

УДК 523.44/64:521.31

ПРИЧИНЫ АКТИВНОСТИ АСТЕРОИДА (457175) 2008 GO98/362P

© 2023 Ю. А. Чернетенко^{1*}¹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 22 июня 2022 года; после доработки 10 октября 2022 года; принята к публикации 12 октября 2022 года

Получена орбита активного астероида (457175) 2008 GO98/362P с учетом негравитационного ускорения по модели Марсдена. В наблюдениях 2016 г., предшествовавших проявлению кометной активности, выявлено наличие систематических уклонений. Рассмотрена возможность столкновения астероида с некоторым малым телом, для чего определены моменты достижения минимальных расстояний (MOID — Minimum Orbit Intersection Distance) между орбитами астероида (457175) и 585 961 нумерованного и 536 561 нумерованного астероидов (по состоянию каталогов наблюдений Международного центра малых планет на октябрь 2021 г.). Максимальное количество сближений орбит приходится на время прохождения астероидом окрестности восходящего узла, что позволяет предположить возможность столкновения, приведшего к фрагментации основного тела. Рассмотрено два сценария разделения и выполнены оценки изменения орбит основного тела и возможных фрагментов. Для образовавшегося фрагмента изменение гелиоцентрической скорости составило $dv = 0.148 \text{ м с}^{-1}$, а негравитационное ускорение $A_3 = -12.5 \times 10^{-8} \text{ а.е. сут}^{-2}$. Динамика основного тела значимо не изменилась.

Ключевые слова: небесная механика — малые планеты, астероиды: отдельные: (457175) 2008 GO98 — кометы: отдельные: 362P

1. ВВЕДЕНИЕ

Популяция малых тел Солнечной системы включает и кометы, и астероиды. Диапазон физических и динамических характеристик у обеих групп широкий, но для каждой из них есть четкое определение: кометы проявляют активность, астероиды — инертные тела; их орбиты характеризуются разными значениями критерия Тиссерана: меньше 3 для комет и больше 3 у астероидов; различаются кометы и астероиды также содержанием льдов. В последние десятилетия были открыты необычные малые тела: ряд астероидов главного пояса с физическими проявлениями кометной активности (активные астероиды) и астероиды, находящиеся на кометных орбитах (спящие, неактивные кометы) (Jewitt 2012, Jewitt et al. 2015).

Среди причин, приводящих к появлению активных астероидов, называют столкновения малых тел, вращательную неустойчивость, рыхлую структуру тела, а также наличие льдов в составе астероида. Активность, наблюдаемая у комет, непродолжительна по времени из-за ограниченного количества их летучих составляющих. В результате динамическое время жизни оказывается длиннее времени активной фазы и комета становится

неактивной, неотличимой от астероидов с низкими значениями альбедо. С другой стороны, изменение орбиты малого тела, приводящее к уменьшению перигелийного расстояния, разрушение и, возможно, другие причины могут приводить к переходу неактивной кометы в фазу кометной активности. Обзор по этой теме можно найти в работах Jewitt (2012), Jewitt et al. (2015).

По данным Международного центра малых планет¹ (МЦМП) наблюдения астероида (457175) 2008 GO98 охватывают период с 15 октября 2001 г. по 13 октября 2018 г. О появлении у астероида яркой комы и широкого длинного хвоста сообщалось в циркуляре МЦМП от 3 июля 2017 года². Астероид получил статус кометы с номером 362P, которая на эпоху 2017 Sept. 4.0 TT = JDT 2458000.5 имела следующие орбитальные параметры³: $a = 3.962 \text{ а.е.}$, $e = 0.281$, $Q = 5.074 \text{ а.е.}$, $q = 2.851 \text{ а.е.}$, $P = 7.89 \text{ лет}$. Критерий Тиссерана относительно Юпитера равен 2.93, то есть орбиту астероида можно считать типичной для комет семейства Юпитера.

¹<https://minorplanetcenter.net/db>²<https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K17/K17N50.html>³<https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K17/K17V13.html>

*E-mail: cya@iaaras.ru

Таблица 1. Параметры негравитационного ускорения

Параметр, 10 ⁻⁸ а.е. сут ⁻²	Эта работа	JPL ^a
A_1	1.17 ± 0.28	1.12 ± 0.28
A_2	-0.015 ± 0.148	-0.151 ± 0.124
A_3	-4.09 ± 0.58	-4.75 ± 0.40
СКО, угл. сек.	0.556	0.686

^aSmall-Body Database / Jet Propulsion Laboratory (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=457175 на 1 марта 2022 г.)

Gil-Hutton and García-Migani (2016) отнесли астероид (457175) к группе малых тел региона квази-Гильда с неустойчивыми орбитами. Указанные авторы исследовали обратную эволюцию его орбиты, наряду с другими такими объектами, и показали, что это малое тело 1700 лет тому назад имело орбиту с большой полуосью $a > 5.2$ а.е., то есть принадлежало группе объектов региона кентавров или транснептуновых объектов.

Целью настоящей работы являются исследование изменений орбиты и выяснение причин проявления кометной активности астероида (457175).

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОРБИТЫ И АНАЛИЗ УКЛОНЕНИЙ ($O - C$)

Для оценки орбитальных параметров в настоящей работе были использованы 712 позиционных наблюдений⁴ (на октябрь 2021 г.) из базы данных МЦМП и 77 наблюдений, полученных в обсерватории Санглок (Kokhirova et al. 2021).

Интегрирование уравнений движения и уравнений в вариациях выполнялось методом Эверхарта (Everhart 1973). В качестве возмущающих составляющих в уравнениях движения учтены возмущения от больших планет, Плутона, Цереры, Паллады и Весты на основании эфемерид DE405 (Standish 1998) с соответствующими значениями масс. Координаты Цереры, Паллады и Весты вычислялись в процессе совместного интегрирования их уравнений движения и уравнений движения астероида (457175), причем значения элементов орбит этих возмущающих тел выбирались из каталога элементов⁵ ИПА РАН. В уравнения движения включены релятивистские возмущения от Солнца. Исключение ошибочных наблюдений выполнялось по правилу 3σ .

⁴https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=457175

⁵https://iaaras.ru/dept/lbss/minor_elem/ на 22 февраля 2022 года.

Орбита, определенная по всем наблюдательным данным без учета негравитационного ускорения (НУ), обнаруживает значительные систематические отклонения в представлении наблюдений. На сайтах МЦМП и AstDyS-2⁶ приводятся оценки орбитальных параметров астероида (457175) без учета НУ. Значения среднеквадратических ошибок (СКО) при этом равны $0''.96$ и $0''.93$ соответственно. При учете в уравнениях движения НУ по модели Марсдена (Marsden et al. 1973) мы получили значения параметров НУ, которые представлены в таблице 1 в сопоставлении с данными, приведенными для астероида на сайте JPL.

Необходимо отметить значительную уверенно определяемую составляющую A_3 . Кроме того, и после учета НУ некоторые ряды наблюдений имеют систематические отклонения. Рисунок 1 показывает отклонения наблюдений ($O - C$) от полученной орбиты на различных интервалах. Хорошо видны систематические отклонения на рис. 1e, f для наблюдений после прохождения окрестности восходящего узла и до начала кометной активности. Систематические отклонения в ($O - C$) после начала кометной активности не выявляются (рис. 1g, h), хотя разброс значений ($O - C$) больше, чем для других интервалов.

3. МИНИМАЛЬНЫЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОРБИТОЙ (457175) И ОРБИТАМИ НУМЕРОВАННЫХ И НЕНУМЕРОВАННЫХ АСТЕРОИДОВ

Орбита астероида (457175) такова, что перигелий он проходил 24 августа 2016 г., а восходящий узел — 24 декабря 2015 г., то есть примерно за 250 суток до перигелия; гелиоцентрическое расстояние узла составляет 3.143 а.е.

Анализ отклонений ($O - C$) позволяет предположить, что изменения орбиты астероида произошли не в момент, близкий к наблюдаемому началу кометной активности, а раньше — судя по графикам ($O - C$) (рис. 1e, f), вблизи даты 1 января 2016 г. А эта дата близка к моменту прохождения астероида через восходящий узел.

Рассмотрим возможность его столкновения на исследуемом отрезке времени с каким-то малым телом. Для астероидов с номерами до 10 000 были получены оценки реальных сближений с астероидом (457175) на этом интервале. Имевшее место 8 февраля 2016 г. сближение до 0.002 а.е. с астероидом 8385 не могло значимо изменить орбиту. Были вычислены значения MOID для 585 961 нумерованного и 536 561 ненумерованного астероидов⁷

⁶<https://newton.spacedys.com/astdys/index.php?pc=1.1.7.0&n=457175>

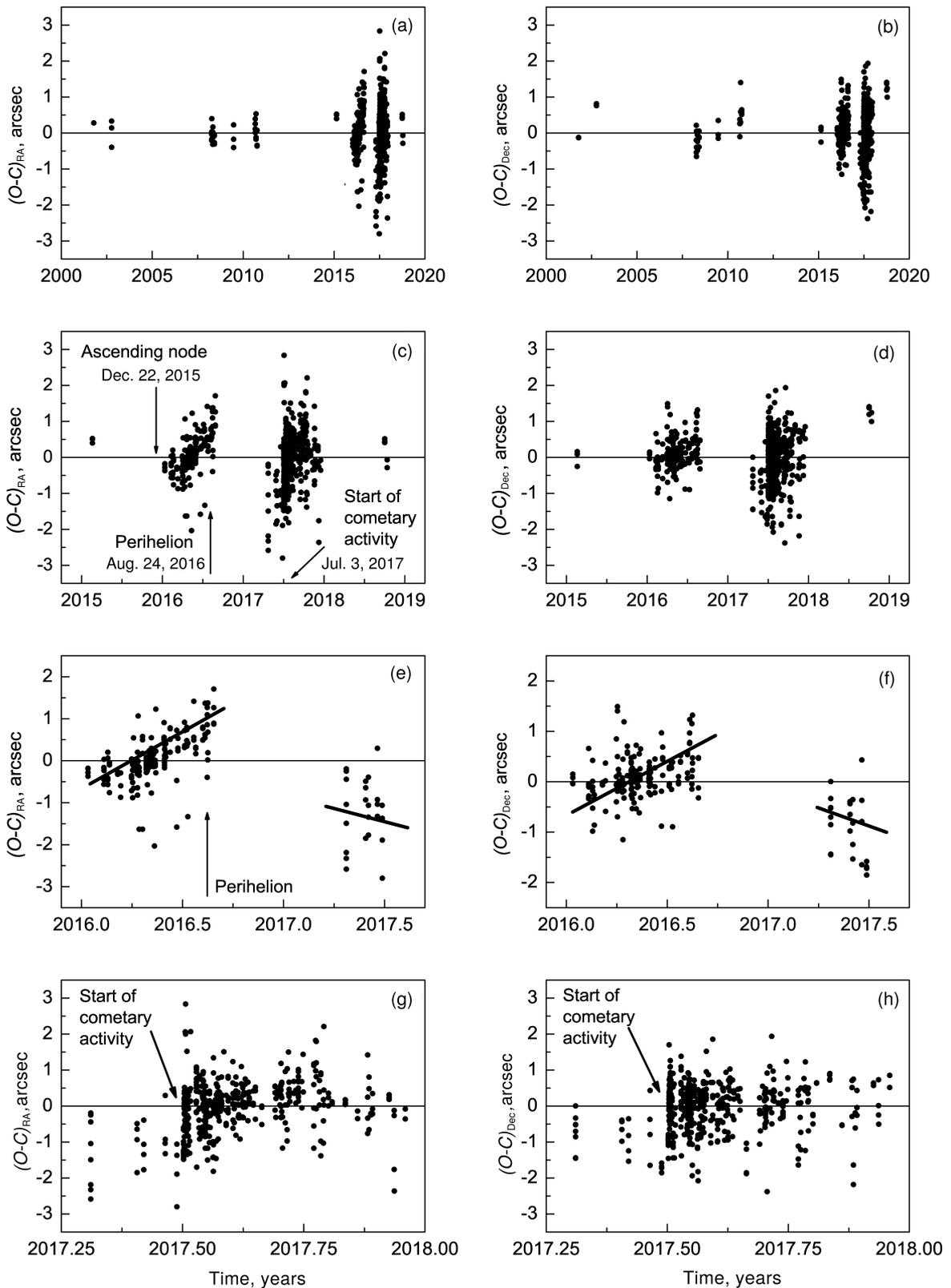


Рис. 1. Уклонения ($O - C$) наблюдений от орбиты, полученной с учетом НУ. Слева — по прямому восхождению, справа — по склонению, для разных интервалов времени наблюдений T : (a) и (b) — за весь период наблюдений; (c) и (d) — начиная с последнего появления, стрелками показаны моменты прохождения через восходящий узел, перигелий и начало кометной активности; (e) и (f) — после прохождения восходящего узла и до начала кометной активности; (g) и (h) — наблюдения с проявлениями кометной активности.

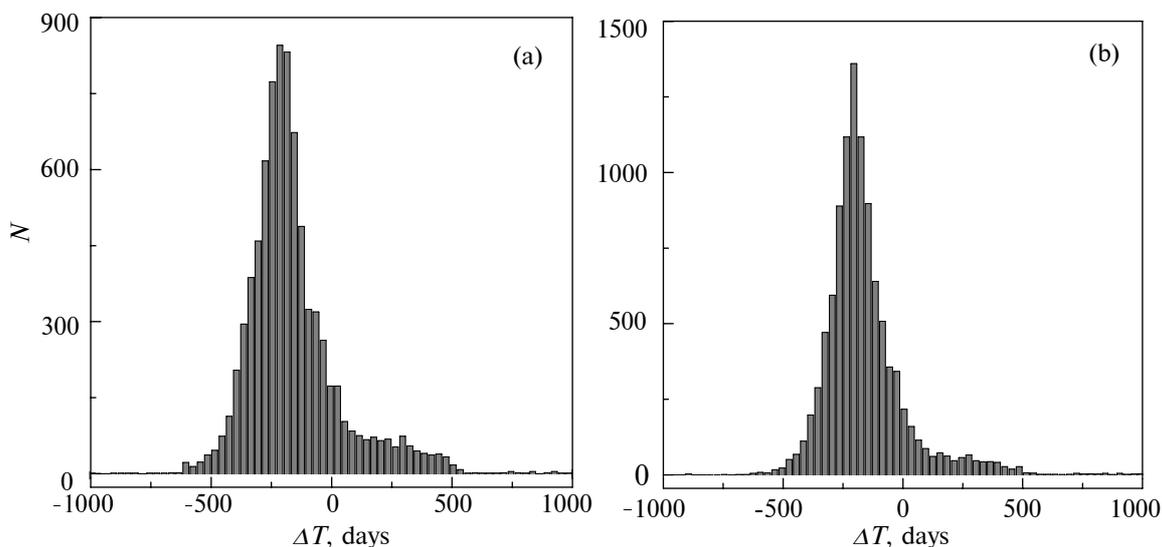


Рис. 2. Число астероидов N в зависимости от времени прохождения астероидом (457175) перигелия ΔT : (а) для 8157 нумерованных астероидов с MOID меньше 0.010 а.е.; (б) для 10 400 нумерованных астероидов с MOID меньше 0.012 а.е. Прохождение через восходящий узел — за 250 суток до перигелия.

Таблица 2. Некоторые параметры опорных орбит в интервалах указанных дат

Опорная орбита	Число наблюдений	Даты	A_1	A_2 , 10^{-8} а.е. сут $^{-2}$	A_3 , 10^{-8} а.е. сут $^{-2}$	СКО, угл. сек.
<i>A</i>	498	2001.10.15–2015.02.19, 2017.07.03–2018.10.13	—	—	-3.980 ± 0.656	0.554
<i>B</i>	37	2001.10.15–2015.02.19	—	-0.403 ± 0.177	—	0.252

и получены моменты времени, соответствующие сближениям орбит. Оказалось, что для 10 400 нумерованных астероидов MOID < 0.012 а.е., и для 8157 нумерованных — MOID < 0.010 а.е. Гистограммы на рис. 2 показывают, что максимальное количество сближений орбит приходится на время 200–215 суток до перигелия, вскоре после прохождения области восходящего узла. Поэтому вероятность столкновения астероида (457175) с каким-либо малым телом особенно велика вблизи восходящего узла его орбиты.

4. ОБСТОЯТЕЛЬСТВА РАЗДЕЛЕНИЯ

С учетом вышесказанного предполагается, что после прохождения астероидом восходящего узла орбиты (выбрана дата 1 января 2016 г.) произошло его столкновение с каким-то малым телом, приведшее к отделению фрагмента. Рассматривается два варианта такого события:

1. От основного тела отделился фрагмент *A-I*, который наблюдался в течение 2016.0–2017.5 гг. Эти наблюдения, имеющие систематические отклонения (рис. 1e, f), из процедуры определения орбитальных и

негравитационных параметров исключены, и получена орбита, называемая далее опорной *A*. Данные о ней приведены в таблице 2. Рисунок 3a показывает отклонения наблюдений 2016.0–2017.5 гг. от этой опорной орбиты.

2. Произошло разделение на два фрагмента: *B-I* и *B-II*. Один из них наблюдался с 1 января 2016 г. до 3 июля 2017 г., другой — с 3 июля 2017 г. по 13 октября 2018 г. Из процедуры определения орбитальных и негравитационных параметров исключены все наблюдения после 1 января 2016 г., и получена орбита, называемая далее опорной *B*. Данные об этой орбите также представлены в таблице 2.

Необходимо отметить, что, если фрагментация действительно имела место, то должна быть велика вероятность наблюдения обоих фрагментов (или фрагмента и основного тела). Однако отнести позиционные наблюдения к тому или другому телу не представляется возможным.

Далее на момент 1 января 2016 г. на опорных орбитах фиксировались значения координат и из наблюдений соответствующих предполагаемых фрагментов уточнялись только поправки

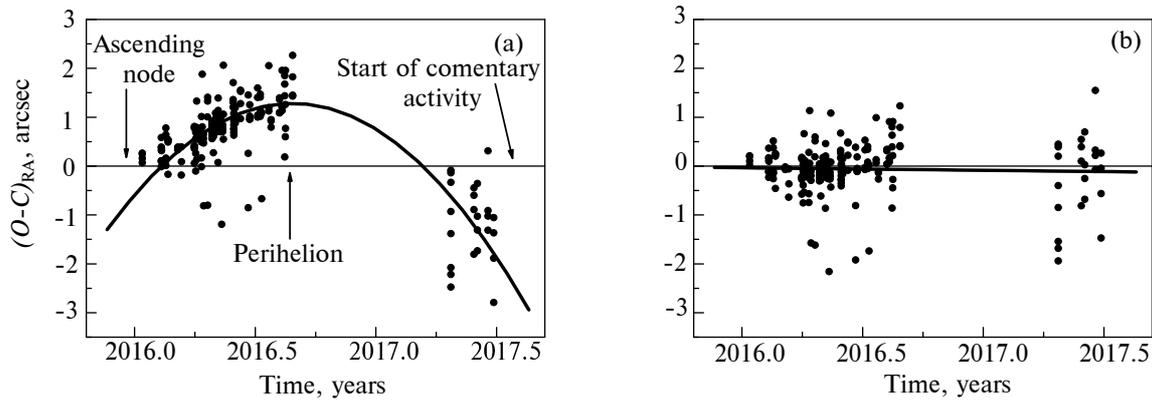


Рис. 3. Уклонения наблюдений ($O - C$) по прямому восхождению: (а) — от опорной орбиты A (жирной линией показана орбита фрагмента $A-I$); (б) — от орбиты фрагмента $A-I$ (жирная линия соответствует линейной аппроксимации ($O - C$), практически совпадающей с орбитой этого фрагмента).

Таблица 3. Орбиты фрагментов на эпоху 1 января 2016 г. (A_1, A_2, A_3 в 10^{-8} а.е. сут $^{-2}$)

Параметры	Опорная орбита A		Опорная орбита B	
	Фрагмент $A-I$		Фрагмент $B-I$	Фрагмент $B-II$
$ \mathbf{V}_0 $, а.е. сут $^{-1}$	$0.0107650689 \pm (0.63 \times 10^{-8})$		$0.0107650842 \pm (1.13 \times 10^{-8})$	
СКО, угл. сек.	0.252		0.307	0.564
A_1	—		—	—
A_2	—		20.66 ± 2.92	—
A_3	-12.47 ± 0.49		-10.90 ± 0.54	-2.10 ± 0.80
$ \mathbf{V} $, а.е. сут $^{-1}$	$0.0107651325 \pm (0.23 \times 10^{-8})$		$0.0107651021 \pm (0.48 \times 10^{-8})$	$0.0107650746 \pm (0.42 \times 10^{-8})$
dv , см с $^{-1}$	11.01 ± 1.17		3.44 ± 2.14	-1.34 ± 2.10
dv_1 , см с $^{-1}$	14.80 ± 0.74		8.70 ± 0.34	6.95 ± 3.89

к компонентам скорости и негравитационные параметры для каждого из фрагментов. Результаты приводятся в таблице 3, где \mathbf{V}_0 — гелиоцентрический вектор скорости астероида на опорной орбите, \mathbf{V} — гелиоцентрический вектор скорости фрагмента, $dv = |\mathbf{V}| - |\mathbf{V}_0|$, $dv_1 = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_0|$.

Данные таблицы 3 говорят о том, что фрагмент $B-II$ является, вероятнее всего, основным телом, так как изменения скорости относительно опорной орбиты B не определяются статистически значимо. Более уверенно, хотя также статистически незначимо, определяется параметр A_3 для этого фрагмента, и его значение близко к значению A_3 для опорной орбиты A (таблица 2).

На основании этого предпочтение отдается варианту с опорной орбитой A и фрагментом $A-I$. На рис. 3б показаны уклонения наблюдений ($O - C$) по прямому восхождению от орбиты фрагмента $A-I$. Жирная линия, соответствующая линейной аппроксимации значений ($O - C$), практически

совпадает с орбитой этого фрагмента (ось абсцисс), что говорит об отсутствии систематических отклонений этих ($O - C$).

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты позволяют предположить, что вблизи прохождения астероида (457175) через восходящий узел могло произойти столкновение с некоторым малым телом, приведшее к фрагментации. Причиной образования фрагмента (относительно опорной орбиты A , что представляется более вероятным) могло быть и повышение температуры на поверхности астероида при приближении к окрестности перигелия. Скорость разделения невелика, 0.148 ± 0.007 м с $^{-1}$, что может говорить также о вращательной неустойчивости, как о причине разделения: при диаметре астероида примерно 7 км (Kokhirova et al. 2021) и периоде вращения $10^{\text{h}}74$ (см. в базе данных JPL⁸) скорость

⁸https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html/#?sstr=457175 на 1 марта 2022 г.

на экваторе составляет примерно 0.6 м с^{-1} . Образовавшийся фрагмент, получивший значительное негравитационное ускорение, $A_3 = -12.5 \pm 0.5$ (в $10^{-8} \text{ а.е. сут}^{-2}$), мог оказаться ярче основного тела, хотя и наблюдался в течение 2016.0–2017.5 гг. без видимых проявлений кометной активности. К появлению яркой комы и хвоста после 2017.5 г., возможно, привело полное разрушение этого фрагмента, или продолжение фрагментации основного тела, или столкновение фрагмента с основным телом. Последнее предположение можно было бы проверить в результате интегрирования уравнений движения основного тела и фрагмента, но ошибки координат (даже в начальную эпоху) существенно больше размеров астероида и возможного фрагмента.

В работе Kokhirova et al. (2021) делается предположение о том, что возможное столкновение было несущественным, так как катастрофических изменений с основным телом не произошло. Полученные в настоящей работе результаты показывают, что и орбита основного тела осталась практически без изменений.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовались данные и/или сервисы, предоставленные Центром малых планет Международного астрономического союза.

Автор благодарит с. н. с. ИПА РАН В. Б. Кузнецова за помощь в вычислениях. Автор благодарит анонимных рецензентов за высказанные замечания и рекомендации, учет которых позволил улучшить работу.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Everhart, Bull. Amer. Astron. Soc. **5**, 389 (1973).
2. R. Gil-Hutton and E. Garcia-Migani, Astron. and Astrophys. **590**, id. A111 (2016).
3. D. Jewitt, Astron. J. **143** (3), article id. 66 (2012).
4. D. Jewitt, H. Hsieh, and J. Agarwal, *Asteroids IV*, Ed. by P. Michel, F. DeMeo and W. Bottke, (University of Arizona Press, Tucson, 2015), pp. 221–241.
5. G. I. Kokhirova, O. V. Ivanova, F. D. Rakhmatullaeva, et al., Advances in Space Research **67** (1), 639 (2021).
6. B. G. Marsden, Z. Sekanina, and D. K. Yeomans, Astron. J. **78**, 211 (1973).
7. E. M. Standish, JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405, JPL Interoffice Memo., 312.F-98-048, 1–18 (1998).

Causes of Asteroid (457175) 2008 GO98/362P Activity

Yu. A. Chernetenko¹

¹ Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

The orbit of an active asteroid (457175) 2008 GO98/362P was obtained taking into account non-gravitational acceleration based on the Marsden model. The presence of systematic deviations was revealed in the 2016 observations prior to the cometary activity. The possibility of a collision with a minor body was considered. For this, the moments of reaching the minimum distances (MOID, Minimum Orbit Intersection Distance) between the orbits of the asteroid (457175) and 585961 numbered, and 536561 unnumbered asteroids (according to the status in the Minor Planet Center catalogs of observations as of October 2021) were found. The maximum number of orbital rendezvous falls on the time when the asteroid was passing in the vicinity of the ascending node, which suggests the possibility of a collision leading to the fragmentation of the main body. Two separation scenarios are considered and orbit variation of the main body and possible fragments are estimated. For the formed fragment, the heliocentric velocity variation amounted to $dv = 0.148 \text{ м с}^{-1}$ and non-gravitational acceleration was $A_3 = -12.5 \times 10^{-8} \text{ AU day}^{-2}$. The main body dynamics did not vary significantly.

Keywords: *celestial mechanics—minor planets, asteroids: individual: (457175) 2008 GO98—comets: individual: 362P*