этого засыпано пылью, в то время как на южном полушарие пыли относительно мало и поверхность относительно более твёрдая [19].



**Рис. 3.** Зависимость скорости выброса газопылевых частиц от размера **Fig. 3.** Dependence of gas-dust particle ejection velocity on particle size

Известно, что у большинства короткопериодических комет при каждом возвращении к Солнцу образуется пылевая корка. Экспериментально эта идея была доказано Ибадиновым с коллегами [20]. Поверхность кометы 67Р тоже покрыта пылью, под которой находится твёрдая кора из спрессованной пыли и льда, такой вывод был выявлен в ходе мисси Розетта [21]. Постоянное магнитное поле на комете отсутствует. Ядро кометы 67Р имеет неправильную форму, и в первом приближении может быть описано как состоящее из двух скреплённых между собою частей. Размеры этих фрагментов оцениваются как  $4.1 \times 3.2 \times 1.3$  км (большая часть) и  $2.5 \times 2.5 \times 2.0$  км (меньшая часть), объём - в 25 км<sup>3</sup> [22]. Такая форма связана с происхождением кометы в результате слияния двух других небесных тел. Части кометы образовались по отдельности, после чего столкнулись между собой.

Следующий шаг нашей работы заключался в определение тепловой скорости молекул. Расчетные формула даются в работах Whipple [17] и ряда других ученых, в том числе в работе Schulz [23] с коллегами. Мы принимали во внимание своих расчетах, и значения скорости сопоставлены из полученных результатов по формулам Whipple. На рисунке 4 пристален зависимость температуры сублимации H<sub>2</sub>O, CO, O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Мы знаем, что давления газа и тепловая скорость молекул, определяющий начальное ускорения частиц всегда зависят от температуры (сублимации) и молекулярной массы. Такой зависимость показывает, что наиболее лёгкие молекул как H<sub>2</sub>O, CO, при одинаковых температурах создают различные профили ускорения для выброшенных частиц. В модельных расчетах нужно принимать во внимание, что температуру солнечной стороны ядра, газовую динамику, форм и интенсивность джетов.



**Рис. 4.** Зависимость температуры компонентов частиц кометы 67Р от молекулярной массы **Fig. 4.** Dependence of the temperature of comet 67P particle components on molecular mass

Зависимости температуры сублимации с солнечной стороны ядра кометы 67Р от скорости расширения газов и молекулы приведен в таблице 1. Как показано в таблице 1 и видно из рисунка 4 что для каждого составляющего компонента температура отличается. В среднем, вращения ядер комет вокруг своей оси считаются медленным. Период вращения ядра кометы 67Р по нашим расчетам равен  $11^h 48^m$ . Неправильная форма ядра, может уменьшить времени вращения вокруг ядра. Принимая во внимание сложную форму ядра кометы, а также неравномерная освещенность поверхности, приводит к очень сложному механизму движения частиц вокруг ядра. Поэтому большинство частиц с определённой массы долго не может удержаться в околокометном пространстве. Частицы с большими массами, если выброшены с малым импульсом быстро упадут в другую часть поверхности ядра.

N₂	Компоненты	Скорость расшире-	Температура, К
	частиц кометы 67Р	ния газов, м/с	
1	H <sub>2</sub> O		125
2	СО	417	195
3	O <sub>2</sub>		223
4	CO <sub>2</sub>		307

**Таблица 1.** Температуры сублимации компонентов частиц кометы 67Р **Table 1.** Sublimation temperatures of comet 67P particle components

В результате сублимации сила давление газа выбрасывает частицы до предельной скорости, а скорость частиц зависит от размера. Наблюдения короткопериодических комет с помощью космических аппаратов [2,4,5,19,20] установили, что в около кометном пространстве существуют многочисленные частицы от 100 микронов до нескольких метров. Из-за низкого отношения поперечного сечения к массе крупные пылевые частицы в незначительной степени подвергаются давления солнечного излучения и дольше остаются вблизи орбиты родительского тела в течении нескольких периодов комет вокруг Солнца.

На рисунке 5, левой стороны приведен изофот кометы 67Р, для 6 октября 2021 года, на фильтре R. Из рисунка видно, что ядро имеет четкий образ, кома-наблюдается чёткое градиентное распределение яркости от ядра к периферии, хвост вытянут вправо и слегка вверх, такой вид типичный в направлении антисолнечного вектора. Видно, что изофот не симметричен, центральная часть смещена налево, а яркость сдвинуто. Отсюда можно делать вывод о наличии джетов, выброшенных из локальных частей поверхности ядра. Угол отклонение направления может указывать на вращения ядра. Кольцевые изофоты хорошо выделены, что может указывать о постоянной активности кометного ядра. На другом рисунке 5, правой стороны сложена кадры полученной в течении четырех ночей. Изменений положения джетов говорит о вращения ядра вокруг своей оси.



**Рис. 5.** Изофота и сложенная фотографии за четырех ночей газопылевых струй кометы 67Р **Fig. 5.** Isophote and combined image over four nights of gas-dust jets of comet 67P

#### Заключение

По результатам четырёх ночей наблюдений в Международном астрономическом обсерватории Санглох Института астрофизики Национальной Академии наук Таджикистана проведен детальный анализ комет 67P на фильтре R с экспозицией 180 секунд. На полученных кадрах выявлен джет. Определен скорости выброса газопылевых струй по методам Whipple и Jones. По методу Whipple значения скоростей достигают от 35,7 м/с до 417 м/с, а по методу Jones до 8 м/с. По изменением положений джетов определен период вращения кометного ядра вокруг своей оси, который равен  $11^{\rm h}$  48<sup>m</sup>. На основе построенных изофот кометы 67P установлена активность ядра. По результатам изофот выявлена точной распределения яркости кометы от центра до периферии, хвост отчетливо видно. Определен тепловой скорости молекул H<sub>2</sub>O, CO, O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>, построено график зависимости температуры от молекулярной массы. На основе фотометрической обработки был определен размер фотометрического ядра кометы 67P на фильтре R равно 4,51 км, объем ядра 22,587 км<sup>3</sup>, общая плотность ядра равен 4,51 г/см<sup>3</sup>. Полученные результаты на оптическом телескопе, очень близки к данным, полученными космическим аппаратом Розетта.

#### Вклад авторов.

Концептуализация, Д.А. и А.С.; методология, А.С.; программное обеспечение, не применимо; валидация, Д.А. и А.С.; формальный анализ, А.С.; исследование, Д.К. и А.С.; ресурсы, Д.А.; кураторство данных, Д.А.; написание оригинального текста, А.С.; написание и редактирование, Д.А. и А.С.; визуализация, А.С.; руководство, Д.А.; администрирование проекта, Д.А.; привлечение финансирования, не применимо. Все авторы ознакомлены с опубликованной версией рукописи и согласны с ней.

#### Authors' contribution.

Conceptualization, D.A. and A.S.; methodology, A.S.; software, not applicable; validation, D.A. and A.S.; formal analysis, A.S.; investigation, D.A. and A.S.; resources, D.A.; data curation, D.A.; writing—original draft preparation, A.S.; writing—review and editing, D.A. and A.S.; visualization, A.S.; supervision, D.A.; project administration, D.A.; funding acquisition, not applicable. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

#### Источник финансирования.

Это исследование не получало внешнего финансирования.

# Funding source.

This study did not receive external funding.

#### Соответствие принципам этики.

Это исследование не требовало этического одобрения, так как оно не включало исследования с участием людей.

## Ethics approval.

This study did not require ethical approval, as it did not include human studies.

#### Информированное согласие на публикацию.

Письменное информированное согласие было получено от всех участников исследования для публикации данной статьи.

#### **Consent for publication.**

Written informed consent was obtained from all the study participants for the publication of this article.

#### Заявление о доступности данных

Мы призываем всех авторов статей, опубликованных в журнале, делиться своими исследовательскими данными. Данные, поддерживающие результаты данного исследования, доступны по запросу у авторов. Если новые данные не были созданы или данные недоступны из-за конфиденциальности или этических ограничений, необходимо предоставить соответствующее заявление.

#### **Data Availability Statement**

We encourage all authors of articles published in the journal to share their research data. Data supporting the results of this study is available upon request from the authors. If no new data has been created or the data is unavailable due to confidentiality or ethical restrictions, an appropriate statement must be provided.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## **Conflict of interest**

The authors declare that there is no conflict of interest.

#### Сокращения

MAOC Международный Астрономический Обсерватория СанглохAU Астрономическая единица

#### Литература

- [1] Vsekhsvyatsky, S.K. Physical characteristics of comets 1965-1970. / S.K. Vsekhsvyatsky М.: Science. 1972. – Р. 66-68. In Russian: Всехсвятский, С.К. Физические характеристики комет 1965-1970 гг. / С.К. Всехсвятский – М.: Наука. – 1972. – С. 66-68.
- [2] Zelenyony, L.M. From the VEGA mission at Comet Halley to the Rosetta mission at Comet 67R/Churyumov-Gerasimenko / L.M. Zelenyony, L.V. Ksanfomality // Bulletin of the NPO named after S.A. Lavochkina. – 2015. – No. 3. – pp. 81-93. In Russian: Зеленёный, Л.М. От миссии «ВЕГА» у кометы Галлея к миссии «Розетта» у кометы 67Р/Чурюмова-Герасименко / Л.М. Зеленёный, Л.В. Ксанфомалити // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2015. – №3. – С. 81-93.
- [3] Weissman, P.R. Structure and density of cometary nuclei / P.R. Weissman, E. Asphaug, S.C. Lowry // Comets II. Eds. Festou M.C., Keller H.U., Weaver H.A. – Tucson: Univ. of Arizona Press. – 2004. – P. 337-357.
- [4] Keller, H. Cometary Nuclei From Giotto to Rosetta / H. Keller, E. Kührt // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. – Iss. 14. – P. 1-26.
- [5] Snodgrass, C. Past and Future Comet Missions / C. Snodgrass, L. Feaga, G. H. Jones, M. Küppers, C. Tubiana, and R.Dotson. // In Comets III, edited by Karen. J. Meech, Michael. R. Combi, Dominique Bockelée-Morvan, Sean. N. Raymond, and Michael. E. Zolensky. University of Arizona Press. 2024. P. 155-192.
- [6] http://www.astrometrica.at.2021.
- [7] Devyatkin, A.V. Software packages "APEX-I"and "APEX-II"for processing astronomical CCD observations / A.V. Devyatkin, D.L. Gorshanov, V.V. Kupriyanov, I.A. Vereshchagina // Solar System Research. 2010. No. 1. Р. 74-87. In Russian: Девяткин, А.В. Программные пакеты «АПЕКС-I» и «АПЕКС-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений / А.В. Девяткин, Д.Л. Горшанов, В.В. Куприянов, И.А. Верещагина // Астрономический вестник. 2010. № 1. С. 74-87.
- [8] https://www.projectpluto.com/find\_orb.htm.2021.

- [9] Ayubov, D.K. Study of physical and dynamic properties of comets 4P/Faye, 6P/d'Arrest and 67P/Churyumov-Gerasimenko / D.K. Ayubov, A.G. Safarov, U.Kh. Khamroev, A.M. Burizoda // Modern problems of astrophysics: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the "Twentieth anniversary of the study and development of natural, exact and mathematical sciences in the field of science and education (2020-2040)" and "80th anniversary of the Corresponding Member of the NAST, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Ibadinov Kh.I. Dushanbe, April 16, 2024. Dushanbe: Tajik National University. 2024. P. 108-115. In Russian: Аюбов, Д.К. Исследование физико-динамических свойств комет 4P/Faye, 6P/d'Arrest и 67P/Churyumov-Gerasimenko / Д.К. Аюбов, А.Г. Сафаров, У.Х. Хамроев, А.М. Буризода // Современные проблемы астрофизики: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» и «80-летие Члена корр. НАНТ, д.ф.м.н., профессора Ибадинова Х.И.», Душанбе, 16 апреля 2024 года. Душанбе: Таджикский национальный университет. 2024. C. 108-115.
- [10] Agarwal, J. Dust emission and dynamics / J. Agarwal, Y.Kim, M.Kelley, M. Raphael. // In Comets III, edited by Karen. J. Meech, Michael. R. Combi, Dominique Bockelée-Morvan, Sean. N. Raymond, and Michael. E. Zolensky. University of Arizona Press. 2024. Pp. 653-678.
- [11] Sekanina, Z. Orientation and origin of dust jets in cometary comae / Icarus. 1981. V. 47. P. 20–38. https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90186-3.
- [12] Sekanina, Z. Recurring patterns in the motion, shape, and brightness of jets in the inner coma of Comet Halley. ESA SP-278: Symposium on the Diversity and Similarity of Comets. – 1987. – P. 323–326.
- [13] Sekanina, Z. Physical and orbital development of periodic comet Encke I Nucleus splitting before 1868 and its consequences. Astronomy and Astrophysics, - 1988. - V. 203. - P. 389–405.
- [14] Sekanina, Z. Physical and orbital development of periodic comet Encke II. Nongravitational effects and interpretation of nucleus activity. Astronomy and Astrophysics. –1988. – V. 203. – P. 405–415.
- [15] Sekanina, Z. Cometary nucleus and its activity: a synoptic view. In: R. L. Newburn Jr., M. Neugebauer, J. Rahe (Eds.), Comets in the Post-Halley Era, 1991. V. 2. P. 769–823. Dordrecht: Springer.
- [16] Whipple, F.L. A comet model I. The acceleration of Comet Encke / F.L. Whipple // Astrophysics Journal. - 1950. - V. 111. - No 2. - P. 375-394.
- [17] Whipple, F.L. A comet model II. Physics relation for comet and meteors / F.L. Whipple // Astrophysics Journal. – 1951. – Vol. 113. – No. 3. – P. 464-474.
- [18] Jones, J. The ejection of meteoroids from comets / J. Jones // MNRAS. 1995. V. 275. P. 773-780.
- [19] Dorofeeva, V. A. Chemical and isotopic composition of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko (review of the results of the Rosetta–Philae space mission). / V. A. Dorofeeva // Solar System Research. – 2020. – V. 54. – No. 2. - P. 110-134. In Russian: Дорофеева, В. А. Химический и изотопный состав кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (обзор результатов космической миссии Rosetta–Philae). / В.А. Дорофеева // Астрономический вестник. – 2020. – Т. 54. – № 2. – С. 110-134.
- [20] Rakhmonov A.A. Evolution of comet nuclei based on the results of laboratory modeling and space research / A.A. Rakhmonov, Kh.I. Ibadinov, A.G. Safarov // Bulletin of the Tajik National University, series of natural sciences. – 2017. – № 1/3. – Р. 149-154. In Russian: Рахмонов, А. А. Эволюция ядер комет на основе результатов лабораторного моделирования и космических исследований / А. А. Рахмонов, Х. И. Ибадинов, А. Г. Сафаров // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. – № 1-3. – С. 149-155.
- [21] Filacchione, G. Comet nuclei composition and evolution / G. Filacchione, M. Ciarniello, S. Fornasier, A. Raponi // In Comets III, edited by Karen. J. Meech, Michael. R. Combi, Dominique Bockelée-Morvan, Sean. N. Raymond, and Michael. E. Zolensky. University of Arizona Press. 2024. P. 315-360.
- [22] Knight, M.M. Physical and surface properties of comet nuclei from remote observations / M.M. Knight, R. Kokotanekova, N.H. Samarasinha // In Comets III, edited by Karen. J. Meech, Michael. R. Combi, Dominique Bockelée-Morvan, Sean. N. Raymond, and Michael. E. Zolensky. – University of Arizona Press. – 2024. – P. 361-404.
- [23] Schulz, R. et al. Rosetta-ESA's mission to the Origin of the Solar System. Springer Press, 2009.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенныйлюдей или имущество, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

**Disclaimer of liability/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the

editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.