



ISSN 1607–2855

Том 8 • № 1 • 2012 С. 38 – 48

УДК 523.6

Космічні місії до ядер комет — ключі для розуміння космогонії Сонячної системи

К.І. Чурюмов

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Приведено деякі результати, що їх отримали космічні місії до ядер декількох періодичних комет, а саме місії «Айс», «Вега-1» і «Вега-2», «Суїсей», «Сакигакі», «Джотто», «Діп Спейс», «Стардаст», «Діп Імпект», «Епокси», «Некст», а також програму й наукові результати місії «Розетта» за вісім років її польоту до ядра комети 67P/Чурюмова–Герасименко.

КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ К ЯДРАМ КОМЕТ — КЛЮЧИ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ КОСМОГОНИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, Чурюмов К.И. — Приведены некоторые результаты, которые получили космические миссии к ядрам нескольких периодических комет, а именно миссии «Айс», «Вега-1» и «Вега-2», «Суисей», «Сакигакі», «Джотто», «Дип Спейс», «Стардаст», «Дип Импект», «Эпокси», «Некст» а также программу и научные результаты миссии «Розетта» за восемь лет ее полета к ядру кометы 67P/Чурюмова–Герасименко.

SPACE MISSIONS TO THE NUCLEI OF COMETS — THE KEY TO UNDERSTANDING THE COSMOGONY OF THE SOLAR SYSTEM, by Churyumov K.I. — Some results obtained by space missions to the nuclei of some periodic comets, namely the mission «Ice», «Vega-1» and «Vega-2», «Suisei», «Sakigake», «Giotto», «Deep Space», «Stardust», «Deep Impact», «Epoch», «Next» and the program and the scientific results of the mission «Rosetta» in the eight years of its flight to the nucleus of the comet 67P/Churyumov–Gerasimenko.

Ключевые слова: ядра комет; дистанционные космические исследования.

Key words: nuclei of comets; remote space sensing.

1. ЧОМУ ВЧЕНИХ ЦІКАВЛЯТЬ КОМЕТИ ?

Комети цікавлять людство з дуже давніх часів. Стародавні хроніки людської цивілізації зберегли численні свідчення про появу незвичайно яскравих комет з величезними хвостами, що простягалися інколи через весь небосхил, за багато сторіч до Різдва Христового. Щоправда, в далекі часи в кометах люди вбачали знамення, небесних передвісників трагічних подій на Землі: будь-то смерть вождя племені, короля якої-небудь країни, страшна епідемія чуми або холери, руйнівна війна, неврожай, голод тощо. Про це йдеться, наприклад, у старовинних китайських хроніках, датованих 2296 р. до Р. Х. У китайській «Шовковій книзі» (IV ст.) був опублікований перший каталог комет, у якому всі комети було поділено на 27 типів нібито за характером тієї шкоди, якої вони завдають Землі. Ось декілька прикладів такої «згубної» дії комет на земні події.

Яскраву комету, що з'явилася в травні — червні 44 р. до Р. Х. під час ігор, організованих Октавіаном у пам'ять загиблого перед цим у Сенаті від рук змовників Юлія Цезаря, визнали небесним знаменням, видінням душі римського померлого понтифіка. А в 79 р. на небі сяяла яскрава комета, і в цьому самому році сталося могутнє виверження вулкана Везувію, розжарена лава і попіл якого покрили квітучі римські міста Помпеї та Геркуланум. Римський письменник Пліній-старший, який загинув під час цього виверження, спостерігаючи за кометою, попереджав жителів загиблих міст задовго до несподіваного виверження Везувію, що у зв'язку з появою комети на небі може трапитися нещастя, оскільки всі комети, на його думку, поділяються на 12 класів відповідно до характеру біди, яку вони провіщають.

Київський князь віщий Олег за рік до своєї смерті в 911 р. побачив яскраву комету в сузір'ї Геркулеса і сприйняв це як недобрый знак, оскільки волхви пророкували йому смерть у рік появи комети на небі. У наступному 912 р. знову з'явилася яскрава комета, цього разу в сузір'ї Лева (це була комета Галлея). І коли вона засяяла спершу в розривах хмар, а потім на чистому небі, Олег, який справляв тризну по загиблих дружинниках на найвищій горі під Києвом (на сьогодні — центр Києва, тут розміщується відома в усьому світі Астрономічна обсерваторія Київського університету), відчув біль у серці від «укусу небесного змія», пригадавши передрікання волхвів. Це був інфаркт, від якого віщий Олег помер. А 18 березня 1584 р. Іван Грозний також із жахом дивився з Красного ганку в Кремлі на двохвосте світило — комету в сузір'ї Змієносія, яка за прогнозами волхвів, зібраних у Москві за велінням Бориса Годунова, в цей Кирилів день віщала грізному деспотові неминучу смерть. Так воно й трапилося. Під час гри в шахи зі своїм улюбленцем Богданом Бельським у Івана Грозного стався удар, від якого він помер.

Велика яскрава комета 1665 р. з'явилася на небі в той час, коли епідемія чуми викосила 90 тисяч жителів Лондона, а Україна втратила залишки свого самоврядування, хоча обраний у 1665 р. гетьманом Правобережної України Петро Дорошенко, який змінив на цій посаді Павла Тетерю, самовіддано намагався об'єднати Україну в незалежну державу.

Знаменита комета Галлея в 1835 р. також стала «вісником» не однієї біди. Близько 530 будинків у Нью-Йорку було повністю зруйновано вогнем за декілька днів і ночей. Усіх чоловіків міста Аламо в Мексиці вбили солдати армії генерала Санта Ганна. Десять тисяч зулусів напали на селище Вінен в Африці й вирізали 97 бурських чоловіків і жінок і 185 дітей. Війни в цей час знищували все живе на Кубі, в Мексиці, Еквадорі, Центральній Америці, Перу, Аргентині та Болівії. Вождь флоридських семинолів Осцеола звертався з молитвою до цієї комети і називав її «великим ножом на небі», і незабаром після цього семиноли на чолі з Осцеолою напали і вирізали всіх солдатів форту Кінг.

Велика комета 1861 р. і комета Свіфта–Туттля (ця періодична комета є материнською відносно метеорного потоку Персеїд, максимум дії яких щорічно припадає на 13 серпня) були пов'язані, на думку деяких шарлатанів-астрологів, з першою і другою громадянськими війнами в США.

А в 1910 р. під час чергової появи комети Галлея на Землі виникла паніка у зв'язку з проходженням Землі крізь хвіст комети на відстані 22,5 млн. кілометрів від її ядра. Поширилися безглузді чутки про нібито отруєння земної атмосфери газами комети, оскільки вже в той час у спектрах комети Галлея був виявлений отруйний газ ціан, і загибель населення Землі від задухи. Спритні шарлатани почали втридорога продавати людям пігулки від задухи кометними газами. Сталося багато самогубств. Але на радість людям Земля перетнула хвіст комети та її атмосферу. Кометні атмосфери — коми і хвости — є дуже розрідженими і «видимим нічим», тобто концентрація отруйних речовин у них у мільярди разів менша за гранично допустиму концентрацію отруйних газів у повітрі, яким ми дихаємо на вулиці й навіть у кімнатах.

Під час останньої появи комети Галлея в 1986 р. (рис. 1) відбулися декілька трагічних подій: загибель американського космічного апарата «Челленджер» із сімома астронавтами на борту, серед наукових завдань яких було дослідження комети Галлея поблизу перигелію, вибух на Чорнобильській АЕС, загибель теплохода «Адмірал Нахімов» у Чорному морі тощо.

Урешті-решт це дуже дивні, але все-таки випадкові збіги, що не мають жодного відношення до науки, оскільки комети із-за їх мізерної гравітації не чинять ніякого впливу на земні події і на долі людей.

Можна навести ще багато підтверджень «поганого впливу» комет на земне життя. Деякі з таких прикладів можна знайти в книжці автора [1]. Але в усіх цих випадках винною виявлялася не комета, а самі люди. Адже фізична (гравітаційна й електромагнітна) дія комет, що близько пролітають повз Землю, як наприклад, комета Хіякутаке в 1996 р., практично є нульовою. Кометні атоми або молекули в більшості випадків не проникають у земну атмосферу.

Велику паніку серед марновірної частини населення Землі викликала поява яскравої комети Гейла–Боппа в 1997 р. (рис. 2). Одна з американських сект, глава якої вселив сектантам, що комета «прийшла» за ними і «кличе» до царства небесного, але для цього члени секти, включаючи жінок і дітей (близько 40 осіб), повинні покінчити життя самогубством, поки комету ще видно. Так і трапилося — вся секта наклала на себе руки за наговором цього шарлатана.

Інша справа, коли відбувається зіткнення крижаного ядра якоїсь комети або астероїда із Землею. Це, можна сказати, майже єдина можливість спричинити істотні зміни на нашій планеті. Так, очевидно, і відбулося 65 млн. років тому, коли, як припускають учені, на Землю в південній частині півострова Юкатан (Мексика) впало 10-кілометрове крижане ядро комети. У результаті зіткнення і вибуху величезної сили, еквівалентного вибуху мільйонів мегатонн бомб, у земну атмосферу було викинуто величезну кількість пилу, сажі, газів. Це призвело до утворення щільного газо-пилового шару, що оточив планету і закрити на декілька місяців доступ сонячних променів, а отже, світла і тепла, на поверхню Землі. Це, у свою чергу, спричинило зниження температури ґрунту до -50°C . Тоді на нашій планеті настала зима, що тривала впродовж якогось часу. Це могло стати головною причиною глобального вимирання динозаврів, які царювали в ту епоху на Землі. Можливо, на їхню загибель вплинули також отруйні кометні гази, що виділилися з кометного ядра під час його руйнування спочатку в атмосфері, а потім під час зіткнення з поверхнею планети.

Комети цікавлять учених, по-перше, через те, що кометні ядра є реліктовою «цеглою», з якої утворилася Сонячна система. Комети зберігають первинну речовину як свідчення про ранню стадію зародження Сонця і планет 4,6 млрд. років тому; по-друге, комети — це своєрідні індикатори фізичних умов у міжпланетному середовищі й засіб діагностики міжпланетної плазми, сонячного вітру і спалахів сонячних космічних променів, причому як на малих, так і на великих геліоцентричних відстанях і геліографічних широтах; по-третє, комети — природні космічні лабораторії, в яких відбуваються унікальні фізичні явища, неможливі для відтворення в земних лабораторіях; по-четверте, існує вірогідність зіткнення ядра комети із Землею, наслідком якого може бути глобальна катастрофа. Прикладами таких зіткнень є

Тунгуський «метеорит» (1908 р.) і комета динозаврів 65 млн. років тому.

Крім усього іншого, комети зіграли велику роль у розвитку науки, особливо фізики, математики і космонавтики. Так, завдяки кометі Галлея був перевірений і тріумфально підтверджений закон всесвітнього тяжіння. Коли вона повернулася в 1759 р., як і передбачала наука, що тоді зароджувалася, — небесна механіка (Е. Галлей, 1709), закон всесвітнього тяжіння був беззастережно прийнятий усіма вченими як один із фундаментальних законів природи.

Перший молекулярний спектр був отриманий у 1864 р. Дж.Б. Донаті (1826–1873) для комети 1864 II, який пізніше правильно був пояснений сером У. Хаггінсом (1824–1910) як спектр молекули Карбону (смуги Свана). Це стало поштовхом для перших кроків молекулярної спектроскопії. Кометні хвости демонстрували реальність тиску світла на тверді тіла і гази, що було доведено у XIX–XX ст. теоретично й експериментально (Фрідріх Бессель, Джеймс Максвелл, Федір Бредіхін, Петро Лебедев).

Для розв'язування рівнянь руху комет було розвинуто нові методи чисельного інтегрування диференціальних рівнянь (Дж.К. Адамс, П. Коуелл та ін.). Дослідження динамічної еволюції комет показало різкі зміни їх орбіт у полі тяжіння планет, що було використано в космонавтиці для маневрів пертурбацій космічних апаратів у полі тяжіння планет Сонячної системи для точної доставки апарата в будь-яку точку Сонячної системи [1–2].

З метою докладного вивчення багатьох загадкових явищ у кометах і встановлення зв'язку речовини



Рис. 1. Комета Галлея 7 січня 1986 р. Спостерігачі — К.І. Чурюмов і Д.І. Городецький



Рис. 2. Комета Гейла–Боппа 1 квітня 1997 р. Спостерігач — К.І. Чурюмов

крижаних кометних ядер з реліктовою речовиною протопланетної хмари вчені та інженери розробили, здійснили і продовжують здійснювати космічні місії до ядер періодичних комет [3].

2. ПЕРШІ КОСМІЧНІ МІСІЇ ДО ЯДЕР КОМЕТ ГАЛЛЕЯ І ДЖАКОБІНІ–ЦІННЕРА

Уперше в історії науки у космічний простір було відправлено два радянських космічних кораблі «Вега-1» і «Вега-2» з метою пролетіти поблизу ядра знаменитої комети Галлея. Вони стартували з космодрому Байконур 15 та 21 грудня 1984 р. і спочатку взяли шлях у напрямку до планети Венера, щоб скинути в її атмосферу два наукових зонди, а також за допомогою її гравітаційного поля зробити маневр, який точно направив би їх в околиці ядра комети Галлея. Ось чому апарати назвали «Вега» — по перших двох літерах слів «Венера» і «Галлей». Так все і відбулося. Обидва апарати успішно впоралися зі своїм завданням поблизу Венери, отримавши нові результати про її атмосферу, а потім точно за розкладом 6 і 9 березня 1986 р. вони пролетіли поблизу ядра комети. Спочатку «Вега-1» пройшла на відстані 8879 км від ядра, а «Вега-2» — на відстані 8045 км. Під час прольоту на величезній швидкості (77 км/с) відносно ядра «Веги-1» і «Веги-2», а потім і європейського апарата «Джотто», який за їх допомогою пролетів 14 березня 1986 р. на відстані 605 км від ядра, було вперше виконано головне завдання — фотографування загадкового ядра комети Галлея (рис. 3–4).

Воно виявилось гігантською монолітною брилою розміром $15 \times 8 \times 8$ км, масою близько 300 млрд. тонн, що складається з 80% водяного льоду з домішками органічного і мінерального пилу і обертається з періодом 2,2 доби навколо своєї осі. Ядро виявилось незвичайно чорним, таким, що відбиває лише 4% сонячного світла, і дуже пористим: його щільність становила близько $0,1 \text{ г/см}^3$. Під час кожного проходження комети Галлея поблизу Сонця її крижане з домішками ядро зменшується на 6 м, тобто за 30 її датованих проходжень, починаючи з 12 р. до Р. Х., кометне ядро «схудло» на 180 м. Повністю воно розтане приблизно через 600–700 тисяч років. Так вперше була розв'язана загадка тисячоліть: що ж є кометними ядрами (рис. 3).

Крім того, було вивчено фізичні характеристики газопилової атмосфери, плазмового хвоста і магнітного поля комети. Ці дані було отримано за допомогою двох японських апаратів «Суїсей» («Комета») і «Сакігаке» («Піонер»), що досліджували далекі околиці комети, відповідно на відстанях 151 000 км (8 березня 1986 р.) і 7 млн. кілометрів (11 березня 1986 р.). Проте першим космічним кораблем, який за півроку до тріумфального прольоту 5 космічних кораблів поблизу ядра комети Галлея зближувався з ядром комети Джакобіні–Ціннера на відстань 10 000 км, став Міжнародний кометний дослідник (International Cometary Explorer, ICE), запущений NASA і який уперше виміряв значення індукції магнітного поля в плазмовому хвості цієї комети (100 нТл). Проте на його борту не було відеокамери, і про ядро цієї комети нам нічого не відомо.

3. МІСІЯ «ДІП СПЕЙС-1» (DEEP SPACE-1) ДО ЯДРА КОМЕТ БОРЕЛЛІ

Космічний апарат «Діп Спейс-1» 22 вересня 2001 р. наблизився до короткоперіодичної комети 19P/Борреллі на відстань 2 171 км і сфотографував її ядро (рис. 5). Якість одержаних знімків ядра

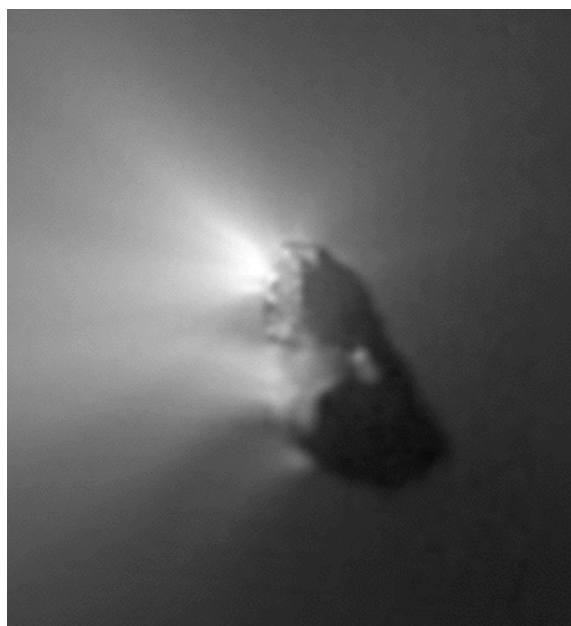


Рис. 3. Ядро комети Галлея 14 березня 1986 р. Фото «Джотто»

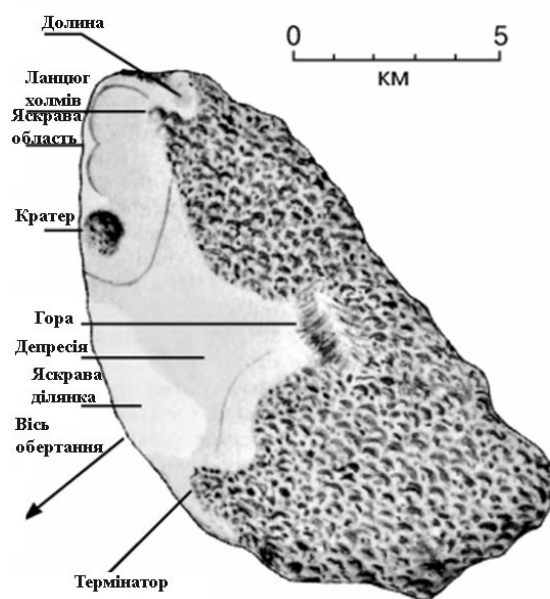


Рис. 4. Карта поверхні ядра комети Галлея

комети Бореллі набагато перевершувала якість знімків ядра комети Галлея, одержаних у 1986 р. За формою ядро розміром $8 \times 3,5$ км нагадувало картоплину. На поверхні ядра видно різноманітні структури, включаючи долини, гори і западини. По всій поверхні ядра розсіяно темні ділянки. Гладкі рівнини, на яких переважають світліші структури, концентруються в середній частині ядра. З цими структурами, можливо, пов'язане утворення пилових і газових струменів (джетів), що поповнюють своєю речовиною кому.

4. МІСІЯ «СТАРДАСТ» (STARDUST) — ПИЛИНКИ З ХВОСТА КОМЕТИ ДОСТАВЛЕНО НА ЗЕМЛЮ

Космічний апарат «Стардаст» стартував з мису Канаверал 7 січня 1999 р., зробив три витки навколо Сонця і 2 січня 2004 р. пролетів на відстані 236 км від ядра періодичної комети Вільда 2. При цьому зближенні було одержано найдетальніші з усіх отриманих раніше зображення поверхні ядра комети з високою роздільною здатністю. Розмір ядра — $1,65 \times 2,00 \times 2,75 \pm 0,05$ км, альbedo дорівнює $0,03 \pm 0,0153$.

На зображеннях ядра комети, одержаних «Стардастом», видно загострені піки висотою 100 м і кратери глибиною понад 150 м. Деякі кратери мають круглі центральні западини, оточені викинутою з надр ядра кометною речовиною, тоді як інші кратери мають абсолютно плоске дно й прямі стіни. Діаметр найбільшого кратера, названого «Ліва ступня», становить 1 км, а це 1/5 усього 5-кілометрового ядра комети Вільда 2.

Іншим сюрпризом була велика кількість (понад 25) і активність джетів частинок, що витікають з різних ділянок поверхні ядра. Перед зближенням передбачалося, що джети мають викидатися на короткій відстані від ядра, потім дисипувати (випаровуватися), утворюючи гало, що світиться навколо ядра комети Вільда 2. Замість цього деякі надшвидкі джети залишалися вузькими, як струмінь води, що витікає з потужного садового брандспойта. Ці джети ускладнили ситуацію для космічного апарата «Стардаст» під час його зближення з ядром комети Вільда 2 (рис. 6). Зонд «Стардаст» буквально зрешетився мільйонами частинок за секунду під час його прольоту крізь три гігантських джети.

Дванадцять таких частинок, деякі з них були більшими за кулю, проникли крізь верхній шар захисного екрана космічного апарата. Упродовж 6-річного польоту до ядра комети Вільда 2 космічний апарат «Стардаст» за допомогою спеціальної пастки, в комірки якої було укладено блоки спеціальної речовини малої щільності — аерогелю (його склад такий самий, як і скла, але в 1000 разів менший за його щільність), проводив збір міжзоряної речовини, потік якої був виявлений у Сонячній системі в напрямку від сузір'я Стрільця, і збір кометних частинок поблизу ядра комети Вільда 2. Частинки проникали в аерогель, утворюючи треки, що нагадують пуголовків, гальмувалися і застрягали в аерогелі наприкінці треків. Порошинки також стикалися з екраном із алюмінієвої фольги, залишаючи в ній сліди у вигляді мікрократерів.

Капсула з кометними і міжзоряними порошинками повернулася на Землю 15 січня 2005 р. і була доставлена в дослідну лабораторію в Берклі (США). Відразу ж після перегляду комірок пастки близько 25 треков-«пуголовків» було виявлено неозброєним оком у деяких блоках аерогелю. Сотні інших частинок було знайдено тільки за допомогою спеціального мікроскопа, причому багато з них уже виявлено аматорами, які долучилися до пошуків міжзоряних і кометних частинок за програмою Stardust@home.

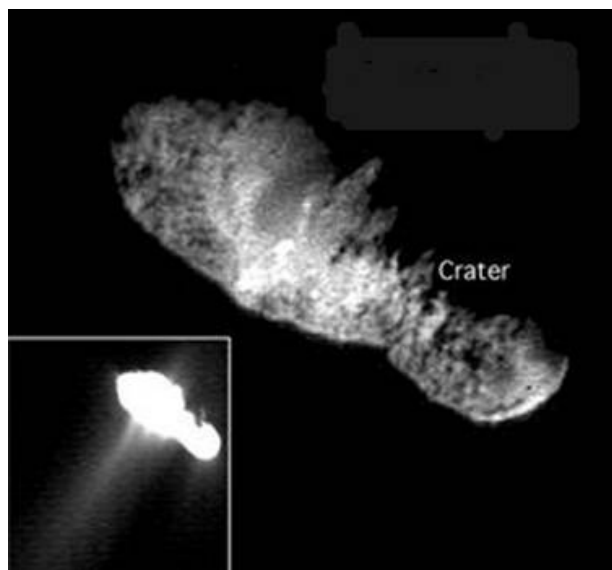


Рис. 5. Ядро комети 19P/Борреллі 23 вересня 2001 р. Фото «Діп Спейс-1»

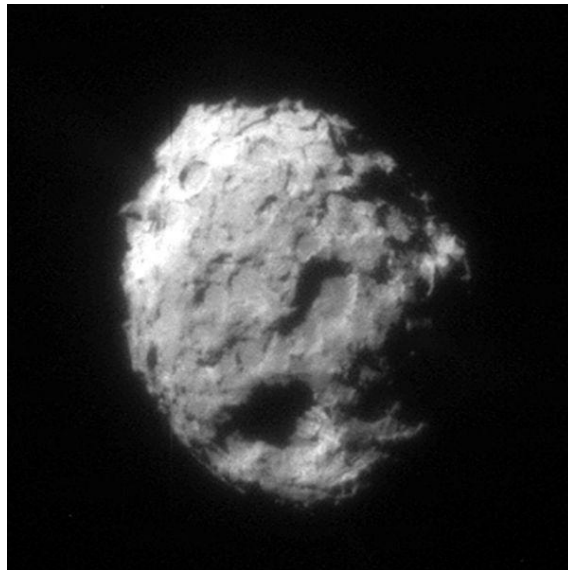


Рис. 6. Ядро комети 81P/Вільда 22 січня 2005 р. Фото «Стардаст»

Аналіз уже знайдених в аерогелі кометних частинок показав, що в кожній четвертій з них наявні «високотемпературні» мінерали, такі як форстерит і кальцієво-алюмінієві включення (CAIs), що формуються за температур, вищих за 1000°C. Також було знайдено інші несподівані «інгредієнти», мінерали, багаті титаном, і олівін. Але комети формувалися в холодних зовнішніх ділянках ранньої Сонячної системи, де міг існувати лід, і ніколи не зазнавали такого нагрівання. А це означає, що їх історія куди складніша, ніж передбачалося раніше, і вони є сумішшю компонентів, сформованих у різних ділянках молодшої Сонячної системи як на периферії, так і поблизу її центра за умов дуже високої температури.

Цілком можуть бути, принаймні, дві можливості для появи «високотемпературних» мінералів у складі комет. Перша: існує гіпотеза про сильний зоряний вітер і могутні викиди корональної плазми молодого Сонця (що проходило стадію зорі Т Тільця), які видували в зовнішні ділянки планетної системи, що зароджується, краплини розплавів із центрального району. Друга гіпотеза полягає в тому, що дані мінерали були сформовані біля інших зір і лише потім, після «мандрів» Галактикою, проникли і перемішалися з речовиною Сонячного протопланетного диска. Науковий керівник проекту Stardust, професор Дональд Браунлі (Donald Brownlee) з університету Вашингтона вважає, що детальний ізотопний аналіз цих мінералів, імовірно, допоможе віддати перевагу одній з цих гіпотез.

Космічний апарат «Стардаст», з успіхом виконавши свою основну програму, продовжує політ по геліоцентричній орбіті. Оскільки всі прилади апарата продовжують функціонувати, було запропоновано переорієнтувати його політ до комети Темпель 1 — головної мети місії «Діп Імпект» (Deep Impact). Нова місія «Стардаста» отримала назву «Стардаст-нект» (Stardust-NexT — **N**ew **E**xploration of **T**empe**l**). Однією з її основних цілей було зблизитися в 2011 р. з ядром комети Темпель 1 і сфотографувати штучний кратер на її ядрі, що утворився внаслідок удару імпаکتора «Діп Імпекта» з ядром комети Темпеля 1.

5. МІСІЯ «ДІП ІМПЕКТ» (DEEP IMPACT) — ПОСТРІЛ У ЯДРО КОМЕТИ І ПЕРЕВІРКА УТВОРЕННЯ УДАРНОГО КРАТЕРА НА НЬОМУ

Космічний апарат «Діп Імпект» стартував з космодрому Кенеді 12 січня 2005 р. 3 липня 2005 р. зонд зближувався з короткоперіодичною кометою сімейства Юпітера Темпеля 9P/Tempel 1 і з нього на ядро комети був направлений імпактор, що складається із 49% міді, 24% алюмінію і 25% інших матеріалів, зокрема 6,5 кг невикористаного гіدразину (N_2H_4) [5].

4 липня 2005 р. імпактор зі швидкістю 10,3 км/с врізався в ядро комети Темпеля 1. Причому в міру зближення з ядром відеокамера, що була встановлена на імпакторі, передавала детальні зображення ядра аж до 4 с до зіткнення.

Пролітний модуль «Діп Імпект» у цей час наблизився до ядра комети на 500 км і зафіксував удар імпаکتора по ядру комети. Однією з головних цілей пролітного модуля було одержання чітких зображень штучного ударно-вибухового кратера на поверхні ядра комети. На жаль, під час вибуху із внутрішніх ділянок ядра була викинута величезна хмара дрібних крижинок із вкрапленням порошків, яка заекранувала кратер, і пролітний модуль не зміг сфотографувати цей новий кратер на ядрі комети Темпеля 1 і визначити його діаметр і глибину. Цей дуже важливий результат уможливив би перевірку реальності моделей багатьох дослідників, у тому числі й розробленої в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (В. Кручиненко, К. Чурюмов і Л. Чубко [6, 7]).

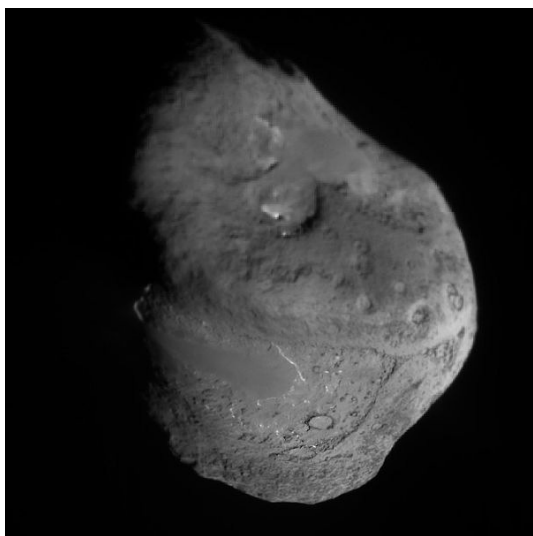


Рис. 7. Ядро комети 9P/Темпеля. Фото КА «Діп Імпект» 5 липня 2005 р.

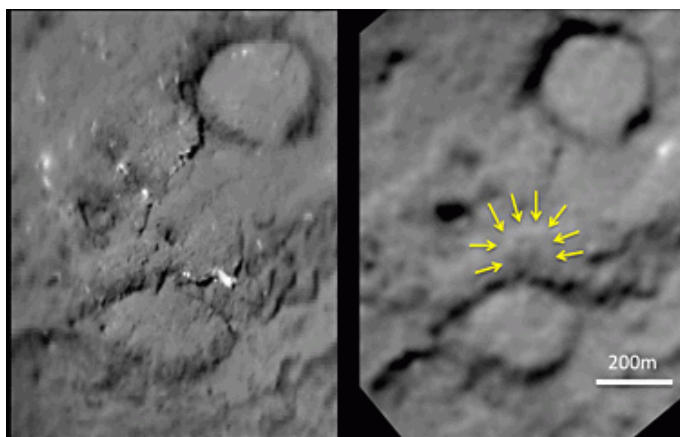


Рис. 8. Зображення тієї ж самої ділянки на ядрі комети 9P/Темпеля 1, отримані в 2005 р. (ліворуч) і в 2011 р. (праворуч)

У рамках цієї моделі, що ґрунтується на ідеї Епіка про використання закону збереження імпульсу під час руху імпактора в поверхневому шарі мішені [9], було виведені рівняння, що пов'язують діаметр D і глибину штучного кратера h , щільність ρ і міцність на стиснення σ_p речовини поверхневого шару кометного ядра з діаметром d і щільністю ударника δ , вистріленого із космічного апарата «Діп Імпект»:

$$\frac{h}{d} = 1,785 \cdot \left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{V^2}{\sigma_p}\right)^{1/30} \cdot \cos Z \quad (1)$$

та

$$\frac{D}{d^{3/2}} = 1,20 \cdot \left(\frac{kV\delta}{h}\right)^{1/2} \cdot (\rho\sigma_p)^{-1/4}. \quad (2)$$

де v — швидкість ударника; Z — кутова зенітна відстань траєкторії ударника; k — безрозмірний коефіцієнт передачі радіального імпульсу.

Підставляючи в рівняння (1) і (2) швидкість зіткнення $v = 10,3$ км/с, густину речовини імпактора $\delta = 7,0 \dots 8,9$ г/см³, густину речовини кометного ядра $\rho = 0,5 \dots 1,0$ г/см³, міцність речовини кометного ядра $\sigma_p = 10,100$ кН/м², еквівалентний діаметр сферичного ударника $d = 43,0 \dots 46,6$ см, безрозмірний коефіцієнт передачі імпульсу $k = 2,45$, з формули (1) отримуємо, що глибина кратера становитиме $h = 5 - 6$ м, а діаметр кратера, який визначається за формулою (2), дорівнюватиме $D = 40 \dots 80$ м.

З іншого боку, вчені команди «Діп Імпект» вважають, що діаметр кратера має бути $D \sim 110$ м і глибина $h \sim 27$ м, приймаючи при цьому вкрай низьке значення міцності речовини кометного ядра $\sigma_p = 65$ Н/м² (65 Па), що не уявляється реальним, оскільки навіть пористих метеорних пилових куль в атмосфері Землі (за Уіпплом) становить 1 кН/м². Реальність тієї або іншої моделі мала бути підтверджена космічним апаратом «Стардаст» (космічна місія Некст), який у 2011 р. зблизився з ядром комети Темпеля 1 і сфотографував штучний кратер на ньому.

«Стардаст-Некст» 14 лютого 2011 р. наблизився до ядра комети 9P/Темпеля 1 на відстань 181 км і отримав детальні знімки поверхні ядра комети 9P, у тому числі й місця падіння мідно-алюмінієвого імпактора в 2005 р. Аналіз цих знімків дав змогу виявити штучний ударний кратер, утворений за шість років до прильоту до ядра космічного апарата «Стардаст». Ототожнення, проведене американською командою, показало нібито наявність цього кратера поблизу валу одного зі старих ударних кратерів (відмічено стрілками на сайті команди «Стардаст-Некст»).

Американські вчені вважали, що діаметр цього кратера (на нашу думку, псевдократера) становить близько 150 м, якщо вимірювати його за світлою кільцевою окантовкою, позначеною стрілками на рис. 8. Проте кратер — це насамперед вирва, і саме за нею має визначатися діаметр кратера, який, як свідчать прості вимірювання, не перевищує 67 м. Якщо ж за розміри кратера приймати окантовку навколо вирви з викинутою із кратера кометною речовиною, то тоді діаметр кратера Тіхо, з якого викинута місячна речовина засипала майже половину поверхні нашого супутника, слід вважати таким, що дорівнює не 240 км, а понад 4 000 км.

Проте, застосовуючи програму обробки зображень О.П. Кучерова, за допомогою якої зображення частково звільняється від дифракційних спотворень, ми отримали зовсім інше положення цього штучного кратера на ядрі: він розміщується всередині вже існуючого ударного кратера на поверхні ядра комети 9P, у його правому верхньому куті (показано чорною стрілкою). Діаметр вирви кратера становить 61 м, що близько до оцінок діаметра кратера за нашою моделлю. Діаметр по розкиданому навколо вирви ґрунту дорівнює 148 м, а діаметр вирви — 61 м з точністю до 1,5 м, що добре збігається з оцінкою діаметра цього кратера згідно із моделлю, запропонованою київськими астрономами. На міжнародній конференції АСМ 2012 в м. Ніїгати (Японія) було визнано, що діаметр штучного кратера на ядрі комети 9P/Темпеля 1 дорівнює 50–60 м, а це і впливає з київської моделі. Також американська команда погодилась з фактом неправильного ототожнення положення штучного кратера на ядрі комети 9P.

6. МІСІЯ РОЗЕТТА (ROSETTA) — ПРОЕКТ ТИСЯЧОЛІТТЯ

КА Розетта стартував 2 березня 2004 р. з космодрому Куру (Французька Гвіана) в напрямку до ядра короткоперіодичної комети Чурюмова–Герасименко (67P/Churyumov–Gerasimenko) [8].

Назва місії — аббревіатура назви проекту англійською мовою, яка вдало збігається з назвою стародавнього міста Розетта, яке знаходилося у дельті річки Ніл і поблизу якого французьким капітаном армії Наполеона П'єром Бушаром 15 липня 1799 р. була знайдена базальтова плита або, інакше, знаменитий «Розеттський камінь». На ньому збереглися записи одного і того ж самого тексту, але трьома мовами: давньоєгипетською (ієрогліфами), коптською (єгипетським демотичним шрифтом) та давньогрецькою. Коптську та старогрецьку мову знали добре і це дало можливість вперше Томасу Янгу і Жану Франсуа Шампольйону в 1822 р. розшифрувати давньоєгипетські ієрогліфи, що дозволило відкрити всьому світу дуже цікаву історію стародавнього Єгипту. Ці три тексти були нанесені на плиту в 196 р. до Р.Х. і являли собою подячний напис єгипетських жерців царю Птолемею V Епіфану, який керував Єгиптом в 204–180 рр. до Р.Х. Розеттський камінь зберігається в Лондоні в Британському музеї.

Символічна назва місії Розетта і полягає в тому, що ядро комети Чурюмова–Герасименко, після посадки на нього посадкового модуля, який доставить до ядра космічний апарат “Розетта”, зіграє своєрідну роль “Розеттського” каменю для розшифровки таємниць крижаних кометних ядер — носіїв загадкової реліктової речовини Сонячної системи, а від неї прямий шлях до вирішення фундаментальних проблеми космогонії Сонячної системи і походження життя на Землі.

Як же була відкрита комета, якій судилося стати “Розеттським” каменем?

Влітку 1966 р. кафедра астрономії Київського державного університету імені Т.Г.Шевченка спорядила і відправила першу кометну експедицію до Таджикистану на гору Санглок з метою спостережень і пошуків комет як фотографічними, так і візуальними засобами. У 1968 р. вже Друга кометна експедиція КДУ проводила спостереження і пошуки комет в Туркменістані на горі Душак.

У 1969 році ми зі Світлою Іванівною Герасименко, яка тоді була аспірантом професора С.К.Всехсвятського, у складі Третьої кометної експедиції КДУ відправилися в Казахстан в Алматинську обсерваторію Астрофізичного інституту імені академіка АН СРСР В.Г.Фесенкова. Нашу увагу привернув наявний там світлосильний 0,5-метровий менісковий максутівський рефлектор. З його допомогою було організовано патрулювання декількох короткоперіодичних комет сімейства Юпітера. Ми відзняли багато фотоплатівок і виконали їх дослідження. На одному із знімків майже в центрі платівки був знайдений слабкий дифузний об’єкт, який спочатку ми прийняли за періодичну комету Комас–Сола, яку ми і знімали на ці ж платівки. Пізніше, коли ми повернулися з експедиції до Києва, то з’ясували, що цей об’єкт за координатами відрізняється на 2 градуси від теоретичного положення комети Комас–Сола. Це викликало у нас здивування, і ми почали шукати таємничий об’єкт на інших знімках. І ще на чотирьох знімках, майже на самому краю платівок, виявили цей же об’єкт. П’ять його точних положень, визначених по знімках, давали можливість точно обчислити орбіту комети. Вона виявилася еліптичною і належала досі невідомій короткоперіодичній кометі з періодом обертання навколо Сонця 6,5 років. Про наше відкриття ми повідомили в Центральне бюро астрономічних телеграм в США доктору Б. Марсдену, де фіксуються відкриття об’єктів Всесвіту і Сонячної системи. Через кілька днів нам прийшло повідомлення, що це дійсно нова комета і її зареєстрували як комету 1969h або комету Чурюмова–Герасименко. Зараз ця комета має постійний номер 67P у всіх каталогах комет (комета Галлея, наприклад, має номер 1P). З моменту відкриття ця комета вже поверталася до Землі 7 разів. Перед її сьомою появою поблизу Сонця до комети відправлений КА “Rosetta”, який досягне її ядра в 2014 р. І разом з ним комета пройде перигелій у восьмий раз у 2016 р.

Цікавою виявилася і динамічна історія комети 67P, тобто еволюція її орбіти в минулому. Виявилось, що за 10 років до відкриття в 1959 р. комета пройшла від Юпітера на дуже близькій відстані в 0,05 а.о. або 7,5 млн. км, що істотно трансформувало всі елементи її орбіти і головним чином перигелійну відстань, яка до цього зближення перевищувала 2,5 а.о., а після зближення зменшилася до 1,3 а.о. Саме після такої помітної зміни орбітальних елементів комета стала доступною для наземних фотографічних спостережень з телескопами, завдяки чому, потрапивши в поле зору нашого меніскового телескопа в Алма-Аті, і була відкрита автором цієї статті і Світлою Герасименко.

У 1982 р. комета зблизилася з Землею до 0,39 а.о. і тоді склалися найкращі умови її видимості з Землі — її спостерігали на багатьох обсерваторіях Землі, а також численні любителі астрономії. Комета в максимумі досягла 9-зоряної величини і її спостерігали навіть за допомогою біноклів. 12–13 січня 1983 р. К. Чурюмов та І. Караченцев отримали її фотографії за допомогою найбільшого в той час 6-метрового телескопа на Кавказі. Був також отриманий ультрафіолетовий спектр комети з супутника IUE.

У 2003 р. космічним телескопом Хаббла була отримана серія зображень комети 67P, на підставі яких було побудовано модельне зображення ядра комети. У плані комета має форму хреста, а в інших проекціях нагадує капелюх. Розмір ядра 5×3 км, а період обертання навколо власної осі 12 годин, тобто доба на кометі складає половину земної доби.

У лютому 2004 р. відкривачі комети 67P за запрошенням генерального директора Європейського космічної агенції Жан-Жака Дордена вилетіли з Парижа спеціальним рейсом до Французької Гвіани в Південну Америку на космодром Куру, де велися приготування до старту ракети Аріан 5 із Розеттою на борту.

Запуск ракети Аріан намічався на 4 години 16 хвилин 00 секунд (за всесвітнім часом) 26 лютого 2004 року. Однак через сильний вітер у високих шарах атмосфери, хмарність і дощ старт був перенесений на ранок 27 лютого. Але й друга спроба на наступний день зірвалася через несправності теплоізоляції одного з двигунів ракети Аріан. Так як вікно для запуску «Розетти» до комети було відкрито ще до 21 березня 2004 р., то після виправлення прикрої несправності з теплоізоляцією 2 березня 2004 р. в 7:17:44 UTC з майданчика ELA3 космодрому Куру у Французькій Гвіані успішно стартувала ракета-носіїв Ariane-5G+ (це за рахунком був 158 пуск ракети Аріан на космодромі Куру), яка вивела в космос європейський міжпланетний зонд Rosetta (28169/2004 006A). Через 2 години 15 хвилин після старту відбулося успі-

шне відділення КА Розетта від другого ступеня ракети, розкрилися панелі сонячної батареї, після чого КА Розетта з посадковим модулем Філі вийшла на задану траєкторію польоту. Через кілька днів польоту, коли орбіта стабілізувалася, небесні механіки прорахували детальний сценарій місії, згідно з яким Розетта, щоб з розрахунковою точністю наблизитися до ядра комети Чурюмова–Герасименко, повинна зробити три гравітаційних маневри поблизу Землі і один біля Марса.

Розетта, зробивши свій перший виток навколосонячною орбітою в березні 2005 р., повернулася до Землі і, отримавши від неї перший гравітаційний імпульс, попрямувала навколо Сонця до Марса. У березні 2007 р. другий виток Розетти вже злегка витягнутою навколосонячною орбітою і завершився прольотом поблизу червоної планети на висоті 250 км, оскільки саме на такій пролітній висоті над Марсом «Розетта» отримала від нього другий прискорюючий гравітаційний імпульс, який ще більше розтягнув навколосонячний орбітальний еліпс «Розетти» і відправив її до Землі. При прольоті поблизу Марса прилади «Розетти» провели детальне картографування поверхні Марса та інші дослідження. У листопаді 2007 р. пролітаючи поблизу Землі, Розетта отримала третій гравітаційний імпульс на своєму третьому витку і відправилася до Сонця по ще більше витягнутій орбіті.

Обігнувши Сонце, Розетта 5 вересня 2008 р., перебуваючи в головному поясі астероїдів, наблизилася на 850 км до астероїда Штейнс (№ 2867) і передала на Землю, його зображення та інші наукові дані про нього. Ця мала планета була відкрита 4 листопада 1969 р. Миколою Степановичем Чернихом в Криму і названа на честь відомого латиського астронома професора Карла Августовича Штейнса — фахівця з космогонії комет. Що стосується астероїда Штейнс, відзначимо, що це високоальбедний астероїд діаметром близько 4,6 км і альбедо 0,35, рухається по еліптичній орбіті з великої півосі а.о., ексцентриситетом і нахилом $i = 9,9^\circ$. Незважаючи на маленькі розміри, астероїд Штейнс вкритий численними кратерами — їх знайдено 23 з діаметрами понад 200 м. Вражає ланцюжок з 8 кратерів (восьмий на краю найбільшого кратеру на астероїді — рис. 9) на поверхні цього невеликого небесного тіла. Імовірно, що цей ланцюжок кратерів утворився внаслідок зіткнення астероїда з іншим невеликим астероїдом, який розділився в полі тяжіння астероїда Штейнса на вторинні фрагменти перед зіткненням.

Повертаючись з поясу астероїдів до Сонця, Розетта в листопаді 2009 р. знову пролетіла поблизу Землі і, зробивши свій четвертий гравітаційний маневр, перейшла на остаточну орбіту польоту до комети Чурюмова–Герасименко. Обігнувши втретє Сонце, Розетта 10 липня 2010 р. пролетіла поблизу великого астероїда Лютеція (№ 21) діаметром понад 100 км і сфотографувала його. Астероїд 21 Лютецію відкрив 15 листопада 1852 р. Г.Гольдшмідт. Астероїд рухається еліптичною орбітою з великою піввіссю 2,4 а.о., ексцентриситетом 0,16 і нахилом $i = 3,1^\circ$. Його уточнені розміри $(121 \pm 1) \times (101 \pm 1) \times (75 \pm 13)$ км, геометричне альбедо 0,19, період обертання навколо осі 8,17 год, температура поверхні 170–245 К. Його поверхня вкрита численними кратерами (понад 350) діаметрами від 600 м до 55 км.

Після прольоту поблизу Лютеції всі прилади «Розетти» були переведені в «сплячий» режим майже на 4 роки до підльоту до ядра комети. На зображенні комети Чурюмова–Герасименко, отриманому 3 травня 2003 р. за допомогою «Дуже великого телескопа» — Very Large Telescope Європейської Південної обсерваторії в Чилі групою спостерігачів, очолюваних доктором Ритою Шульц (яка є заступником наукового керівника космічного проекту Розетта) добре розрізняються всі структури комети 67Р: темна сферична область — голова (кома з ядром 3×5 км) і два хвосты — вузький довгий хвіст, спрямований до Сонця, і короткий, спрямований у протилежний бік. Це пилові хвосты, що утворилися в результаті викиду пилових частинок з ядра комети і сконцентровані в площині орбіти комети, матеріалізуючи таким чином орбіту, вздовж якої рухається ядро комети. А в 1983 р. у цієї комети спостерігався вузький плазмовий хвіст, який був детально вивчений кандидатом фіз.-мат. наук астрономом-дослідницею комет Наталією Шабас (трагічно загиблої у віці 33 років в 2003 р.), яка вираховувала за власною формулою по фотометричним профілям яскравості хвоста значення індукції магнітного поля в ньому, яке виявилось

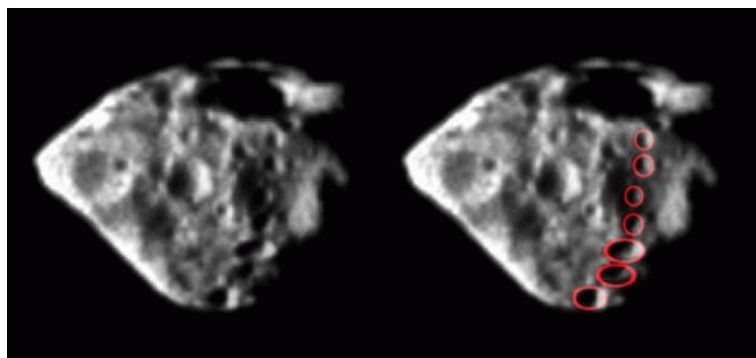


Рис. 9. Астероїд Штейнс. Фото КА «Розетта». Вражає ланцюжок з 8 кратерів (восьмий на краю найбільшого кратеру на астероїді) на поверхні невеликого небесного тіла.

більше 100 нТл, що майже в 2 рази більше, ніж у хвості комети Галлея. Звідси Н. Шабас зробила висновок, що прямий короткий хвіст комети 67Р, що спостерігався в січні 1983 р., являє собою замагнічений пиловий джет. На підставі досліджень Н. Шабас і з подальших спостережень пилових структур в атмосфері комети 67Р автор цієї статті висловив гіпотезу, що поверхня і підповерхневі шари ядра комети 67Р насичені магнетитовими мікросферулами діаметрами від 1 до 100 мікрон, що є джерелом утворення пилових плазмових джетів, які час від часу спостерігаються у цієї комети. Посадка модуля Філі на ядро комети 67Р в 2014 р. дозволить за допомогою його приладів перевірити достовірність цього припущення.

У травні 2014 р. «Розетта» знизить свою швидкість щодо ядра комети до 2 м/с, наблизиться до нього відстань 25 км і перейде на орбіту штучного супутника навколо ядра комети Чурюмова–Герасименко. Всі прилади Розетти будуть «розбуджені» і приведені в повну готовність, щоб розпочати систематичні дослідження ядра і навколоядерної області комети. У цей час буде проведено повне і детальне картографування поверхні ядра комети, яке дозволить вперше в світі побудувати «глобус» ядра комети. Докладний аналіз рельєфу ядра комети дасть можливість обрати п'ять майданчиків на його поверхні для безпечної посадки посадкового модуля Філі. У листопаді 2014 р. буде проведений найскладніший і головний етап всієї місії Розетта — відділення від орбітального модуля посадкового зонду Філі і посадка його на один з п'яти обраних для цієї мети безпечних майданчиків на ядрі комети. При цьому буде включений двигун на Філі, який погасить швидкість зонда до значення, меншого 1 м/с. Філі зробить м'яку посадку спершу на одну з трьох його ніжок. При торканні другою ніжкою з зонда висунеться спеціальний гарпун, який, проникнувши в кометний ґрунт, закріпить модуль Філі на кометному ядрі і зробить його положення надійно стійким. Після закріплення Філі на кометному ядрі дев'ять високоточних наукових приладів, що встановлені на ньому, по команді з Землі будуть «розкохлені» і приступлять до головної задачі місії — комплексного дослідження загадкової реліктової речовини кометного ядра і Сонячної системи.

Філі — це унікальний науковий контейнер масою близько 21 кг. На ньому встановлено дев'ять приладів: спектрометр альфа-променів, протонів і рентгенівських променів (АРХ) для дослідження елементного складу кометної речовини; газо-хроматограф і мас-спектрографи КОЗАК і МОДУЛУС/ПТОЛЕМЕЙ — для дослідження хімічного складу, ізотопного складу та ідентифікації складних органічних молекул в кометній речовині; СЕЗАМ — для акустичного дослідження речовини поверхневого шару ядра, вимірювання діелектричних властивостей середовища, що оточує ядро, і моніторингу зіткнень з пиловими частками; МУПУС — для вивчення фізичних властивостей речовини комети; КОНЦЕРТ — для дослідження електричних характеристик всього ядра і його внутрішньої структури; РОМАП — для дослідження кометного магнітного поля і його взаємодії з сонячним вітром; СІВАА для отримання зображень рельєфу ядра в місці посадки Філі і РОЛІС — для забезпечення буріння кометного ґрунту і дослідження речовини, яка знаходиться під поверхневим шаром ядра на глибині порядку 60 см а також



Рис. 10. Астероїд Лютеція. Фото КА «Розетта»

для вивчення розподілу і величини електричних зарядів на ядрі і в зразку кометного ґрунту, який буде поміщений в спеціальний колектор.

На орбітальному модулі Розетти будуть працювати наступні прилади: ОЗІРІС, АЛІСА, ВІРТІС, МІРО — для отримання дистанційним шляхом прямих зображень поверхні ядра і спектральних досліджень ядра і навколоядерної області; РОЗИНА, КОЗИМА, МІДАС — для аналізу хімічного складу кометної речовини, КОНЦЕРТ — для дослідження великомасштабної структури ядра спільно з аналогічним приладом, встановленим на модулі Філі; Гіади — для дослідження потоку пилу і розподілу пилових частинок за масами; РПС — для дослідження кометної плазми і її взаємодії з сонячним вітром; РСІ — для дослідження комети за допомогою радіохвиль.

З модуля Філі наукові дані, отримані кожним із його дев'яти високоточних і чутливих приладів, будуть передаватися на орбітальний модуль Розетта, а звідти за допомогою радіотелескопу разом з даними, отриманими 11 приладами Розетти, вся наукова інформація буде передаватися на Землю. Для живлення приладів космічної орбітальної лабораторії буде використовуватися сонячна батарея площею 32 м². За допомогою двометрової антени радіотелескопа, встановленого на Розетті, вперше в історії науки в науковій лабораторії на Землі будуть надходити унікальні дані про реліктову речовину Сонячної системи.

31 грудня КА «Розетта» знаходилась в сузір'ї Змієносія на відстанях 5,265162463587 а.о. від Сонця і 6,15690155711306 а.о. від Землі. Комета в цей же момент знаходилась теж в сузір'ї Змієносія на відстанях 5,538619449073 а.о. від Сонця і 6,43003794500334 а.о. від Землі.

7. ВИСНОВКИ

Багато вчених вважають, що місія Розетта — це експеримент тисячоліття, а за кількістю витрачених на нього коштів — близько півтора мільярда євро — це буде один з найбільш дорогих космічних експериментів в історії науки, але “гра коштує свічок”. Без всякого сумніву — це найбільш грандіозна кометна місія, унікальний і захоплюючий експеримент в історії людської цивілізації, результати якої поповнять новими відкриттями золотий фонд світової науки.

Подяка: Це дослідження було частково підтримано грантом ДФФД F40_2-087.

1. Чурюмов К.И. Кометы и их наблюдение. — М.: Наука, 1980. — 160 с.
2. Беляев Н.А., Чурюмов К.И. Комета Галлея и ее наблюдение. — М.: Наука, 1985. — 270 с.
3. Чурюмов К.И. Космические миссии к ядрам комет: от Веги и Джотто до Розетты // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. — Серія педагогічна. — Випуск 15. — Управління якістю підготовки майбутніх учителів фізики і трудового навчання. — 2009. — С. 55–60.
4. Marc D. Rayman The Deep Space 1 extended mission: challenges in preparing for an encounter with comet Borrelly // Acta Astronautica. — 2002. — **51**, № 1–9. — P. 507–516.
5. Belton M.J.S. and the Deep Impact science team A Deep Impact mission contribution to the internal structure of Jupiter family cometary nuclei: the talps or “layered pile” model // Belton Space Exploration Initiatives. — LLC, Tucson, Lunar and Planetary Science. — XXXVII. — 1232.pdf
6. Churyumov K., Kruchynenko V., Chubko L. On sizes of the artificial explosive crater on the nucleus of comet 9P/Tempel 1 // International Workshop “Deep Impact as world observation event”. — Belgium, Brussels, 2006. — Book of abstracts. — P. 87.
7. Churyumov K.I., Kruchinenko V.G., Chubko L.S. The Size of the Artificial Explosive Crater on the Nucleus of Comet 9P/Tempel // Deep Impact as a World Observatory Event: Synergies in Space, Time, and Wavelength. Proceedings of the ESO/VUB Conference held in Brussels, Belgium. — 2009. — Springer, Berlin/Heidelberg. — C. 191–196.
8. Churyumov K.I. Discovery, observations and investigations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in Kyiv // In the book “The new ROSETTA targets”. — 2004. — Astrophysics and space science library. — Kluwer acad. Publ. — Collangelli et al. (eds). — P. 1–13.
9. Opik E.J. Researches on the physical theory of meteor phenomena. I. Theory of the formation of meteor crater // Tartu Obs. Publ. — 1936. — **28**, № 6. — P. 27.

Надійшла до редакції 19.10.2012