

Сопоставление некоторых характеристик вещества кометы 67P/Чурюмова-Герасименко и Челябинского метеороида

Ю. И. Лобановский

Краткое содержание

В работе сопоставляются изображения выходов «коренной» породы поверхностной корки ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко и граней разломов Чебаркульского метеорита (метеорита «Челябинск») – обломка поверхностной корки Челябинского метеороида. Сравниваются также средние плотности ядра этой кометы и Челябинского метеороида и прочности поверхностных слоев этих объектов. Из проведенных сопоставлений следует, что сравниваемые объекты оказываются весьма похожими и близкими по рассматриваемым характеристикам. Поэтому подтверждается ранее сделанный вывод о том, что Челябинский метеороид является обломком ядра кометы. Показано также, что исследование Чебаркульского метеорита может дать дополнительные данные и о комете 67P/C-G.

Ключевые слова: комета 67P/C-G – Челябинский метеороид – метеорит – обломок – корка – плотность – прочность

I. Введение

Как известно, 12 ноября 2014 года на поверхность ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко (67P/C-G) после двойного прыжка сначала примерно на полкилометра в высоту, а затем на 3 метра, совершил мягкую посадку спускаемый аппарат Филы европейского космического аппарата Розетта. При этом точка посадки оказалась примерно в километре от расчетной и, видимо, в узкой долине между холмами с крутыми склонами. Из-за затенения этими элементами рельефа Филы освещалась Солнцем всего 1.5 часа за местные сутки (продолжающиеся чуть более 12 часов), а не 6, как планировалось изначально [1, 2]. В связи с этим, программа исследования поверхности ядра кометы была сокращена до 57 часов, и надежды на то, что полученные данные будут достаточны для полноценного анализа характеристик кометы, не оправдались. Поэтому, чтобы получить максимум возможного из этого неординарного полета космического аппарата следует применить менее тривиальные, чем обычно, методы анализа имеющейся информации.

За 21 месяц до описываемого события, утром 15 февраля 2013 года, в небе вблизи Челябинска взорвался объект, который, как доказано в статьях [3 – 14], наряду с Тунгусским метеороидом оказался обломком ядра одной из комет. При этом со дна Чебаркульского озера был поднят единственный достаточно крупный (размером порядка 1 м) осколок этого Челябинского метеороида, который, как следует из довольно очевидной цепи рассуждений, является фрагментом его внешней поверхностной хондритной корки. Эта корка возникает при абляции под действием солнечного излучения загрязненного хондритами снежно-ледяного композита, из которого, в основном, состоят ядра комет и, соответственно, их обломки [3, 4, 9, 10]. Очевидно, что только малая часть этой корки сохранилась после взрыва, а снег и лед – основная часть вещества метеороида, испарились полностью. По-видимому, не требуется специального объяснения, что аналогичная поверхностная корка возникает не только на обломках кометных ядер, но и на них самих.

Поэтому сопоставление характеристик как всего метеороида с ядром кометы, так и поверхностных корок обоих объектов может быть полезно даже при использовании доступных нам простейших «органолептических» методов, исключительно на основе которых в XIX веке была, впрочем, разработана основа современной научной геологии – относительная геохронологическая шкала геологических событий.

II. Визуальный анализ некоторых имеющихся изображений

В архиве фотоизображений Европейского космического агентства имеются фотографии поверхности ядра кометы 67P/C-G, полученные при первом подлете спускаемого аппарата Филы к точке касания, названном Агилкия. Фотоснимок, представленный на рис. 1, сделан в точке Агилкия перед касанием с высоты около 40 м [15]. Размер самого большого камня в правом верхнем углу кадра составляет около 5 м.



Рис. 1

Достоин упоминания тот факт, что этот камень из Агилкии внешне довольно похож на Чебаркульский метеорит (метеорит «Челябинск») – фрагмент корки Челябинского метеороида из озера Чебаркуль почти во всем, за исключением размеров – первый в 3 – 4 раза больше, чем второй, см. например, рис. 2 [16].



Рис. 2

В самом деле, если Чебаркульский метеорит отмыть от озерного ила (см. также рис. 5) и присыпать пылью его более низкий левый край, то при выдерживании одного визуального масштаба его было бы трудно отличить от Большого Агилкийского камня. Однако, динамика отскока спускаемого аппарата Филы от поверхности ядра кометы говорит о том, что толщина пылевого слоя в Агилкие составляет, по-видимому, несколько сантиметров, и на самом деле Агилкийский камень, вероятно, является более плоским, чем Чебаркульский. А в целом, местность в точке Агилкия внешне очень похожа на бескрайние лунные пустыни, засыпанные реголитом, см. рис. 3 [17].

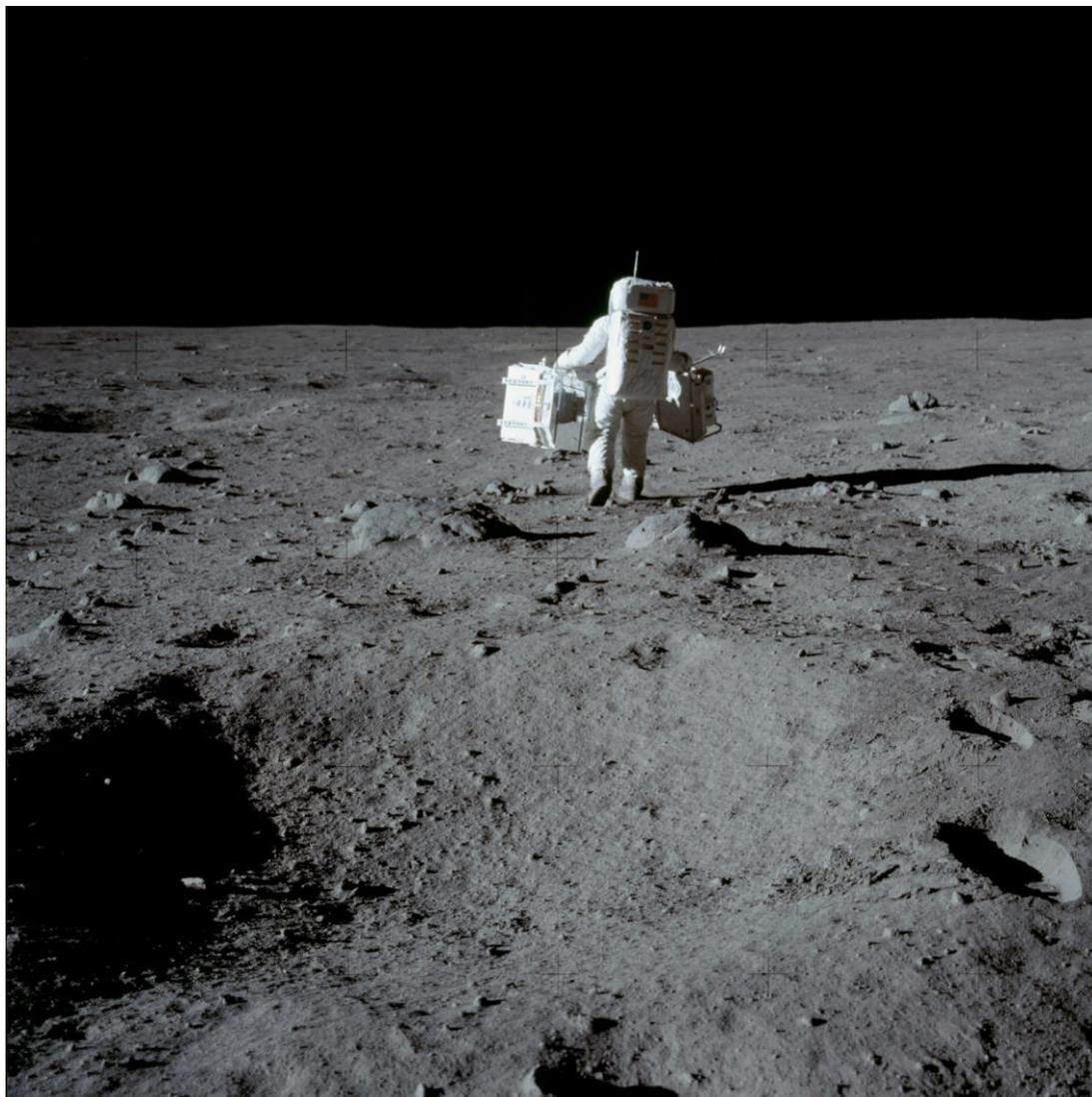


Рис. 3

Однако, слой реголита на Луне, видимо, толще, и камни в точке Агилкия, запечатленные на рис. 1, лежащие на слое пыли, оказываются довольно плоскими отщепами от основного массива. В целом, вряд ли должно удивлять, что в более-менее подобных условиях (в вакууме) каменная поверхность подвергается растрескиванию и эрозии, вызванными, в первую очередь температурными напряжениями в материале при изменении условий освещенности его Солнцем.

Явно более интересным оказался район окончательной посадки аппарата Филы. Пыль там практически отсутствует, и видна «коренная» порода, см. рис. 4 [18].



Рис. 4

На первый взгляд, поверхность Чебаркульского метеорита (см. рис. 5) отличается от выходов породы на ядре кометы. Однако, следует помнить, что Чебаркульский камень (метеорит), представляющий собой внешнюю корку Челябинского метеороида, подвергся сильнейшей аэротермодинамической эрозии, а также воздействию чрезвычайно мощного взрыва.



Рис. 5

Представляется очевидным, что верхняя на рис. 5 (см. [19]) поверхность обломка метеороида до взрыва была внешней стороной поверхностной корки и испытала спекание и абляцию. Ближе к исходному состоянию (до торможения метеороида в земной атмосфере) материал корки находится на боковых сторонах обломка – разломах корки, образовавшихся при взрыве. И там он вполне похож на то, что мы наблюдаем на рис. 4. При фотографировании в одинаковом спектральном диапазоне кусок породы кометы 67P/C-G, представленной на рис. 4, нелегко было бы отличить от обломка Челябинского метеороида с рис. 5, представляющего собой ординарный хондрит типа LL5 [20].

На рис. 6 показан черно-белый фрагмент изображения поверхности другого сравнительно мелкого обломка Челябинского метеороида в более крупном масштабе [21]. Представляется, что только различия в масштабе и освещении поверхности приводят к тем отличиям изображений на рис. 4 и рис. 5, 6, которые способен зафиксировать глаз человека.



Рис. 6.

Таким образом, сопоставление фотографий поверхности уцелевших после стратосферного взрыва осколков Челябинского метеороида, представляющих собой фрагменты его поверхностной корки, и ядра кометы в точке посадки зонда Филы, где нет мелкодисперсного вещества, покрывающего значительную часть поверхности кометы, демонстрируют их несомненную внешнюю идентичность. Очевидно, что подобие поверхностной корки кометы и куска аналогичной корки обломка другой кометы вряд ли может вызывать большое удивление.

III. Определение средней плотности сравниваемых объектов

Однако все соображения, приведенные выше, являются только качественными. Для их подкрепления необходимы количественные данные. Так как количественная информация со спускаемого аппарата в открытом доступе пока практически отсутствует, сейчас имеется только два параметра, которые можно использовать при анализе характеристик как кометы 67P/C-G, так и Челябинского метеороида. Первый из этих параметров – средняя плотность объектов.

Зонд Розетта после выхода на орбиту комету 67P/C-G с начала августа 2014 года совершал полет в пределах 100 км от ее ядра. Было сделано много фотографий, позволивших определить его форму и размеры, см., например, рис. 7 [22].

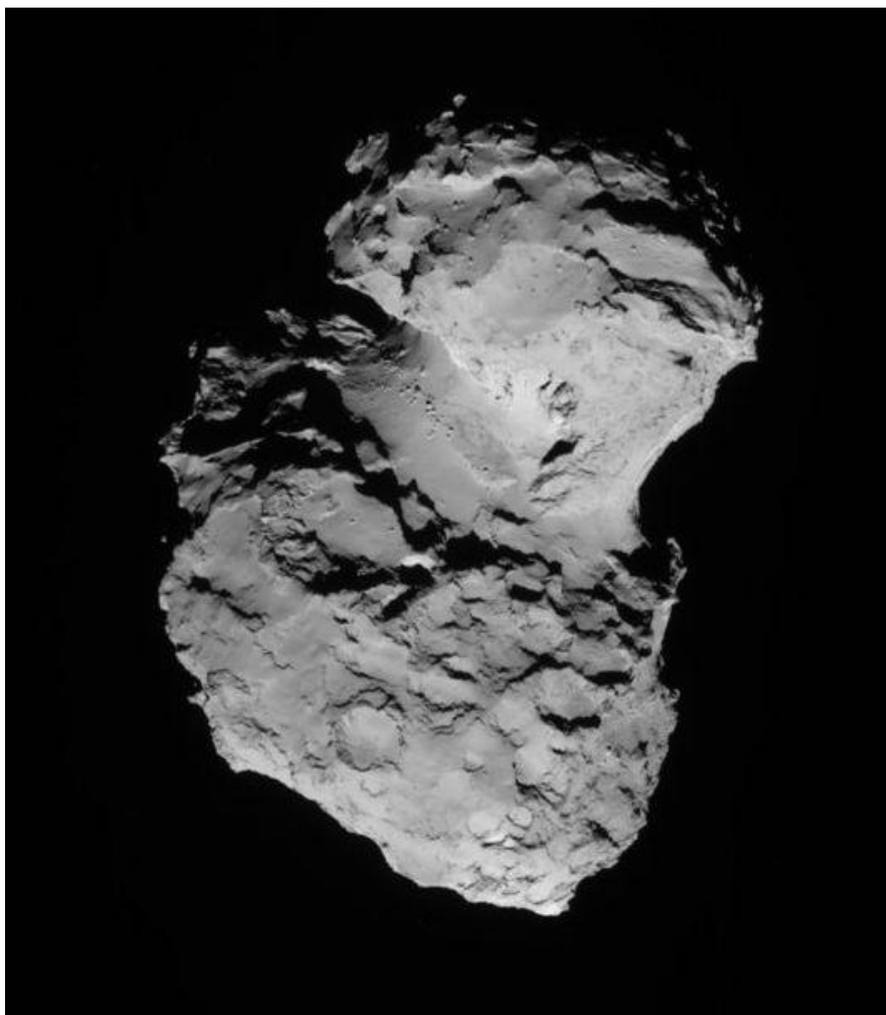


Рис. 7

В целом, форма ядра кометы довольно близка к комбинации двух соединенных между собой эллипсоидов с размерами $4.1 \times 3.3 \times 1.8$ км (бóльший) и $2.6 \times 2.3 \times 1.8$ км (меньший эллипсоид), см. [23]. Тогда оценка величины его объема составит около 18.5 км^3 . Перешеек между двумя частями кометы и различные выступы увеличивают ее реальный объем по сравнению с этой оценкой, а впадины уменьшают, и по данным источника [23] объем ядра кометы 67P/C-G составляет $21.4 \pm 2.0 \text{ км}^3$. Однако, после того, как была проведена съемка тех районов поверхности кометы, которые до того находились в тени, оценки ее объема уменьшились до $18.7 \pm 1.2 \text{ км}^3$ [24]. По траекторным измерениям на расстоянии около 100 км от центра ядра кометы было получено, что масса ядра составляет 10 Гт [23]. Деля массу кометы на объем, получаем ее среднюю плотность – $535 \pm 35 \text{ кг/м}^3$.

Следует отметить, что до сближения Розетты с кометой масса последней определялась в 3 с лишним раза меньшей, чем сейчас (но, тем не менее, до трех (!) значащих цифр) – 3.14 ± 0.21 Гт, а плотность $102 \pm 9 \text{ кг/м}^3$ (!) [25]. В других источниках первоначальные оценки средней плотности вещества кометы по методу моделирования негравитационных сил давали ее значения в диапазоне $100 - 370 \text{ кг/м}^3$ с верхним пределом при учете неопределенности определяющих параметров $500 - 600 \text{ кг/м}^3$ [26]. Радиолокационные наблюдения с помощью крупнейшего радиотелескопа Аресибо привели к оценке плотности кометы $600 - 1000 \text{ кг/м}^3$ [27]. Все это, между прочим, характеризует надежность тех данных по параметрам малых тел Солнечной системы, которыми оперируют астрономы, если они не используют прямые измерения с близко пролетающих космических аппаратов.

При этом вполне адекватная оценка средней плотности ядра кометы легко получается из параметров кометного обломка – Челябинского метеороида. В самом деле, из расчетов следует, что его поперечный размер составлял 182.5 м, а средняя плотность – 570 кг/м^3 [4, 10] (тогда его масса составила 1.82 Мт, что, примерно, в 5500 раз меньше, чем масса кометы 67P/C-G). Согласование плотностей кометы и метеороида оказалось многократно лучше, чем согласование дополетных и современных данных по плотности ядра кометы.

Однако есть еще один аспект, который следует учитывать при сравнении средних плотностей ядра кометы 67P/C-G и сравнительно небольшого обломка другой кометы – то, что доли вклада в их массы поверхностной корки повышенной плотности сильно различаются. Плотность корки Челябинского метеороида, состоящей из ординарного хондрита – 3300 кг/м^3 [20]. Ее толщина, если за основу брать «высоту» крупнейшего сохранившегося обломка – Чебаркульского метеорита, составляла, примерно, 0.75 % от радиуса метеороида, то есть, около 0.65 м. Однако, вне всякого сомнения, этот обломок был куском части «лобового тормозного щита», где образовалась корка максимальной толщины. Характерный размер ядра кометы 67P/C-G раз в 20 больше, поэтому влиянием ее поверхностной корки на среднюю плотность можно пренебречь. Тогда, для того, чтобы средние плотности Челябинского обломка без учета поверхностной корки и ядра кометы 67P/C-G были одинаковы, требуется, чтобы объем корки составлял около 1.25 % от объема Челябинского метеороида. То есть, толщина ее составляла бы несколько больше 0.4 % его радиуса или около 0.4 м. При сопоставлении с размером Чебаркульского метеорита эта оценка представляется вполне адекватной.

С учетом этого значения средней плотности снежно-ледяного (с минеральными и иными загрязнениями) ядра кометы 67P/C-G, а также Челябинского метеороида (без поверхностной корки) составят, примерно, 535 кг/м^3 . Конечно, возможные различия в происхождения 67P/C-G и родительской кометы этого метеороида могли привести к некоторым различиям в количестве и химическом составе минерального материала их ядер. Кроме того, в 20 раз меньшие размеры метеороида и примерно 1.3 раза бóльшая температура его поверхности в перигелии орбиты [4, 10, 28] могли привести к каким-то различиям во внутренней структуре этих объектов. Тем не менее, практически полное совпадение их средних плотностей является еще одним доказательством того, что Челябинский метеороид – это обломок ядра кометы.

Последний вывод подтверждается и результатами, представленными в разделе II данной работы.

IV. Прочность поверхностного слоя сравниваемых объектов

Поступила информация о работе пенетратора Филы – его молоток последовательно отработал на всех рабочих режимах вплоть до максимального и сломался, не разрушив при этом поверхность ядра кометы. По этим данным было определено, что прочность поверхностной корки ядра оказалась «больше 2 МПа» [29]. Вызывает удивление, что пенетратор был рассчитан на столь низкую прочность «грунта», так как всегда предполагалось, что ядра комет состоят в основном из водяного льда с различными загрязнениями. А ведь прочность даже морского льда (тоже льда с загрязнениями) на Земле при температурах $T \approx 245 - 260 \text{ К}$, существенно более высоких, чем «кометные» (даже на освещенных Солнцем участках поверхности кометы при не слишком большом удалении от снеговой линии Солнечной системы) составляет не менее 2 – 3 МПа [30]. Конечно, ядро кометы должно представлять собой скорее снежок, чем ледяной обломок. Но, твердо рассчитывать на то, что пенетратор никогда не окажется на куске сплошного льда – это представляется совершенно неоправданным оптимизмом. К тому же, чем ниже температура, тем крепче лед [31]. И при температуре около 120 – 160 К [32], которая была зарегистрирована на поверхности кометы 67P/C-G в интересующий нас период в целом, а также в точке посадки, прочность льда может превысить 10 МПа. Тем не менее, «инженерные модели свойств кометной поверхности покрывали диапазон ее прочности на сжатие от 60 кПа до 2 МПа». Рассматривались варианты с прочностью поверхности всего в несколько килопаскалей (см. [33]).

При этом известно, что прочность на сжатие одного из образцов размером $10 \times 10 \times 20 \text{ мм}$, вырезанного из найденного на земле осколка Челябинского метеороида, несколько превысила 60 МПа, а у микроскопических образцов измеренная прочность была еще в несколько раз выше [20] – якобы как у высокопрочной углеродистой стали. Правда, эти данные относятся к образцам материала, пережившим сильнейшее аэротермодинамическое воздействие и перенесшим взрыв с энергией около 57 Мт в тротиловом эквиваленте [4 – 6, 10 – 12]. Вполне возможно, что до этих воздействий их прочность была заметно ниже.

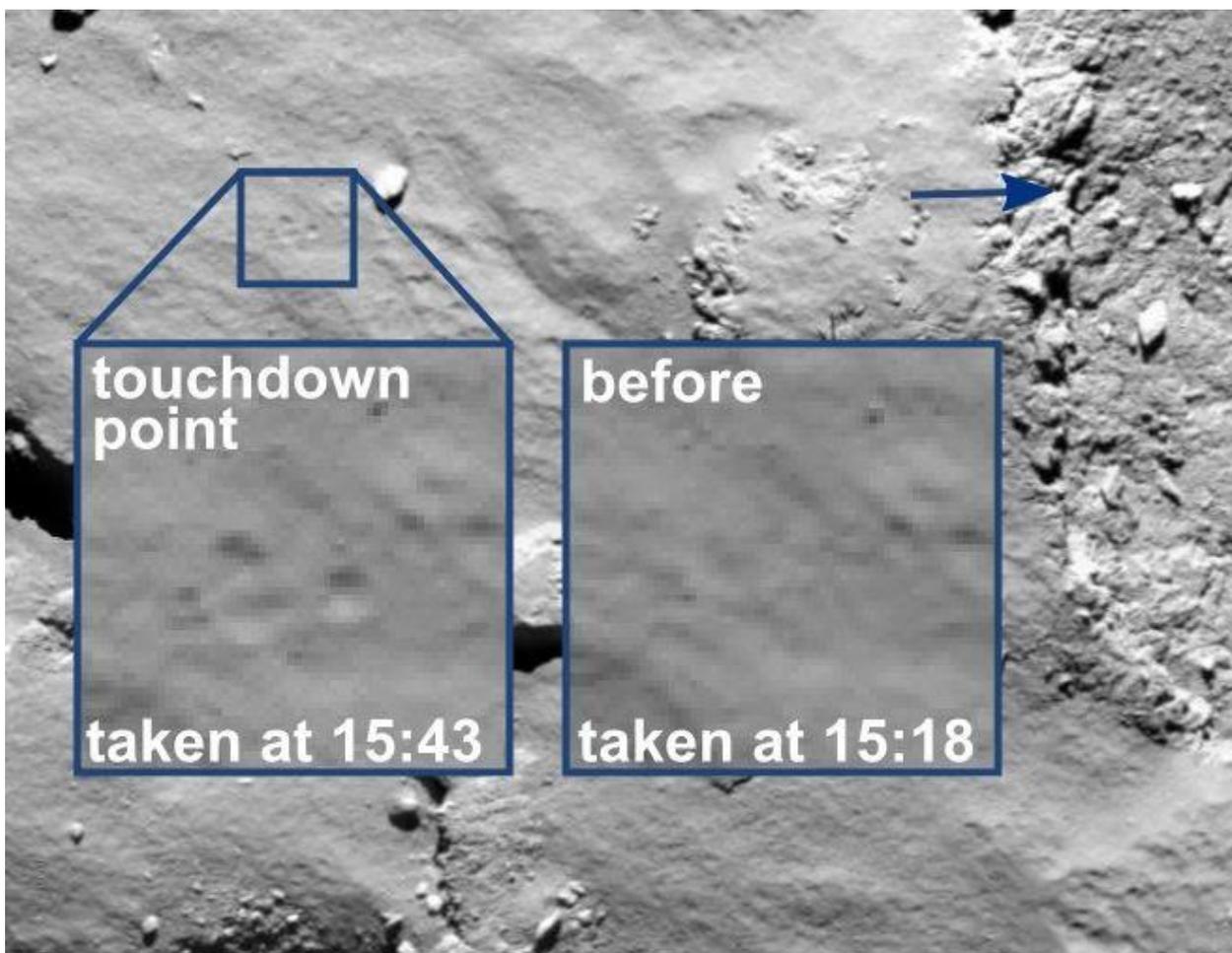


Рис. 8

Гарпуны, которые должны были закрепить спускаемый аппарат на поверхности кометы и которые не смогли этого сделать, были рассчитаны на прочность материала, не превышающую 8 – 10 МПа [33]. Хотя, судя по отпечаткам шасси аппарата при первом касании поверхности кометы [34] и данным с датчика скорости, подход к ней произошел вполне штатно, и больших камней в точке касания, способных как-то помешать посадке, не было (см. рис. 8). Выяснилось, что гарпуны не сработали [32], однако, сопоставление наиболее вероятной прочности поверхностной корки кометы (минимум, порядка нескольких десятков мегапаскалей), и расчетные характеристики гарпунов (максимальная прочность пробиваемого материала – менее десяти мегапаскалей) показывает, что их работоспособность никак не могла повлиять на возможность закрепления посадочного аппарата на поверхности кометы.

Прочность в несколько килопаскалей для описанного выше образца, вырезанного из осколка Челябинского метеороида, также была получена при испытаниях, но только при растяжении этого образца [20]. Возникает ощущение, что разработчики пенетратора Филы, а также руководители миссии не понимали различия между прочностью материала типа льда, хондрита или вообще любого камня на разрыв и на сжатие.

Итак, имеющиеся чрезвычайно скудные данные о прочности поверхностной корки ядра кометы 67P/C-G также согласуются с данными о прочности фрагментов аналогичной корки Челябинского метеороида.

V. Обсуждение результатов и выводы

1. Скачки спускаемого аппарата Филы по поверхности кометы 67P/C-G оказались чрезвычайно удачными для визуального анализа материала ее ядра, так как в итоге привели в точку выхода «коренной породы» ядра, что было критически важным для этого анализа.
2. Визуальный анализ изображений выходов на поверхность из-под пылевого слоя «коренной породы» ядра кометы 67P/C-G и не подвергшихся длительному воздействию интенсивных аэротермодинамических нагрузок граней Чебаркульского метеорита – крупнейшего обломка поверхностной корки Челябинского метеороида, свидетельствует об их значительной схожести.

3. Величины средней (без поверхностной корки) плотности ядра Челябинского метеороида и средней плотности ядра кометы 67P/C-G практически совпадают и составляют около 535 кг/м³.
4. Прочность поверхностной корки кометы 67P/C-G намного превысила ожидания ее исследователей и оказалась много выше прочности водяного льда.
5. Данные о прочности поверхностных корок Челябинского метеороида и кометы 67P/C-G вполне согласуются между собой.
6. Все это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что Челябинский (а, значит, и Тунгусский, см. [3, 4, 9, 10]) метеороиды являются объектами одного семейства – обломками ядра кометы.
7. Если, вследствие проблем, возникших у спускаемого аппарата Филы при посадке, информации о химическом составе и физических характеристиках поверхностного слоя кометы 67P/C-G окажется недостаточно, участники этой программы могут дополнить ее в Челябинском государственном краеведческом музее, где хранится Чебаркульский метеорит.

Литература

1. Rosetta (spacecraft). *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Rosetta_\(spacecraft\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Rosetta_(spacecraft))
2. Rosetta. Rendezvous with a comet. *ESA* // <http://rosetta.esa.int/>
3. Ю. И. Лобановский – Параметры Челябинского и Тунгусского объектов и характеристики вызванных ими взрывов. *Synerjetics Group*, 12.04.2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/objects.htm>
4. Ю. И. Лобановский – Параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов и характеристики их взрывов. *Synerjetics Group*, 26.01.2014 – 30.01.2016 // http://www.synerjetics.ru/article/objects_2.htm
5. Ю. И. Лобановский – Акустические способы оценки энергии мощных взрывов. *Synerjetics Group*, 20.07.2013 – 10.02.2014 // <http://synerjetics.ru/article/acoustics.htm>
6. Ю. И. Лобановский – Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов. *Synerjetics Group*, 14.02.2014 – 30.01.2016 // http://www.synerjetics.ru/article/springs_critique.htm
7. Ю. И. Лобановский – Кометно-метеоритная угроза: исторический аспект. *Synerjetics Group*, 30.09.2013 – 10.02.2016 // <http://www.synerjetics.ru/article/history.htm>
8. Ю. И. Лобановский – Каким был Челябинский метеороид на самом деле? *Synerjetics Group*, 10.07.2014 // http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments.htm
9. Yu. I. Lobanovsky – Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes. *Arxiv.org*, 08.07.2013 // <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
10. Yu. I. Lobanovsky – Refined Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Meteoroids and their Explosion Modes. *Arxiv.org*, 28.03.2014 // <http://arxiv.org/abs/1403.7282>
11. Yu. I. Lobanovsky – Acoustic Methods for Evaluation of High Energy Explosions. *Arxiv.org*, 06.03.2014 // <http://arxiv.org/abs/1311.6565>
12. Yu. I. Lobanovsky – Chelyabinsk Meteoroid: Critique of Sources and Proving of Conclusions. *Synerjetics Group*, 06.06.2014 // http://www.synerjetics.ru/article/springs_critique_eng.htm
13. Yu. I. Lobanovsky – Comet and Meteor Threat: Historical Aspects. *Synerjetics Group*, 18.06.2014 // http://www.synerjetics.ru/article/history_eng.htm
14. Yu. I. Lobanovsky – What was the Chelyabinsk Meteoroid really? *Synerjetics Group*, 15.08.2014 // http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments_eng.htm
15. Comet from 40 metres. *Space in images. ESA*, November 13, 2014 // http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/11/Comet_from_40_metres
16. Сотрудники музея допустили ошибки в обращении с метеоритом «Челябинск». *РИА Новости. Наука*, 13.02.2014 // <http://ria.ru/studies/20140213/994662402.html>
17. Remembering Apollo 11. *The Big Picture, boston.com*, 15.07.2009 // http://www.boston.com/bigpicture/2009/07/remembering_apollo_11.html
18. Welcome to a comet. *Space in images. ESA*, 13.11.2014 // http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/11/Welcome_to_a_comet
19. Челябинский метеорит выставляют в музее. *В мечтах о космосе* // <http://ru-universe.livejournal.com/668127.html>
20. O. P. Popova et al. – Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, **342**, no 6162, 29.11.2013 // <https://www.sciencemag.org/content/342/6162/1069>
21. О. Стрельцова, Ю. Тимошин – Челябинский метеорит «долетел» до столицы. «ТВЦ Центр», Москва, 21.01.2015 // <http://www.tvc.ru/news/show/id/59769>
22. Comet on 8 August 2014 – NAVCAM. *ESA, Space in Images* // http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/08/Comet_on_8_August_2014_-_NavCam
23. H. Sierks et al. – On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, **347**, no 6220, 23.01.2015 // <http://www.sciencemag.org/content/347/6220/aaa1044.full>
24. F. Preusker et al. – Shape model, reference system definition, and cartographic mapping standards for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko – Stereo-photogrammetric analysis of Rosetta/OSIRIS image data. *Astronomy & Astrophysics*, **583**, November, 2015 // <http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2015/11/aa26349-15/aa26349-15.html>

25. L. Maquet et al. – 67P/Churyumov-Gerasimenko mass determination based on a new method for modeling non-gravitational forces and accelerations. *Asteroids, Comets, Meteors*, 2012 // <http://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2012/pdf/6282.pdf>
26. BJR Davidsson, PJ Gutierrez – Nucleus properties of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko estimated from non-gravitational force modeling. *Instituto de Asrofisika de Andalucia, IAA-CSIC*, 2012 // <http://www.iaa.es/node/6962>
27. P. Kamoun et al. – Constraints on the subsurface structure and density of the nucleus of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Arecibo radar observations. *SAO/NASA ADS Astronomy Abstract Service* // <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014A%26A...568A..21K>
28. 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Wikipedia* // <http://en.wikipedia.org/wiki/67P/Churyumov%E2%80%93Gerasimenko>
29. MUPUS on Philae. Results (15) @Philae_MUPUS, 15.11.2014 // https://twitter.com/Philae_MUPUS/status/533695419843637248
30. В. И. Одинокоев, А. М. Сергеева – Эволюция процесса нарушения сплошности при разрушении ледяного покрова. *ПМТФ*, 2008, **49**, no 1 // http://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120036&ARTICLE_ID=127254
31. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). *Гострой СССР, Москва*, 1989 // <http://www.gosthelp.ru/text/SNiP2060482Nagruzkiivozde.html>
32. Philae settles in dust-covered ice. *Rosetta Blog, ESA*, 18.11.2014 // <http://blogs.esa.int/rosetta/2014/11/18/philae-settles-in-dust-covered-ice/>
33. S. Ulamec, J. Biele – From Rosetta lander Philae to an asteroid hopper: Lander concept for small bodies missions. *DLR*, 2006 // <http://solarsystem.nasa.gov/docs/pr395.pdf>
34. OSIRIS spots Philae drifting across the comet. *Space in images. ESA*, 17.11.2014 // http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/11/OSIRIS_spots_Philae_drifting_across_the_comet

Москва,
16.11.2014 – 10.02.2016

Ю. И. Лобановский