

УДК 523.44/64

## СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДОВ: АСТЕРОИД (596) ШЕЙЛА

© 2019 Ю. А. Чернетенко\*

*Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187, Россия*

Поступила в редакцию 25 сентября 2018 года; после доработки 5 декабря 2018 года; принята к публикации 5 декабря 2018 года

Среди малых тел Солнечной системы в настоящее время выделяют группу объектов, проявляющих динамические и/или физические свойства и комет, и астероидов. Одной из причин таких проявлений могут быть столкновения с другими телами. Астероид (596) Шейла является одним из объектов, принадлежащих к группе комет главного пояса. Изучение его пылевой комы позволило оценить относительную скорость столкновения и размеры тела-ударника. В настоящей работе выполнен поиск возможного ударника среди известных астероидов, комет, метеорных потоков. Реальное такое тело не найдено, хотя это мог быть фрагмент гипотетического метеорного роя кометы 232P/Hill. Выполненное моделирование тесных сближений астероида (596) с фиктивными телами показывает, что таким ударником мог быть и астероид, и комета. По его позиционным наблюдениям выполнена оценка возможного изменения скорости астероида (596) в результате столкновения. Приведено 3456 наблюдений с 22 февраля 1906 г. по настоящее время. Однако точность определения компонент изменения скорости, примерно  $1 \text{ мм с}^{-1}$ , оказалась недостаточной для уверенного определения этого изменения.

Ключевые слова: *небесная механика: кометы: малые планеты, астероиды: индивидуальные: (596) Шейла*

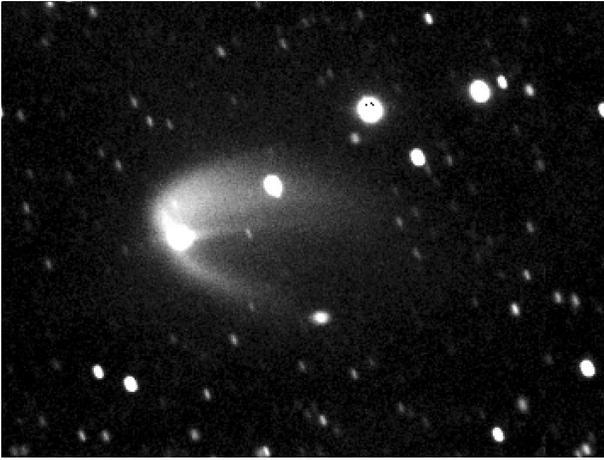
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как показывают результаты исследований, среди астероидов, сближающихся с Землей, имеется некоторое количество комет, потерявших летучую составляющую в поверхностном слое (так называемые «спящие кометы»). В последние годы в главном поясе астероидов также выделена новая группа тел, которая получила название *кометы главного пояса*. Эти тела обнаруживают свойства и астероидов, и комет, демонстрируя различные признаки кометной активности. Некоторые из этих тел имеют двойное обозначение. К этим телам могут быть отнесены: комета P/2010 A2, астероид (596) Шейла, астероид (493) Гризельда, 107 P/Вильсон–Харрингтон (астероид (4015)), 133 P/Элст–Пизарро (астероид (7968)), 176 P/LINEAR (астероид (118401)), P/2006 VW139 (астероид (300163)). Всего таких тел известно несколько десятков, но их количество постоянно возрастает. Как показывают наблюдения, активность некоторых из них имеет кометную природу, т.е. в их комах присутствует летучая составляющая. У других — выбросы и другие активные образования имеют только пылевую составляющую и являются следствием столкновений или, возможно, вращательной неустойчивости.

В настоящей работе рассмотрено событие, проявившееся в активности астероида Шейла. Особый интерес к астероиду возник после того, как 11 декабря 2010 г. С. Ларсон по наблюдениям в обсерватории Маунт Леммон (США) обнаружил, что его блеск увеличился почти в два раза, и он, как комета, проявил признаки комы. Позднее у астероида были обнаружены два пылевых хвоста (рис. 1). И по этой причине он был отнесен к группе объектов, называемых кометами главного пояса. Сравнение архивных данных показало, что кома у астероида появилась в период с 11 ноября 2010 г. по 3 декабря 2010 г.

Наблюдения, выполненные с помощью телескопов им. Хаббла и Swift, позволили сделать вывод о том, что астероид Шейла столкнулся на скорости порядка  $5 \text{ км с}^{-1}$  с ранее неизвестным астероидом диаметром около 35 м [1, 2]. Другие авторы [3] дают следующие оценки диаметра ударника: 1) 60–180 м, 2) не больше 100 м. Столкновение произошло в интервале времени 11.11.2010–03.12.2010, когда астероид находился на расстоянии порядка 3.136 а.е. от Солнца и имел значение истинной аномалии  $v = 214^\circ$ . Восходящий узел орбиты ( $r_N = 3.407 \text{ а.е.}$ ) астероид прошел 24 декабря 2009 г., из чего следует, что столкновение произошло далеко от плоскости эклиптики. Измерения показали, что вспышка

\*E-mail: cya@iaaras.ru



**Рис. 1.** Астероид (596), как он наблюдался 15 декабря 2010 г. А. Гиббсом с 1.5-м рефлектором обсерватории Маунт Леммон, Аризона. Представлена сумма тридцати 20-секундных экспозиций.

астероида имела эпизодический характер и не связана с выделением газов CO, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, OH, NH, CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, обычно характерных для комет. Анализ пылевой комы показал, что из астероида произошел выброс  $6 \times 10^8$  кг пыли со скоростью  $57 \text{ м с}^{-1}$ . В результате столкновения могли образоваться фрагменты диаметром не более 100 м (предполагая значение альбедо астероида равным 0.04). Фрагменты такого размера не могли бы наблюдаться с Земли, т.к. их угловой размер составил бы всего около  $0''.00005$ . А также образовалась пылевая кома, площадь сечения которой составила почти  $2.2 \times 10^4 \text{ км}^2$ , что соответствует облаку микронных частиц массой около  $4 \times 10^7$  кг. После такого столкновения на поверхности астероида мог образоваться кратер диаметром приблизительно 300 м.

В работе [4] были выполнены наблюдения астероида Шейла с целью обнаружения изменений фотометрических характеристик астероида, а именно формы кривой блеска, видимого и, следовательно, абсолютного блеска, которые могли произойти в результате столкновения. Фотометрические наблюдения астероида Шейла проведены с помощью ПЗС камеры FLI 1024 на 1.25 м телескопе АЗТ-11 в Крымской астрофизической обсерватории с 30 мая по 4 июня 2011 г. Абсолютный блеск астероида составил 8.9 звёздной величины, который он имел до столкновения с малым телом. Сделан вывод о том, что вспышка астероида Шейла не была вызвана катастрофическим столкновением, повлекшим за собой полный распад объекта. Вероятнее всего, астероид практически сохранился, а последствия удара выразились в кратерообразовании на поверхности и в проявлении кометной активности вследствие появления пылевого облака.

Оценки изменений скорости астероида, основанные на законе сохранения количества движения, при предположении об одинаковой плотности двух астероидов и диаметре ударника 35 м, а астероида (596) — 118 км, показывают, что эти изменения очень малы. Однако с учетом того, что было выброшено значительное количество вещества, и оценки размеров ударника отличаются в разных работах в пять раз, эти изменения, в принципе, могут быть оценены по результатам позиционных наблюдений. Это и явилось первой задачей настоящей работы. Вторая задача состояла в поиске тела, которое могло столкнуться с астероидом Шейла. Были рассмотрены астероиды, периодические кометы и метеорные потоки, а также выполнено моделирование, основанное на использовании данных об обстоятельствах столкновения.

## 2. ПОИСК СБЛИЖЕНИЙ С МАЛЫМИ ТЕЛАМИ

### 2.1. Сближения с астероидами

Выполнен поиск кандидатов на ударник среди астероидов по каталогам элементов нумерованных и нenumерованных астероидов Международного планетного центра на январь 2017 г. Критерием отбора была абсолютная звездная величина, для которой принято предельное значение  $H \geq 23.0^m$  (диаметр меньше 100 м). Кроме этого, нас интересовали такие астероиды, которые не наблюдались после ноября 2010 г., а также те, которые имели достаточно тесные сближения с астероидом (596) в интервале столкновения и относительные скорости не более  $10\text{--}15 \text{ км с}^{-1}$ . В таблице 1 приводятся данные о четырех астероидах, которые могут рассматриваться в качестве кандидатов-ударников.

Далее были оценены возможности соударения. Для этого выполнены определения орбит по наблюдениям предполагаемых ударников 2001 UO и 2008 LE (эти астероиды имеют меньше всего наблюдений и на коротких дугах) и по наблюдению астероида (596) в момент соударения (вычисленные сферические координаты). Однако таким образом орбиту гипотетического тела получить не удалось.

### 2.2. Сближения с метеорными потоками

На сайте [www.astro.amu.edu.pl/](http://www.astro.amu.edu.pl/) — Meteor Data Center — приводятся данные (состояние на 25 июня 2016 г.) о 701 метеорном потоке, из которых 112 считаются установленными. Из этих 112 нами были выбраны те, для которых есть информация обо всех орбитальных параметрах, а их орбиты являются эллиптическими. Таких потоков

**Таблица 1.** Реальные сближения астероида (596) с другими астероидами с 11.11.2010 по 03.12.2010

Астероид	$H$ , зв. вел.	$D$ , м	$\omega$ , град.	$\Omega$ , град.	$i$ , град.	$e$	$a$ , а.е.	$\Delta r$ , а.е.	$\Delta v$ , км с <sup>-1</sup>	МОИД, а.е.	Число набл.	Дуга, сут.
2001 UO	24.1	50	303	22	10.3	0.669	2.55	0.4	12.4	0.002	14	2
2008 LE	23.6	75	180	98	5.5	0.534	2.30	0.5	5.6	0.275	12	0.1
2009 MU	24.6	35	224	94	7.3	0.607	2.29	0.6	8.0	0.482	90	5
2009 SR104	25.4	15	316	5	13.1	0.548	2.28	0.4	6.9	0.277	34	4
(596)	8.9		175	70	14.7	0.164	2.93					

**Таблица 2.** Минимальные значения МОИД для орбит метеорных потоков и орбиты астероида (596)

Номер потока	$a$ , а.е.	$q$ , а.е.	МОИД, а.е.	Название потока	Родитель- ское тело
00011	2.47	0.46	0.038	$\eta$ Virginids	D/1766 G1?
00021	2.55	0.74	0.138	$\alpha$ Virginids	1998 SH2?
00063	2.35	1.00	0.086	Corvids	2004 HW

оказалось 99. В таблице 2 приводятся результаты минимальных значений МОИД между орбитами указанных потоков и орбитой астероида (596).

Наиболее близок к изучаемой области пространства поток 00063. Все три потока проходят через куб со сторонами 1 а.е., в центре которого находится точка столкновения. Однако относительные скорости этих потоков вблизи точки столкновения существенно отличаются от наблюдаемых 5 км с<sup>-1</sup>, поэтому остается сделать вывод о том, что предполагаемое тело-ударник не принадлежало ни одному из этих потоков.

### 2.3. Сближения с периодическими кометами

Далее рассмотрены орбиты 416 периодических комет. В таблице 3 показаны реальные сближения комет с астероидом (596) в интервале возможного столкновения. Как видно, достаточно тесные сближения не выявлены, хотя относительные скорости комет 9P, 23P, 175P близки к оценкам, полученным для этой величины.

Рассмотрим теперь другую группу комет, а именно тех, для которых сближения их орбит с орбитой астероида (596) имеют место вблизи точки столкновения ( $v = 214^\circ$ ). В таблице 4 приводится информация о девяти таких кометах, для которых расстояния от орбиты кометы до точки столкновения по каждой из прямоугольных координатах

**Таблица 3.** Реальные сближения астероида (596) с кометами на интервале 11.11.2010–03.12.2010

Комета	МОИД, а.е.	$\Delta r$ , а.е.	$\Delta v$ , км с <sup>-1</sup>
9P/Tempel 1	0.27	0.46	4.7
23P/Brorsen–Metcalf	0.81	1.10	6.6
145P/Shoemaker–Levy	0.30	0.41	12.9
175P/Hergenrother	0.20	1.12	5.4

( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) меньше 1.0 а.е. В последнем столбце таблицы 4 приводятся значения этих расстояний.

Орбиты комет 180P/NEAT и 232P/Hill проходят на минимальном расстоянии от области, в которой произошло столкновение (таблица 4, последний столбец). Так как 32 метеорных потока из 112 установленных связывают именно с кометами, то естественно предположить существование метеорных потоков, связанных также и с этими кометами (гипотетически, так как орбиты этих комет не пересекают орбиту Земли ( $q \geq 1.0$  а.е.)). Варьированием элементов были получены орбиты, близкие к орбитам этих комет и приводящее к столкновению с астероидом (596) 27 ноября 2010 г. Для предполагаемого фрагмента кометы 180P/NEAT относительная скорость оказалась меньше оцененной — 4 км с<sup>-1</sup>. Для фрагмента кометы 232P/Hill результаты приводятся в таблице 5. При этом относительная скорость возможного столкновения составляет 5.02 км с<sup>-1</sup>, что хорошо согласуется со значением, полученным по скорости пылевой комы. В таблице 5 показаны варьированные элементы орбиты кометы, приводящие к столкновению с астероидом (596). Значение критерия Тиссерана для предполагаемого фрагмента говорит о том, что это тело остается на кометной орбите, как и 232P/Hill.

**Таблица 4.** Минимальные расстояния (MOID) между орбитами комет и орбитой астероида (596) и расстояния до точки столкновения в прямоугольных координатах

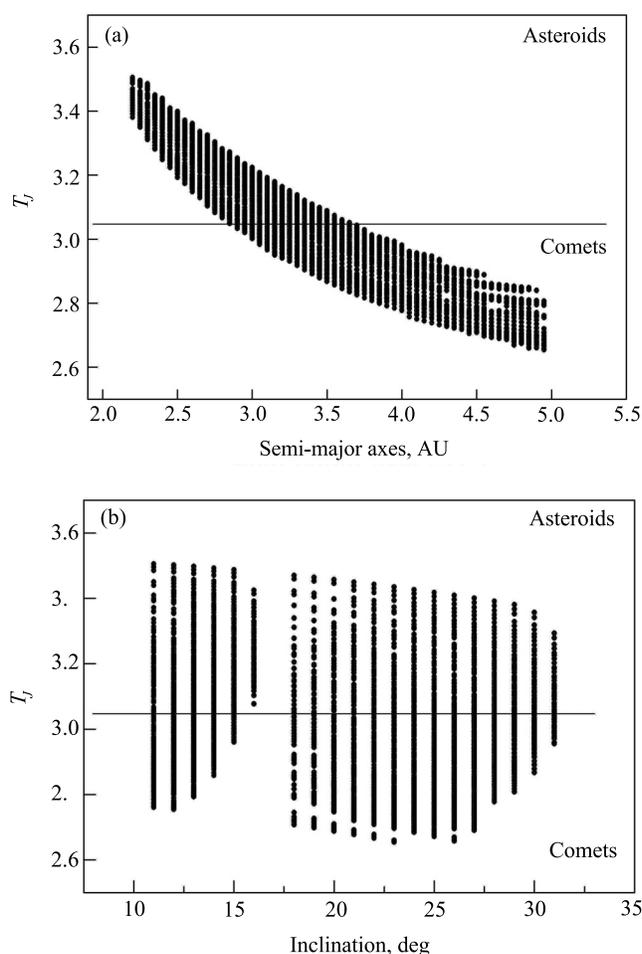
Комета	$a$ , а.е.	$q$ , а.е.	MOID, а.е.	$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , а.е.
44P/Reinmuth 2	3.692	2.113	0.023	$\geq 0.5$
51P/Harrington	3.708	1.692	0.038	$\geq 0.5$
84P/Giclas	3.547	1.719	0.092	0.1, 0.0, 0.5
94P/Russell 4	3.034	2.230	0.023	0.4, 0.3, 0.5
139P/Vaisala— Oterma	6.397	3.403	0.031	$\geq 0.5$
180P/NEAT	3.839	2.488	0.008	0.2, 0.0, 0.2
222P/LINEAR	4.138	0.781	0.004	0.0, 0.2, 0.5
232P/Hill	4.483	2.983	0.015	0.0, 0.1, 0.0
243P/NEAT	4.947	2.458	0.038	$\geq 0.5$
261P/Larson	6.936	2.190	0.005	$\geq 0.5$

**Таблица 5.** Элементы орбит кометы 232P/Hill и возможного фрагмента кометы на эпоху JD 2455070.5

Элементы орбиты	232P/Hill	Фрагмент 232P/Hill
$M$ , град.	356.311736	320.912736
$\omega$ , град.	53.424856	50.423856
$\Omega$ , град.	56.145512	56.145512
$i$ , град.	14.634976	12.656976
$e$	0.33451999	0.30869999
$n$ , град./сут.	0.10384465	0.10384465
$p$ , а.е.	4.482772	4.482772
$q$ , а.е.	2.983195	3.098940
Критерий Тиссерана ( $T_J$ )	2.853	2.884

#### 2.4. Моделирование орбит, приводящих к столкновению

Для невозмущенной задачи было выполнено моделирование тесных сближений фиктивных тел с астероидом (596). Рассматривались следующие диапазоны значений орбитальных параметров таких тел: большая полуось: 2.2–5.0 а.е., эксцентриситет: 0.0–0.9, наклон: 0°–35°, для осталь-



**Рис. 2.** Критерий Тиссерана в зависимости от: (а) значения больших полуосей; (б) наклона орбит фиктивных тел, для которых возможно тесное сближение с астероидом (596).

ных элементов: 0°–360°. При этом фиксировались минимальные расстояния между телами меньше 0.1 а.е. и относительная скорость  $dv$  в интервале 4.5–5.5 км с<sup>-1</sup>.

Вычисления показывают, что при этом условии столкновения с астероидом (596) возможны как для фиктивных тел на астероидных орбитах (критерий Тиссерана ( $T_J$ ) относительно Юпитера более 3), так и на орбитах комет семейства Юпитера ( $2 < T_J < 3$ ).

В рассмотренном пространстве элементов такие события возможны для двух групп наклонов орбит фиктивных тел: 11°–16° и 19°–31°. Величины  $T_J$  для 18 346 орбит в зависимости от значений наклонов и больших полуосей представлены на рис. 2. Эти графики позволяют сделать вывод о том, что возможны столкновения астероида (596) с телом, находящимся как на астероидной орбите, так и на кометной орбите.

**Таблица 6.** Изменение компонент скорости в принятый момент столкновения 2010.11.27.0

$\Delta v_x$ , мм с <sup>-1</sup>	$\Delta v_y$ , мм с <sup>-1</sup>	$\Delta v_z$ , мм с <sup>-1</sup>
$+0.63 \pm 0.42$	$-0.10 \pm 0.57$	$+1.20 \pm 0.97$

### 3. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ АСТЕРОИДА В РЕЗУЛЬТАТЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, ПОЛУЧЕННАЯ ИЗ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Как следует из закона сохранения количества движения, в предположении, что плотность обоих тел одинакова, диаметр ударника равен 35 м, диаметр (596) — 114 км, а скорость столкновения — 5 км с<sup>-1</sup>, изменение скорости астероида в результате столкновения может быть оценено примерно в 0.0002 мм с<sup>-1</sup>. От момента столкновения до 2016 г. это изменение может привести к отклонению в положении астероида примерно на 60 м, или в угловой мере (на расстоянии 1 а.е. от Земли) на порядка 0''0001, т.е. эти отклонения вряд ли будут обнаружены при позиционных наблюдениях. Если принять максимальную оценку значения диаметра ударника 180 м, то изменение скорости составит около 0.02 мм с<sup>-1</sup>. К 2016 г. отклонение в положении составит порядка 0''0024, и его уже можно попробовать определить из наблюдений.

Астероид (596) наблюдается с 22 февраля 1906 г. по настоящее время. Всего выполнено 3456 наблюдений, причем после столкновения — 2380 наблюдений. Уточнение параметров орбиты проводилось по методике, описанной в работе [5]. Найдены несколько вариантов решения с учетом весов наблюдений, заданных по различным схемам, и возмущений от ряда крупных астероидов главного пояса, в том числе и сближающихся с астероидом (596). Включение в число определяемых характеристик, кроме орбитальных параметров, также и изменений компонент скорости в момент столкновения дает следующие их оценки (таблица 6). Видно, что значения ошибок этих изменений не позволяют сделать вывод о достоверности определенных значений. Необходимо увеличение точности определения скорости примерно на два порядка, что при проведении только наземных позиционных наблюдений в ближайшее время нереально. Возможно, наблюдения с помощью космического телескопа Gaia позволят уменьшить эти ошибки.

### 4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В наблюдениях зафиксирован результат столкновения астероида (596) с некоторым малым телом, размеры которого оцениваются в несколько десятков метров. При анализе пылевой комы оценена относительная скорость столкновения.

В настоящей работе выполнен поиск такого тела среди известных астероидов, комет и метеорных потоков. Несмотря на то, что число только нумерованных астероидов составляет почти 500 000, такой объект обнаружен не был, однако показано, что фрагмент гипотетического метеорного потока кометы 232P/Hill мог быть искомым телом-ударником. Выполнено моделирование, позволяющее сделать вывод о том, что вероятность столкновения астероида (596) с фиктивным телом на кометной или астероидной орбите примерно одинакова. Такие события возможны для двух групп орбит фиктивных тел с наклонами 11°–16° и 19°–31°. При позиционных наблюдениях астероида определены орбитальные параметры и компоненты изменения его скорости на момент предполагаемого столкновения 27 ноября 2010 г. Оказалось, что точность определения этих параметров недостаточна для вывода о достоверности полученных оценок.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 16–12–00071).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Jewitt, H. Weaver, M. Mutchler, et al., *Astrophys. J.* **733**, L4 (2011).
2. D. Bodewits, M. S. Kelley, J.-Y. Li, et al., *Astrophys. J.* **733**, L3 (2011).
3. F. Moreno, J. Licandro, J. L. Ortiz, et al., *Astrophys. J.* **738**, 130 (2011).
4. Н. Н. Киселев, Ф. Д. Рахматуллаева, А. К. Антонюк, и др., Доклады Академии наук республ. Таджикистан, **57**, 823 (2014).
5. О. М. Кочетова, Ю. А. Чернетенко, *Астрон. вестник*, **48**, 318 (2014).

**Collisions of Asteroids: Asteroid (596) Sheila****Yu. A. Chernetenko**

Among the small bodies of the Solar System, at present, a group of bodies, called comets of the main belt, exhibiting dynamic and/or physical properties of both comets and asteroids is distinguished. One of the reasons for such manifestations may be collisions with other bodies. Asteroid (596) Sheila is one of the bodies belonging to the group of comets of the main belt. The study of its dust coma made it possible to estimate the relative velocity of the collision and the size of the body-impactor. In this paper, we searched for a possible impactor among known asteroids, comets, and meteor showers. A real of such a type body was not found, although it could be a fragment of a possible meteor shower of comet 232P/Hill. The performed simulation of close approaches of the asteroid (596) with fictitious bodies shows that the asteroid and the comet could be such an impactor. An estimate was made of the possible change in the velocity of the asteroid (596) as a result of a collision using its positional observations. 3456 observations from February 22, 1906 to the present have been used. However, the accuracy of determining the components of the change in velocity, about  $1 \text{ mm s}^{-1}$ , turned out to be insufficient for the confident determination of such a change.

Keywords: celestial mechanics: comets: general: minor planets, asteroids: individual: (596) Sheila