

Учреждение Российской академии наук  
Институт прикладной астрономии РАН

Сообщения ИПА РАН

№ 184

Ю. С. Бондаренко

**Изменение движения кометы Темпель 1 вследствие столкновения с ударником космической миссии Deep Impact**

Санкт-Петербург  
2010

УДК 521.35; 523.64

Ю. С. Бондаренко. Изменение движения кометы Темпель 1 вследствие столкновения с ударником космической миссии Deep Impact.

**Ключевые слова:** кометы, негравитационные эффекты, Deep Impact.

Исследуется динамика кометы Темпель 1 до и после ее столкновения с ударником космической миссии Deep Impact. В сообщении приводится исторический обзор наблюдений и исследований движения кометы Темпель 1, дается описание космической миссии Deep Impact, а также полученных в ходе ее проведения результатов. По наблюдениям 1967-2020 гг. вычислены три варианта орбиты кометы Темпель 1 с различными наборами параметров. В первом варианте орбиты предполагалось, что на рассматриваемом интервале негравитационные параметры  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  модели Марседена не изменялись. Второй вариант решения предполагал, что столкновение с ударником могло привести к изменению величины негравитационного ускорения, т.е. определялось два набора негравитационных параметров до и после столкновения. В третьем варианте предполагалось, что столкновение кометы с ударником привело к мгновенному изменению ее скорости. Используя результаты космической миссии Deep Impact, производится оценка возмущения, оказанного на движение кометы Темпель 1 в результате столкновения.

Yu. S. Bondarenko. Changing the motion of comet Tempel 1 due to a collision with impactor of Deep Impact space mission.

**Keywords:** comets, nongravitational forces, Deep Impact.

The dynamics of comet Tempel 1 before and after its collision with the Deep Impact space mission impactor have been studied. The historical review of observations, study of motion of the comet Tempel 1, description of the Space mission Deep Impact and results derived from its implementation are described. The numerical theory of motion of the comet Tempel 1 is obtained using three different sets of parameters. The first solution assumed that on the considered interval non-gravitational parameters were unchanged. The second solution assumed that the collision with the impactor could lead to change in the non-gravitational acceleration. The instantaneous change of comet velocity due to collision with the impactor was assumed in the third solution. The perturbation in motion of the comet Tempel 1 due to collision with the impactor is estimated using the results of the Space mission Deep Impact.

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 184. – Санкт-Петербург, 2010 – 24 с.

© Институт прикладной астрономии, 2010

## Содержание

1. Введение	4
2. Космическая миссия Деер Импракт и ее результаты	6
3. Построение численной теории движения кометы Темпель 1	11
4. Сравнение результатов космической миссии Деер Импракт с полученными параметрами	19
5. Выводы	21
Список литературы	23
Электронные ресурсы	23

## 1. Введение

Короткопериодическая комета Темпель 1 (Tempel 1) была впервые открыта В. Темпелем 3 апреля 1867 г. на 13 сантиметровом рефракторе обсерватории Марселя во Франции. Комета имела 9 звездную величину и описывалась Темпелем как слабая, размытая, с небольшим уплотнением в середине и приблизительным диаметром комы 4'-5'. Последующие вычисления показали, что в это время комета находилась на расстоянии 0.71 а.е. от Земли и 1.64 а.е. от Солнца. Благодаря сближению с Землей на расстояние 0.568 а.е. и относительно небольшому перигелийному расстоянию (1.562 а.е.), комета была достаточно яркая. В течение последующих пяти месяцев после открытия комета постоянно наблюдалась. К маю число и интервал наблюдений этой кометы был таков, что удалось определить достаточно надежно орбиту кометы. По вычислениям Э. Брунса орбита оказалась эллиптической с периодом 5.74 года.

Комета Темпель 1 была вновь обнаружена 3 апреля 1874 г. Э. Стефаном в обсерватории Марселя по эфемериде Х. Зеелигера и наблюдалась вплоть до 1 июля 1874 г. Предсказание следующего появления, вычисленное Р. Готье по наблюдениям двух предыдущих появлений, позволило Темпелю вновь обнаружить комету 24 апреля 1879 г.

19 октября 1881 г. произошло тесное сближение кометы Темпель 1 с Юпитером на расстояние 0.522 а.е., вследствие чего орбитальный период и перигелийное расстояние кометы увеличились с 6.0 до 6.5 лет и с 1.8 а.е. до 2.1 а.е. соответственно, что сделало комету почти недоступной для наблюдения. В следующем появлении 1885 г. комета не была обнаружена. Попытки найти комету в появлениях 1898 и 1905 гг. также потерпели неудачу.

В 1963 г. Б. Марсден провел исследование движения кометы, пытаясь выяснить, почему комета Темпель 1 была потеряна, и предсказал положение кометы в появлениях 1967 и 1972 гг. Он обнаружил, что из-за тесных сближений с Юпитером 12 октября 1941 г. на 0.412 а.е. и 12 сентября 1953 г. на 0.759 а.е. значения орбитального периода и перигелийного расстояния стали меньше, чем в момент открытия кометы в 1867 г. Эти сближения перевели комету на орбиту со средним движением близким к резонансу 1:2 со средним движением Юпитера. Несмотря на неблагоприятное возвращение кометы в 1967 г., Э. Ремер сделала несколько фотографий в течение 1967 г. на обсерватории Каталина. Хотя первоначальный анализ фотографий ничего не показал, позднее в 1968 г. на пластинке, сделанной 8 июня 1967 г., она обнаружила диффузный объект 18 звездной величины, очень близкий к положению, предсказанному Марсденом в 1963 г.

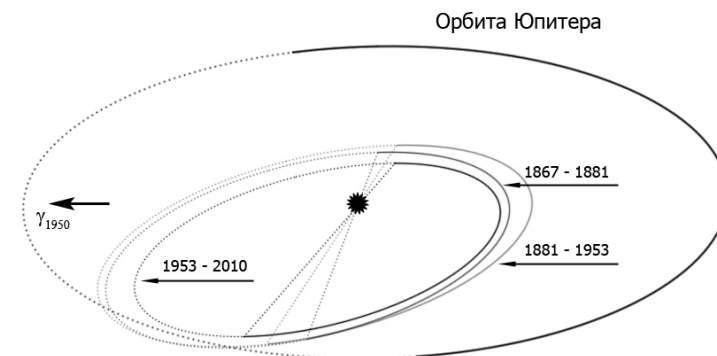


Рис. 1. Эволюция орбиты короткопериодической кометы Темпель 1 в течение всей наблюдательной истории с 1867 по 2010 гг. (изображение получено с помощью электронного каталога кометных орбит «Галлей» [3]).

В появлении 1972 г. комета Темпель 1 была окончательно найдена после 13 пропущенных появлений с 1879 по 1967 гг. Используя предсказание Марсдена [6], Ремер обнаружила комету 11 января 1972 г. на обсерватории Стюарт. Комета повсеместно наблюдалась, а 11 мая ее яркость достигла 11 звездной величины. Появление 1972 г. окончательно доказало, что на снимке, полученном Ремер в 1967 г., действительно была комета Темпель 1. Впоследствии комета наблюдалась в каждом появлении. Эволюция орбиты кометы Темпель 1 на различные периоды ее наблюдательной истории изображена на рис. 1.

После сближения с Юпитером 12 сентября 1953 г. на 0.759 а.е. орбитальный период кометы Темпель 1 стал приблизительно равным половине орбитального периода Юпитера. С этого момента движение кометы представляется довольно стабильным, без каких-либо существенных изменений в орбитальных параметрах, до следующего тесного сближения с Юпитером 26 мая 2024 г. на 0.55 а.е.

В 1996 г. комета Темпель 1 была выбрана в качестве объекта научной космической миссии Deep Impact {1},{2}, целью которой являлось изучение внутреннего состава кометного ядра. Космический аппарат миссии Deep Impact был запущен 12 января 2005 г. и, приблизившись к комете, разделился на две части – ударник и основную секцию. Ударник столкнулся с кометой 4 июля 2005 г. с относительной скоростью 10.3 км/с, породив при этом большое и яркое облако пыли и газа. Через несколько минут после удара,

основная секция пролетела около ядра на минимальном расстоянии в 500 км и произвела съемку кометного ядра и выброшенного вещества.

После столкновения кометы с ударником было сделано большое количество наблюдений. Одновременно это событие наблюдалось на наземных и космических обсерваториях, в том числе Hubble {3}, Chandra, Spitzer, Swift {5} и XMM-Newton. Последствия удара были замечены также камерами и спектроскопами космического аппарата Rosetta {4}, который к этому моменту был запущен к ядру кометы Чурюмов-Герасименко (Churyumov-Gerasimenko) и находился на расстоянии примерно  $80 \cdot 10^6$  км от кометы Темпель 1 в момент ее столкновения с ударником.

Столкновение кометы с ударником привело к изменению ее поступательно-вращательного движения, а также, вероятно, к изменению негравитационного ускорения. Однако отсутствие наблюдений следующего появления кометы осложняло оценку влияния столкновения на последующую эволюцию орбиты и изменение негравитационного ускорения. В 2006 г. А. Белоусов [1] оценил величину мгновенного изменения скорости вследствие столкновения с ударником, имея в распоряжении 543 наблюдения после столкновения на полугодичной дуге.

Комета Темпель 1 была переоткрыта 22 сентября 2009 г. на автоматической учебной обсерватории Халеакала Фолкс (Гавайи), что дало возможность поставить задачу более точной оценки изменения ее орбиты и негравитационного ускорения в результате столкновения.

## **2. Космическая миссия Deep Impact и ее результаты**

Впервые миссия Deep Impact {1}, {2} была предложена NASA в 1996 г. Целью миссии было исследование состава кометного ядра, его поверхностной структуры, физических характеристик ядра (массы, плотности и др.), а также оценка последствий столкновения кометы с другим телом. Основным руководителем миссии был М. А'Хирн [4], профессор Университета штата Мэриленд. Он руководил научной группой, в которую входили представители Корнельского университета, Университета штата Мэриленд, Университета штата Аризона, Университета Брауна, Лаборатории реактивного движения, Гавайского университета, Института Макс-Планка.

Предыдущие космические полеты к кометам, такие как, например Vega-1, Vega-2, Giotto, Stardust и др. были исключительно наблюдательными миссиями. Эти миссии были способны лишь на расстоянии изучать поверхности кометных ядер. Миссия Deep Impact была первой, способной извлечь вещество из-под поверхности кометы и изучить его состав.

Космический аппарат состоял из двух секций, 370-килограммового медного ударника, который столкнулся с кометой, и основной секции, которая получала изображения кометы с безопасного расстояния.

Основная секция состояла из двух панелей солнечных батарей, система защиты от пыли, нескольких инструментов для фотографирования и инфракрасной спектроскопии, а также оптической навигационной системы. Эта секция была оборудована двумя камерами высокого и среднего разрешения.

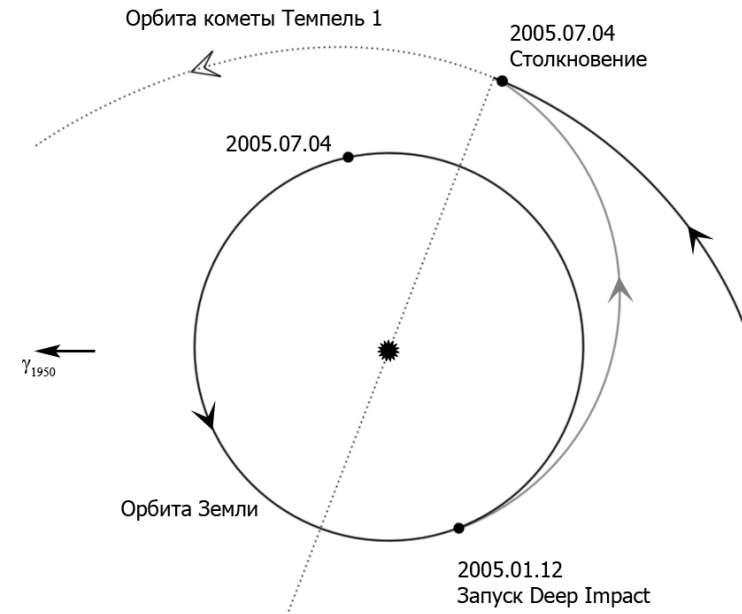


Рис. 2. Траектория полета космического аппарата Deep Impact к комете Темпель 1.

Ударник также был оборудован камерой среднего разрешения. Когда ударник приблизился к поверхности кометы, его камера получила фотографии ядра с разрешением (0.2 м на пиксель), которые были переданы в режиме реального времени на основную секцию до того, как ударник столкнулся с поверхностью кометного ядра. Последнее изображение, отправленное с ударника, было сделано за 3.7 с до удара. Ударник состоял на 100% из меди для уменьшения искажений, вносимых в измерения спектра облака газа и пыли, образовавшегося в результате столкновения кометы с ударником, поскольку медь до этого не встречалась в спектрах комет.

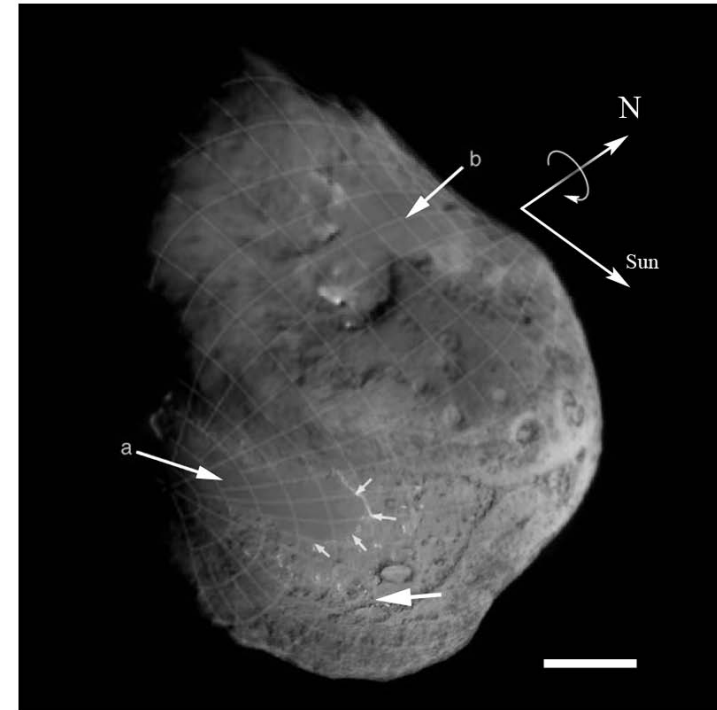


Рис. 3. Ядро кометы Темпель 1 за 3 с до столкновения с ударником. Стрелки а и б указывают на большие плоские регионы. Место, где произошло столкновение, отмечена жирной стрелкой. Малые сгруппированные стрелки выделяют плато. Белая линия в правом нижнем углу указывает масштаб в 1 км. Два вектора вверху справа направлены на Солнце и северный полюс ядра. Также показано направление вращения ядра [1].

Первоначально запуск космического аппарата был запланирован на 30 декабря 2004 г., однако, из-за возникших проблем был отложен, а затем успешно произведен с мыса Канаверал 12 января 2005 г. на ракете Delta 2. Первое изображение кометы Темпель 1 было получено космическим аппаратом 25 апреля с расстояния  $64 \cdot 10^6$  км до кометы. За 174 дня космический аппарат пролетел  $0.429 \cdot 10^6$  км. Траектория его полета изображена на рис. 2.

3 июля ударник успешно отстыковался от основной секции. Первые снимки камерой ударника были сделаны через два часа после отстыковки.



Основной космический аппарат совершил маневр, чтобы избежать повреждений во время столкновения ударника с ядром. Ударник произвел три корректирующих маневра в течение последних двух часов перед ударом, а само столкновение произошло в 05:45 UTC 4 июля, с относительной скоростью 10.3 км/с

Ударник передал последние изображения всего за 3 с до удара (рис. 3). В течение последующих после удара нескольких дней основная секция отправила примерно 4500 изображений на Землю. Энергия, выделившаяся в результате столкновения, составила  $1.96 \cdot 10^{10}$  Дж, что эквивалентно 4.7 т тротила, а комета в момент столкновения стала светиться в шесть раз ярче, чем обычно. В 08:00 UTC 4 июля 2005 г. были получены первые обработанные изображения ядра кометы Темпель 1 после столкновения с ударником (рис. 4).

Анализ данных, полученных с космического рентгеновского телескопа Swift {5} показал, что истечение газа вследствие воздействия ударника на ядро кометы продолжалось в течение 12 суток, с максимумом через пять дней после столкновения. По оценкам Р. Виллингейла и др. [9] общая масса выброшенного вещества составила примерно  $0.5 - 4.1 \cdot 10^8$  кг. Данные, полученные М. Куперсом и др. [5] камерой OSIRIS космического телескопа Rosetta {4}, показали, что в первые 20 часов после столкновения было выброшено приблизительно  $10^6$  кг вещества со средней скоростью истечения 200 м/с, а в общей сложности, в результате столкновения, было выброшено 5000 т воды и от 10000 до 25000 т пыли. Анализ выброшенного вещества указывает, что эффективная плотность ядра кометы равна  $0.62 \pm 0.4$  г/см<sup>3</sup>.

Хотя изображение всей поверхности ядра не было получено, имеющихся данных оказалось достаточно, чтобы дать хорошее представление о его форме и размерах. В 2007 г. П. Томасу и др. [8] удалось рассчитать форму ядра, средний радиус которого оказался равен  $3.0 \pm 0.1$  км, причем самая длинная ось составила 7.5 км, а кратчайшая 5.0 км. В этой же работе была получена ориентация оси вращения ядра кометы. Оказалось, что полюс оси вращения направлен в точку на небесной сфере с координатами  $\alpha = 294^\circ \pm 5^\circ$  и  $\delta = 73^\circ \pm 5^\circ$  (см. рис. 3). Также была рассчитана масса кометы, которая оказалась равной  $7.6 \cdot 10^{13} \pm 0.3 \cdot 10^{13}$  кг. Анализ величин яркости кометы в зависимости от времени, позволил установить период вращения ядра, который оказался равен приблизительно 41 часу.

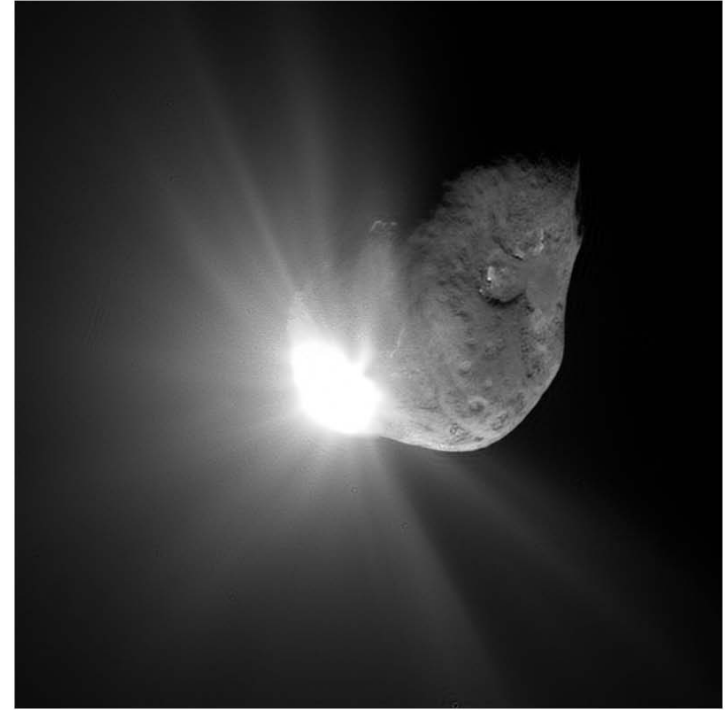


Рис. 4. Изображение ядра кометы Темпель 1, полученное камерой высокого разрешения, через 67 с после столкновения с ударником {1}.

Был уточнен химический состав ядра кометы. Выяснилось, что ядро содержит большее, чем ожидалось, количество пыли и меньшее количество льда. Кроме того, частицы пыли оказались мельче, чем ожидалось. При проведении спектрального анализа продуктов выброса вещества, были обнаружены глина, карбонаты, натрий, а также кристаллические силикаты. Следует отметить, что для образования глин и карбонатов, как правило, требуется жидкая вода и натрий, которые редко встречаются в космосе. Наблюдения также показали, что ядро кометы примерно на 75% состоит из пустот.

После завершения своей основной задачи космический аппарат миссии Deep Impact был задействован в миссии EPOXI {6}, целью которой является изучение внесолнечных планет и кометы Хартли 2 (Hartley 2).

### 3. Построение численной теории движения

В каталоге Брайана Марсдена [7] за 2008 г. приводятся 3 системы элементов представляющих каждое из 11 наблюдаемых на момент публикации каталога появлений кометы, а также элементы, предсказанные на появление 2011 г. (см. табл. 1 и 2). Первая система элементов объединяет 394 наблюдения трех появлений, с момента открытия кометы в 1867 г. После 13 пропущенных появлений, начиная с 1967 г. движение кометы Темпель 1 представляется довольно стабильным. В каталоге Марсдена [7] для этих появлений приводятся элементы, полученные с одним набором негравитационных параметров, отличающиеся лишь дугой наблюдений.

Таблица 1. Значения негравитационных параметров (в  $10^{-8}$  а.е./сут<sup>2</sup>), приведенные в каталоге кометных орбит Марсдена [7].

$T_{\pi}$	$n_i$	Дуга	$A_1$	$A_2$	$A_3$	Ссылка
1867 May 24.2174			–	–	–	Schrutka
1873 May 10.2804	394	1867-1972	–	–	–	Schrutka
1879 May 07.6034			–	–	–	Schrutka
1967 Jan. 12.7015			0.02	0.0018	–	Nakano
1972 July 15.3949	469	1967-1996	0.02	0.0018	–	Nakano
1978 Jan. 11.0144			0.02	0.0018	–	Nakano
1983 July 09.7972			0.02	0.0018	–	Nakano
1989 Jan. 04.4429			0.01	0.0018	–	Nakano
1994 July 03.3141	672	1967-2000	0.01	0.0018	–	Nakano
2000 Jan. 02.6168			0.01	0.0018	–	Nakano
2005 July 05.3153			0.01	0.0018	–	MPC 45657
2011 Jan. 12.3656	4793	1967-2006	0.02	0.0017	–	MPC 62880

Как видно из табл. 1, компоненты негравитационного ускорения  $A_1$  и  $A_2$  остаются практически неизменными на интервале с 1967 по 2005 гг. Однако, как уже отмечалось, столкновение кометы с ударником при проведении космической миссии Deep Impact могло привести к изменению негравитационных параметров. Поэтому, когда стали доступны первые 23 наблюдения кометы в 2009 г., появилась возможность определить изменение негравитационных параметров вследствие этого столкновения.

При исследовании движения кометы Темпель 1, в настоящей работе ставилось несколько задач. Во-первых, используя предложенную автором [2] методику построения долгосрочных численных теорий движения комет, построить единую численную теорию движения кометы Темпель 1 на интервале с 1967 по 2010 гг. наилучшим образом удовлетворяющую всей совокупности имеющихся наблюдений (5249 позиционных наблюдений этого объек-

та с 8 июня 1967 г. по 17 января 2010 г.). Во-вторых, определить величины мгновенного изменения скорости и негравитационного ускорения, приобретенных кометой в результате столкновения с ударником космического аппарата Deep Impact. В-третьих, располагая результатами миссии Deep Impact, оценить реальность полученных изменений негравитационного ускорения и мгновенного изменения скорости, полученных из обработки позиционных наблюдений кометы.

Таблица 2. Элементы орбиты кометы Темпель 1, приведенные в каталоге кометных орбит Марседена [7].

$T_{\pi}$	$q(\text{a. e.})$	$e$	$\omega$	$\Omega$	$i$	Epoch
1867 May 24.2174	1.562104	0.507708	134°.9855	102°.9169	6°.3897	1867 May 14
1873 May 10.2804	1.771159	0.462625	159°.4082	80°.408	9°.7665	1873 May 22
1879 May 07.6034	1.771126	0.462546	159°.5782	80°.3642	9°.7675	1879 May 31
1967 Jan. 12.7015	1.502848	0.518073	179°.1582	69°.039	10°.5405	1967 Jan. 30
1972 July 15.3949	1.49666	0.519615	179°.2233	69°.0146	10°.551	1972 July 22
1978 Jan. 11.0144	1.496849	0.519502	179°.1109	69°.0059	10°.5466	1978 Jan. 12
1983 July 09.7972	1.491117	0.520898	179°.0751	68°.994	10°.5571	1983 July 05
1989 Jan. 04.4429	1.496726	0.519684	179°.0131	68°.9931	10°.5463	1988 Dec. 25
1994 July 03.3141	1.494151	0.520255	178°.9016	68°.9857	10°.5518	1994 June 17
2000 Jan. 02.6168	1.500048	0.518953	178°.9112	68°.9665	10°.5414	2000 Jan. 17
2005 July 05.3153	1.506167	0.517491	178°.839	68°.9373	10°.5301	2005 July 09
2011 Jan. 12.3656	1.510301	0.516537	178°.9231	68°.9072	10°.5224	2010 Dec. 30

Решая поставленные задачи, на предварительном этапе были получены априорные оценки точности представления наблюдений в каждом появлении путем попарного объединения наблюдения соседних появлений на всем исследуемом интервале. Для каждой пары улучшались начальные значения координат и компонент скорости кометы на эпоху, соответствующую середине объединяемого интервала наблюдений. Оценки ошибок представления наблюдений для каждого рассматриваемого появления приведены в табл. 3 в третьей колонке. В этой таблице в первой и второй колонках приводятся годы появлений и число наблюдений в рассматриваемых появлениях.

Далее на выбранную начальную эпоху 17 января 2000 г. (2451560.5 JD) было улучшено три различных набора параметров определяющих движение кометы. В первом варианте, была построена численная теория движения кометы Темпель 1, предполагая, что на рассматриваемом интервале с 1967 по 2010 гг. негравитационные параметры не изменялись. Улучшались 9 параметров орбиты: координаты и компоненты скорости, а также, коэффициенты радиальной  $A_1$ , трансверсальной  $A_2$  и нормальной  $A_3$  компонент негравитационного ускорения. Также, для каждого появления  $T_i$  вычислялись

апостериорные ошибки  $\sigma_p(T_i)$ , значения которых приведены в табл. 3 в четвертой колонке, обозначенной «1-й вариант». Значения полученных параметров орбиты и их ошибки приводятся в табл. 4 в первой колонке, обозначенной также как и в табл. 3 «1-й вариант». Наблюдения кометы Темпель 1 на интервале с 8 июня 1967 г. по 17 января 2010 г. представляются полученным набором элементов со средней ошибкой веса  $\sigma_0=0''.538$  (последняя строка табл. 3).

Таблица 3. Годы появления  $T_i$ , число наблюдений в появлениях  $n_i$ , априорные  $\sigma_a(T_i)$ , апостериорные  $\sigma_p(T_i)$ , ошибки по появлениям, среднеквадратические ошибки  $\sigma_0$  и общее число улучшаемых параметров (в скобках) для трех вариантов решений.

$T_i$	$n_i$	$\sigma_a(T_i)$	$\sigma_p(T_i)$		
			Вариант / (число улучшаемых параметров)		
			1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
			(9)	(12)	(12)
1967	1	0''.59	1''.33	1''.31	1''.40
1972	92	1''.64	1''.74	1''.71	1''.73
1978	17	1''.52	1''.60	1''.57	1''.60
1983	148	1''.94	2''.01	1''.98	2''.00
1989	11	0''.77	0''.93	0''.79	0''.90
1994	288	1''.10	1''.16	1''.14	1''.17
2000	271	1''.00	1''.00	1''.00	1''.00
2005	4398	1''.00	1''.00	1''.00	1''.00
2011	23	1''.10	1''.17	1''.06	1''.06
$\sigma_0$			0''.538	0''.533	0''.536

Второй вариант решения представляет движение кометы Темпель 1 набором из 12 параметров. Предполагая, что столкновение с ударником, могло вызвать, изменение величин негравитационных параметров, к основному набору из 9 элементов, представлявших орбиту в первом варианте, были добавлены три компонента негравитационного ускорения, отвечающих за изменение негравитационных ускорений в появлении 2005 г. Значения апостериорных ошибок  $\sigma_p(T_i)$  наблюдений в соответствующих появлениях приведены в табл. 3, а значения полученных параметров орбиты, представляющих все наблюдения кометы со средней ошибкой веса  $\sigma_0=0''.533$  и их ошибки приводятся в табл. 4 в колонке с названием «2-й вариант».

Здесь необходимо отметить, что параметры  $A'_1$ ,  $A'_2$  и  $A'_3$  являются поправками к радиальной  $A_1$ , трансверсальной  $A_2$  и нормальной  $A_3$  компонен-

там негравитационного ускорения начиная с появления 2005 г. Значения компонент негравитационного ускорения после столкновения кометы с ударником составили  $A_1=(0.97\pm 0.58)\cdot 10^{-10}$  а.е./сут<sup>2</sup>,  $A_2=(0.02\pm 0.03)\cdot 10^{-10}$  а.е./сут<sup>2</sup>,  $A_3=(6.48\pm 0.62)\cdot 10^{-10}$  а.е./сут<sup>2</sup>.

Была предпринята попытка включить в обработку наблюдения 1879 г., однако оказалось, что остаточные невязки для них достигают 80", что может быть вызвано как ошибочностью этих наблюдений, так и нерегулярными изменениями негравитационных эффектов на интервале с 1879 по 1967 гг., поэтому в вычислениях эти наблюдения не учитывались.

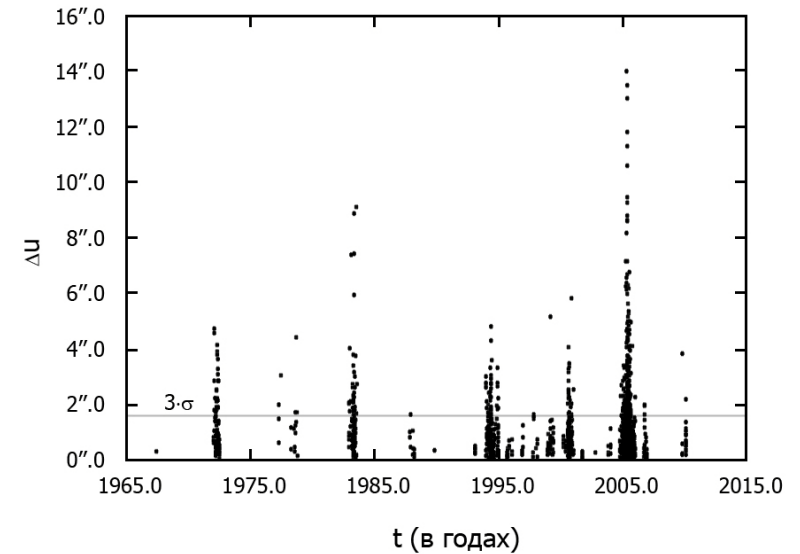


Рис. 5. Видимые расстояния  $\Delta u$  (в секундах дуги) между наблюдаемыми и вычисленными положениями кометы Темпель 1, полученные при объединении появлений с 1972 по 2011 гг. Серой горизонтальной линией отмечен порог в «три сигма», при превышении которого соответствующие наблюдения исключались из улучшения.

На рис. 5 приведены значения видимого расстояния  $\Delta u$  между наблюдаемыми и вычисленными положениями кометы на небесной сфере с 8 июня 1967 г. по 17 января 2010 г, полученные по формуле:

$$\Delta u = \sqrt{(\alpha_0 - \alpha_C)^2 \cdot \cos^2 \delta_C + (\delta_0 - \delta_C)^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_0, \delta_0, \alpha_C, \delta_C$  – наблюдаемое и вычисленное прямое восхождение и склонение соответственно.

В третьем варианте улучшались 12 параметров орбиты, включающие в себя 3 компоненты вектора начального положения  $x, y, z$ , 3 компоненты начальной скорости  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ , 3 параметра негравитационного ускорения  $A_1, A_2, A_3$ , а также 3 компоненты мгновенного изменения скорости  $I_x, I_y, I_z$ , представляющие изменение орбиты в результате столкновения с ударником 4 июля 2005 г. (2453555.73932 JD). Значения координат, компонент скоростей, компонент негравитационного ускорения и мгновенного изменения скорости, приводятся в табл. 4 в колонке «3-й вариант». Полученная система параметров орбиты представляет наблюдения со среднеквадратической ошибкой  $\sigma_0=0''.536$ .

Таблица 4. Улучшенные компоненты положения  $x, y, z$  (в а.е.), скорости  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  (в а.е./сут), негравитационные параметры  $A_1, A_2, A_3$  и  $A'_1, A'_2, A'_3$  (в  $10^{-8}$  а.е./сут<sup>2</sup>), компоненты мгновенного изменения скорости  $I_x, I_y, I_z$  (в а.е./сут) и их ошибки на эпоху 17 января 2000 г. для трех вариантов решений.

	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
$x$	$-0.333298759 \pm 0.177 \cdot 10^6$	$-0.333298997 \pm 0.197 \cdot 10^6$	$-0.333298774 \pm 0.179 \cdot 10^6$
$y$	$-1.331971227 \pm 0.573 \cdot 10^7$	$-1.331970511 \pm 0.815 \cdot 10^7$	$-1.331971226 \pm 0.592 \cdot 10^7$
$z$	$-0.621333438 \pm 0.609 \cdot 10^7$	$-0.621334923 \pm 0.118 \cdot 10^6$	$-0.621333553 \pm 0.630 \cdot 10^7$
$\dot{x}$	$0.016327762 \pm 0.851 \cdot 10^9$	$0.016327760 \pm 0.958 \cdot 10^9$	$0.016327761 \pm 0.887 \cdot 10^9$
$\dot{y}$	$-0.002985434 \pm 0.105 \cdot 10^8$	$-0.002985432 \pm 0.118 \cdot 10^8$	$-0.002985435 \pm 0.109 \cdot 10^8$
$\dot{z}$	$-0.004721444 \pm 0.797 \cdot 10^9$	$-0.004721449 \pm 0.881 \cdot 10^9$	$-0.004721446 \pm 0.820 \cdot 10^9$
$A_1$	$0.015798264 \pm 0.121 \cdot 10^2$	$0.019934845 \pm 0.128 \cdot 10^2$	$0.019383999 \pm 0.133 \cdot 10^2$
$A_2$	$0.001674578 \pm 0.404 \cdot 10^5$	$0.001683584 \pm 0.409 \cdot 10^5$	$0.001679447 \pm 0.407 \cdot 10^5$
$A_3$	$-0.014184553 \pm 0.803 \cdot 10^3$	$-0.012934223 \pm 0.801 \cdot 10^3$	$-0.014338889 \pm 0.817 \cdot 10^3$
$A'_1$		$-0.010256577 \pm 0.453 \cdot 10^2$	
$A'_2$		$-0.001509909 \pm 0.319 \cdot 10^3$	
$A'_3$		$0.077760335 \pm 0.540 \cdot 10^2$	
$I_x$			$0.6921 \cdot 10^8 \pm 0.141 \cdot 10^8$
$I_y$			$-0.4992 \cdot 10^8 \pm 0.296 \cdot 10^8$
$I_z$			$2.6988 \cdot 10^8 \pm 0.367 \cdot 10^8$

Как видно из табл. 3, орбиты, полученные во втором и третьем вариантах, лучше представляют как весь интервал рассматриваемых наблюдений, так и наблюдения каждого появления в частности, по сравнению с орбитой, полученной в первом варианте. Используя системы элементов второго и третьего вариантов из табл. 4, были вычислены кеплеровские параметры орбиты кометы для всех наблюдаемых появлений, начиная с появления

1967 г. Оба этих варианта, обозначенные верхними индексами 2 и 3, приводятся также в табл. 5. Сравнение элементов показывает их близость, что говорит о достаточно надежном прогнозе движения кометы.

Таблица 5. Элементы орбиты кометы Темпель 1 для всех наблюдаемых появлений, начиная с появления 1967 г., вычисленные по параметрам второго (<sup>2</sup>) и третьего (<sup>3</sup>) вариантов решения.

$T_{\pi}$	$q(\text{a. e.})$	$e$	$\omega$	$\Omega$	$i$	Epoch
1967 <sup>2</sup> Jan. 12.7011	1.502848	0.518074	179°.1581	69°.0393	10°.5404	1967 Jan. 30
1967 <sup>3</sup> Jan. 12.7010	1.502848	0.518074	179°.1578	69°.0396	10°.5404	1967 Jan. 30
1972 <sup>2</sup> July 15.3946	1.496659	0.519616	179°.2233	69°.0149	10°.5510	1972 July 22
1972 <sup>3</sup> July 15.3946	1.496659	0.519616	179°.2229	69°.0152	10°.5509	1972 July 22
1978 <sup>2</sup> Jan. 11.0142	1.496849	0.519502	179°.1108	69°.0062	10°.5466	1978 Jan. 12
1978 <sup>3</sup> Jan. 11.0142	1.496849	0.519502	179°.1105	69°.0065	10°.5465	1978 Jan. 12
1983 <sup>2</sup> July 09.7970	1.491117	0.520898	179°.0750	68°.9942	10°.5571	1983 July 05
1983 <sup>3</sup> July 09.7970	1.491117	0.520898	179°.0747	68°.9945	10°.5570	1983 July 05
1989 <sup>2</sup> Jan. 04.4424	1.496725	0.519684	179°.0129	68°.9934	10°.5462	1988 Dec. 25
1989 <sup>3</sup> Jan. 04.4424	1.496725	0.519684	179°.0126	68°.9937	10°.5462	1988 Dec. 25
1994 <sup>2</sup> July 03.3133	1.494151	0.520255	178°.9013	68°.9860	10°.5519	1994 June 17
1994 <sup>3</sup> July 03.3133	1.494151	0.520255	178°.9010	68°.9863	10°.5518	1994 June 17
2000 <sup>2</sup> Jan. 02.6155	1.500047	0.518953	178°.9108	68°.9667	10°.5414	2000 Jan. 17
2000 <sup>3</sup> Jan. 02.6155	1.500047	0.518953	178°.9105	68°.9670	10°.5414	2000 Jan. 17
2005 <sup>2</sup> July 05.3137	1.506166	0.517491	178°.8382	68°.9380	10°.5301	2005 July 09
2005 <sup>3</sup> July 05.3138	1.506166	0.517491	178°.8383	68°.9379	10°.5301	2005 July 09
2011 <sup>2</sup> Jan. 12.3636	1.510300	0.516537	178°.9232	68°.9072	10°.5222	2010 Dec. 30
2011 <sup>3</sup> Jan. 12.3638	1.510301	0.516536	178°.9233	68°.9071	10°.5223	2010 Dec. 30

Для решения задачи сопоставления негравитационных моделей было получено соотношение, описывающее связь между величинами поправок  $A'_1$ ,  $A'_2$  и  $A'_3$  к компонентам негравитационного ускорения, полученными во втором варианте орбиты и компонентами мгновенного изменения скорости в третьем варианте:

$$\Delta \bar{V} \approx \int_{t_n}^{t_k} g(r(t)) (A'_1 \bar{t}_r(t) + A'_2 \bar{t}_t(t) + A'_3 \bar{t}_n(t)) dt, \quad (2)$$

где  $g(r(t))$  – скорость испарения кометного вещества в зависимости от гелиоцентрического расстояния  $r(t)$  на момент  $t$ ;  $\bar{t}_r(t)$ ,  $\bar{t}_t(t)$  и  $\bar{t}_n(t)$  – направляющие косинусы радиальной, трансверсальной и нормальной компонент негравитационного ускорения, на момент  $t$ ;  $t_n, t_k$  – начало и конец интерва-



ла, на котором действует ускорение (в нашем случае с 4 июля 2005 г. по 17 января 2010 г.). Здесь следует отметить, что в (2) величина  $\Delta\bar{V}$  не строго равна интегралу, стоящему справа, поскольку не учитываются дифференциальные отклонения одной орбиты относительно другой. Используя свойство аддитивности интеграла, выражение (2) можно представить в виде суммы интегралов:

$$\Delta\bar{V} \approx \sum_{i=1}^m \int_{t_i}^{t_{i+1}} g(r(t)) (A'_1 \bar{t}_r(t) + A'_2 \bar{t}_t(t) + A'_3 \bar{t}_n(t)) dt, \quad (3)$$

где  $t_{i+1} - t_i = h_i$  – длина шага численного интегрирования уравнений движения кометы, а  $m$  – число шагов на рассматриваемом интервале. Применив к (3) квадратурную формулу правых прямоугольников, получим:

$$\Delta\bar{V} \approx \sum_{i=1}^m g(r(t_{i+1})) (A'_1 \bar{t}_r(t_{i+1}) + A'_2 \bar{t}_t(t_{i+1}) + A'_3 \bar{t}_n(t_{i+1})) h_i. \quad (4)$$

Интегрированием уравнений движения на интервале с 4 июля 2005 г. по 17 января 2010 г. была произведена оценка  $\Delta\bar{V}$  по формуле (4). Полученные значения компонент  $\Delta\bar{V}$  и соответствующие компоненты мгновенного изменения скорости  $\bar{I}$  из третьего варианта представлены в табл. 6. В качестве сравнения, в этой таблице в последней строке представлены компоненты мгновенного изменения скорости  $\bar{I}'$ , полученные в работе А. Белоусова [1].

Таблица 6.  $x$ ,  $y$  и  $z$  составляющие  $\Delta\bar{V}$ ,  $I$  и  $I'$  в (в а.е./сут).

	$x$	$y$	$z$
$\bar{I}$	$0.6921 \cdot 10^{-8} \pm 0.141 \cdot 10^{-8}$	$-0.4992 \cdot 10^{-8} \pm 0.296 \cdot 10^{-8}$	$2.6988 \cdot 10^{-8} \pm 0.367 \cdot 10^{-8}$
$\Delta\bar{V}$	$0.9167 \cdot 10^{-8}$	$-0.3950 \cdot 10^{-8}$	$3.3972 \cdot 10^{-8}$
$\bar{I}'$	$0.0 \cdot 10^{-8} \pm 0.6 \cdot 10^{-8}$	$0.8 \cdot 10^{-8} \pm 0.8 \cdot 10^{-8}$	$3.6 \cdot 10^{-8} \pm 0.6 \cdot 10^{-8}$

Как видно из табл. 6, значения компонент  $\Delta\bar{V}$ , полученные по изменениям негравитационного ускорения, близки к соответствующим значениям компоненты мгновенного изменения скорости  $\bar{I}$ , т.е. две различные модели движения дают примерно одинаковые значения для приращения скорости кометы Темпель 1 в результате ее столкновения с ударником, что говорит о достаточно надежном определении этой величины. Здесь хочется отметить близость значения компоненты  $I'_z$ , полученной в работе [1], к соответствующему значению в данной работе, что еще раз подтверждает достоверность полученных результатов. Ошибка для величины  $\Delta\bar{V}$  не вычислялась, а сравнение ошибок  $\bar{I}$  и  $\bar{I}'$  показывает, что в данной работе удалось определить

значение мгновенного изменения скорости со значительно меньшей ошибкой, чем в работе А. Белоусова [1].

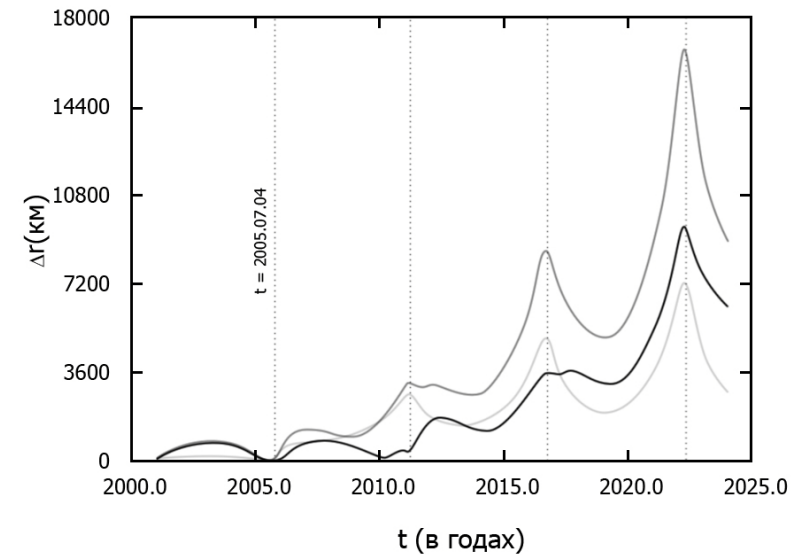


Рис. 6. Расстояние между орбитами, полученными по элементам 1, 2 и 3-го вариантов решения на интервале с 2000 по 2025 гг.

Была произведена оценка изменения расстояния между орбитами, полученными по трем различным наборам параметров, к моменту прохождения кометы перигелия в 2022 г. На рис. 6 изображены графики зависимости от времени положения между орбитами, полученными по элементам второго и третьего вариантов (черная кривая), первого и второго вариантов (серая кривая) и первого и третьего вариантов (светло-серая кривая), а также момент столкновения с ударником 4 июля 2005 г. Вычисления показывают, что к моменту прохождения перигелия в 2011 г. различия между орбитами второго и третьего вариантов не достигнут и 500 км, что говорит о близости этих орбит. На протяжении еще как минимум двух появлений кометы в 2011 и 2016 гг. влияние мгновенного изменения скорости, полученного в третьем варианте и негравитационного ускорения во втором варианте, на параметры орбитального движения, можно считать приблизительно одинаковыми. Далее расхождение между этими орбитами увеличивается вследствие различия

в негравитационных ускорениях в этих моделях и к перигелию 2022 г. составит уже приблизительно 9000 км.

#### 4. Сравнение результатов космической миссии Deep Impact с полученными параметрами

Изменение скорости в движении кометы вследствие негравитационных воздействий на ядро, при вычислении орбиты по второму и третьему варианту, если пренебречь дифференциальными возмущениями, можно представить в виде:

$$\int_{1972}^{2010} \bar{A} dt + \int_{2005}^{2010} \bar{A}' dt, \quad (5)$$

$$\int_{1972}^{2010} \bar{A} dt + \bar{I}(t_1), \quad (6)$$

где  $\bar{A}$  – вектор негравитационных ускорений;  $\bar{A}'$  – вектор поправок к негравитационному ускорению, начиная с появления 2005 г.;  $\bar{I}(t_1)$  – вектор мгновенного изменения скорости в момент  $t_1=4$  июля 2005 г. Здесь следует отметить, что значения негравитационного параметра  $\bar{A}$ , для второго и третьего варианта оказались близкими (см. табл. 4), поэтому в выражениях (5) и (6) они имеют одинаковые обозначения. Также вычисления показали, что значение  $\int_{2005}^{2010} \bar{A}' dt$  приблизительно равно значению  $\bar{I}(t_1)$ .

После столкновения кометы Темпель 1 с ударником космической миссии Deep Impact были возможны два случая развития событий с точки зрения изменения негравитационных параметров. В первом случае, образование активной области вызывает реактивную силу, которая в течение некоторого времени увеличивает общую интенсивность сублимации, но мало изменяет параметры вращения ядра. Поэтому после окончания выброса вещества из активной области, негравитационное ускорение становится таким же, как будто бы столкновение не произошло. Второй возможный случай развития событий предполагает, что столкновение может привести к заметным изменениям в параметрах вращения ядра, а также к образованию на поверхности ядра новой активной области, что, в свою очередь, приведет к изменению негравитационного ускорения. Изменение скорости движения кометы согласно этим вариантам математически можно описать следующим образом:

$$\int_{1972}^{2010} \bar{A} dt + \int_{t_1}^{t_2} \overbrace{\bar{J}et}^{\int_{2005}^{2010} \bar{A}' dt \approx \bar{I}_{t_1}} dt ; \quad (7)$$

$$\int_{1972}^{t_1} \bar{A} dt + \int_{t_1}^{2010} \Delta \bar{A} dt + \int_{t_1}^{t_2} \overbrace{\bar{J}et}^{\int_{2005}^{2010} \bar{A}' dt \approx \bar{I}_{t_1}} dt, \quad (8)$$

где  $\bar{J}et$  – вектор ускорения от выброса вещества из образовавшейся в результате столкновения активной области, действующий с момента  $t_1$  до  $t_2$ .

В первом случае развития событий, описанных выражением (7), оценка величины вектора изменения скорости  $\int_{t_1}^{t_2} \bar{J}et dt$  должна быть близка к полученным во втором и третьем вариантах величинам  $\int_{2005}^{2010} \bar{A}' dt$  и  $\bar{I}(t_1)$ , а во втором случае (см. (8)) должна различаться, поскольку изменение скорости происходит не только вследствие действия выброса вещества, а также из-за изменения негравитационного ускорения, представленного интегралом  $\int_{t_1}^{2010} \Delta \bar{A} dt$ .

Располагая результатами космической миссии Deep Impact, можно оценить возмущение, оказанное на комету Темпель 1 в результате столкновения. Это возмущение будет складываться из двух составляющих. Первое представляет собой импульс, сообщенный ядру кометы массивным ударником. Второе можно представить как реактивную силу, действующую на ядро кометы, вследствие выброса кометного вещества из образовавшегося на поверхности кратера.

Столкновение кометы Темпель 1 с ударником, произошло в близперигелийной области с относительной скоростью  $|\Delta \bar{v}_{imp}| = 10.3$  км/с. Если масса кометы равна  $M = 7.5 \cdot 10^{13}$  кг, а масса ударника  $m_{imp} = 370$  кг, тогда приращение скорости  $\Delta \bar{V}_{imp}$ , которое ударник сообщит комете вычисляется из выражения, описывающего закон сохранения импульса:

$$M\bar{V} + m_{imp}(\bar{V} + \Delta \bar{v}_{imp}) = (M + m_{imp})(\bar{V} + \Delta \bar{V}_{imp}), \quad (9)$$

где  $\bar{V}$  – скорость кометы. Оценки, полученные по формуле (9) показывают, что максимальное приращение скорости, которое может сообщить ударник комете равно  $|\Delta \bar{V}_{imp}| = 5.1 \cdot 10^{-8}$  м/с.

По оценкам Виллингейла и др. [9] выброс кометой  $4.1 \cdot 10^8$  кг вещества происходил в течение 12 суток, т.е. через 12 суток после столкновения общая производительность кометой вещества практически сравнялась с общей производительностью до столкновения. В предположении, что выброс кометного

вещества происходил мгновенно, приращение скорости кометы можно вычислить по формуле:

$$(M + m_{jet})\bar{V} = M(\bar{V} + \Delta\bar{V}_{jet}) + m_{jet}(\bar{V} + \Delta\bar{v}_{jet}). \quad (10)$$

Подставляя в выражение (10) массу выброшенного вещества  $m_{jet}=4.1 \cdot 10^8$  кг [9] и среднюю скорость истечения  $|\Delta\bar{v}_{jet}|=200$  м/с [5], получим оценку максимального приращения скорости  $|\Delta\bar{V}_{jet}|=1.1 \cdot 10^{-3}$  м/с. Данная оценка позволяет определить среднюю величину ускорения, которое действовало на комету в результате выброса вещества, которое составило  $|\bar{J}e\bar{t}|=1.1 \cdot 10^{-9}$  м/с<sup>2</sup>. Оно может быть сопоставлено с вычисленной величиной негравитационного ускорения после столкновения кометы с ударником. Модуль вектора негравитационного ускорения, полученный во втором варианте, на момент прохождения кометой перигелия равен  $|\bar{A}'|=4.7 \cdot 10^{-9}$  м/с<sup>2</sup>. Таким образом, ускорение приобретенное кометой в результате выброса вещества, оказалось примерно в пять раз меньше величины негравитационного ускорения.

Приращение модуля скорости, полученное по третьей модели на момент столкновения кометы с ударником  $t_1=4$  июля 2005 г. составляет  $|\bar{I}(t_1)|=4.9 \cdot 10^{-2}$  м/с, что значительно больше приращения скорости кометы вследствие выброса кометного вещества  $|\Delta\bar{V}_{jet}|$  и тем более импульсного воздействия ударника  $|\Delta\bar{V}_{imp}|$ . Прделанные вычисления позволяют сделать вывод, что имел место второй вариант развития событий, т.е. произошло изменение негравитационного ускорения, например, вследствие изменения параметров вращения ядра кометы Темпель 1.

## 5. Выводы

Были вычислены три варианта орбиты кометы Темпель 1 на интервале с 1967 по 2010 г., используя три различных набора параметров, определяющих движение кометы. В первом варианте, представляющем наблюдения кометы Темпель 1 со средней ошибкой веса  $\sigma_0=0''.538$ , улучшались 9 параметров орбиты: координаты и компоненты скорости, а также три компоненты негравитационного ускорения, предполагая, что на рассматриваемом интервале негравитационные параметры не изменялись. Вторым вариантом решения представляет движение кометы Темпель 1 набором из 12 параметров со средней ошибкой веса  $\sigma_0=0''.533$ . Предполагая, что столкновение с ударником, могло привести к изменению величины негравитационного ускорения, к основному набору из 9 элементов, представлявших орбиту в первом варианте, были добавлены три компоненты негравитационного ускорения, отвечающих за изменение негравитационных ускорений в появлении 2005 г. В третьем варианте улучшались 12 параметров орбиты, включающие в себя координаты и компоненты скорости, 3 параметра негравитационного ускорения, а также 3 компоненты мгновенного изменения скорости  $I_x, I_y, I_z$ , в

данном случае представляющие изменение орбиты в результате столкновения с ударником 4 июля 2005 г. Полученная система параметров орбиты представляет наблюдения со среднеквадратической ошибкой  $\sigma_0=0''.536$ .

Было показано, что величины поправок к компонентам негравитационного ускорения второй модели, представленные в виде вектора изменения скорости, оказываются близки к соответствующим значениям компоненты мгновенного изменения скорости, полученным из третьей модели, т.е. две различные модели движения дают примерно одинаковые значения для приращения скорости кометы. В то же время значения вектора негравитационного ускорения второй и третьей модели оказались приблизительно равными, что говорит о равнозначности самих моделей.

Используя результаты космической миссии Deep Impact, была произведена оценка возмущения, оказанного на комету Темпель 1 в результате столкновения с ударником. Оказалось, что приращение модуля скорости, полученное по третьей модели, превосходит приращение скорости кометы вследствие выброса кометного вещества и импульсного воздействия ударника. Это расхождение может быть связано с изменением негравитационного ускорения, что требует дальнейших исследований поступательно-вращательного движения кометы.

## Список литературы

1. Белоусов А. А. Численная теория движения кометы Темпель 1 с учетом результатов космической миссии Deep Impact // Труды ИПА РАН, 2006, вып. 14, С. 199–209.
2. Бондаренко Ю. С., Медведев Ю. Д. Долгосрочные численные теории движения комет // *Астрономический Вестник*, 2010, Т. 44, № 2, С. 158–166.
3. Бондаренко Ю. С. Электронный каталог кометных орбит «Halley» // Труды ИПА РАН, 2009, вып. 19, С. 55–66.
4. A'Hearn, M. F., Belton, M. J. S., Delamere W. A. et al. Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1 // *Science*, 2005, v. 310, p. 258–264.
5. Küppers M., Bertini I., Fornaisier S. et al. A large dust/ice ratio in the nucleus of comet 9P/Tempel 1 // *Nature*, 2005, v. 437, p. 987–990.
6. Marsden B. G. *Catalogue of Cometary Orbits*, 2nd ed. // IAU., 1975, Cambridge. Mass.
7. Marsden B.G., Williams G.V. *Catalogue of Cometary Orbits*. 17th ed. // SAO., 2008, p. 195.
8. Thomas P. C., Veverka J., Belton J. S. et. al. The shape, topography, and geology of Tempel 1 from Deep Impact observations // *Icarus*, 2007, v. 187, p. 4–15.
9. Willingale R., O'Brien P. T., Cowley S. W. H. et. al. Swift X-ray telescope observations of the deep impact collision // *The Astrophysical Journal*, 2006, v. 649, p. 541–552.

## Электронные ресурсы

- {1}. <http://solarsystem.nasa.gov/deepimpact/index.cfm/>
- {2}. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/deepimpact/main/index.html/](http://www.nasa.gov/mission_pages/deepimpact/main/index.html/)
- {3}. <http://hubblesite.org/>
- {4}. <http://www.esa.int/SPECIALS/Rosetta/index.html/>
- {5}. <http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html/>
- {6}. <http://epoxi.umd.edu/>

Ю. С. Бондаренко.

Изменение движения кометы Темпель 1 вследствие столкновения с ударником  
космической миссии Deep Impact

---

Подписано к печати 14.05.2010 Формат 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Офсетная печать Печ. л. 1.2  
Уч.-изд.л. 1.2 Тираж 200 Заказ 225 бесплатно

---

Отпечатано в типографии ЗАО «Полиграфическое предприятие» № 3  
(191104, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 55.)

Институт прикладной астрономии РАН, 191187, С.-Петербург, наб. Кутузова, 10