

Е. Д. Кондратьева, Г. В. Жуков, Д. С. Халин
 Казанский государственный университет, г. Казань
 Gera.Zhukov@ksu.ru

КОМЕТНЫЕ ПЛАНЫ ЗЕМЛИ

Космос, наш ближний Космос или Солнечная система, – это не только предмет исследования специалистов, далеких от обычной жизни. В какой-то степени, это и объект борьбы различных стран за приоритет в науке и технологии. Ведь совершенно ясно, что каждая миссия за пределы Земли, каждый успешный запуск – очередной шаг в развитии технической мысли. Разве можно переоценить значение запуска первого Спутника Земли, первый полет человека или высадку на Луну?

Кометы – одни из самых замечательных тел Солнечной системы: и тем, что они сохранили в себе первичную материю, из которой наша система образовалась около 5 миллиардов лет назад, и тем, что эволюция комет наиболее динамична. Поэтому несомненен все возрастающий интерес к их исследованиям. Естественно, что наши представления об этих удивительных телах будут неполными до тех пор, пока мы не сможем изучить вещество самих комет. Однако подобраться к ним непросто: это не большая планета с ее сравнительно стабильной орбитой. Да и размеры ядер комет – 1 – 5 км в среднем – песчинки даже по сравнению с Землей. Вполне понятно, что при первых полетах к кометам вопрос стоял только о том, чтобы аппарат прошел вблизи кометы и передал на Землю все возможные, но дистанционные измерения.

Первыми исследовательскими миссиями подобного типа были полеты к кометам Джакобини-Циннера и Галлея. Первый из них состоялся в 1985 г., когда аппарат, созданный НАСА (Национальное космическое Агентство США), буквально прошел через хвост кометы. В 1986 году знаменитая комета Галлея приблизилась к Земле – и это событие инициировало запуск к ней 6 аппаратов: российские Вега 1 и 2, японские Suisei и Sakigake и американский JSE. Аппараты ВЕГА (ВЕНера-ГАллей) также выполнили исследования Венеры. Аппарат Джотто (Европейское космическое агентство, ЕКА) прошел вблизи двух комет: Галлея и Грига-Скеллерупа. Снимки последней кометы были получены с расстояния всего 200 км. И, наконец, в 2001 г. аппарат НАСА Deep Space 1 сделал снимки ядра кометы Борелли, которые по качеству превзошли результаты, полученные по комете Галлея.

По мере накопления опыта задачи полетов к ядрам комет все более усложнялись. Выделились два основных агентства – НАСА и ЕКА, которые стали лидерами в области подобных исследований.

НАСА выполняет одновременно несколько проектов разной сложности. Прежде всего, это проект «Глубокое проникновение» (Deep Impact), в котором в качестве возможных объектов исследования рассматривались кометы Энке, Д'Арре и Темпеля I. Выбор был сделан в пользу последней. Станция 4 июля 2005 г. сблизилась с ядром кометы и отделяемый блок выстрелил в комету металлической болванкой. От удара на поверхности ядра предполагалось образование кратера и выброс вещества из внутренних слоев. Облако выброшенного вещества изучалось раз-

личными приборами, установленными на специальной платформе.

Второй проект носил название CONTOUR (COmet Nucleus TOUR) – «Визит к кометному ядру». Он предназначался для изучения комет Энке и Швассмана-Вахмана 3. Однако в 2002 году после запуска носителя исследовательская станция не вышла на расчетную траекторию полета. Кроме того, комета Швассмана-Вахмана 3 распалась на 3 фрагмента, практически прекратив свое существование. Впоследствии НАСА решило в 2006 году повторить запуск с аналогичной задачей.

Одновременно США разрабатывают еще один проект под названием «Звездная пыль» (Stardust), задача которого – полет к комете Вильд 2. Принципиальным отличием этой миссии является планируемая доставка на Землю проб вещества из кометного хвоста. Успешный запуск корабля Stardust состоялся 7 февраля 1999г., а в феврале 2000 и январе 2001гг. были взяты пробы межпланетной пыли. И, наконец, когда 2 января 2004г. расстояние между кометой и космическим аппаратом составило около 240 км, в ловушки были захвачены пылинки из хвоста кометы. 15 января 2006 года эти пробы возвращены на Землю, и впе-

реди их детальное исследование.

Фотографии ядра кометы Вильд 2 продемонстрировали весьма сложную поверхность: обнаружены образования, похожие на кратеры диаметром до 1 км, стометровые обрывы и отдельные камни (Рис. 1). Специалисты полагают, что

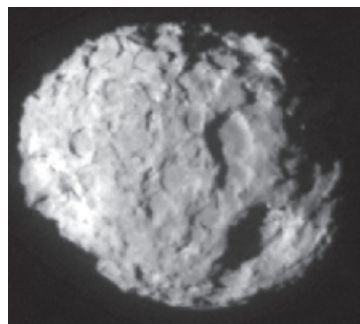


Рис. 1. Ядро кометы Вильд-2 (<http://www.nasa.gov>).

такой сложный рельеф свидетельствует о значительной прочности поверхностного слоя ядра кометы: вероятно, это гранулы скальной породы, удерживаемые льдами. Необходимо отметить, что комета Вильд 2 только с 1974 года стала подходить близко к Солнцу. За последние 5 оборотов летучие вещества, видимо, не успели покинуть ядро, и твердые его части пока целы. Тем ценнее пробы, которые получили ученые для изучения.

Естественно, что страны, входящие в европейское сообщество, также заинтересованы в исследовании открытого космоса. К числу удач ЕКА прежде всего относится полет зонда «Гюйгенс» для исследования Титана, самого крупного спутника Сатурна. Необходимо отметить, что интерес к Титану объясняется в первую очередь тем, что это единственный спутник, обладающий плотной атмосферой. Успешный запуск, произведенный в 1997 году, обеспечил к настоящему времени доставку исследовательской платформы в систему Сатурна. Исследовательский аппарат успешно спустился на поверхность Титана, на

Табл. 1. Наименьшее расстояние между орбитами Земли и кометы Темпель I. t_1 - момент, когда Земля проходит точку сближения; t_2 - момент, когда частица проходит точку сближения; Δt - разница моментов в сутках; ρ - расстояние в указанный момент.

Модель – 50м/с			
t_1 (Земля)	t_2 (модель)	Δt	ρ , а.е.
2011.05.31	2010.12.14	167	0.60
2016.05.31	2016.06.08	-8	0.54
2022.05.31	2021.12.13	169	0.54
2028.06.04	2027.09.27	250	0.53
Модель – 100м/с			
2011.05.31	2010.11.14	198	0.50
2016.05.30	2016.04.13	48	0.55
2022.05.31	2021.09.23	250	0.55
2028.06.02	2027.02.14	107	0.40

Землю переданы уникальные снимки, уже продемонстрированные всему человечеству.

Наиболее ценным и значимым является последний проект ЕКА – полет к периодической комете, спуск на поверхность ее ядра, забор грунта и доставка его на Землю. Впервые Земля поставила перед собой такую грандиозную задачу. Первоначально планировалось, что носитель выведет в околосолнечное пространство зонд «Розетта», который направится к комете Виртанена. Старт был запланирован на январь 2003 года. Однако неудачный запуск носителя «Ариан-5» за месяц до старта миссии к комете заставил заново проверить всю технику, для чего понадобилось достаточно много времени, и «окно» для успешного полета к комете Виртанен закрылось (окном называется интервал времени, в течение которого можно провести запуск по расчетной траектории с незначительными коррекциями орбиты). Но программа не была свернута: замена кометы Виртанен нашлась быстро – это комета Чурюмова-Герасименко.

Комета Чурюмова-Герасименко была открыта украинскими астрономами относительно недавно - в 1969 году. По характеру нынешней орбиты относится к кометам семейства Юпитера, имеет период обращения вокруг Солнца в 5 лет, а наименьшее расстояние от него всего 190 млн.км. Поэтому комета приближалась к Солнцу (и к Земле) после своего открытия всего 5 раз. Это весьма существенный факт: ядро кометы за это время не успело потерять большую часть своего газо-пылевого состава. Оно достаточно большое по кометным меркам - около 5 км, при приближении к Солнцу появляется длинный хвост.

В планах НАСА был «расстрел» кометы, но высадка на столь малое тело, каким является ядро, еще ни разу не планировалась. Надо учесть, что выстрелить в ядро кометы можно в любом участке траектории, но желательно вблизи перигелия. А посадка аппарата на поверхность ядра, наоборот, возможна только далеко от Солнца, т.е. для данной кометы вблизи орбиты Юпитера. Именно там газовая составляющая находится в замороженном состоянии и следует надеяться, что поверхность ядра твердая.

Исследовательский аппарат «Розетта» – это алюминиевый куб со стороной чуть больше 2 метров и массой около 3 тонн. Ни один современный носитель не сможет доставить его на орбиту Юпитера. Поэтому для «Розетты» был разработан сложный сценарий, использующий гравитационные поля Солнца, Марса и Земли. Он по характеру походит на полет к комете Вильд 2, но сложнее: сначала четыре оборота вокруг Солнца, при этом в трех случаях попадая в зону притяжения Земли (в 2005, 2007 и 2009 гг.), и один раз – Марса (2007 г.). Эти сближения должны подправить орбиту корабля, придав ему дополнительную скорость для достижения орбиты Юпитера: «Розетта» как бы пустится вдогонку комете, которая за это время

сделает один полный оборот и пройдет в 2008 г. перигелий. Они должны встретиться в мае 2014 г. Зонд будет работать около кометы примерно 1.5 года, наблюдая за всеми изменениями ее состояния. Возвращаемый отсек станции со всеми полученными данными должен впервые доставить на Землю пробы вещества самого ядра кометы.

Российское космическое агентство решает задачи не менее важные, но еще более ответственные. Прежде всего, к ним относятся наши работы по под-

держанию жизнедеятельности Международной космической станции (МКС):

Россия отвечает за самое дорогое – жизнь космонавтов, их отправку на орбиту и возврат на Землю. Однако это не означает, что российские программы исчерпываются только в области технической космонавтики. И среди множества научных исследований, которые в настоящее время выполняются с привлечением внеземных технологий, заметное место занимает изучение комет.

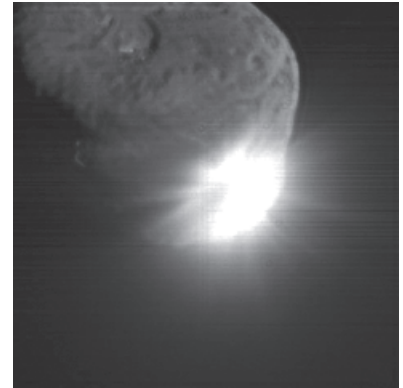


Рис. 2. Ядро кометы Темпель I со вспышкой (<http://www.nasa.gov>).

Российские ученые всегда стояли в первых рядах специалистов, изучающих физику и движение комет. В частности, в Казани научные наблюдения комет начались в 1811 г., когда в сторожке ботанического сада, во дворе главного здания университета была оборудована первая в Поволжье обсерватория. Студент И.М. Симонов и магистр Н.И. Любачевский провели наблюдения знаменитой кометы 1811г. и опубликовали их. Фактически, эти наблюдения и были началом кометных исследований казанских ученых. Настоящего расцвета это научное направление достигло после 1920 г. Именно тогда студент кафедры астрономии КГУ Александр Дубяго, наблюдая небосвод, открыл две новые кометы, которые носят его имя и изучаются и в настоящее время.

После окончания университета А.Д. Дубяго, пройдя путь от студента до профессора, директора обсерватории, все свои силы отдает исследованию орбит комет, определению механизмов их распада, изучению влияния негравитационных сил на движение комет. Итогом этих исследований стала его монография «Определение орбит», впоследствии переведенная на английский язык и не потерявшая свое значение и в наши дни. Именно А.Д. Дубяго является создателем научного направления, которое называют Казанской кометной школой.

Табл. 2. Моделирование выброса из ядра кометы Вильд 2 в перигелии 1999 г. Обозначения - см. табл. 1.

Модель – 100м/с			
t_1 (Земля)	t_2 (модель)	Δt	ρ , а.е.
2010.03.21	2009.09.25	176	0.61
2016.03.20	2015.12.08	103	0.61
2022.03.20	2022.02.23	35	0.61
2028.03.20	2028.05.10	-51	0.61
Модель – 500м/с			
2008.03.20	2008.04.12	-22	0.61
2014.03.23	2014.01.14	68	0.81
2020.03.23	2019.11.14	130	0.81
2027.04.01	2026.07.30	245	1.39

Модель – 2500м/с			
t ₁ (Земля)	t ₂ (модель)	Δt	ρ, а.е.
2015.11.26	2015.07.21	127	0.077
2018.11.26	2019.02.26	-92	0.075
2022.11.26	2022.10.04	53	0.079
2025.11.26	2026.05.14	-169	0.078
Модель – 3000м/с			
2015.11.23	2015.07.20	126	0.052
2018.11.23	2018.11.07	15	0.051
2021.11.24	2021.09.23	250	0.55
2025.11.24	2025.06.22	154	0.055

Табл. 3. Моделирование выброса из ядра кометы Чурюмова-Герасименко в перигелии 2015 г. Обозначения – см. табл. 1.

Его ученики, Л. Я. Ананьева и Ю. В. Евдокимов, воспитали целую плеяду «кометчиков», работающих в различных университетах нашей страны: от Челябинска до Санкт-Петербурга. Продолжаются кометные исследования и в Казани. Наши работы посвящены одному из интереснейших моментов жизни комет – истечению и выбросам вещества из их ядер, которые происходят, главным образом, под воздействием Солнца. Каждая частица отделившаяся от ядра кометы, двигается по своей собственной орбите в зависимости от скорости и направления выброса. Эти частицы образуют метеорные рои, часть из которых проходит вблизи Земли. Именно при вторжении в атмосферу Земли такие частицы и создают красивейшее явление – метеорный поток или дождь. Каждый отдельный метеор потока выглядит как «падающая звезда».

Что же увидят люди Земли, когда кометы, входящие в планы космических исследований, в очередной раз сблизятся с нашей планетой? Начнем с кометы Темпель I. Исследовательская станция сблизилась с ней 4 июля 2005 года. В результате столкновения ядра кометы с выстреливаемой болванкой должен образоваться ударный кратер диаметром 200 метров. Далее аппаратура будет изучать выброшенное вещество (Рис. 2). Взяв за основу самые точные элементы орбиты данной кометы, мы проинтегрировали уравнения ее движения и изучили эволюцию орбиты кометы до 2028 г. Оказалось, что за это время она трижды сблизится с Юпитером, из которых два сближения, в 2012 и 2015 годах, весьма незначительны (расстояние до Юпитера 2.1 и 2.9 а.е. соответственно). В 2024 году комета сблизится с Юпитером до 0.5 а.е., однако даже это сближение не внесет существенных изменений в орбиту кометы.

Между тем, комета Темпель I прошла ближайший перигелий 6 июля 2005 года, т. е. удар и выброс вещества произошел всего за два дня до этого события. Земля, правда, находилась в этот момент достаточно далеко от кометы, на расстоянии 0.5 а.е. Ядро кометы в этом состоянии уже достаточно нагрето и даже частично растаяло. Аппарат догонял комету, и выброс вещества произошел в его направлении, т.е. против движения кометы. Поэтому мы вычислили орбиты частиц, смоделировав выброс именно по предполагаемому вектору со скоростями от 0 до 1000 м/с. Все эти частицы в ближайшие 3 десятилетия не будут сближаться с Землей и не смогут наблюдаться как метеорный поток, поскольку будут проходить достаточно далеко от орбиты Земли. Продемонстрируем этот вывод на двух частицах, вычисления для которых представлены в таблице 1.

Таким образом, мы видим, что моделируемые частицы проходят очень далеко от Земли. Чтобы модель дала надежду на возможность наблюдения потока, расстояние между орбитами частиц и Землей должно быть на два

порядка меньше.

Для моделирования выбросов из ядра кометы Вильд 2 воспользуемся наилучшими элементами ее орбиты, полученными по 880 наблюдениям с 1978 по 1997 годы. Рассмотрим поведение частиц, выброшенных из ядра кометы вблизи перигелия в 1997 году перпендикулярно к радиусу-вектору против движения со скоростями от 0 до 1000 м/с. На возможность таких значительных скоростей указывают данные НАСА. Для иллюстрации в таблице 2 приведены результаты этих вычислений для двух частиц со скоростями выброса 100 м/с и 500 м/с на ближайшие 30 лет. При этом выявлено, что в первом случае нет сближений с большими планетами; во втором – сближения будут с Юпитером (1999.01.02 – 2.80 а.е., 2010.07.07 – 0.67 а.е., 2022.08.18 – 0.31 а.е.) и с Марсом (2002.08.18 – 0.092 а.е.).

Как мы видим, метеорный поток от хвоста кометы Вильд 2 не будет наблюдаться в ближайшие годы. Даже в узле расстояние между орбитами очень велико. Поэтому метеорный рой, обязательно следующий за ядром кометы вблизи ее орбиты, нельзя наблюдать с Земли. Однако в дальнейшем, особенно если тесные (на расстоянии меньше 0.33 а.е.) сближения с Юпитером повторяются, рой может отойти от орбиты кометы – родоначальницы достаточно далеко. Но это предмет следующего исследования.

Полет исследовательского аппарата, осуществляемый ЕКА, не менее интересен и труден в исполнении. (Напомним, что это полет к комете Чурюмова-Герасименко.) Когда комета будет вблизи своего афелия, аппарат начнет ее догонять – пути движения двух тел должны пересечься вблизи орбиты Юпитера в мае 2014 года. Далее будет произведена посадка на ядро кометы спускаемого аппарата, который закрепится на нем с помощью двух гарпунов. Спускаемая платформа несет на себе оборудование для более чем 10 научных экспериментов.

Как и в предыдущих случаях, ракета догоняет комету и поэтому после приближения к Солнцу основные выбросы должны быть в сторону, противоположную движению. Однако в данных обстоятельствах скорости выброса частиц могут быть значительно больше: вторжение гарпунов в ядро кометы может привести к появлению трещин на поверхности. А наличие трещин, в свою очередь, при сближении с Солнцем приведет к образованию «свищей», в которых скорость, несомненно, будет выше обычной скорости испарения. Рассмотрены две модели – со скоростями выброса частиц –2500 м/с и 3000 м/с (Табл. 3). В первом случае сближений с большими планетами не обнаружено, во втором будет сближение с Юпитером (2021.04.06 на расстояние 2.66 а.е.).

Таким образом, только активные эксперименты на ядре кометы Чурюмова-Герасименко дают надежду на успешные наблюдения «рукотворного» метеорного потока.

Теперь легко подобрать такие модели, в которых частицы сближались бы с Землей более тесно. Но мы пока не будем этого делать: подождем новых сообщений об этой интересной миссии ЕКА. До 2015 года довольно далеко...

Литература

- Кондратьева Е.Д., Муравьева И.Н., Резников Е.А. Метеорный рой Леонид в 2000 – 2002 годах. *Астрономический вестник*, Т. 34, № 3, 257-260, 2000.
 Marsden B. *Catalogue of Cometary Orbits*. IAU, Central Bureau for Astronomical Telegrams, Cambridge. 1999.