



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 11 • № 1 • 2015 С. 61 – 68

УДК 523.4

Особливості отримання та обробки даних дистанційного зондування супутників планет

К.О. Радченко^{1*}, С.О. Ясєнев²

¹Національний технічний університет України «КПІ»

²Національний авіаційний університет

Сучасний рівень та прогноз розвитку техніки показують, що основною метою наукових досліджень за допомогою космічних засобів в найближчому майбутньому буде Сонячна система. Головними при цьому будуть дослідження систем планета–супутник та вивчення взаємодії супутників між собою. Нас цікавлять такі фізичні властивості супутників планет, як форма, розміри, гравітаційне поле та власне обертання, які можна отримати з обробки результатів роботи космічних місій.

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ, Радченко К.А., Ясєнев С.А. — Современный уровень и прогноз развития техники показывают, что основной целью научных исследований с помощью космических средств в ближайшем будущем будет Солнечная система. Главными при этом будут исследования систем планета–спутник и изучения взаимодействия спутников между собой. Нас интересуют такие физические свойства спутников планет, как форма, размеры, гравитационное поле и собственное вращение, которые можно получить при обработке результатов работы космических миссий.

FEATURES OF ACQUISITION AND PROCESSING OF THE DATA OF REMOTE SENSING OF THE PLANETARY SATELLITES, by Radchenko K.A., Yasenev S.A. — The current level of technological development and forecast show that the main purpose of scientific research using space vehicles in the near future will be Solar system. The key to this will be the study of the planet–satellite and satellite to study the interaction between them. We are interested in such physical properties of planetary satellites as shape, size, and gravitational field proper rotation, which can be obtained from the results of the processing space missions.

Ключевые слова: спутники планет; дистанционное зондирование; ГИС.

Key words: satellites of planets; remote sensing; GIS.

1. ВСТУП

Від гіпотез про природу планет і будову космосу людство перейшло до всебічного і безпосереднього вивчення небесних тіл і міжпланетного простору за допомогою космічної техніки. В освоєнні Всесвіту, зокрема Сонячної системи, людству належить вивчити різні його складові, серед яких вирізняються супутники планет. На сьогодні актуальним є безпосереднє дослідження супутників планет, аналіз їх фізичних властивостей та картографування їх поверхні. Сучасні астрономічні спостереження, проведені наземними і космічними засобами, призвели до відкриття великої кількості супутників планет, і їх кількість продовжує зростати. Окремо взятий супутник планети достатніх розмірів може вивчатись як просторовий, самогравітуючий об'єкт, що здійснює рух в гравітаційному полі планети. Космічні методи мають суттєву перевагу перед наземними спостереженнями, тому що значна частина електромагнітного випромінювання небесних тіл затримується в земній атмосфері.

Нас цікавлять такі фізичні властивості супутників планет, як форма, розміри, гравітаційне поле та власне обертання, які можна отримати з обробки результатів роботи космічних місій.

2. ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДНИХ СПУТНИКІВ ПЛАНЕТ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Фізико-хімічний склад супутників планет-гігантів включає різні силікати, оксиди і сульфідів, а також водяний або водно-аміачний лід. Поверхня супутників покрита численними кратерами метеоритного походження. Однак на багатьох супутниках є ще й власні тектонічні розломи, тріщини крижаної кори, вулкани, наприклад, вулканічна активність призвела до утворення на Іо помітної атмосфери з двоокису сірки, кисню, натрію і калію [1–3].

У деяких супутників є власні дипольні магнітні поля, що вказують на наявність металевого ядра. Виходячи з низької середньої щільності льодяних супутників (1,8–4,0 г/см³), водяний лід може становити 30–60% їх маси, а товщина крижаної кори — 150–750 км. Існують гіпотези наявності на деяких

* Радченко Костянтин Олександрович; ✉ radche000@mail.ru

супутниках підповерхневих океанів солоної води, які не замерзають в результаті процесів радіоактивного розпаду в гірських породах, що протікають з виділенням тепла в підповерхневих океанах великих супутників [4].

Плануються такі визначні місії для вивчення системи галілеєвських супутників Юпітера, такі як “Jupiter Icy Moon Explorer” і “Europa Clipper”. Особливу увагу буде приділено дослідженням унікальних магнітних і плазових взаємодій Ганімеда і Юпітера.

Головними завданнями дистанційного зондування супутників є вивчення планетно-супутникової геологічної еволюції, їх походження, внутрішньої будови, хімічного складу, розподілу геологічних порід і матеріалів на їх поверхнях, підповерхнєве моделювання, з'ясування джерел вулканічної активності Ю зокрема.

Зовнішні ретроградні супутники планет (найбільшим з яких є Тритон) на інтервалі часу, порівнянному з віком Сонячної системи не піддавалися суттєвим змінам і тому зберегли інформацію про ранні стадії формування Сонячної системи. Вивчення їх природи, складу, еволюції їх орбіт наблизить нас до розуміння основного сценарію походження Сонячної системи.

Всього за час використання міжпланетних зондів для дослідження зовнішніх планет Сонячної системи та їх супутників відправлено 5 автоматичних місій дистанційного зондування у складі 8 космічних апаратів.

Одним з результатів місії космічного апарату (КА) “Галілео” до Юпітера є виявлення малих об'єктів поблизу п'ятого супутника Юпітера — Амальтеї. При зближенні КА “Галілео” з Амальтеєю сканер виявив 9 тіл, але два з них могли бути дублікатами побачених раніше. Ці об'єкти розмірами менше 5 км або були захоплені на орбіти навколо цього супутника, або перетворилися на супутники в результаті минулих зіткнень. Обмежені дані не дозволили визначити їх точні положення.

У 2003 р. цікаві відкриття в області внутрішніх супутників Урана були здійснені за допомогою телескопа Хаббла. Один супутник S/2003 U1 діаметром 16 км був відкритий між орбітами Пака і Міранди на відстані 97 700 км від центру Урана. Другий супутник S/2003 U2 (діаметр 12 км) знаходиться всередині орбіти Белінди на відстані 74 800 км від центру планети. Також за допомогою телескопа Хаббла сталося повторне відкриття супутника S/1986 U10 (діаметр 40 км), вперше виявленого в 1999 р. по фотографіях, отриманим космічним апаратом “Вояджер” в 1986 р., тобто через 13 років після отримання знімків. Його відстань від Урану складає в середньому 76 400 км. Третій супутник S/2003 U3 (діаметр 11 км), відкритий у 2003 р., належить до зовнішніх супутників, знаходиться на відстані 14 млн км від Урана і єдиний із далеких супутників рухається в прямому напрямку [5].

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДНИХ СУПУТНИКІВ ПЛАНЕТ ЗА ДОПОМОГОЮ КОСМІЧНИХ МІСІЙ

3.1. Місяць

4 жовтня 1957 року запуском в Радянському Союзі першого штучного супутника Землі розпочалася космічна ера людства. А в 1959 році почалися польоти до Місяця. 2 січня 1959 року в СРСР було здійснено запуск автоматичної міжпланетної станції (АМС) “Луна-1”, яка через двоє діб пролетіла поблизу Місяця на відстані менше 6 тис. км і вийшла на навколосонячну орбіту. 3 березня 1959 р. американська станція “Pioneer-4” пролетіла на відстані 60 тис. км від Місяця. 14 вересня 1959 р. АМС “Луна-2” досягла поверхні Місяця. 4 жовтня 1959 року до Місяця стартувала АМС “Луна-3”, яка мала сфотографувати зворотну сторону Місяця і передати зображення на Землю. Слід зазначити, що ця дата обрана не випадково. Тоді ще не могли змінювати орбіти космічних апаратів. І щоб апарат міг сфотографувати зворотну сторону Місяця, він мав стартувати у певний день і час раз на місяць.

Фотографування відбувалося 7 жовтня 1959 р. з відстані 65–68 тис. км від поверхні Місяця на 35-міліметрову плівку. Було сфотографовано 2/3 невидимої сторони Місяця і частину видимої. Зображення на плівці за допомогою телевізійної передавальної трубки перетворювалися в радіосигнал і передавалося на Землю. На Землі прийняті сигнали після підсилення і перетворення фіксували на кінофотоплівку в апаратах магнітного запису на електронно-променевих трубках з тривалим післясвітінням і на електрохімічний папір у фототелеграфних апаратах. Передача зображень перший раз здійснювалася з відстані 470 тис. км у повільному режимі (1 кадр за 30 хв.). 18 жовтня пройшла повторна передача у швидкому режимі (1 кадр за 15 секунд). Після цієї передачі зв'язок зі станцією було втрачено. На основі отриманих фотографій Академія наук СРСР у 1960 році склала і видала перші атлас і карту зворотної сторони Місяця.

У 1962–1964 рр. американські АМС “Ranger-3, 4, 5, 6”, яким ставилась мета телевізійної зйомки Місяця з невеликої відстані, або проходили повз Місяць, або падали на Місяць і розбивалися. Така сама доля чекала радянські АМС “Луна-4, 5, 6”, які мали здійснити м'яку посадку на Місяць [9].

Детальну телезйомку Місяця виконали американські АМС “Ranger-7, 8, 9” з липня 1964 по березень 1965 р. Зокрема, остання АМС отримала 5800 знімків з висоти від 2300 км до 600 м над гористим районом у центральній частині видимої півкулі.

18 липня 1965 р. радянська АМС “Зонд-3” сфотографувала ту третину зворотної сторони Місяця, яка ще не була сфотографована. Фотографування Місяця почалося на відстані 11,6 тис. км, а через кілька днів з відстані 220 тис. км від Землі почалася передача отриманих зображень. З відстані 31,5 тис. км була проведена повторна передача отриманих знімків. Ці знімки дали можливість скласти більш повну карту майже всієї поверхні Місяця і створити нарешті Місячний глобус.

Після двох невдач з АМС “Луна-7” і “Луна-8”, які розбилися під час посадки у жовтні і грудні 1965 року, АМС “Луна-9” 31 січня 1966 року здійснила м’яку посадку в Океані Бур і передала телевізійні панорами місячного ландшафту. А 31 березня 1966 року на навколomisячну орбіту було виведено АМС “Луна-10” — перший штучний супутник Місяця. Слід сказати, що перший глобус мав значні “білі плями” поблизу полюсів. Виведення на навколomisячну орбіту штучних супутників дозволило картографувати всю поверхню Місяця.

Потім СРСР і США запускали нові АМС — на орбіту навколо Місяця, які не тільки фотографували поверхню Місяця, але й досліджували його гравітаційне поле і гамма-випромінювання, метеоритну обстановку. Починаючи з 90-х рр. XX століття дослідницькі станції до Місяця почали запускати Японія, Європейське космічне агентство, Китай, Індія [2].

3.2. Європа

Європа — шостий супутник Юпітера, найменший з чотирьох галілеєвих супутників. Виявлена в 1610 році Галілео Галілеєм і, ймовірно, Симоном Марієм в той же самий час. Протягом століть за Європою велися все більш всебічні спостереження за допомогою телескопів, а починаючи з 1970-х років — і космічних апаратів.

Цікаві характеристики Європи, особливо можливість виявлення позаземного життя, призвели до цілого ряду пропозицій з досліджень супутника. Місія космічного апарату “Галілео”, що почалася в 1989 році, надала більшу частину сучасних даних про Європу. У бюджеті NASA на 2016 рік виділено кошти на розробку автоматичної міжпланетної станції “Еуропа Clipper”, призначеної для вивчення Європи на предмет її населеності, запуск найбільш імовірний в середині 2020-х рр. Запуск апарату для вивчення крижаних супутників Юпітера “Jupiter Icy Moon Explorer” (JUICE), запланований на 2022 р.

Перші фотографії Європи з космосу були зроблені космічними станціями “Піонер-10” і “Піонер-11”, які пролетіли поблизу Юпітера в 1973 і 1974 роках відповідно. Якість цих знімків було краще того, що було доступно телескопів того часу, але все ж вони були нечіткими порівняно з зображеннями пізніших місій.

У березні 1979 року Європу з пролітної траєкторії вивчав “Вояджер-1” (максимальне зближення — 732 тис. км), а в липні — “Вояджер-2” (190 тис. км). Космічні апарати передали якісні знімки супутника і провели ряд вимірювань. Гіпотеза про існування на супутнику рідкого океану з’явилися саме завдяки даним “Вояджерів” [6].

2 червня 1994 група дослідників з університету Джона Хопкінса і Наукового інституту Космічного телескопа під керівництвом Дойла Халла виявила в атмосфері Європи молекулярний кисень. Це відкриття було зроблене за допомогою космічного телескопа “Хаббл” з використанням Годдардівського спектрометра високої роздільної здатності.

У 1999–2000 роках галілеєві супутники спостерігали космічна обсерваторія “Чандра”, в результаті чого було виявлено рентгенівське випромінювання Європи та Іо. Ймовірно, воно з’являється при зіткненні з їх поверхнею швидких іонів з магнітосфери Юпітера.

Космічний апарат “Нові горизонти” в 2007 році, пролітаючи біля Юпітера на шляху до Плутона, зробив нові знімки поверхні Європи.

В даний час до системи Юпітера наближається апарат “Юнона”, запущений 5 серпня 2011 року НАСА, однак він не буде вивчати Європу, так як головна мета його місії — полярні області Юпітера. Запланована дата виходу “Юнони” на орбіту — серпень 2016 року.

3.3. Місія “Галілео”

“Галілео” — автоматичний космічний апарат НАСА, створений для дослідження Юпітера і його супутників. Апарат було запущено 1989 року, він з грудня 1995 по вересень 2003 р вивчав систему Юпітера. Це був перший (і поки єдиний) апарат, який вийшов на орбіту Юпітера, досліджував планету тривалий час і скинув на планету дослідний зонд. З 35 витків апарату навколо Юпітера 12 були присвячені вивченню Європи (максимальне зближення — 201 км). “Галілео” обстежив супутник досить детально; були виявлені нові ознаки існування океану. Станція передала більше 30 гігабайт інформації, зокрема 14 тисяч зображень планети й її супутників, а також унікальну інформацію про атмосферу Юпітера. Метою місії було вивчення атмосфери Юпітера, його супутників і її будови, магнітосфери, передавання зображення планети та її супутників тощо.

Спочатку планувалось, що “Галілео” буде виведено на навколосонячну орбіту за допомогою “шатла”, а потім розігнано за допомогою прискорювача “Кентавр” у бік Юпітера. Але після загибелі “Челленджера”

доставка “Кентавра” на орбіту за допомогою “шатла” була заборонена. Після аналізу було знайдено траєкторію перельоту, яка значно економила паливо й дозволяла обійтися без “Кентавра”. Ця траєкторія, яку назвали VEEGA (Venus–Earth–Earth Gravity Assist), використовувала тяжіння Венери і Землі для здійснення пертурбаційних маневрів.

Апарат полетів спочатку до Венери та двічі пролетів поблизу Землі. Перед тим, як вийти на траєкторію до Юпітера, “Галілео” здійснив дослідження Венери й двох астероїдів (951 Гаспра, 243 Іда). 21 вересня 2003 року після 6 років польоту і 8 років дослідження системи Юпітера місію “Галілео” було завершено. Апарат було спрямовано в атмосферу Юпітера зі швидкістю близько 50 км/с аби уникнути занесення земних мікроорганізмів на супутники Юпітера. “Галілео” згорів у верхніх шарах атмосфери Юпітера.

За час свого перебування на орбіті Юпітера “Галілео” проходив близько до супутників Юпітера — Європи, Іо, Ганімеда і Каллісто. Було отримано велику кількість нових даних і детальні знімки поверхні супутників. Встановлено, що Іо має власне магнітне поле, підтверджено теорію про наявність океану рідкої води під поверхнею Європи, висловлено гіпотези про наявність рідкої води в надрах Ганімеда і Каллісто. Також було визначено незвичайні характеристики Амальтеї.

3.4. Місія “Кассіні–Гюйгенс”

“Кассіні–Гюйгенс” — автоматичний космічний апарат, створений спільно NASA, Європейським космічним агентством та Італійським космічним агентством, що наразі досліджує планету Сатурн, кільця й супутники. Станція складається з двох основних елементів: безпосередньо станції Кассіні і зонду Гюйгенс, призначеного для посадки на Титан.

“Кассіні–Гюйгенс” — це результат співпраці трьох організацій. У створенні апарату брали участь 17 держав. Станція “Кассіні” була побудована зусиллями NASA й Лабораторії Реактивного Руху. Зонд “Гюйгенс” було створено Європейським космічним агентством. Італійське космічне агентство сконструювало антену телекомунікації й радарний висотомір (RADAR).

16 квітня 2008 року діяльність апарата було продовжено на два роки (до липня 2010). Нова місія отримала назву “Рівнодення Кассіні”. 2010 року було ухвалено рішення продовжити діяльність апарата ще на сім років (до 2017) у вигляді місії під назвою “Сонцестояння Кассіні”.

Після завершення місії розглядаються різні варіанти завершення діяльності. Найбільш імовірно, що апарат буде переведено на витягнуту орбіту, що не перетинатиме орбіти супутників Сатурна.

“Кассіні–Гюйгенс” було запущено 15 жовтня 1997 р. ракетою-носієм Титан IV і він досяг системи Сатурна 1 липня 2004 р. після міжпланетної подорожі, яка включала обліт Землі, Венери і Юпітера. Це перший штучний супутник Сатурна.

Зонд “Гюйгенс” створений Європейським космічним агентством і названий на честь голландського астронома XVII століття Християна Гюйгенса. Зонд був запущений 15 жовтня 1997 р. у зв'язці з космічним апаратом “Кассіні”. 25 грудня 2004 р. зонд відокремився від свого носія і почав самостійний рух до Титану. Зонд відділився від орбітального апарату 25 грудня 2004 р. приблизно о 2:00 UTC. Він досяг супутника Сатурна — Титана — 14 січня 2005 року, увійшов в атмосферу й опустився на поверхню супутника. Зонд успішно передав дані на Землю, використовуючи орбітальний апарат як передавач. Це була перша посадка в зовнішній частині Сонячної системи.

Основними цілями подальших досліджень залишаються: визначення структури та поведінки кілець Сатурна; визначення геологічної структури та історії поверхні супутників; визначення природи і походження темного матеріалу на одній з півкуль Япету; дослідження структури і поведінки магнітосфери; дослідження поведінки атмосфери Сатурна та структури хмар; дослідження хмар та туману в атмосфері Титана; визначення характеру поверхні Титана.

3.5. Енцелад

Протягом майже семи років камери “Кассіні” були спрямовані на південний полюс Енцелада, де унікальний геологічний басейн відомий своїми “тигрячими смугами” — розломами і гейзерами, вперше поміченими там майже 10 років тому. Результатом обстеження стала карта 101 гейзера.

Для визначення місця розташування поверхні гейзерів був застосований той самий процес триангуляції, який використовується на Землі, щоб обстежити геологічні особливості, такі як гори. Коли дослідники порівнювали місця гейзерів з картами теплового випромінювання, стало очевидно, що найбільша активність гейзерів збіглася з найбільшим тепловим випромінюванням. Однак для визначення однозначної кореляції даних виявилось замало.

Ключ до цієї загадки прийшов з порівняння результатів дослідження з даними у високій роздільній здатності, які були зібрані в 2010 році за допомогою приладів теплового зондування на “Кассіні”. Були знайдені окремі гейзери, що збігаються з дрібними гарячими точками, які були занадто малі, щоб можна було говорити, що вони отримані шляхом фрикційного нагрівання, але достатнього розміру для конденсації пари на приповерхневих стінах тріщин. Це означає, що гарячі точки є гейзерними процесами.

Завдяки аналізу гравіметричних даних “Кассіні” дослідники прийшли до висновку, що єдиним ймовірним джерелом гейзерів є море, яке існує під крижаною кіркою. Вони також виявили, що вузькі ущелини в крижаній оболонці можуть бути заповнені рідкою водою.

3.6. Гіперіон

Належний НАСА космічний корабель “Кассіні” зробив знімок супутника Сатурна — Гіперіона, де добре видно, що поверхню останнього покривають розкидані всюди множинні кратери, що мають різні розміри і форми та нагадують бджолині стільники. Вони мають дно темного кольору, на якому виявлено залишки речовини, залишеного тілом, що вдарив супутник.

Таким чином, Гіперіон нагадує величезну губку. Пориста структура цього космічного тіла пояснюється вкрай низькою її щільністю. Під час одного з останніх своїх обльотів “Кассіні” зафіксував сплеск електро-магнітного випромінювання на Гіперіоні і був зустрінутий потоком заряджених частинок. Нагадувало це удар струму, напруга якого становить двісті вольт. Накопичується настільки потужний електричний заряд на поверхні супутника, через вплив на неї магнітного поля Сонця. У Сонячній системі Гіперіон, що має розмір 410×260 км, є найбільшим небесним тілом неправильної форми.

Утворений водяним льодом з невеликою кількістю каменів, Гіперіон відрізняється тим, що має багато порожнеч, обсяг яких становить приблизно 40% від розмірів самого небесного об'єкта. Вони утворилися через те, що супутник покинули легкі речовини. Ця неспецифічний супутник Сатурна, порівнюваний часто через його форми з картоплею; його діаметр оцінюють в 266 км, температура тут опускається нижче -180°C , а ознак атмосфери взагалі не виявлено.

Для цього тіла характерна нестандартна поведінку, яка ускладнює його вивчення. Поки вчені не можуть з'ясувати ні час його обертання навколо власної осі, оскільки показник цей постійно змінюється, ні точну тривалість доби (через сильного впливу Титана — ще одного супутника Сатурна).

Отриманий знімок дозволяє детально розглянути поверхню Гіперіону, але жодної відповіді на наявні питання не дає. Він зроблений був з допомогою апарата “Кассіні” з відстані 62 тис. км в 2005 році.

3.7. Оберон

Єдині зображення Оберона крупним планом було отримано завдяки космічному апарату “Вояджер-2”, який сфотографував супутник під час досліджень Урана в січні 1986 року. Найменша відстань між ними становила 470 600 км, і знімки супутника мають роздільну здатність близько 6 км (лише Міранду та Аріель було знято з більшою роздільністю). Зображення охоплюють 40% поверхні, проте лише 25% її відзнято достатньо добре для геологічного картування. Під час польоту “Вояджера” південна півкуля Оберона (як і інших супутників) була обернена до Сонця, а північна була неосвітленою, тож не могла бути вивчена (на північному полюсі панувала полярна ніч тривалістю 42 роки). Жоден інший космічний апарат не відвідував Уран або Оберон.

3.8. Міранда

Міранда — найближчий і найменший серед п'яти великих супутників Урана. Супутник відкрито 1948 року Джерардом Койпером. Супутник сфотографовано з близької відстані лише одного разу, під час прольоту космічного апарату “Вояджер-2” через систему Урана в січні 1986 року. З усіх супутників Урана Міранду було найкраще вивчено завдяки тому, що вона опинилася найближче до траєкторії “Вояджера-2” (31 000 км). Однак вивчити вдалося лише південну півкулю, бо північна перебувала в тіні.

Регіонам, сфотографованим “Вояджером-2”, дали назви: Регіон Мантуя, Регіон Ефес, Регіон Сицилія і Регіон Дунсінан. Вони характеризуються чергуванням горбистої поверхні та рівнин з характерними розломами та більш-менш вираженими давніми ударними кратерами. Поряд із розломами спостерігаються грабени, що свідчить про наявність у минулому тектонічної активності. Поверхня регіонів практично однорідно темна, окрім прямовисних скель уздовж кратерів, де спостерігаються світліші ділянки поверхні.

Міранда є одним з небагатьох супутників в Сонячній системі, що має корони. Наразі за допомогою “Вояджера-2” було зафіксовано наявність трьох корон: Корона Арден (розташована у півкулі, оберненій у напрямку руху супутника орбітою), Корона Ельсінор (розташована у півкулі, що спрямована у протилежний бік до напрямку руху супутника орбітою) і Корона Інвернесс (розташована на південному полюсі). Велика різниця альbedo (на поверхні Міранди) найпомітніші на Короні Арден та Короні Івернесс [2].

3.9. Місії до інших супутників

Багато АМС, що мали своїм основним завданням дослідження Марса, зробили фотографії його супутників з різної відстані.

З чотирьох місій до супутників Марса три закінчилися повною невдачею: зв'язок з АМС “Фобос-1” був втрачений на шляху до Марса, АМС “Марс-96” і “Фобос-Грунт” зазнали невдачі, так і не покинувши навколоземну орбіту. АМС “Фобос-2” вийшла на орбіту, були отримані деякі наукові дані про Фобос, потім зв'язок було втрачено на віддаленні в кілька сотень кілометрів від Фобоса. Основна частина місії з використанням посадочних модулів не була виконана.

На одному зі знімків “Маринера-7” з близької відстані зафіксована тінь Фобоса на диску Марса. При аналізі знімка визначено, що Фобос у перетині еліптичний, його розміри вдвічі більше обчислених Дж. Койпера і альbedo його поверхні 5–6%.

Фобос був сфотографований крупним планом декількома космічними апаратами, основною метою яких було фотографування Марса. Першим був “Маринер-9” в 1971 році, за ним “Вікінг-1” і “Вікінг-2” в 1977 році, “Фобос-2” в 1989 році, “Mars Global Surveyor” в 1998 і 2003 роках, “Марс-експрес” в 2004 році і “Mars Reconnaissance Orbiter” в 2007 і 2008 роках. 9 січня 2011 р. “Марс-експрес” наблизився до Фобоса на 100 км і зробив знімки з роздільною здатністю 16 м. Вперше були отримані стереозображення супутника.

Деймос був сфотографований крупним планом декількома космічними апаратами, основною метою яких було фотографування Марса. Першим був “Маринер-9” в 1971 році, за ним “Вікінг-1” і “Вікінг-2” в 1977 році.

У 2020-х роках планується запуск дослідницької програми НАСА — “Uranus orbiter and probe”. До складу програми входить орбітальний апарат і атмосферний зонд. Крім того, група зі 168 учених представила Європейському космічному агентству програму-місію “Uranus Pathfinder”. У програмі описано подорож до зовнішньої частини Сонячної системи, кінцевою метою якої є планета Уран. Метою вищеназаних програм є уточнення знань про Уран і його супутники [1].

“Neptune orbiter” — запропонована НАСА місія для вивчення Нептуна, його атмосфери, кільця і супутників, зокрема, Тритона. Політ, імовірно, займе від 8 до 12 років. Для запуску передбачається використовувати РН Delta IV або Atlas V. Для додаткового розгону апарат виконає гравітаційні маневри в околі Венери і Юпітера. При наближенні до планети від орбітального апарату відокремляться два атмосферних зонда, які передаватимуть дані під час спуску, поки не будуть зруйновані атмосферним тиском. Подібний сценарій використовувався в місії “Галілео”. Орбітальний апарат буде вивчати Нептун, його супутники і кільця протягом кількох років, як орбітальні апарати “Магеллан”, “Галілео” і “Кассіні” [2].

4. ПЕРСПЕКТИВИ КОСМІЧНИХ МІСІЙ ДО ПРИРОДНИХ СУПУТНИКІВ

4.1. Місія до супутників Юпітера

Місія “JUICE” (JUperiter ICymoons Explorer) повинна досліджувати наявність води, яка може жити біологічне життя. Її основна мета — Ганімед, — найбільший супутник Сонячної системи, який на 8% більший, ніж Меркурій. Ганімед може приховувати глибокий океан солоної води під товстим шаром льоду. У цього супутника також є своє власне магнітне поле, що захищає від сильних радіаційних поясів Юпітера, і його давня поверхня всяна багатьма типами кратерів.

План місії полягає в тому, щоб надіслати дослідницький апарат на орбіту навколо Ганімеда для вивчення його підповерхневого океану. Космічний апарат “Juice” також зробить обліт двох інших супутників, Калісто і Європи, у яких є гіпотетичні океани, покриті льодом.

Ганімед сильно взаємодіє з Юпітером через гравітаційні і електромагнітні поля. Вивчення цієї взаємодії надасть подальше розуміння його унікального магнітного щита, що захищає його від сильних радіаційних поясів Юпітера.

В останні роки розроблено кілька перспективних проектів вивчення Європи за допомогою космічних апаратів. Цілі цих місій були різноманітні — від дослідження хімічного складу Європи до пошуку життя в її підповерхневому океані. Кожна місія до Європи має бути розрахована на роботу в умовах сильної радіації (близько 540 бер випромінювання в день або 2000 Зв/рік — майже в мільйон разів більше природного фону на Землі). Для порівняння: в області орбіти Ганімеда дози в 50–100 разів нижче [3].

Європейське космічне агентство (ЄКА) і Роскосмос після виходу США і Японії з програми “Euro-Jupiter System Mission” продовжили допрацьовувати проекти “Jupiter Ganymede Orbiter” і “Jupiter Europa Lander”. Спадкоємцем проекту “Jupiter Ganymede Orbiter” стала місія “Jupiter Icy Moon Explorer” (JUICE), схвалена ЄКА 2 травня 2012 року і призначена до запуску в 2022 році з прибуттям в систему Юпітера в 2030 році. Роскосмос у зв’язку з високою складністю проекту з відправлення зонда на Європу і деякими технологічними обмеженнями в 2012 році був змушений переорієнтувати місію “Jupiter Europa Lander” з Європи на Ганімед. Нова назва місії — “Лаплас-П”, старт призначений на 2023 р., прибуття в систему Юпітера — на 2029 р. У 2016 році з бюджету NASA буде виділено 30 млн. доларів на розробку власного проекту Європа Clipper. Всього на програму протягом п’яти років з 2016 року НАСА збирається виділити 255 млн. доларів. Таким чином, дана обставина може вважатися офіційним стартом підготовки NASA до місії на Європу.

4.2. New Horizons (“Новітні горизонти”)

Мета місії — вивчення Плутона, його супутника Харона і пояса Койпера, тривалість розрахована до 2026 року. Космічне агентство НАСА 19 січня 2006 р. запустило апарат New Horizons. Автоматична міжпланетна станція в 2007 році пролетіла біля Юпітеру, зробивши гравітаційний маневр, який дозволив прискоритися у полі тяжіння планети. При цьому були зафіксовані викиди вулкана на 330 км

над поверхнею у патерах Тваштара на Іо. Найближче зближення апарату з системою Плутон–Харон відбулося 14 липня 2015 р., близько 11:50 UTC — 12,5 тис. км від поверхні Плутона, найбільш чіткі знімки мають роздільну здатність 30 метрів на піксель [3]. В цілому апарат проводив спостереження 9 днів, за які зібрав приблизно 50 гігабіт інформації. Передача всіх зібраних даних буде тривати до кінця 2016 — початку 2017 року. На основі вже переданих знімків, були відкриті два потенційні вулкани Райт Монс і Пікар Монс на Плутоні висотою кілька км і діаметром кілька десятків км.

Знімки поверхні Харону передають величезну систему каньонів завдовжки близько 1600 км. Вчені Південно-західного дослідницького інституту в м. Боулдер (Колорадо) вважають, що вони є результатом геологічної чи тектонічної події планетарного масштабу. Також були проведені спектральні зйомки і створено карту температур поверхні.

На переданих знімках четвертий супутник Плутона Кербер являє собою структуру з двох частин, що віддалено нагадують двутавр або метелик. Відкрите високе альbedo означає, що поверхня супутника вкрита водяним льодом без істотних домішок. Більша частина Кербера має діаметр приблизно 8 км, а менша — близько 5 км. Незвичайна форма супутника могла утворитися в результаті зіткнення двох об'єктів. Супутник був відкритий телескопом “Хабл” у 2011 році. Він обертається навколо Плутона за 31 день. Тепер апарат спрямований до об'єкта пояса Койпера 2014 MU69 (діаметр близько 45 км, орбітальний період близько 293 років), і має досягти його 1 січня 2019 року. Внаслідок вкрай обмеженого запасу палива корекції траєкторії апарату після прольоту Плутона можливі лише у невеликому діапазоні (приблизно 1 градус).

New Horizons обладнаний комплексом зондування PERSI, що включає оптичні прилади для зйомки у видимому, інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах, аналізатор космічного вітру SWAP, радіоспектрометр енергійних часток EPSSI, блок з двометровою антеною для вивчення атмосфери Плутона і “студентський лічильник пилу” SDC для вимірювання концентрації пилових частинок в поясі Койпера.

5. ПРОБЛЕМИ ОБРОБКИ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КОСМІЧНИХ МІСІЙ

Використання космічних апаратів розширило можливість дослідження супутників планет. Основними методами наукових досліджень із використанням космічних апаратів є:

- пряме фотографування з більш чи менш близької відстані;
- спектральні спостереження в УФ променях, що дозволяють зареєструвати найінтенсивніші, так звані резонансні спектральні лінії, до яких належать лінія водню, триплет кисню; наземні спостереження в УФ діапазоні практично неможливі;
- вимірювання напруженості магнітного і гравітаційного поля;
- різні методи вивчення фізичних властивостей, що включають в себе визначення елементного складу порід;
- вивчення рельєфу;
- вивчення гравітаційного поля за рухом штучних супутників чи міжпланетних космічних апаратів на пролітних траєкторіях;
- вивчення власного і відбитого випромінювання;
- вивчення власного обертання;
- вивчення припливних деформацій;

Проте деякі задачі космічної фотограмметрії не зустрічаються на практиці у фотограмметрії земній, тому традиційні методи вирішення фотограмметричних задач не завжди можуть бути з успіхом застосовані [7].

На сьогодні актуальними є задачі створення мозаїки небесних тіл за допомогою стереофотограмметричної обробки космічних знімків, створення моделей фігур небесних тіл, створення опорної мережі на поверхні супутника, визначення його гравітаційного поля. Зрозуміло, що ефективна обробка космічних знімків небесного тіла можлива лише у тому випадку, якщо відомі елементи зовнішнього орієнтування (ЕЗО) кожного знімка у системі координат небесного тіла. Але для точного визначення елементів зовнішнього орієнтування потрібна побудова особливої фототріангуляційної мережі, інакше помилки визначення ЕЗО будуть досить значними [6].

При космічній зйомці небесних тіл використовують різні варіанти дистанційних досліджень; при цьому реалізуються різні схеми прольотів космічних апаратів, тому відсутня можливість отримувати зображення поверхні з однаковими умовами освітленості, кутом нахилу та іншими параметрами.

При роботі з космічними знімками супутників планет дуже значним є ефект кривизни поверхні, особливо враховуючи відсутність опорної координатної мережі. Також проблематика обробки інформації пов'язана з вибором поверхні відносності, якою має бути здійснена апроксимація фігури супутника (сфера, двовісний чи тривісний еліпсоїд). Зрозуміло, що найбільш доцільним є використання тривісного еліпсоїда, але це, в свою чергу, викликає додаткові труднощі, які пов'язані з динамічною фігурою супутника.

До основних особливостей об'єктів картографування, якими в даному випадку є супутники планет Сонячної системи, відносять, в основному, наступні [7]:

- віддаленість від Землі самих об'єктів;
- нерегулярність фізичних поверхонь;
- особлива роль фізичних параметрів (альbedo, освітленість, обертання);
- роль рельєфу як основного домінуючого компонента;
- недосконалість опорної мережі.

Серед знімків супутників планет немало таких, де на одному знімку відображено 40–50% поверхні [8]. При цьому геометрію зйомки витримати практично неможливо. Ось чому більша частина космічних знімків супутників планет — це всього лише комплекти перекриваючих один одного знімків. Зрозуміло, що опорна мережа необхідна для вирішення багатьох задач: моделювання фігури і гравітаційного поля супутника, створення 3D-моделі його поверхні з мозаїки знімків, уточнення параметрів обертання і лібрацій.

Фігури небесних тіл відрізняються один від одного іноді дуже істотно. У ряді випадків в якості поверхні відносності досить використовувати поверхню кулі або еліпсоїда обертання, але нерідко більш доцільно для них приймати не сферу або еліпсоїд обертання, а тривісний еліпсоїд обертання, інші регулярні поверхні, що ставить нові завдання перед математичною картографією, яка на шляху вирішення цих завдань зробила вже деякі кроки. Можливо також використання морфографічних проекцій. Особливої уваги заслуговують питання визначення параметрів динамічних фігур супутників планет, визначення геометричних центрів і центрів мас супутників.

Проте методики для вирішення цих проблем активно розробляються NASA і вже є деякі успіхи, наприклад, створені програмні пакети ISIS і VICAR, бібліотека SPICE. У Російській Федерації на базі PHOTOMOD 5.2 створені нові алгоритми і застосовані методики, які дозволили створення опорних мереж для супутників Фобос, Іо, Енцелад [5].

6. ВИСНОВКИ

1. Космічні методи мають суттєву перевагу перед наземними спостереженнями, тому що значна частина електромагнітного випромінювання зір і планет затримується в земній атмосфері, проте є і суттєві недоліки, пов'язані з фотограмметричною обробкою знімків.

2. Завдяки гравітаційній взаємодії планети із супутником виникають припливні сили, які спотворюють рівноважну динамічну фігуру супутника і зумовлюють вибір фігури відносності у вигляді тривісного еліпсоїда.

3. Розвиток космічних досліджень супутників планет потребує вдосконалення математичного обґрунтування визначення параметрів динамічної фігури і гравітаційного поля супутників планет.

4. Існує ряд методичних труднощів при отриманні і обробці даних дистанційного зондування супутників планет, вирішення яких має бути підґрунтям подальших наукових розвідок.

5. За допомогою дослідницьких місій, що вже відбулися, отримані унікальні наукові дані в області топографії, хімії, мінералогії, тектоніки і еволюції супутників планет-гігантів. Наступні запуски космічних апаратів дистанційного зондування дозволять значно підвищити інформативність одержуваних даних та перевірити нові, досконаліші і детальні моделі “крижаних” транснептунових об'єктів на околицях Сонячної системи [2].

1. Сайт НАСА. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.nasa.gov/index.html>

2. Сайт Европейского космического агентства. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.esa.int/ESA>

3. Сайт Earth and Space. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://space.io9.com/bask-in-the-glory-of-charon-plutos-largest-moon-1734063617>

4. *Відьмаченко А.П., Мороженко О.В.* Порівняльна планетологія. Навчальний посібник. — Київ: ТОВ ДІА, 2013. — 552 с.

5. *Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Конопихин А.А.* Проблемы обработки данных дистанционного зондирования для моделирования фигур малых тел Солнечной системы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — № 4. — С.277–285.

6. *Мороженко О.В.* Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. — Київ: Наукова думка, 2004. — 647 с.

7. *Станкевич С.А.* Дистанционное зондирование спутников планет-гигантов Солнечной системы // Тези доповідей Міжнародної наукової конференції “Астрономічна школа молодих вчених”. — Кіровоград: Кіровоградський державний педагогічний університет, 2014. — С.60–65.

8. *Тюфлин Ю.С.* Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутников. — М.: Недра, 1989. — 215 с.

9. *Шингарева К. Б.* Концепция картографирования тел Солнечной системы в ее историческом развитии. — М.: МИИГАиК, 1992. — 60 с.

Надійшла до редакції 2.09.2015

Прийнята до друку 8.10.2015

Радченко К.О., Ясєнев С.О.