

УДК 523.53

## ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОМЕТНОЙ ПРИРОДЫ АСТЕРОИДА ДОН КИХОТ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ОБСЕРВАТОРИИ САНГЛОХ

© 2021 г. Г. И. Кохирова<sup>a, \*</sup>, А. В. Иванова<sup>b, c, d</sup>, Ф. Дж. Рахматуллаева<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт астрофизики АН Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

<sup>b</sup>Астрономический институт Словацкой академии наук, Братислава, Словакия

<sup>c</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

<sup>d</sup>Астрономическая обсерватория им. Т. Шевченко Киевского национального университета, Киев, Украина

\*e-mail: kokhirova2004@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.2020 г.

После доработки 12.08.2020 г.

Принята к публикации 05.09.2020 г.

В работе представлены результаты многоцветных оптических наблюдений астероида (3552) Дон Кихот, проведенных на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох Института астрофизики АН РТ в июле 2018 г. Определен видимый и абсолютный блеск астероида в полосах *VRI*. Анализ кривых блеска астероида показал значительное изменение блеска в период наблюдений – от  $11.50 \pm 0.10$  до  $13.10 \pm 0.18$  абсолютных звездных величин. Столь существенное изменение блеска свидетельствует о вспышке астероида, следовательно, нами зафиксирована его активность, характерная для комет. Показатель цвета (*V–R*) по нашим наблюдениям соответствует величинам для ядер угасших короткопериодических комет и астероидов D типа. Комето-подобная орбита, низкое значение альбедо, показатель цвета и зарегистрированная активность указывают на то, что астероид с очень высокой вероятностью является ядром угасшей кометы. Среднее значение эффективного диаметра астероида по наблюдениям через 10 сут после вспышки составило  $18.5 \pm 2.5$  км и эта оценка хорошо согласуется с имеющимися данными, что подразумевает завершение вспышки. Сделано предположение, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости, явились результатом столкновения астероида 3552 с другим небольшим объектом или бомбардировки его поверхности мелкими метеороидами.

**Ключевые слова:** астероид, угасшая комета, наблюдения, фотометрия, абсолютная яркость, кривая блеска, показатель цвета, вспышка, активность, диаметр

DOI: 10.31857/S0320930X20330026

### ВВЕДЕНИЕ

Кометы, астероиды и метеороиды составляют популяцию малых тел Солнечной системы. Кометы и астероиды принято считать остатками вещества первоначальной и последующей стадий эпохи формирования Солнечной системы и изучая их, мы познаем обстоятельства ранней истории Солнечной системы. Для классификации малых тел во внутренней Солнечной системе существуют разные методы, подходы и критерии. Классическое понятие “астероиды” подразумевает, что это – неактивные объекты, состоящие в основном из нелетучего материала. В основном астероиды располагаются внутри орбиты Юпитера, где и сформировались. Принято считать, что кометы – это богатые льдом тела, сформированные на периферии Солнечной системы – в поясе Койпера или в облаке Орта (см., например, Jewitt, 2015). Вследствие многочисленных гравитационных

возмущений кометы из этих внешних регионов перебрасывались на орбиты, проходящие через внутреннюю Солнечную систему. Когда кометы приближаются к Солнцу, увеличивается нагрев поверхности их ядер, достаточный для того, чтобы произошел сублимационный процесс, который, в свою очередь, приводит к выделению газов и пыли, формирующих кому вокруг ядра, хвосты и джеты позади или впереди движения кометы, соответственно (Бредихин, 1954; Whipple, 1950; 1951; 1955). Это явление называется нормальной кометной активностью. Еще одним отличительным признаком комет и астероидов являются их динамические особенности. Для классификации типа орбит малых тел используются несколько критериев, среди которых наиболее широко применяется постоянная Тиссерана  $T_j$  (Kresak, 1969). Она позволяет провести динамическое разделение между кометами и астероидами и определяет

ся по отношению к Юпитеру следующим выражением (Kresak, 1982; Kosai, 1992)

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2 \left[ \frac{a}{a_j} (1 - e^2) \right]^{0.5} \cos i, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $e$ ,  $i$  – большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты объекта,  $a_j$  – большая полуось орбиты Юпитера. Для комет значение  $T_j$  лежит в интервале от 2.08 до 3.12, и для астероидов имеет значения свыше 3.12 (Kresak, 1982). Таким образом, в настоящее время условной границей, разделяющей типично кометные и астероидальные орбиты, все еще принято считать значение постоянной Тиссерана  $T_j = 3.12$  (Jewitt, 2012).

Однако за последние десятилетия выяснилось, что такое разделение комет и астероидов не столь однозначно, как подразумевалось ранее. В общепринятую классическую дефиницию не укладываются несколько групп объектов. Среди них – т.н. “уснувшие” и “угасшие” кометы, имеющиеся среди астероидов, сближающихся с Землей (Opik, 1963; Weissman и др., 1989; 2002; Бабаджанов, Кохинова, 2009). Это ядра короткопериодических комет, которые в ходе эволюции потеряли все свои летучести или покрылись толстой тугоплавкой корой, полностью или временно предотвращающей сублимацию газов, и в период прохождения перигелия такие ядра уже не проявляют кометной активности. Угасшие кометы могут вновь проявить активность, если в покрывающей их мантии образуются трещины или отверстия вследствие столкновения с другим телом или ударов метеоритов, приводящих к взрывлению поверхности и повреждению мантии. В пользу реальности существования угасших ядер комет говорит тот факт, что продолжительность активной фазы короткопериодических комет составляет около 12 тыс. лет (Levison, Duncan, 1997) и это время значительно короче их динамического времени жизни в околоземном пространстве – приблизительно  $10^7$  лет (Morbidelli, Gladman, 1998). Следовательно, можно ожидать, после завершения активной фазы кометы переходят в фазу астероидоподобных угасших (спящих) кометных ядер (Weissman и др., 2002). Внешне для наземного наблюдателя угасшие кометные ядра выглядят также как астероиды, из-за чего различить их практически не возможно. Доказательством реальности таких объектов служит объект 107P/Вилсон–Харрингтон, открытый в 1949 г. как активная комета, затем утерянный и вновь открытый в 1979 г. как астероид, сближающийся с Землей (АСЗ), (4015) 1979 VA. Позже в 1992 г. было подтверждено, что этот АСЗ в действительности является кометой 107P/Вилсон–Харрингтон, утерявшей какие-либо признаки кометной активности (Bowell и др., 1992; Fernandez и др., 1997). Примером обратного хода событий служит комета 96P/Мачхолца 1, от-

крытая в 1986 г. Специальные поиски этой кометы по вычисленным эфемеридам на пластинках, полученных на телескопах с большим полем зрения и предельной звёздной величиной до  $+19^m$  до момента открытия кометы, не дали результата (Green и др., 1990). Хотя, по крайней мере три из четырех ее прохождений перигелия были очень благоприятны для наблюдений (Sekanina, 1990). Наиболее логичное объяснение этого факта заключается в предположении, что вплоть до 1986 г. комета находилась в неактивном или “спящем” состоянии (Green и др., 1990; Sekanina, 1990).

Другая группа малых тел, выходящих за рамки классического определения, это объекты переходного класса, расположенные в Главном поясе (ГП) астероидов и названные “кометами Главного пояса” (КГП) (Hsieh, Jewitt, 2006) или “активными астероидами” (АА) (Jewitt, 2012). Активность КГП связана с освобождением летучих соединений, находящихся в слое или под слоем реголита, а также со столкновениями с другими астероидами (Jewitt, 2012; Neslusan и др., 2016; Kokhirova и др., 2018). Характерная особенность объектов этой группы заключается в том, что они обладают динамическими характеристиками астероидов (их орбиты являются типично астероидальными) и в то же время проявляют активность комет, которая выражается в появлении у них кометной комы с пылевыми или газовыми хвостами. Проявляемая ими кометная активность носит как периодический, так и единовременный характер. Несколько механизмов потери массы для ПП таких объектов были рассмотрены Jewitt (2012), где они обозначены термином “активные астероиды”, поскольку некоторые из этих тел не принадлежат Главному поясу астероидов (Jewitt и др., 2009; Hsieh и др., 2009a; 2009b). Были предложены следующие механизмы ответственной за активность: метеоритная бомбардировка поверхности астероидов, нестабильность вращения, тепловые эффекты, вынос вещества за счет электростатических сил, сублимация летучих веществ (Jewitt, 2012; Hsieh, 2016; Neslusan и др., 2016). Кроме того, для некоторых примитивных астероидов ГП на типично астероидных орбитах также подтверждена сублимационная активность во время прохождения перигелия (Busarev, 2018; Бусарев и др., 2019).

К настоящему моменту почти у 20 малых тел Солнечной системы известных как астероиды наблюдалась кометная активность (Jewitt, 2012; Jewitt и др., 2015). Астероид, сближающийся с Землей (АСЗ), (3552) Дон Кихот также относится к группе активных астероидов благодаря кометной активности, время от времени проявляемой астероидом в течение последних нескольких лет. Определение физических характеристик активных астероидов и КГП, установление достоверных механизмов внезапного появления кометной ак-

**Таблица 1.** Основные параметры орбиты астероида (3552) Дон Кихот

Объект	$a$ , а. е.	$e$	$q$ , а. е.	$Q$ , а. е.	$i$ , град	$\omega$ , град	$\Omega$ , град	$T_j$	$P$ , годы
3552	4.259	0.709	1.240	7.278	31.081	316.448	350.003	2.31	8.79

тивности у астероидов, проявляющейся в виде выброса пыли и образования типичных кометных хвостов и выявление их связи с другими телами Солнечной системы являются важнейшими задачами в настоящее время. Такие исследования относятся к фундаментальной проблеме происхождения и взаимосвязи малых тел Солнечной системы.

### АКТИВНЫЙ АСТЕРОИД (3552) ДОН КИХОТ

Астероид (3552) Дон Кихот, далее 3552, был открыт в 1983 г. швейцарским астрономом П. Вильдом в обсерватории Циммервальд 3552 Don Quixote (1983 SA). (<http://www.ssd.jpl.nasa.gov>, 2019). Период обращения составляет 8.8 лет, и объект наблюдался в трех появлениях во время прохождения перигелия. Астероид имеет сильно вытянутую орбиту со значительным эксцентриситетом, пересекающую орбиты Марса и Юпитера, и не пересекающую орбиту Земли, вследствие чего объект классифицируется как астероид группы Амура. Однако, хотя орбита 3552 расположена за орбитой Земли, астероид в перигелии достаточно близко подходит к орбите Земли – до расстояния 0.2 а. е., что позволяет отнести его к астероидам, сближающимся с Землей. Основные орбитальные характеристики астероида согласно базе данных NASA (<http://www.ssd.jpl.nasa.gov>, 2019) приведены в табл. 1, где  $a$  – большая полуось,  $q$ ,  $Q$  – перигелийное и афелийное расстояния,  $e$  – эксцентриситет,  $i$  – наклонение,  $\omega$  – аргумент перигелия,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $T_j$  – критерий Тиссерана,  $P$  – период обращения.

Параметр Тиссерана для астероида 3552 имеет значение 2.31 (табл. 1), следовательно, его орбита классифицируется как типичная орбита короткопериодических комет и уже на этой основе можно предположить кометное происхождение объекта. Veeder и др. (1989) используя результаты радиометрических и инфракрасных наблюдений и тепловую модель, определили, что диаметр астероида составляет 18.7 км и его геометрическое альbedo в полосе  $V$  равно 0.02. Такое низкое значение альbedo является типичным для кометных ядер (Lamy и др., 2004; Jewitt, 1992) и согласуется с таксономической классификацией 3552 как астероид D типа (Hartmann и др., 1987; Binzel и др., 2004). Астероидам примитивного P или D типа свойственна довольно низкая объемная плотность, в среднем  $\rho = 2 \text{ г/см}^3$  (Dahlgren, Lagerkvist,

1995), типичная для углистых хондритов (Consolmagno, Britt, 1998; Consolmagno и др., 2008). Кометное происхождение астероида было предсказано со 100% вероятностью и на основе динамического моделирования и это самая высокая вероятность кометного происхождения среди всех известных АСЗ (Bottke и др., 2002). Иными словами, исходя из приведенных аргументов, 3552 является одним из первых кандидатов в астероиды, имеющих кометную природу, среди известных околоземных объектов. Однако на тот момент никаких признаков активности у астероида не было зарегистрировано, поэтому было сделано предположение, что объект является ядром угасшей кометы (Weissman и др., 1989; 2002).

Особый интерес к астероиду вновь возник после того, как 22 августа 2009 г. с помощью космического телескопа Спитцер у объекта в инфракрасном диапазоне спектра излучения на длине волны 4.5 мкм была зафиксирована кометная активность в виде небольшой комы и хвоста (Mommert и др., 2014). Данный волновой интервал соответствует эмиссии молекулярной полосы  $\text{CO}_2$ . Мониторинг длился 18 дней до прохождения астероидом перигелия, в это время 3552 находился на гелиоцентрическом расстоянии 1.23 а. е. и фазовом угле  $55^\circ$ , расстояние от телескопа Спитцер составляло 0.55 а. е., и объект имел аномальную яркость на полученных снимках (Mommert и др., 2014). Опубликованные результаты предыдущих наблюдений 3552 в различных диапазонах длин волн, показали, что надежных данных, подтверждающих активность астероида, не было получено до 2009 г. ни из оптической фотометрии, ни из радиометрических и инфракрасных измерений (Mommert и др., 2014). Следовательно, впервые кометная активность у астероида 3552 достоверно была зарегистрирована по инфракрасным измерениям в августе 2009 г. В октябре 2017 г. с помощью космического телескопа Спитцер вновь наблюдалась активность астероида 3552, подтвердившая ранее полученные результаты (Mommert и др., 2018a). Только в марте 2018 г. с помощью 4.1 м телескопа (Southern Astrophysical Research Telescope) впервые выявили эпизодическую пылевую активность этого объекта и в оптическом диапазоне (Mommert и др., 2018b).

Анализируя результаты наблюдений Mommert и др. (2014) пришли к заключению, что астероид 3552, действительно, является ядром угасшей кометы, которое вновь проявило активность. Реги-

**Таблица 2.** Сводка наблюдений астероида 3552 Дон Кихот в обсерватории Сангloch

Июль, 2018 UT	$r$ , а. е.	$\Delta$ , а. е.	$ph$ , град	$V$ , зв. вел.	Полоса	$t$ , с
14.92	1.506	1.478	39.8	16.2	V, R	60
23.86	1.569	1.465	38.9	16.3	V, R, I	60
24.86	1.577	1.463	38.8	16.3	V, R, I	60

страция излучения в молекулярной полосе  $\text{CO}_2$  свидетельствует о существовании ледяного  $\text{CO}_2$  на астероиде 3552 и, следовательно,  $\text{CO}_2$  может находиться в околоземном космическом пространстве в течение продолжительного времени. Ранее для объяснения существования замороженного  $\text{CO}_2$  в околоземном пространстве Rickman и др. (1990) предположили, что лед может содержаться под толстым слоем поверхностного изолирующего материала. В частности, спектроскопические наблюдения в инфракрасном диапазоне телескопа Спитцер показали наличие на поверхности астероида 3552 мелкозернистых силикатов, возможно, обогащенных пироксеном (Mommert и др., 2014). Для объяснения наблюдаемой активности 3552 предложены два сценария: (1) подповерхностный замороженный газ  $\text{CO}_2$  сублимирует вследствие сезонного нагрева, вызывая постоянную активность, или (2) наблюдаемая активность является временной, например, вызванной недавним столкновением с другим объектом, в результате которого обнажается замороженное подповерхностное вещество и происходит мощная единовременная сублимация его летучих компонентов ( $\text{CO}$  или  $\text{CO}_2$ ), что приводит к кратковременной вспышечной активности астероида. Однако для реализации обоих сценариев необходимо, чтобы объект находился вблизи Солнца, по крайней мере, на расстоянии  $r = 1.23$  а. е. (Mommert и др., 2014). Кроме того, наличие  $\text{CO}_2$  может объяснить почему кометная природа 3552 оставалась скрытой почти три десятилетия. На основе теплового моделирования фотометрических данных из наблюдений Спитцера было подтверждено, что диаметр астероида составляет 18.4 км и геометрическое альbedo равно 0.03 (Mommert и др., 2014).

Из вышеприведенных фактов следует, что объект 3552 представляет несомненный научный интерес, существует необходимость его дальнейшего изучения для получения новых доказательств его происхождения. В этой связи целью новых наблюдений астероида 3552 является продолжение анализа его фотометрических характеристик — блеска, оценки диаметра, показателей цвета.

## НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Как было отмечено, в марте 2018 г. у астероида 3552 по оптическим наблюдениям зарегистрирована кометная активность в виде слабой комы. 7 мая 2018 г. астероид прошел перигелий своей орбиты. Для поиска признаков активности 14, 23 и 24 июля 2018 г. были проведены наблюдения объекта на телескопе Zeiss-1000, снабженном ПЗС-камерой FLI Proline PL16803, в Международной астрономической обсерватории Сангloch (МАОС) Института астрофизики АН РТ. Фокусное расстояние телескопа (фокус Кассегрена)  $F = 13.3$  м, при этом масштаб получаемого изображения равен 63 мкм/угловых с. Размер и поле зрения матрицы камеры составляют  $4096 \times 4096$  пикселей и  $11 \times 11$  угловых мин соответственно, масштаб матрицы (pixel scale) равен 0.16 угловых с на пиксель, с учетом значения биннинга  $2 \times 2$  для фотометрии, масштаб составил 0.36 угловых с на пиксель. Использовались стандартные широкополосные фильтры системы Джонсона–Козинса  $VRI$ , позволяющие выделить для наблюдений соответствующий диапазон спектра. Для уменьшения уровня шумов ПЗС-камеры аппаратура была охлаждена до температуры  $-20^\circ\text{C}$ . Для учета темного сигнала использованы кадры “Dark”, для выравнивания полей изображений использованы кадры “Flat”, для учета ошибок матрицы ПЗС-камеры снимались кадры “Bias”, которые также использовались в обработке кадров. За весь период наблюдений получено 340 кадров с экспозицией 60 с. Снимки астероида 3552 приведены на рис. 1. Дата и время наблюдений астероида в долях суток мирового времени, используемая полоса, время экспозиции  $t$ , а также гео- и гелиоцентрические расстояния  $r$ ,  $\Delta$ , фазовый угол  $ph$  астероида и его эфемеридная яркость  $V$  приведены в табл. 2. Отметим, во всех полосах получено по 30 изображений.

Фотометрическая обработка наблюдательных данных проводилась с помощью набора программ написанных под IDL (<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>). Стандартная обработка изображений включает создание мастер-кадров нулевой экспозиции, темного и плоского полей, с помощью которых все кадры с изображением астероида были исправлены за

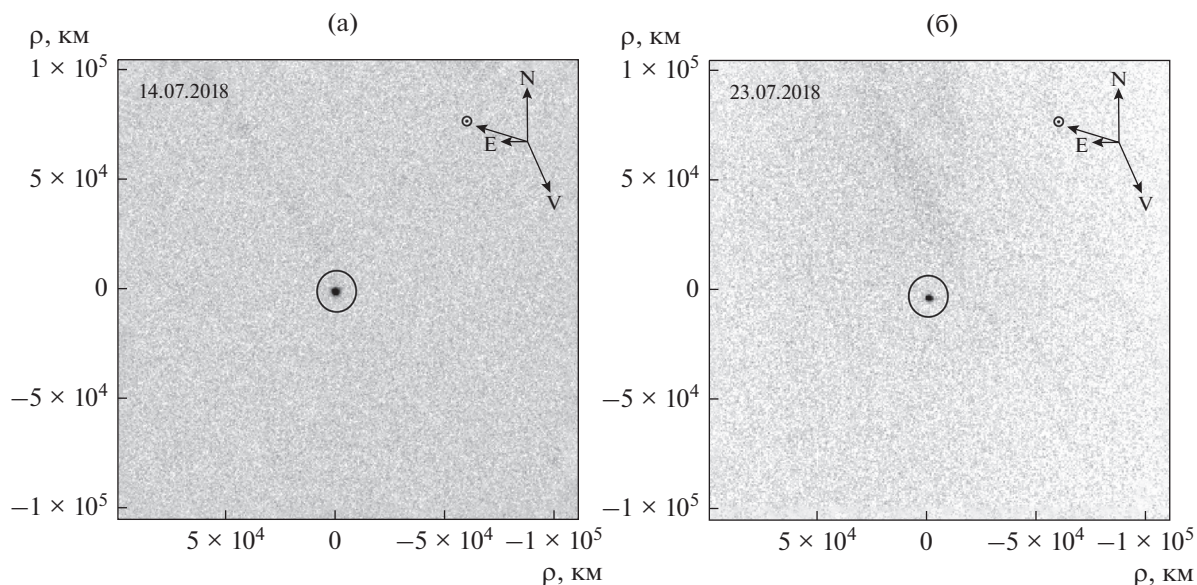


Рис. 1. Изображения астероида Дон Кихот, полученные в обсерватории Сангloch 14.07.2018 г. (а) и 23.07.2018 г. (б).

нуль пункт и неравномерность чувствительности пикселей. Фон неба был определен с помощью стандартной процедуры Sky пакета IDL (Landsman, 1993). Для определения видимого блеска астероида были использованы звезды поля, которые предварительно исследовались на переменность. Звездные величины звезд сравнения в полосах *VRI* брались из каталога UCAC4 и NOMAD (<http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html>). Для измерений изображений астероида и звезд поля использовалась апертура фиксированного радиуса от 5" до 7" (соответственно от 1919 до 2686 км), которая позволила охватить объект полностью. Остаточный фон неба оценивался при помощи кольцевой апертуры. При вычислении ошибки звездной величины суммировались статистические ошибки, которые обусловлены отношением сигнала к шуму  $S/N$  для объекта, звезд сравнения, ошибки каталожных звездных величин звезд-стандартов. В процессе обработки с помощью программ IDL ошибка для звезд сравнения при использовании каталогов UCAC4 и NOMAD оказалась равной  $0.02^m$  и  $0.04^m$  соответственно. Таким методом были получены видимый блеск  $m$  и кривые видимого блеска астероида 3552 в *VRI* полосах за каждую ночь наблюдений, представленные на рис. 2, где по оси ординат отложены видимые звездные величины  $m$  и по оси абсцисс – время наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных полосах, даны в табл. 3.

Известно, что блеск астероидов сильно зависит от фазового угла (см., например, Lumme и др., 1986; Belskaya, Shevchenko, 2000; Лупишко и др., 2007). Видимый блеск  $m$  астероида 3552 конвер-

тировался в абсолютный  $H$  с использованием эмпирической модели (Penttila и др., 2016) и по следующему соотношению (Bowell и др., 1989), позволяющим более точно описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от  $0^\circ$  до  $120^\circ$ :

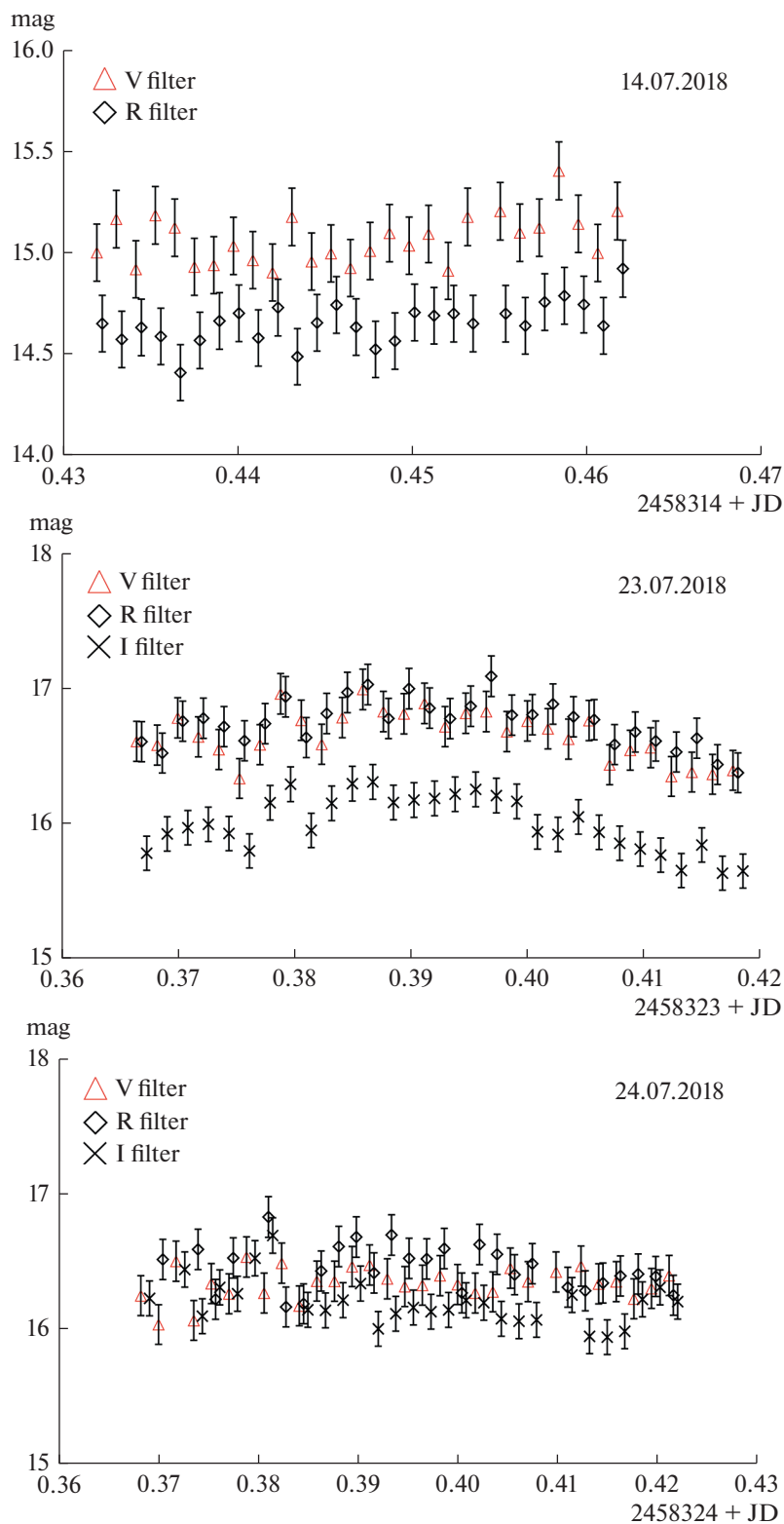
$$H = m - 5 \lg(r\Delta) + 2.5 \lg[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2], \quad (2)$$

$$\Phi_i = \exp[-A_i \{\lg(\beta/2)\}^{B_i}], \quad i = 1, 2,$$

где  $G$  – параметр наклона, найденный лишь для небольшого числа астероидов, для остальных принято значение  $G = 0.15$ ;  $\Phi_1, \Phi_2$  – функции угла фазы,  $A_1 = 3.33, A_2 = 1.87, B_1 = 0.63$  и  $B_2 = 1.22$  – коэффициенты, значения которых приведены в Penttila и др., (2016). Найденный таким путем абсолютный блеск астероида в фильтре  $R$  (средние значения за ночь) приведен в табл. 4, и в графическом виде – на рис. 3. Для астероидов главного пояса фазовый угол, т.е. угол Солнце-астероид-наблюдатель, обычно не превышает  $30^\circ$  и типичная фазовая кривая имеет линейный участок при фазовых углах свыше  $7^\circ$  (Лупишко и др., 2007). Фазовая зависимость блеска астероида Дон Кихот, полученная по нашим наблюдениям, представлена на рис. 4, где уменьшение блеска с углом

Таблица 3. Видимый блеск (зв. вел.) астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Сангloch в июле 2018 г.

Полоса	14.92	23.86	24.86
V	$15.06 \pm 0.12$	$16.52 \pm 0.17$	$16.64 \pm 0.18$
R	$14.63 \pm 0.10$	$16.19 \pm 0.17$	$16.32 \pm 0.18$
I	–	$15.93 \pm 0.16$	$16.21 \pm 0.16$



**Рис. 2.** Кривые видимого блеска астероида Дон Кихот в полосах  $VRI$  по наблюдениям в обсерватории Санглох 14, 23 и 24 июля 2018 г.

фазы  $V$  ( $1, ph$ ) найдено из соотношения, приведенного в работе Лупишко (2000). Сплошной линией показан линейный участок этой зависимости,

от которого значительно отклоняется блеск, найденный во время вспышки 14 июля, приходящийся на большой фазовый угол.

**Таблица 4.** Абсолютный блеск и диаметр астероида 3552 Дон Кихот

Июль, 2018 UT	$r$ , а. е.	$\Delta$ , а. е.	$ph$ , град	$m_R$ , зв. вел.	$H_R$ , зв. вел.	$D$ , км	$D$ , км
14.92	1.506	1.478	39.8	$14.63 \pm 0.10$	$11.50 \pm 0.10$	$38_{-1}^{+2}$	
23.86	1.569	1.465	38.9	$16.19 \pm 0.17$	$13.02 \pm 0.18$	$19_{-3}^{+2}$	$19.0^1$
24.86	1.577	1.463	38.8	$16.32 \pm 0.18$	$13.10 \pm 0.18$	$18_{-3}^{+2}$	$18.4^2$

<sup>1</sup> <http://www.ssd.jpl.nasa.gov>.

<sup>2</sup> Mommert и др., 2014.

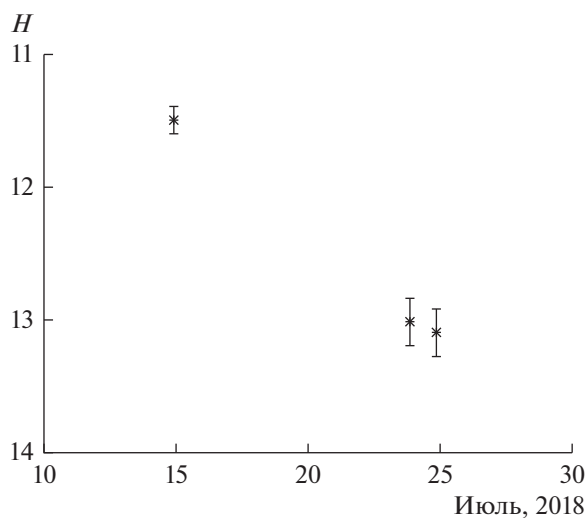
Фотометрические данные (табл. 3–4, рис. 2–4) показывают, что 14 июля 2018 г. нами зарегистрирована вспышечная активность астероида, об этом свидетельствует блеск, измеренный 14 июля, значительно отличающийся и от эфемеридного значения и от яркости, измеренной 23 и 24 июля. Наиболее близкое к эфемеридной величине значение яркости получено по наблюдениям 24 июля, на основании этого можно сказать, что после вспышки 14 июля яркость астероида падала и в конце наблюдений уже соответствовала эфемеридному блеску. Иными словами, к этому моменту вспышка завершилась. Анализ суммарных изображений астероида 3552 также показал наличие слабой пылевой комы (рис. 5).

Величину блеска астероида, найденную их фотометрических наблюдений, можно использовать для определения диаметра объекта. Хотя размер 3552 известен, существует необходимость оценивать диаметр по новым наблюдениям, для уточнения размера и полноценного анализа состояния объекта на момент этих наблюдений. Для определения диаметра  $D$  астероида 3552 использованы измерения его блеска в полосе  $R$  и следующее со-

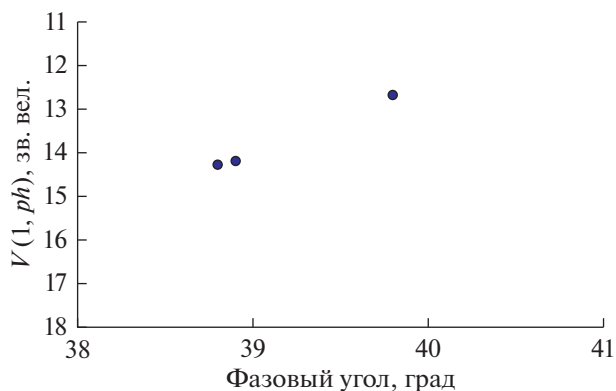
отношение, принятое для оценки размеров астероидов (Harris, 2002):

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_v} \times 10^{0.2H}}, \quad (3)$$

где  $p_v = 0.03$  геометрическое альbedo астероида (Mommert и др., 2014). Найденные таким методом оценки диаметра астероида приведены в табл. 4, где наряду с нашими данными, приведены имеющиеся оценки размера. Как видно, эффективный диаметр, найденный по нашим измерениям 14 июля также указывает, на то, что в этот момент астероид находился в состоянии вспышки, и об этой величине можно говорить лишь как об оценке фотометрического диаметра. Яркость объекта значительно возросла за счет вклада излучения комы, образовавшейся в результате вспышки, и отделить этот вклад в процессе измерений не удалось. Оценки диаметра  $18\text{--}19 \pm 2.5$  км, полученные по фотометрическим данным 23 и 24 июля, оказались более близки к оценкам, имеющимся в базе опубликованных данных. С учетом кривых блеска, можно заключить, что к этому времени кома уже рассеялась, и измеренный блеск астероида приблизился к эфемеридной величине, в результате нами получены более достоверные оценки эффективного диаметра объекта.



**Рис. 3.** Абсолютный блеск астероида Дон Кихот в полосе  $R$  по наблюдениям в обсерватории Санглюх 14, 23 и 24 июля 2018 г.



**Рис. 4.** Фазовая зависимость блеска астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглюх 14, 23 и 24 июля 2018 г.

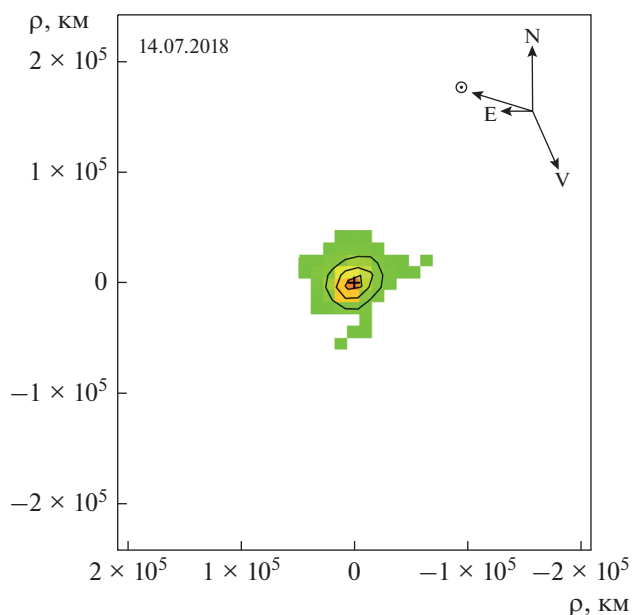


Рис. 5. Слабая кома астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Сангloch 14 июля 2018 г.

Показатель цвета ( $V-R$ ), найденный из наших наблюдений приведен в табл. 5, где для сравнения приведены показатель цвета ( $V-R$ ) следующих групп малых тел: DSPN – угасшие ядра короткопериодических комет (Licandro и др., 2008), JFCN – ядра комет семейства Юпитера (Lamy, Toth, 2009), AJFC – активные кометы семейства Юпитера (Solontoi и др., 2012), D-type NEAs – AC3 D типа (Dandy и др., 2015) согласно таксономической классификации Толена (1989).

Из табл. 5 видно, что показатель цвета ( $V-R$ ), найденный 14 июля, больше всего соответствует показателю цвета ( $V-R$ ) активных комет семейства Юпитера и AC3 D типа. Это вполне ожидаемый результат, поскольку 14 июля 3552 находился в состоянии кометной активности. В остальные ночи этот показатель более соответствует величине ( $V-R$ ) угасших ядер короткопериодических комет. Существенное “покраснение” объекта в период наблюдений вполне ожидаемое явление, поскольку мелкие пылевые частицы являются более красными по отражательной способности, чем ледяные зерна, то можно предположить, что в эти ночи их вклад в излучение астероида в оптическом диапазоне стал преобладающим. Хотя вспышка к 24 июля завершилась и основная пы-

левая кома уже рассеялась, объект все еще находился в облаке пылевых частиц, выброшенных с его поверхности во время вспышки. Напомним, что наличие на поверхности астероида 3552 мелкозернистых силикатов подтверждено наблюдениями телескопа Спитцер (Mommert и др., 2014) и классификация объекта как астероида D типа также подразумевает содержание значительного количества гидросиликатов и карбонатов (Cruikshank и др., 2001).

В то время как наблюдения в инфракрасном диапазоне в 2009 г. подтвердили активность астероида 3552 вследствие сублимации сверхлетучего газа  $\text{CO}_2$ , содержащегося в замороженном состоянии в подповерхностном слое объекта, оптические наблюдения в марте и июле 2018 г. подтвердили активность вследствие выброса пыли с поверхности астероида и образования слабой комы. Если допустить, что в период прохождения перигелия в 2018 г. процесс сублимации  $\text{CO}_2$  происходил вследствие увеличения солнечного нагрева и высвободившийся газ захватывал с собой мелкие частицы пыли с поверхности астероида, то такой “нормальной” кометной активности не достаточно для образования вспышки яркости, связанной с единовременным выбросом огромного количества пыли, особенно, если учесть, что перигелий был пройден в начале мая 2018 г. Более того, уже через 10 дней после регистрации вспышки, блеск астероида приблизился к эфемеридному значению, что указывает на завершение активной фазы. Зарегистрированная вспышка и, как следствие, выброс пыли, скорее всего, обусловлены тем, что на фоне нормальной кометной активности вблизи перигелия дополнительно имело место столкновение астероида 3552 с небольшим объектом – крупным метеороидом или бомбардировка его поверхности мелкими метеороидами, в результате чего произошло взрывление поверхности и наблюдаемый выброс пыли. Разумеется, в этом случае из-за большего повреждения поверхностного слоя усилился и выброс  $\text{CO}_2$ , регистрация которого была бы возможна по инфракрасным наблюдениям. Отметим, по наблюдениям 24 июля блеск астероида в фильтре  $I$  стал ближе к блеску в фильтре  $R$ . Но для большей убедительности этого вывода необходимы новые наблюдения астероида.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По оптическим наблюдениям астероида (3552) Дон Кихот 14 июля 2018 г. зарегистрирована

Таблица 5. Показатель цвета ( $V-R$ ) астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Сангloch

Дата	14.92	23.86	24.86	DSPN	JFCN	AJFC	D-type NEAs
$V-R$	$0.43 \pm 0.10$	$0.33 \pm 0.18$	$0.40 \pm 0.18$	0.39	$0.49 \pm 0.03$	$0.46 \pm 0.02$	$0.46 \pm 0.02$



вспышка яркости, повлекшая за собой образование пылевой комы у объекта. 24 июля 2018 г. блеск астероида приблизился к эфемеридной величине. Столь быстрое падение блеска предполагает, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости, явились результатом столкновения 3552 с другим небольшим объектом или бомбардировки его поверхности мелкими метеороидами. Оценки эффективного диаметра, полученные по наблюдениям 23 и 24 июля 2018 г. соответствуют имеющимся данным, можно предположить, что столкновение не было катастрофичным для астероида. Однако для большей убедительности необходимы новые наблюдения.

Наличие замороженного нейтрального газа  $\text{CO}_2$  в подповерхностном слое астероида является доказанным фактом. Величина показателя цвета ( $V-R$ ), полученная из наблюдений, соответствует значениям для ядер угасших короткопериодических комет и астероидов D типа. С учетом этого, кометоподобной орбиты, низкого значения альбедо и зарегистрированной реактивации объекта в июле 2018 г. можно сделать вывод, что с очень высокой вероятностью, объект 3552 действительно может быть ядром угасшей кометы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

А.В. Иванова выражает благодарность Словацкой академии наук (грант VEGA 2/0023/18).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И.* Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли. Душанбе: Изд-во АН РТ “Дониш”, 2009. 185 с.
- Бредихин Ф.А.* Этюды о метеорах Серия “Классики науки”. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 607 с.
- Бусарев В.В., Шербина М.П., Барабанов С.И., Ирсамбетова Т.Р., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х., Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Гумеров Р.И., Иртуганов Э.Н., Мельников С.С.* Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немузы и 65 Цибелы // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 4. С. 273–290 (*Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I., Irtambetova T.R., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh., Khamitov I.M., Bikmaev I.F., Gumerov R.I., Irtuganov E.N., Mel'nikov S.S.* Confirmation of the sublimation activity of the primitive Mine Belt Asteroid 799 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its probable spectral signs on 51 Nemausa and 65 Cebele // *Sol. Syst. Res.* 2019. V. 53. P. 273–290).
- Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж., Хамроев У.Х., Буриев А.М., Абдуллоев С.Х.* Результаты комплексных наблюдений астероида (596) Шейла в Международной астрономической обсерватории Санглох // *Астрон. вестн.* 2018 Т. 52. № 6. С. 511–520. (*Kokhirova G.I., Ivanova A.V., Rakhmatullayeva F.Dzh., Khamroev U.Kh., Buriev A.M., Abdulloev S.Kh.* Results of complex observations of asteroid (596) Scheila at the Sanglokh International Astronomical observatory // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. P. 495–504).
- Лунишко Д.Ф.* Физические свойства астероидов // *Вестн. астрон. школы.* 2000. Т. 1. С. 63–77.
- Лунишко Д.Ф., Круглый Ю.Н., Шевченко В.Г.* Фотометрия астероидов // *Кинемат. и Физ. небесн. тел.* 2007. Т. 23. С. 235–244.
- Belskaya I.N., Shevchenko V.G.* Opposition effect of asteroids // *Icarus.* 2000. V. 147. P. 94–105.
- Binzel R.P., Rivkin A.S., Stuart J.S., Harris A.W., Bus S.J., Burbine T.H.* Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes // *Icarus.* 2004. V. 170. P. 259–294.
- Bottke W.F., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J., Levison H.F., Michel P., Metcalfe T.S.* Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the Near-Earth objects // *Icarus.* 2002. V. 156 (2) P. 399–433.
- Bowell E., Hapke B., Dominigue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A.W.* Application of photometric models to asteroids // *Asteroids II. Proceed. of the Conf., Tucson, AZ, Mar. 8–11, 1988 (A90-27001 10-91).* Tucson: Univ. Arizona press, 1989. P. 524–556.
- Bowell E., Buie M.W., Picken H.* (4015) 1979 VA = Comet Wilson-Harrington (1949) // *IAUC.* 1992. No 5586.
- Busarev V.V.* Detection of the influence of solar activity on the sublimation activity of primitive asteroids // *Phys. Curr. State Pros. Astronomy-2018 (XIII Cong. Int. Pub. Org. “Astronomy Society”). Con. Abs. Moscow: IZMIRAN, 2018. V. 2. P. 47–50.*
- Consolmagno G.J., Britt D.T.* The density and porosity of meteorites from the Vatican collection // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1998. V. 33. P. 1231–1241.
- Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J.* What density and porosity tell us about meteorites // *LPI Contrib.* 2008. № 1391. P. 1582.
- Cruikshank D.P., Dalle Ore C.M., Roush T. L., Geballe T.R., Owen T.C., de Bergh C., Cash M.D., Hartmann W.K.* Constraints on the Composition of Trojan Asteroid 624 Hektor // *Icarus.* 2001. V. 153. P. 348–360.
- Dahlgren M., Lagerkvist C.I.* A study of Hilda asteroids. I CCD spectroscopy of Hilda asteroids // *Astron. and Astrophys. J.* 1995. V. 302. P. 363–373.
- Dandy C.L., Fitzsimmons A., Collander-Brown S.J.* Optical colors of 56 near Earth objects trends with size and orbit // *Icarus.* 2009. V. 163. P. 114–126.
- Fernandez Y.R., McFadden L.A., Lisse C.M., Helin E.F.* Analysis of POSS images of comet-asteroid transition object 107P/1949 W1 (Wilson-Harrington) // *Icarus.* 1997. V. 128. P. 114–126.
- Green D.W.E., Rickman H., Porter A.P., Porter A.C., Meech K.J.* The strange periodic comet Machholz // *Icarus.* 1990. V. 247. P. 1063–1067.
- Harris A.W.* On the slow rotation of asteroids // *Icarus.* 2002. V. 156. P. 184–190.
- Hartman W.K., Tholen D.J., Cruikshank D.P.* The relationship of active comets, extinct comets, and dark asteroids // *Icarus.* 1987. V. 69. P. 33–50.
- Hsieh H.* Active asteroids: Main-belt comets and disrupted asteroids // *Proc. IAU.* 2016. V. 29A. P. 237–240.

- Hsieh H., Jewitt D.* Main belt comets: Ice in the inner Solar system // *Bull. Americ. Astron. Soc.* 2006. V. 38. 492 p.
- Hsieh H., Jewitt D., Ishugro M.* Physical properties of Main-Belt Comet P/2005 U1 (Read) // *Astron. J.* 2009a. V. 137. P. 157–168.
- Hsieh H., Jewitt D., Fernandez Y.* Albedos of Main-Belt Comets 133P/Elst-Pizarro and 176P/LINEAR // *Astrophys. J. Lett.* 2009b. V. 694. P. L111–L114.
- Jewitt D.* Introductory report: Physical properties of cometary nuclei // *Proc. Liege Inst. Astrophys. Colloq.* 30. 1992. P. 85–111.
- Jewitt D.* The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. P. 66–80.
- Jewitt D.* Color systematics of comets and related bodies // *Astron. J.* 2015. V. 150:201. (18 p.).
- Jewitt D., Yang B., Haghhighipour N.* Main Belt of asteroids comet P/2008 (Garradd) // *Astron. J.* 2009. V. 137. P. 4313–4321.
- Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J.* The active of asteroids // *Asteroids IV / Eds Michel P., DeMeo F., Bottke W.* Univ. Arizona Space Sci. Series. 2015. P. 221–241.
- Kosai H.* Short-period comets and Apollo-Amur-Aten type asteroids in view in Tisserand invariant // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 1992. V. 54. P. 237–240.
- Kresak L.* On the similarity of orbits of associated comets, asteroids and meteoroids // *Bull. Astr. Inst. Czechosl.* 1982. V. 33. P. 104.
- Kresak L.* The discrimination between cometary and asteroidal meteors. I. The orbital criteria // *Bull. Astr. Inst. Czechosl.* 1969. V. 20. P. 177.
- Lamy P., Toth I.* The color of cometary nuclei-Comparison with other primitive bodies of the Solar System and implications for their origin // *Icarus.* 2009. V. 201. P. 674–713.
- Lamy P.L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A.* The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei // *Comets II / Eds. Festou M.C., Keller H.U., Weaver H.A.* Tucson: Univ. Arizona Press, 2004. P. 223–264.
- Landsman W.B.* The IDL astronomy user's library // *Astron. Data Analysis Software and Systems II / Eds Hanisch R.J., Brissenden R.J.V., Barnes J. A.S.P.* Conference Series. 1993. V. 52. P. 246–248.
- Levison H., Duncan M.* From the Kuiper Belt to Jupiter-Family comets: The spatial distribution of ecliptic comets // *Icarus.* 1997. V. 127. P. 13–32.
- Licandro J., Alvarez-Candal A., de-Leon J., Pinnila-Alonso N., Lazzaro D., Campins H.* Spectral prosperities of asteroids in cometary orbits // *Astrophys. J.* 2008. V. 481. P. 861–877.
- Lumme M., Nieminen M., Torsti J.J., Vainikka E., Peltonen J., Valtonen E., Arvela H.* Interplanetary propagation of relativistic solar protons // *Sol. Phys.* 1986. V. 107. P. 183–194.
- Mommert M., Hora J.L., Harris A.W., Reach W.T., Emery J.P., Thomas C.A., Mueller M., Cruikshank D.P., Trilling D.E., Delbo M., Smith H.A.* The discovery of cometary activity in Near-Earth asteroid (3552) Don Quixote // *Astrophys. J.* 2014. V. 781. Article id. 25. 10 p.
- Mommert M., Trilling D., Knight M.M., Hora J., Biver N., Womack M., Wierzbos K., Polishook D., Veres P., Gustafson A., McNeill A., Skiff B., Wainscoat R., Kelley M.S., Moskowicz N., Harrington O.* Systematic characterization and monitoring of potentially active asteroid: The case of Don Quixote // *Americ. Astron. Soc.* 2018a. DPS. Meeting #50. id.505.05.
- Mommert M., Polishook D., Moskovitz N.* (3552) Don Quixote // 2018b. CBET 4502: 20180329. [<http://www.cbat.eps.harvard.edu/index.html>].
- Morbidelli A., Gladman B.* Orbital and temporal distributions of meteorites originating in the asteroid belt // *Meteor. and Planet. Sci.* 1998. V. 33. P. 999–1016.
- Neslushan L., Ivanova O., Husarik M., Svoren J., Krisandova Z.S.* Dust productivity and impact collision of the asteroid 596 (Scheila) // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 125. P. 37–42.
- Opik E.* The stray bodies in the Solar System. I. Survival time of cometary nuclei // *Adv. Astron. and Astrophys.* 1963. V. 2. P. 219–262.
- Penttila A., Shevchenko V.G., Wilkman O., Muinonen K.H.* H,G1,G2 photometric phase function extended to low-accuracy data // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 123. P. 117–125.
- Rickman H., Gustafson B.A.S., Fernandez J.A.* Model Calculations of Mantle Formation on Comet Nuclei // *Asteroids, Comets, Meteors III (ACM) 1989 / Eds Lagerkvist C.I., Rickman H., Lindblad B.A.* Uppsala: Univ., 1990. P. 423–426.
- Sekanina Z.* Periodic comet Machholz its idiosyncrasies // *Astron. J.* 1990. V. 99. P. 1269–1277.
- Solontoi M., Ivezić Z., Juric M., Becker A.C., Jones L., West A.A., Kent S., Lupton R.H., Claire M., Knapp G.R., Quinn T., Gunn J.E., Schneider D.P.* Ensemble properties of comets in the Sloan digital sky survey // *Icarus.* 2012. V. 128. P. 571–584.
- Tholen D.J.* Asteroid taxonomic classification // *Asteroids / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S.* Tucson: Univ. Arizona Press. 1989. P. 1139–1150.
- Veeder G.J., Hanner M.S., Matson D.L., Tedesco E.F., Lebofsky L.A., Tokunaga A.T.* Radiometry of Near-Earth Asteroids // *Astron. J.* 1989. V. 97. P. 1211–1219.
- Weissman P.R., A. Hearn M.F., McFadden L.A., Rickman H.* Evolution of comets into asteroids // *Asteroids II / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S.* Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 880–920.
- Weissman P., Bottke W., Levison H.* Evolution of Comet into Asteroid // *Asteroids III / Eds Bottke W., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.* Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 669–686.
- Whipple F.L.* A comet model I. The acceleration of comet Encke // *Astrophys. J.* 1950.V. 111. P. 375–394.
- Whipple F.L.* A comet model II. Physical relation foe comets and meteors // *Astrophys. J.* 1951.V. 121. P. 750–770.
- Whipple F.L.* A comet model III. The zodiacal light // *Astrophys. J.* 1951.V. 56. P. 144–145.
- <https://www.ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>, 2019
- <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>
- <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html>