

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ**

Відьмаченко А.П., Стєклов О.Ф.

Фізичні характеристики природних супутників планет

Київ 2023

УДК 523.4

*Рекомендовано до видання Вченою радою Національного університету
біоресурсів і природокористування України
(протокол № 10 від 26 квітня 2023 року).*

Рецензенти:

МОРОЖЕНКО О.В. – головний науковий співробітник відділу фізики субзоряних та планетних систем Головної астрономічної обсерваторії НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор

ІВЧЕНКО В.М. – завідувач кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського Національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор

ГРУДИНІН Б.О. – доцент кафедри фізики Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор педагогічних наук, доцент

МОЗГОВИЙ О.В. – доцент Вінницького державного педагогічного університету ім. М. Коцюбинського, кандидат технічних наук, доцент;

А.П. Відьмаченко, О.Ф. Стеклов. Фізичні характеристики природних супутників планет: - К.: **Видавництво Ліра К**, 2023. – 233 с.

У монографії наведено основні спостережні результати по вивченню фізичних характеристик природних супутників планет. Представлені дані їх досліджень при наземних спостереженнях та результати, отримані за допомогою космічних апаратів. При підготовці ілюстративного матеріалу використовувалися дані із спеціалізованих інтернет-сайтів (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery; <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>; <http://www2.jpl.nasa.gov/> та ряду інших) та із оригінальних публікацій. Список використаних публікацій наведено у кінці видання.

Монографія буде корисною для викладачів вищих закладів освіти, студентів, аспірантів, фахівців, які спеціалізуються з експериментальної астрофізики і фізики тіл Сонячної системи.

ISBN

© А.П. Відьмаченко, О.Ф. Стеклов, 2023

© НУБіП України, ГАО НАН України, 2023

На обложці зображення гірського хребта в екваторіальній частині супутника Сатурна Япет, деякі вершини сягають у висоту до 20 км; зміни, що відбулися у вулканічній активності вулкана Піллан на супутнику Юпітера Іо за три роки

Зміст

Вступ	4
1. Історія відкриття супутників та їх дослідження космічними апаратами	5
2. Місяць	28
2.1. Особливості вулканізму на Місяці.	38
3. Супутники Марса	44
4. Супутники Юпітера	48
5. Супутники Сатурна	59
6. Супутники Урана	78
7. Супутники Нептуна	89
8. Змінні явища на супутниках	96
8.1. Місяць	96
8.2. Іо	98
8.3. Європа	125
8.4. Енцелад	128
8.5. Титан	141
9. Життя в Європі та в (на ?) інших супутниках	164
Список використаної літератури	169

Вступ.

Для землян є природним спостерігати на небосхилі два однакових за видимим розміром небесних тіл: гаряче Сонце і холодний Місяць. А це дозволяє вести жартівливий діалог:

- Як ти думаєш, що важливіше: Сонце чи Місяць?
- Звичайно Місяць.
- А чому?
- Сонце світить вдень, коли і так видно, а Місяць – вночі.

З іншою ситуацією ви зіткнетеся на інших планетах у Сонячній системі (крім Меркурія та Венери), де вночі вам світитиме від двох (на Марсі) до 83 (на Сатурні) природних супутників.

У книзі наведемо деякі дані про історію відкриття супутників, їх динамічні та фізичні характеристики, а також існуючі гіпотези походження і внутрішньої будови.

1. Історія відкриття супутників та їхні дослідження космічними апаратами

Супутником Землі Місяцем милувалися ще перші «створені Богом та поселені в Рай (на Землю) люди – Адам і Єва». А відкриття супутників навколо інших планет спочатку вимагало дуже наполегливих телескопічних спостережень, а після 1970 року – праці великих колективів, які готували і забезпечували космічні місії до тієї, або іншої планетної системи.

Найперші чотири супутники були відкриті на початку січня 1610 р. За звання їх першовідкривача сперечалися італійський астроном Галілео Галілей та німецький Симон Марій. Але оскільки Галілей першим про це сповістив людство, то пріоритет залишився за ним, і супутники зараз називаються галілеєвими. В той же час, Марію належить пріоритет у присвоєнні їм імен: він надав їм імена улюбленців Бога Зевса (Юпітера) в греко-римській міфології – Іо, Європа, Ганімед та Каллісто.

В другій половині того ж століття було відкрито ще 5 супутників у Сатурна (один – відкрив Гершель та ще 4 – Кассіні). Загалом при наземних спостереженнях вдалось відкрити 34 супутники: у Марса – 2, Юпітера – 13, Сатурна – 11, Урана – 6 і Нептуна – 2.

В боротьбі за пріоритет пошук супутників був надзвичайно втаємничений. Так, коли у 1967 р. Головну астрономічну обсерваторію Національної академії наук України відвідав відомий французький астроном О. Дольфюс, то, на здивування наших співробітників, він зразу ж попросився на 70 см телескоп і став, нічого не пояснюючи, уважно вивчати околиці Сатурна. Все стало зрозумілим лише у 1980-му році, коли з'явилося повідомлення щодо відкриття ним за спостереженнями у 1966-1980 роках 10-го супутника (Януса) у Сатурна.

В подальшому, супутники відкривалися завдяки спостереженням на Космічному телескопі Хабла та таким космічним апаратам (КА).

Піонер-10 – досяг Юпітера 4 грудня 1973 р. (мінімальна відстань 200 тис. км);

Піонер-11 – досяг Юпітера 3 грудня 1974 р. (мінімальні відстань 110 тис. км), а Сатурна – 1 вересня 1979 р (мінімальна відстань 21 тис. км).

Вояджер 1 – досяг Юпітера 5 березня 1979 р. (мінімальна відстань 348890 км), Сатурна – 22 серпня 1980 р. (мінімальна відстань 126 тис. км).

Вояджер-2 – досяг Юпітера 2 серпня 1980 р. (мінімальна відстань 721670 км), Сатурна – 5 червня 1981 р. (мінімальна відстань 100800 км); Урана – 24 січня 1986 р. (мінімальна відстань 107 млн. км), а околиць Нептуна – 5 червня 1989 р. (мінімальна відстань становила 29240 км 25 серпня 1989 р.); протягом 6 місяців цей КА передав більше 9 тисяч зображень цієї планети, його супутників і кілець.

Галілео – досяг Юпітера 7 грудня 1995 р. і став його єдиним на той час штучним супутником.

Кассіні – пролетів мимо Юпітера і 30 червня 2004 р. досяг Сатурна, де працював до 2017 р; він став штучним супутником цієї планети та опустив зонд на супутник Титан.

КА «**Нові горизонти**» 28.02.2007 здійснив один з гравітаційних маневрів поблизу Юпітера, при наближенні до нього на відстані 2305 млн. км.

5 липня 2016 р. КА . «**Юнона**» вийшов на полярну орбіту навколо Юпітера. Це другий проект у рамках програми «**Нові горизонти**». Метою даної місії являється вивчення гравітаційного та магнітного поля планети, і перевірка гіпотези щодо наявності у Юпітера ядра із твердих порід. Також, апарат має досліджувати атмосферу планети.

На середину 2022 р. загальну кількість супутників довкола планет Сонячної системи доведено до 207 (Земля – 1, Марс – 2, Юпітер – 80, Сатурн – 83, Уран – 27 і Нептун – 14). Дані про приблизно третину відомих супутників приведені в табл. 1.

Таблиця 1. Деякі супутники планет

Супутник	Рік	Автор	Форма	Розмір	М 10^{20} кг	Альbedo
Земля						
Місяць			Майже сферична	1738	735	0,12
Марс						
Фобос	1877	Холл	Тривісний еліпсоїд	13,5±1 10,7±1 9,5±1	0,099	<0,05
Деймос	1877	Холл	Тривісний еліпсоїд	7,5(+3,-1) 6,0±1 5,5±1	0,02	<0,05
Юпітер						
Іо, J1	1610	Галілей Марій?	Сферична	1815	894	0,6
Європа, J2	1610	Галілей Марій?	Сферична	1569	480	0,6

Супутник	Рік	Автор	Форма	Розмір	М 10^{20} кг	Альbedo
Ганімед, J3	1610	Галілей Марій	Сферична	2631	1482	0,4
Калісто, J4	1610	Галілей Марій	Сферична	2400	1077	0,2
Амалфея, J5	1892	Бернард	Тривісний Еліпсоїд	135±10 82±8 75±5	?	0,06
Гамалія, J6	1904/5	Перріне	Сферична	90±10	?	0,03
Елара, J7	1904/5	Перріне	Сферична	40±5	?	?
Пасифе, J8	1908	Меллот	Сферична	35	?	?
Синове, J9	1914	Нікольсон	Сферична	20	?	?
Лиситея, J10	1938	Нікольсон	Сферична	20	?	?
Карме, J11	1938	Нікольсон	Сферична	22	?	?
Ананке, J12	1951	Нікольсон	Сферична	15	?	?
Леда, J13	1974	Ковал	Сферична	8	?	?
Адрастея, J14	1979	Джут Даніельсон	Тривісний еліпсоїд	12,5 10,7 7,5	?	?
Фіва, J15	1979/80	Синнотт	Тривісний еліпсоїд	? 55±8 45±8	?	?
Метис, J16	1970/80	Синнотт	Тривісний еліпсоїд	? 20±2 20±2	?	?
Сатурн						
Титан, S6	1655	Гюйгенс	Сферична	2575	1346	0,2
Япет, S8	1671	Кассіні	Сферична	718±8	18,8±1,2	0,5/ 0,04
Рея, S5	1672	Кассіні	Сферична	800±125	24,9±1,5	0,65
Тефія, S3	1684	Кассіні	Сферична	524±5	7,6±0,9	0,80
Діона, S4	1684	Кассіні	Сферична	559±5	10,5±0,3	0,55
Мімас, S1	1789	Гершель	Сферична	197±3	0,38±0,01	0,77
Енцелад, S2	1789	Гершель	Сферична	251±5	0,8±0,3	1,04
Гіперон, S3	1848	У. і Д. Бонд Лассел	Тривісний еліпсоїд	175±15 120±10 100±10	?	0,25
Феба, S9	1848	Пікерінг	Тривісний еліпсоїд	115±10 110±10 105±10	?	0,06

Супутник	Рік	Автор	Форма	Розмір	М 10^{20} кг	Альbedo
Янус, S10	1966/80	Дольфюс	Тривісний Еліпсоїд	110 ± 5 95 ± 5 80 ± 5	?	0,5
Епіметей, S11	1966/80	Фаунтін та ін.	Тривісний Еліпсоїд	70 ± 8 58 ± 8 50 ± 5	?	0,5
Елена, S12	1980	Лукаше, Лаке	Тривісний Еліпсоїд	18 ± 3 ? <15	?	0,6
Телесто, S13	1980	Рейтима та ін.	Тривісний Еліпсоїд	? 12 ± 3 11 ± 3	?	0,6
Каліпсо, S14	1980	Паско та ін.	Тривісний Еліпсоїд	15 ± 3 13 ± 5 8 ± 3	?	0,9
Прометей, S16	1980	Колінс та ін.	Тривісний Еліпсоїд	70 ± 5 50 ± 7 37 ± 8	?	0,5
Шандора, S17	1980	Колінс та ін.	Тривісний Еліпсоїд	35 ± 8 43 ± 5 33 ± 5	?	0,5
Атлас, S15	1980	Колінс та ін.	Тривісний еліпсоїд	19 ± 4 ? 14 ± 4	?	0,5
Уран						
Титанія, U3	1787	Гершель	Сферична	800 ± 5	34,4	0,23
Обертон U4	1787	Гершель	Сферична	775 ± 10	28,7	0,20
Аріель, U1	1851	Лассел	Сферична	580 ± 5	24,4	0,38
Умбріель, U2	1851	Лассел	Сферична	595 ± 10	11,8	0,16
Міранда, U5	1948	Койпер	Сферична	242 ± 5	0,71	0,22
(1985U1)	1985	Вояджер-2	Сферична	≈ 40	?	$\approx 0,09$
(1986U1)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 40	?	$\approx 0,06$
(1986U2)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 30	?	$\approx 0,04$
(1986U3)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 30	?	$\approx 0,05$
(1986U4)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 30	?	$\approx 0,05$
(1986U5)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 30	?	$\approx 0,05$
(1986U6)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 30	?	$\approx 0,04$
(1986U7)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 25	?	$\approx 0,05$
(1986U8)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 25	?	$\approx 0,05$
(1986U9)	1986	Вояджер-2	Сферична	≈ 25	?	$\approx 0,05$
Нептун						
Тритон, N1	1846	Лассел	Сферична	1355 ± 7	?	0,78
Нереїда, N2	1949	Койпер	Сферична	170 ± 25	?	0,14
(1989N1)	1989	Вояджер-2	Сферична	200 ± 10	?	0,06

Супутник	Рік	Автор	Форма	Розмір	М 10^{20} кг	Альbedo
(1989N2)	1989	Вояджер-2	Сферична	95 ± 10	?	0,056
(1989N3)	1989	Вояджер-2	Сферична	75 ± 15	?	0,054
(1989N4)	1989	Вояджер-2	Сферична	90 ± 10	?	?
(1989N5)	1989	Вояджер-2	Сферична	40 ± 8	?	?
(1989N6)	1989	Вояджер-2	Сферична	27 ± 8	?	?

Спочатку нововідкритим супутникам надають тимчасові позначення, і тільки після уточнення для них елементів орбіти вони отримують свій порядковий номер та назву. Що стосується назви супутників, то намагаються притримуватися започаткованої С. Марієм традиції – пов'язувати їх з греко-римською міфологією назви планети, а саме.

Супутники Марса – названі Фобос і Деймос; в перекладі з давньогрецької – це означало Страх і Жах; вони були синами Бога війни Ареса (чи Марса), які завжди супроводжували його у подорожах.

Галілеєві Супутники Юпітера:

Іо – дочка царя Аргосу Інаха; за іншими версіями, Іо – або дочка Яса, або дочка Пірена, або дочка Арестора, або дочка Прометея чи Гермеса, або ж дочка Прометея і дружина Діоніса; вона – жриця Гери і коханка Зевса; за це ревнива Гера обернула Іо на корову;

Європа - згідно грецькій міфології фінікійська принцеса, викрадена Зевсом, який прийнявши зовнішність білого бика, спокусив її і зробив своєю коханкою;

Ганімед – у давньогрецьких міфах – був сином одного із троянських владарів – Троя – та німфи Каллірої; він виділявся надзвичайною красою; сам Зевс в образі орла приніс Ганімеда на Олімп й зробив його, як і Гебу, виночерпієм. Батькові хлопця, у якості певної розради, Зевс подарував колісницю із парою безсмертних коней. На картинах Ганімеда зображували вродливим юнаком, і часто із келихом вина;

Каллісто — дочка Лікаона, улюблениця Артеміди; від Зевса, що з'явився до неї в образі Аполлона, Каллісто народила Аркаса; через це розгнівана Артеміда обернула її на ведмедицю; у ту мить, коли Аркас на полюванні хотів убити ведмедицю – свою матір, Зевс обернув його самого на ведмедя, переніс обох на небо й утворив із них сузір'я Малої та Великої Ведмедиці.

Супутники Сатурна:

Титан – представляє цілий сонм титанів;

Мімас - один з Титанів, котрого вбив у одному з поєдинків Геркулес;

Тефія – морська богиня у грецькій міфології, котра була сестрою, а дещо пізніше – стала дружиною Океануса;

Діона – є героїнею грецької міфології, котра була матір'ю прекрасної Афродіти (Венери); вона народила її від Зевса (чи Юпітера);

Рея – героїня грецької міфології, яка була сестрою, а потім стала ще й дружиною Кроноса (чи Сатурна) та матір'ю Деметри, Гадеса (Плутона), Гери, Гестії, Посейдона (чи Нептуна) та Зевса (чи Юпітера);

Гіперіон – у давньогрецькій міфології також був Титаном, сином від Урана та Геї, чоловіком своєї сестри Теї, батьком Геліоса, Селени та Еоса;

Пан (SXVIII) – за однією із міфічних версій, Пан був народжений Одісеєю дружиною Пенелопою від Гермеса; він був Богом лісів, пастухів, отар, пізніше – став покровителем усієї природи; народився Пан в горах Аркадії і виглядав напівлюдиною – напівцапом, мав цапині ноги, роги та бороду;

Атлас – один з Титанів, котрого Зевс поставив для того, щоб він підтримував небеса на своїх плечах; був сином Япета і німфи Клименти, братом Прометея й Епіметея;

Прометей (лат. – провидець) – у грецькій міфології вважався віщим і добрим сином титана Япета та німфи Климени Фетіди, був братом Атаманта, Менетія й Епіметея; потім став батьком Девкаліона; викрав з Олімпу вогонь і передав його людям, за що він був ув'язнений богами;

Епіметей (непередбачуваний) – сприймався, зазвичай, дурником, для якого Зевс спеціально створив Пандору; був батьком Атласа;

Пандора – у грецькій міфології дружина Епіметея, якій було довірено скриню з усіма можливими бідами для людей, та який вона з цікавості відкрила й випустила все зло;

Янус – у римській міфології зображався з двома обличчями; а його батьками були Уран і Геката, дружиною була Ютурна, його сином — Фонт, а зятем — Вультурн; ім'я його походить із латинського слова *iānu* — «двері»; спочатку Янус був богом світла і Сонця; уранці він відчиняв небесну браму й випускав на землю день, а ввечері та брама ним зачинялася; цей бог також є покровителем подорожуючих та моряків; вірили, що саме він охороняє всі двері всіх

будівель — хат, храмів, тому дубові двері храмів прикрашали золотом; в жертву Янусу — фрукти, вино, виноград, а на початку року — мав бути білий бік, оскільки Янус є символом часочислення, богом початку і кінця часу та всякої діяльності; його трактували як Всесвіт, як первісний хаос, з якого виник уже упорядкований космос, а він сам перетворився на бога, що стежить за порядком;

Єлена — у грецькій міфології була дочкою Тітируса, однією з амазонок та подругою богині Венери; у міфології говориться, що Венера використовувала її для того, щоб вона допомогла їй спокусити Адоніса;

Телесто — у грецькій міфології дочка Океануса й Тефії;

Каліпсо — морська німфа, яка змогла затримати Одиссея на своєму острові майже протягом 7 років;

Енцелад — у давньогрецькій міфології один з титанів, син Урана й Геї; під час відомої битви між титанами та богами-олімпійцями, коли титани були переможені, Енцелад почав утікати; та Афінa погналася за ним на колісниці і він був знищений кинутим Афіною списом; його поховали на острові Сицилія під вулканом Етна; вважали, що вулканічні виверження Етни — це є диханням Енцелада; у Греції землетрус досі часто називають «тремтіння Енцелада».

Винятком із такого божественного пантеону є відкриті В. Гершелем 4 **супутники Урана**, імена яким дав його син Дж. Гершель і, в порушення традиції, назвав їх іменами персонажів з творів Шекспіра й Попа.

Усі **супутники Юпітера** були названі іменами із греко-римської міфології та хоч якось пов'язані з Юпітером (чи Зевсом). Відповідно до прийнятих Міжнародним астрономічним союзом (МАС) правил, супутникам із прямим рухом надавались переважно латинські імена що закінчуються на літери -а чи -о; тоді як назви супутників із зворотним рухом (і переважно грецькі) мають закінчуватися на літеру -е. В українській мові написання грецьких імен двояке: Тайгета і Тайгете, Іокаста та Іокасте тощо, однак для супутників зі зворотним рухом затверджені назви із закінченням на -е: Тайгете, Іокасте, Каліке, Еріноме тощо.

Якщо кількість супутників більша двох, то говорять вже про планетну систему. Супутники, в залежності від відстані до головної планети, розбивають на **внутрішні, головні й зовнішні**.

Внутрішні - розташовані на відстані до 20000 км від рівня видимих хмар планет і мають малі розміри (всього у кілька десятків і

менше кілометрів) та уламко-подібну форму. Допускають, що вони утворилися від бомбардування астероїдами, або при зіткненні великих супутників.

Головні супутники розташовані на відстанях від 20000 до 2 млн. км над рівнем хмар планет і мають діаметри від 500 до більше 5000 км. Допускають, що вони могли утворитися одночасно із планетами з протопланетної хмари й мають регулярні, практично колові орбіти, що розташовані у площині екватору планети. Їм притаманне, в основному, пряме обертання (за винятком Тритона, який обертається в зворотному напрямку).

Всі зовнішні супутники розташовані на відстанях більше 2 млн. км і також мають малі розміри (кілька кілометрів) і неправильну форму. Більшість із них обертаються у зворотних напрямках.

Велика кількість супутників обертається синхронно із орбітальним рухом, тобто, період їх обертання навколо своїх осей рівний періодам обертання біля центральних планет. Тому вони завжди звернені до планети тим же боком; причому вісь обертання практично завжди перпендикулярна до площини його орбіти. Відзначимо, що бік супутника за напрямком руху по орбіті називають «лідуючий», «ведучий» «передній», а протилежний – «ведений», «задній».

Окремий клас супутників становлять найвіддаленіші з них, на які майже однаково здійснюють вплив тяжіння планети і Сонця; це зумовлює прецесію їх орбіт, внаслідок чого вони часто мають петлеподібну форму. Такі супутники отримали, відповідно, назву **нерегулярні**. Наприклад, якщо частота прецесії відповідає частоті обертання даної планети довкола Сонця, то цей супутник потрапляє у резонанс, котрий називається **евекція**.

Накопичення ефекту доволі слабкого впливу гравітації від Сонця витягує орбіту настільки, що даний супутник зможе або зіткнутися із планетою (або ж з одним із її великих супутників), чи виходить за межі так званої сфери Хілла й потрапляє в гравітаційні «обійми» Сонця. Нагадаємо, що межа існування супутників визначається областю гравітаційного притягування конкретної планети – названої сферою Хілла; її радіус для Юпітера становить ~740 радіусів Юпітера (до 50 млн. км), Нептуна – 86.8 млн. км. З 1995 р. у системі Юпітера кількість віддалених нерегулярних супутників зросла до 53, великі півосі найвіддаленіших із них доходять до 0.8 радіуса сфери Хілла.

Оскільки прямі орбіти супутників уразливіші, ніж зворотні, то навіть якщо ці нерегулярні супутники спочатку рівноімовірно були присутніми на прямих та зворотних орбітах, то поява резонансу

приводить до збереження на таких відстанях лише супутників із зворотними орбітами. Інший ефект, відомий у якості **резонансу Козаї**, пов'язує величину нахилу й форму орбіти. Тобто, захоплені супутники на орбіти із значним нахилом, котрі рухаються по дуже витягнутих орбітах, можуть бути або ж викинутими із орбіти, або навіть повністю зруйнованими. Цілком можливо, що якраз по цій причині ще не було знайдено супутників із нахилом орбіт у межах від 50° до 130° .

У випадку, коли кілька супутників перебувають один із іншим в орбітальному резонансі (наприклад, Іо, Європа та Ганімед – мають резонанс 4:2:1; тобто, коли за час одного обороту Ганімеда навколо Юпітера, Європа робить два, а Іо – чотири), то виникають сильні збурення їх орбіт і зміни амплітуди постійних великомасштабних припливів під дією тяжіння планети. Розсіювання припливної енергії розігріває надра супутників і зумовлює їх вулканічну (на Іо) й тектонічну (на Європі, Ганімеді) активності.

Для захоплення тіла з геліоцентричної орбіти на стаціонарну навколопланетну, воно повинно втрачати деяку частину своєї початкової енергії; тобто, загальмуватися. Оскільки зараз у Сонячній системі майже немає ефективних механізмів для дисипації енергії, то таке захоплення одного із супутників повинне було б відбутися досить давно, коли Сонячна система ще мала трохи інші властивості. В 1970-тих роках були запропоновані три сценарії можливого захоплення супутників, котрі могли б діяти під час, чи відразу ж після формування планет.

1. Супутники могли втрачати енергію завдяки тертю при прольоті крізь протяжні атмосфери зародків планет, коли малі тіла згоряли, дуже великі безперешкодно проходили і продовжували рух по орбіті навколо Сонця, а проміжного розміру були захоплені. Це є природним аналогом так званого аерогальмування, котре зараз часто використовують для виведення міжпланетних апаратів на орбіти навколо планет із потужними атмосферами.

Але така модель не може пояснити присутність нерегулярних супутників навколо Нептуна та Урана. Адже через велику їх віддаленість від Сонця та малі густини речовини у зовнішніх областях навколосонячного диску, ядрам даних планет було б потрібно дуже багато часу для того, щоб досягнути критичної маси, котра необхідна для захоплення значної кількості газу; по цій причині газове гальмування практично не було задіяне.

2. Другий механізм також допускає суттєву активність планети ще на стадії зростання її розміру, коли акреція газів на ядро

майбутнього гіганта – повинна була б приводити до все наростаючого збільшення його маси; і це викликало б значне розширення радіуса сфери Хілла; при цьому, раптове збільшення гравітаційного впливу могло б стати потужною пасткою для тих тіл, котрі опинилися у даний час поблизу цих планет. Але навіть такий сценарій не може пояснити присутності цих супутників біля Урана й Нептуна.

Справа у тому, що більшість новітніх моделей розглядають припущення про те, що маси цих планет зростали не раптово, а поступово, акумулюючи небесні тіла із розмірами астероїдів та кометних ядер. За таких умов існуючих значень своїх мас планети змогли б досягти через кілька сотень мільйонів років, а не через тисячоліття, як це сталося для Юпітера та Сатурна. Тому пропонували ще й альтернативну модель для формування Нептуна та Урана. Згідно такій моделі, спочатку ці планети були такими ж масивними, що й Юпітер і Сатурн; проте потім, віддаленіші планети могли втрачати велику частину від своїх мас унаслідок впливу іонізуючого випромінювання від сусідніх масивних зір. Проте така планета скоріше втрачатиме супутники, ніж буде їх захоплювати.

3. Механізм потрійного зіткнення, згідно котрого зіткнення пари тіл у межах сфери Хілла могло розсіювати достатню кількість енергії для того, щоб ця планета захоплювала хоча б одне із них. У подальшому вдалося довести, що в цьому випадку, зіткнення не являється обов'язковим. А тому при обміні енергією між трьома тілами енергія одного з них може збільшувати свою долю за рахунок енергії двох інших. (Цей варіант ефекту гравітаційної праці зараз також використовується для розгону космічних міжпланетних зондів).

Пізніше запропонували ще й інший сценарій для потрійного захоплення, при якому тісніший подвійний об'єкт може розірватися гравітацією планети; і тоді один з цих компонентів викидається на інший рівень навколосонячної орбіти, а інший – виходить на орбіту даної планети. Проте навіть у випадку, коли потрійна взаємодія зможе пояснити те, як саме були захоплені деякі нерегулярні супутники, то залишається ще й таке запитання: звідки ж вони могли спочатку взятися? Для цього розглядалося два варіанти можливої відповіді: більшість планетезималей на стадії первинного формування Сонячної системи спочатку акреціювали у тіло майбутньої планети, чи у більшій супутники; тоді як решта із планетезималей були викинуті за межі нашої Сонячної системи, й лише незначна їх доля могла стати нерегулярними супутниками.

На орбітальний рух впливають й інші можливі чинники. Наприклад, серед відкритих супутників Юпітера є близько 17

осколків, котрі, скоріше всього, багато років тому утворилися із крупнішого супутника; а зараз вони продовжують свій рух по його орбіті. При умові, що це так, більшість нерегулярних супутників мають належати до вторинного покоління, а не до первинного, яке утворилося разом з планетами.

Крім того, рух деяких супутників (названих коорбітальними) також є своєрідним: радіуси орбіт супутників Янус та Епіметей відрізняються тільки на 50 км (151422 та 151472 км, відповідно), і при русі по орбіті вони періодично міняються місцями (допускають, що вони, можливо, є фрагментами колись зруйнованого в результаті удару тіла); в точці Лагранжа L4 на орбіті Діони знаходиться супутник Єлена; супутник Тефія ніби «пасе» два на порядок менших супутники (Каліпсо й Телесто) які розташовані на 60° спереду й позаду Тефії при її русі по орбіті довкола Сатурна (їх, за аналогією із астероїдами Троянцями, ще називають і Троянськими Тефіями).

Як видно з табл. 1, супутники різняться розмірами (від тисяч кілометрів до менше 10), формою (від майже сферичної до гантеле- та уламкоподібних) та відбивною здатністю: низько (альbedo в межах від приблизно 0,03- до менше 0,2), середньо (альbedo від 0,2 до менше 0,4) і високо (альbedo від 0,4 до 1,04) альбедні.

Існують і супутники з унікальними властивостями: Титан (є супутником Сатурна) та Тритон (є супутником Нептуна) мають постійні атмосфери різної потужності (у Титана навіть переважає земну; Іо (супутник Юпітера) демонструє вулканічну, а Енцелад (супутник Сатурна) і Тритон (супутник Нептуна) – гейзерну активність. Внаслідок цього на орбітах цих супутників існують своєрідні газово-плазмові тори. Загадковим є й супутник Сатурна Япет [11], у якого яскравість ведучої та веденої півкуль відрізняється у 10 разів.

Оскільки у вивчення супутників неоцінимим є внесок космічних засобів досліджень, то коротко зупинимося на їх становленні. Воно почалося з офіційного повідомлення Телеграфного агентства Радянського Союзу (ТАРС): «4 жовтня 1957 р. СРСР вперше вивів на земну орбіту штучний супутник Землі (ШСЗ)». Це без перебільшення збурило весь світ, коли мільйони радіослухачів дослухались до його голосу: «пик-пик-пик»... Оскільки у 1950-ті роки розгоралася так звана «холодна війна» між двома ядерними державами світу, СРСР та США, то цей запуск відкрив новий етап не лише у засобах доставки ядерних боеголовки, але й у здійсненні споконвічної мрії людства – ступити на поверхню іншої планети.

Безумовно, військові інтереси тоді були першочерговими, та вимагали постійного вдосконалення ракетної техніки і засобів астронавігації. Тому військово-промислові комплекси обох країн із задоволенням прийняли пропозиції науковців про дослідження тіл Сонячної системи (в першу чергу – Місяця) космічними засобами; тим більше, що це було для них надзвичайно вигідним. Це зумовлено щонайменше такими трьома причинами: освоєння космосу ставило значно вищі вимоги до технології матеріалів і питань астронавігації; хоча б частину надзвичайно великих фінансових затрат оправдувати потребами Академії наук СРСР та НАСА США, а також багато з так званих «технологічних» експериментів у космосі прикривати потребами освоєння космосу. Тому вже 17 серпня і 23 вересня 1958 р. до Місяця були спрямовані (правда, невдало) КА «Піонер-0» (США) та «Луна 1958А» (СРСР). Ними було започатковано виснажливе змагання між цими країнами, на кону якого стояла найамбітніша на той час задача: висадка людини на Місяць і її повернення на Землю.

Правда, президент США Дж. Кеннеді поставив ще й суто геополітична задачу: запропонувати такий темп гонки, який виявиться не під силу значно слабшому фінансовому і науково-технічному потенціалу СРСР. Це ілюструє й наведений нижче перелік лише успішних місій до Місяця.

КА «Луна-1» (СРСР) стартував 2.01.1959. Пролетів на відстані до 6000 км від Місяця та здійснив експеримент «штучна комета» – на відстані 11 399 км випустив хмару парів натрію.

КА «Луна-2» (СРСР) стартував 12 вересня 1959 р. і вперше досяг місячної поверхні.

КА «Луна-3» (СРСР) стартував 4 жовтня 1959 р. Пролетів на відстані 6000 км та вперше передав на Землю зображення майже 2/3 поверхні зворотного боку Місяця (з відстані 65 200-68 400 км).

КА «Рейнджер-6» (США) стартував до Місяця 30 січня 1964 р. та досяг його поверхні.

КА «Рейнджер-7» (США) стартував 31 липня 1964 р. Здійснив посадку на місце з координатами 10° 36' пд. ш. та 20° 36' зх. д. та передав 4308 зображень місячної поверхні з відстані від 2110 км до 439 м.

КА «Рейнджер-8» (США) стартував 17 лютого 1965 р. Здійснив посадку на місце з координатами 2° 36' пні. ш. та 24° 48' сх. д. та передав 7137 зображень поверхні Місяця з відстані від 2510 км аж до 160 м.

КА «Рейнджер-9» стартував 21 березня 1965 р. Здійснив посадку на місце з координатами $12^{\circ} 54'$ пд. ш. та $2^{\circ} 24'$ зх. д. та передав 5814 зображень поверхні Місяця з відстані від 2363 км до 600 м.

КА «Зонд» (СРСР) стартував 18 липня 1965 р. Пролетів мимо Місяця. З відстані 11 570 – 9220 км передав 25 зображень зворотного боку Місяця.

КА «Луна-8» (СРСР) стартував 3 грудня 1965 р. та досяг місячної поверхні з координатами $9^{\circ} 08'$ пн. ш. та $63^{\circ} 18'$ зх. д.

КА «Луна-9» (СРСР) стартував 31 січня 1966 р. Здійснив посадку на місце з координатами $7^{\circ} 08'$ пн. ш. та $64^{\circ} 22'$ зх. д. та передав 4308 зображень поверхні Місяця з відстані від 2110 км до 439 м. Вперше передано телевізійні панорами поверхні Місяця з роздільною здатністю краще 1 мм. Апарат відпрацював 3 земних доби.

КА «Луна-10» (СРСР) стартував 31 березня 1966 р. Вийшов на місячну орбіту з мінімальною відстанню 350 км, максимальною – 1017 км та нахилом у 72° до екватора. Даний апарат працював 2 місяці. Досліджувалось гравітаційне поле та вперше визначався склад місячних порід за даними гама-спектроскопії. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвилі 1,7 м.

КА «Сервейєр-1» (США) стартував 30 травня 1966 р. Здійснив посадку в місце з координатами: $2^{\circ} 28'$ пд. ш. та $43^{\circ} 14'$ зх. д. На поверхні Місяця апарат працював до 7 січня 1967 р. Передав більше 11000 зображень. Досліджувались механічні, теплові та електричні властивості місячної поверхні.

КА «Лунар Орбітер-1» (США, 10.08.1966р.). З місячної орбіти передав 211 зображень, за якими відібрано 9 місць для посадки пілотованих космічних кораблів (КК) серії «Аполлон». Бістатична радіолокація на $\lambda=11.1$ см.

КА «Луна-11» (СРСР) стартував 24 серпня 1966 р. та став штучним супутником Місяця. Здійснювались радіоастрономічні дослідження Місяця і Сонця, а також рентгенівського та гама-випромінювання Місяця. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвилі 1,7 м.

КА «Луна-12» (СРСР) стартував 22 жовтня 1966 р. та став штучним супутником Місяця. Передавав зображення його поверхні з висоти 340-100 км. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвилі 1,7 м.

КА «Лунар Орбітер-2» (США) стартував 6 листопада 1966 р. та вивів на орбіту Місяця штучний супутник. Передав 209 зображень із середньою і 210 – з високою роздільною здатністю з відстані від 1517

до 41 км. Попередньо було відібрано 13 місць для програми «Аполлон».

КА «Луна-13» (СРСР) стартував 21 грудня 1966 р. Здійснив посадку в місце з координатами $18^{\circ} 52'$ пн. ш. та $62^{\circ} 03'$ зх. д., передав панорами з місця посадки. Вимірювались деякі механічні властивості ґрунту.

КА «Лунар Орбітер-3» (США) стартував 4 лютого 1967 р. Вивів на орбіту штучний супутник та передав 329 зображень з відстані від 1530 до 44 км. Попередньо було відібрано 8 місць для програми «Аполлон».

КА «Лунар Орбітер-4» (США) стартував 8 травня 1967 р. та вивів на орбіту штучний супутник. Передано 344 зображення з відстані від 6147 до 2669 км, які перекрили 98% видимого та 96% зворотного боку Місяця.

КА «Експлорер-35» (США) стартував 19 липня 1967 р. та став супутником Місяця. Вивчав характеристики плазми в навколomisячному середовищі. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвилі 2,2 м.

КА «Лунар Орбітер-5» (США) стартував 1 серпня 1967 р. Вивів на орбіту штучний супутник Місяця. Передано 213 зображень з відстані від 5755 до 96 км, що дозволило зрештою відібрати місця посадки для програми «Аполлон». Працював до 1 лютого 1968 р.

КА «Сервейєр-5» (США) стартував 8 вересня 1967 р. Здійснив посадку на місце з координатами $1^{\circ} 25'$ пн. ш. та $23^{\circ} 12'$ сх. д. та передав 19 054 зображень поверхні Місяця при різній висоті Сонця. Вивчались механічні, теплові та електричні властивості місячного ґрунту. Вперше досліджувався хімічний склад ґрунту. Останній сеанс зв'язку було проведено 17 грудня 1967 р.

КА «Сервейєр-6» (США) стартував 7 листопада 1967 р. Здійснив посадку на місце з координатами $0^{\circ} 31'$ пн. ш. та $1^{\circ} 23'$ сх. д. та передав 6315 зображень поверхні Місяця при різній висоті Сонця, а також продовжив свою наукову програму КА «Сервейєр-5». Останній сеанс зв'язку відбувся 14 грудня 1967 р.

КА «Сервейєр-7» (США) стартував 7 січня 1968 р. Здійснив посадку в місце з координатами $40^{\circ} 53'$ пд. ш. та $11^{\circ} 27'$ зх. д. та передав 21 038 зображень поверхні Місяця при різній висоті Сонця, а також продовжив програму КА «Сервейєр-5». Вперше було проведено експерименти з реєстрації посланого з Землі лазерного сигналу. Останній сеанс зв'язку відбувся 21 лютого 1968 р.

КА «Луна-14» (СРСР) стартував 7 квітня 1968 р. та став супутником Місяця. Вивчались гравітаційне поле та навколomisячний

простір. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвилі 1,7 м.

КА «Зонд-5» (СРСР) стартував 10 листопада 1968 р. Облетів навколо Місяця (на мінімальній відстані 1950 км) та повернувся на Землю. Здійснив жорстку посадку (з перевантаженням у 20 сил земного тяжіння) в Індійському Океані.

КА «Зонд-6» (СРСР) стартував 10 листопада 1968 р. Облетів навколо Місяця (на мінімальній відстані 2420 км), фотографував поверхню та повернувся на Землю з фотоплівками. При посадці кабіна розгерметизувалась.

КК «Аполлон-8» (США) стартував 21 грудня 1968 р. та започаткував нову еру космонавтики. На його борту було три члени екіпажу (Ф. Борман, Дж. Ловелл та У. Андерс). 24 грудня корабель підійшов до Місяця приблизно на 100 км, перейшов на місячну орбіту та зробив навколо нього 10 обертів. Сумарно на місячній орбіті астронавти пробули 20 годин, за які було проведено детальне фотографування поверхні Місяця, та успішно повернулись на Землю.

КК «Аполлон-10» (США) з екіпажем в складі Т. Стаффорда, Ю. Сернана та Дж. Янга стартував 18 травня 1969 р. та вийшов на орбіту Місяця. Від корабля відділилась місячна кабіна, у якій знаходились Т. Стаффорд та Ю. Сернан. Вона наблизилася до місячної поверхні на відстань 15 км. На цій висоті відокремили ступінь, за допомогою якої можна було здійснити м'яку посадку, а астронавти повернулись на корабель. Корабель успішно повернувся на Землю.

КА «Луна-15» (СРСР) стартував 13 липня 1969 р., а 20 липня почав спуск для м'якої посадки, яка виявилась дуже вже невдалою.

КК «Аполлон-11» (США) реалізував згадувану найамбітнішу програму: вперше доставив землян на поверхню Місяця. Він стартував 16.07.1969 з екіпажем з 3 людей на борту (Нейл Армстронг – командир, Едвін Олдрін і Майкл Коллінз – члени екіпажу). Після чотириденного перебування на місячній орбіті, 20 липня о 20 год. 17 хв. 43 сек. за Гринвічем місячний модуль з екіпажем у складі Н. Армстронга та Е. Одріна здійснив посадку в південній частині Моря Спокою з координатами $0^{\circ} 41'$ пн. ш. та $23^{\circ} 26'$ сх. д.

Мороженко О.В. був «телевізійним» свідком цієї історичної миті. Завдяки щасливому випадку в цей час у Тернополі проходила Всесоюзна конференція Комісії з фізики тіл Сонячної системи при Астрономічній раді АН СРСР, де була можливість приймати телевізійні передачі іноземних телекомпаній. Завдяки тому, що в роботі НАСА була й зберігається практика прямої трансляції всіх запусків КА (не військового призначення), він був свідком цієї

історичної миті. Першим, і не без вагань на місячну поверхню ступив Н. Армстронг і здійснив «прогулянку» протягом 2 годин 40 хвилин. Разом з Е. Олдріном вони зібрали 22 кг зразків ґрунту з Місяця, встановили пасивний сейсмометр, лазерний кутиковий відбивач для вимірювання місячної лібрації, пастку для частинок сонячного вітру та успішно повернулися на Землю.

КА «Зонд-7» (СРСР) стартував 7 серпня 1969 р. Облетів Місяць та доставив на Землю кольорові знімки Місяця та Землі.

КК «Аполлон-12» (США) – другий пілотований корабель, на борту якого були Чарльз Конрад, Алан Бін та Річард Гордон, який стартував 14 листопада 1969 р. Місячний модуль з екіпажем (Ч. Конрад та А. Бін) здійснив посадку на місце з координатами $3^{\circ} 12'$ пд. ш. та $23^{\circ} 23'$ зх. д. – всього за 183 м від місця посадки КА «Сервейєр-3». Ч. Конрад і А. Бін встановили сейсмометр, тривісний магнітометр, іонний датчик з охолоджуванням катодом для вимірювання атмосферного тиску та спектрометр для вимірювання приповерхневої плазми. Вони частково демонтували опори КА «Сервейєр-3» та в радіусі 500 м від місця посадки КА «Аполлон -12» зібрали 34 кг місячного ґрунту і все це успішно доставили на Землю.

КК «Аполлон-13» (США) є прикладом драматичності та водночас надійності цих програм. Він стартував 11 квітня 1970 р. з екіпажем у складі Дж. Ловелла, Дж. Суїджерта та Ф. Хейса. На третій день перельоту у відсіку двигунів вибухнув один із кисневих балонів, а пізніше був пошкоджений ще один. За 3 години відсік основного блоку КК повністю залишився без кисню. Екіпаж перейшов у місячну кабінку, а корабель, здійснив оберт навколо Місяця, та направився до Землі й успішно її досяг. При обльоті Місяця екіпаж проводив спостереження місячної поверхні.

КА «Луна-16» (СРСР) стартував 12 вересня 1970 р. Здійснив посадку на місце з координатами $0^{\circ} 41'$ пд. ш. та $56^{\circ} 18'$ сх. д.. За командою з Землі було проведено буріння на глибину 35 см та успішно повернувся на поверхню Землі, доставивши приблизно 100 г місячного ґрунту.

КА «Зонд-8» (СРСР) стартував 20 жовтня 1970 р. Облетів навколо Місяця та доставив на Землю зображення Місяця та Землі.

КА «Луна-17» (СРСР) стартував 10 листопада 1970 р. Здійснив посадку на місце з координатами $38^{\circ} 17'$ пн. ш. та $35^{\circ} 00'$ зх. д. та вивантажив самохідний апарат «Луноход-1» масою 840 кг та габаритами: висота – 135 см, довжина – 179 см, ширина – 160 см. За

10,5 місяців він проїхав 10 540 м та отримав більше 20 зображень поверхні Місяця та більше 200 панорам.

КК «Аполлон-14» (США) з екіпажем у складі А. Шепарда, Е. Мітчела та С. Руса стартував 31 січня 1971 р. Місячний модуль з першими двома астронавтами здійснив посадку в місце з координатами 3 40' пд. ш. та 17° 28' зх. д. Вони встановили новий сейсмометр та прилад для визначення атмосферного тиску, зібрали та доставили на Землю 43 кг місячного ґрунту. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвиль 13,1 та 116 см.

КА «Луна-19» (СРСР) стартував 28 вересня 1971 р. і став супутником Місяця. Вивчалось гравітаційне поле Місяця та навколomisячний простір. Здійснювалась бістатична радіолокація на довжині хвилі 32 см.

КК «Аполлон-15» (США) з екіпажем Дж. Скота, Дж. Ірвіна та А. Уордена стартував 7 серпня 1971 р. Місячний модуль з двома першими членами екіпажу здійснив посадку в місці з координатами 26° 06' пн. ш. та 3° 39' сх. д. Цього разу Дж. Скот та Дж. Ірвін, вперше використавши «місячний автомобіль», провели на поверхні Місяця 18 годин та проїхали приблизно 10 км. За допомогою спеціальних бурів проводилось буріння до глибини 2,4 м, а також вимірювався розподіл температури в ґрунті до глибини 1 м.

Були встановлені сейсмограф, магнітометр, лазерний відбивач, зібрано та доставлено на Землю 77 кг місячного ґрунту. Була суттєво розширена програма досліджень з орбітального модуля, на якому були встановлені прилади для гамма-, рентгено- та магнітометричного картування, а також прилади для досліджень варіацій потоку альфа-частинок та мас-спектрометричних вимірювань, бістатичної радіолокації на довжині хвиль 13 і 116 см. Здійснювалися запуски субсателітів для досліджень магнітного поля.

КА «Луна-20» (СРСР) стартував 14 лютого 1972 р. Здійснив посадку на місці з координатами 3° 32' пн. ш. та 56° 33' сх. д. Доставив на Землю приблизно 50 г ґрунту.

КК «Аполлон-16» (США) з екіпажем Дж. Янг, Ч. Дюк та Т. Маттінглі стартував 16.04.1972. Місячний модуль з першими двома членами екіпажу здійснив посадку (рис. 1.1) на місце з координатами 8° 59' пд. ш. та 15° 31' сх. д. На поверхні Місяця вони провели 20 годин та проїхали приблизно 27 км на доставленому електромобілі. Наукова програма для даного польоту практично була такою ж, як і попереднього. На Землю було доставлено 95 кг місячного ґрунту.

КК «Аполлон-17» (США) з екіпажем Ю. Сернан, Г. Шмітт та Р. Еванс стартував 19 грудня 1972 р. Місячний модуль з першими двома членами екіпажу здійснив посадку в місці з координатами $20^{\circ} 10'$ пн. ш. та $30^{\circ} 46'$ сх. д. Саме там вперше використали метод штучного активного сейсмічного експерименту: астронавти підірвали 8 зарядів різної потужності (від 57 г до 2,7 кг у тротиловому еквіваленті), рознесених на відстані від 100 до 2700 м. З орбітального модуля проводились експерименти за допомогою: інфрачервоного радіометра (спектральний діапазон від 1,2 до 70 мкм) і з роздільною здатністю 10 км; радіолокатора бокового огляду та УФ – спектрометра в інтервалі довжин хвиль 118-168 нм. На Землю було доставлено 110 кг місячного ґрунту.

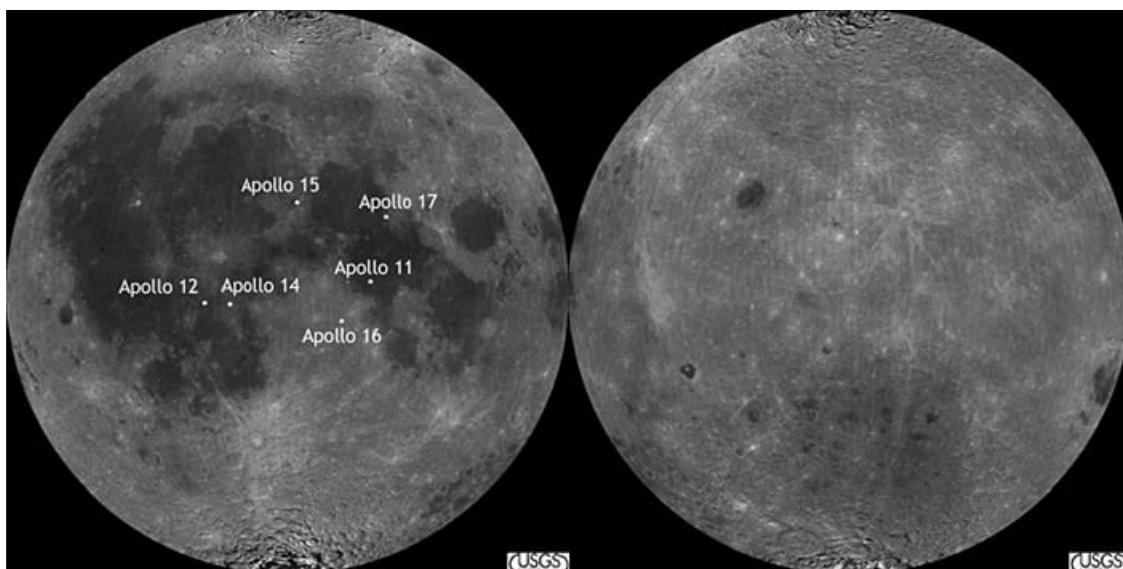


Рис. 1.1. Місця посадок КА «Аполлон» на видимому боці Місяця. Праворуч - зворотній бік (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

КА «Луна-21» (СРСР) стартував 8 січня 1973 р., який доставив на поверхню Місяця «Луноход-2» на місце з координатами $25^{\circ} 55'$ пн. ш. та $30^{\circ} 40'$ сх. д. Упродовж 4 місяців роботи він пройшов 37 км, отримав 86 панорам та більше 80 000 окремих зображень поверхні.

КА «Експлорер-49» (США) стартував 10 червня 1973 р. та став штучним супутником Місяця. Оснащений чотирма антенами, із довжиною кожної по 230 м.

КА «Луна-22» (СРСР) стартував 2 червня 1974 р. та став штучним супутником Місяця, спрямованим на дослідження гравітаційного й магнітного полів, отримання зображень поверхні

Місяця з роздільною здатністю 100 м, а також бістатичної радіолокації на довжині хвилі 32 см.

КА «Луна-24» стартував 9 серпня 1976 р., його місячний модуль зміг здійснити посадку в місці з координатами $12^{\circ} 45'$ пн. ш. та $62^{\circ} 12'$ сх. д. Здійснювалось буріння на глибину до 1,8 м. На Землю було доставлено 170 г місячного ґрунту. Запуском КА «Луна-24» закінчився етап активних не лише космічних, але і наземних досліджень Місяця як небесного тіла.

Після майже 20-ти річної перерви розпочалося нове коло в космічних дослідженнях. З одного боку, Місяць став небесним тілом, на якому стверджували свій космічний статус інші держави, з іншого – розпочалися роботи із забезпечення його освоєння. Саме в такому плані доцільно розглядати перераховані нижче не лише здійснені запуски, а також ті, які лише проектується.

Запуском КА «Луна-24» завершилось змагання явно на користь США. Основними причинами цього були не лише технологічна (особливо в електроніці) відсталість Радянського Союзу, але й гіперболізована утаємниченість. Корені першого пов'язані не стільки з економічним потенціалом, скільки є наслідком звичайнісінької дурості, коли у 1930-х роках в Радянському Союзі генетика та кібернетика були визнані «лженауками», а більшість (на той час і так незначної кількості) науковців були репресовані. Майже до кінця 1950 р. у «найголовнішому» підручнику для студентів усіх ВУЗів і факультетів Короткому курсі історії ВКП(б) писалося: кібернетика – «лженаука», яку придумав буржуазний псевдовчений Вернер.

І тільки після смерті у 1953 р. Й. Сталіна стали не лише закривати очі на роботи в галузі цих «лженаук», але й через треті, так звані нейтральні країни, у «три дороги» закуповувати (в першу чергу у США та Японії) обчислювальну (як правило, вже застарілу) техніку. Були створені цілі інститути з розробки сучасної електроніки, але втрачені десятиріччя не могли не позначатися. Тому не дивною здається уявна (чи реальна?) розмова радянського і японського науковців у галузі електроніки: «як Ви думаєте, наскільки відстав Радянський Союз від Японії? - Назавжди».

Основною задачею деяких із цих інститутів була, як тоді говорилося, «советізація» зарубіжних досягнень. Це зводилось до того, що неофіційно завезені електронні прилади (наприклад, комп'ютери) розбиралися, а з деталей під мікроскопом знімали мікрон за мікроном покриття і розшифровували секрет виготовлення комплектуючих. Подібна відсталість змушувала дублювати значну кількість систем, і це призводило до не лише значного збільшення

ваги, але й підвищення ймовірності відмови того чи іншого елементу. Внаслідок цього ефективність радянських КА була нижчою ніж аналогічних апаратів США. Так, якщо **КК «Аполлон-17»** з трьома членами екіпажу доставив 110 кг місячного ґрунту, то **КА «Луна-24»** (без екіпажу) – всього 170 г.

Гіперболізована втаємниченість робіт привела до того, що якщо НАСА завчасно сповіщало про свої плани і широко (у тому числі й із запрошенням іноземних науковців) обговорювало експерименти, то у СРСР навіть більшість з науковців дізнавалася про це з повідомлення ТАРС, та й то лише про успішні запуски, а про неуспішні - могла лише здогадуватися з пропусків між, наприклад, КА «Луна-3» та «Луна-8». Тому не дивним було, коли одного з постановників телевізійного експерименту ми дістали питаннями типу: «Чому не передбачили того, чи іншого?» почули відповідь: «нам важлива не ваша наука, а публікація зображення на першій сторінці газети Правда».

Або ще один приклад. Якщо зараз практикуються екскурсії в музей космонавтики в Житомирській області, чи в Київський політехнічний інститут, де знайомлять з життям одного з «батьків» радянської космонавтики Корольова С.П., то наше покоління про нього дізналося лише після його смерті у 1966 р. До того часу були відомі лише посади: Головний конструктор (С.П. Корольов) та Головний теоретик (Келдиш М.В., відомого більшості лише як Президент Академії наук СРСР). Через утаємниченість робіт задіяні в реалізації космічних експериментів колективи часто навіть не здогадуватися, що вони виготовляють.

Нагадаємо, що ці підприємства офіційно значилися або як «Поштовий ящик № ...», або ж маскувалися під суто цивільні (наприклад, завод з виготовлення швейних машинок). Тому не дивно було почути анекдот типу:

- Іване, а Іване, чому ти такий сумний?

- Та дістала дружина з проханням: збери та збери швейну машинку.

- А чому не збереш, ти ж бо працюєш на заводі з їх виготовлення.

- Та виношу і збираю, але кожний раз отримую кулемет.

Внаслідок цього, хоча й існували підвищені вимоги до якості продукції (так звана військова прийомка), але багато з КА зазнали невдач якраз через звичайний брак. Одну з таких описує О. Гурштейн у своїх Автобіографічних нотатках «Московский астроном на заре космического века», який був членом Міжвідомчої комісії з виявлення причин невдалої посадки неназваного вище КА «Луна-18». Оскільки

працююча при посадці КА телеметрія показала, що з трьох двигунів системи орієнтації працювало лише два, то стало зрозуміло, що чомусь не спрацював клапан, який регулював подачу газової суміші до двигуна. Після тривалого пошуку винуватців, члени комісії приїхали на завод, який виготовляв патрубки, через які подавався газ до регулюючого клапану та перевірили їх якість; в середині всіх патрубків, які були розібрані, було виявлено не лише дрібні задирки, але й стружку.

Були й об'єктивні причини, які пов'язані із дослідженнями поверхні Місяця. Так, у кінці 1950-х років існувало два погляди на його поверхневий шар: кількадеметровий не утрамбований пил, у який міг провалитися КА, та твердий ґрунт. Тому не дивно, що задіяні в місячній програмі науковці побоюлися взяти на себе відповідальність і зупинитися на одній з них.

І, за таких умов, Корольов С.П. всю відповідальність взяв на себе і наклав резолюцію: «на поверхні Місяця товстого пилового шару немає. Корольов». На щастя, він не помилився. Тим не менше, перші радянські КА типу «Луна» здійснювали посадку на надувні подушки.

Складнішою була ситуація з вибором рівного місця посадки, на якому апарат не завалиться, а карт місячного рельєфу з високою просторовою роздільною здатністю (так званих гіпсометричних карт) не існувало. Тому на багатьох обсерваторіях (у тому числі й у ГАО АН України) велись роботи з побудови таких карт для окремих морських районів Місяця, роздільна здатність на яких навіть у місцях з найкращою якістю зображення була не кращою 0,3 км (а в Києві, де розташована ГАО, – 3 км), Тому ці карти могли слугувати лише для приблизного вибору території посадки.

У зв'язку із цим, однією з першочергових задач був вибір місця посадки за зображеннями із високою роздільною здатністю, за результатами радарного і лазерного зондування та посадками безпілотних модулів.

Доцільно відзначити, що при плануванні та реалізації космічних місій на Місяць використовувались ідеї не згаданого в СРСР уродженця міста Полтава Шагря О.Г. (1897-1942 рр.), який ховався за псевдонімом Кондратюк Ю.В.

Після місій КК «Аполлон-17» та КА «Луна-24» на багато років настала перерва в запусках і розпочалася розробка перспектив на майбутнє. У 1984 та 1988 рр. були проведені перші два Міжнародні симпозиуми з проблем місячної бази та діяльності в космосі у 21-му сторіччі, матеріали яких були оприлюднені у відповідних виданнях.

Про інтерес до цього говорить хоча б те, що у другому Симпозіумі прийняло участь більше 500 фахівців і було зроблено до 300 доповідей. Тематика цих форумів обхватувала широке коло проблем, які можуть виникнути як при створенні місячної бази та її функціонуванні, так і щодо життєдіяльності людини на цих базах. Крім того, з'явилися нові держави, які запусками власних КА ствердили себе у ранзі космічних. Серед них відзначимо такі.

КА «**Хайтен**» (Японія, 24 січня 1990 р.) став супутником Місяця під назвою «Мюзес-А».

КА «**Клементина**» (США) з 19 лютого до 3 травня 1994р. досліджував Місяць з полярної орбіти. Потім, після корекції орбіти був спрямований до астероїда 1620 Географ, але прямий зв'язок з ним було втрачено. Головною його задачею було отримати ряд зображень поверхні з роздільною здатністю біля 100 м на довжинах хвиль 415, 750, 900, 950 і 1000 нм (останні 4 довжини хвилі припадають на різні ділянки контуру смуги поглинання піроксену у спектрі Місяця) та провести бістатичну радіолокацію (РЛ).

КА «**Лунар Проспектор**» (США, 7.01.1998 р.) став штучним супутником Місяця і працював до 31 липня 1999 р. Основною метою було геохімічне картування місячної поверхні з допомогою гамма- і нейтронного спектрометрів.

КА «**Назомі**» (Планета-Б)» (Японія, 3.07.1998 р.), став супутником і передав зображення поверхні Місяця високої якості в кількох довжинах хвиль.

КА «**Смарт-1**» (Європейське Космічне Агентство, 29.09. 2003 р.) вийшов на полярну орбіту.

КА «**Селена**» (Японія, 14.09.2007 р.). Мета – одержання наукових результатів стосовно мінералогічного складу, топографії, геології, гравітаційного поля, місячної плазми і сонячно-земної плазми та розвиток критичних технологій для майбутніх місій.

«**Chandrayan-1**» (Індія, 08.11.2008р.), супутник Місяця.

«**Chang'e 1**» – 24.10.2007 р. (Китай). Основна мета – відпрацювання технологій наступних космічних експериментів.

КА «**Місячний розвідник**» (США, 01.10.2008 р.). Мета – картування поверхні Місяця і пошуку ресурсів, придатних для життєдіяльності людей на Місяці і підбору ділянок для посадки.

Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) на борту КА **LRO** було запущено 18 червня 2009 р., який 23 червня 2009 р. вийшов на сильно витягнуту місячну орбіту з метою підготувати зіткнення з кратером на полюсі.

Завдяки удару 9 жовтня 2009 р. з'явилась потужна газопилова хмара, через яку чотирма хвилинами пізніше пролетів інший апарат, а зібрану інформацію передав на Землю, а потім також ударився об місячну поверхню і створив новий плюмаж. Ці плюмажі були видимі при наземних спостереженнях.

Серед наукового навантаження там було два спектрометри на ближню інфрачервону (ІЧ) ділянку спектра, спектрометр на видиме світло, дві інфрачервоні камери, дві камери на ближню ІЧ і видиму ділянки спектру і радіометр; ці камери зареєстрували кожну фазу послідовності ударів об поверхню: спалах при ударі, утворення плюмажів (6-8 км у діаметрі через 15 с) і кратери (діаметром біля 28 м). На рис. 1.2 показано вигляд області біля місячного полюса з досліджуваним кратером Кабеус діаметром майже 100 км; ми бачимо його внизу на горизонті, а дно його завжди в тіні.

Вивчення супутників Марса започаткував КА «Маринер-9» (США, 1971 р.), продовжили «Вікінг-1, -2» (США, 1976 р.) й інші, які поряд із виконанням основаної місії – вивчення Марса, досліджували й супутники. Були й три спеціалізованих запуски, які планували м'яку посадку на Фобос.

КА «Фобос-1, -2» (СРСР, 29.01.1989). З Фобос-1 втрачено зв'язок на шляху до Марса, а «Фобос-2» досліджував супутники, але не здійснив м'якої посадки. КА Фобос (Росія, 2012 р.) не покинув навіть земної орбіти.

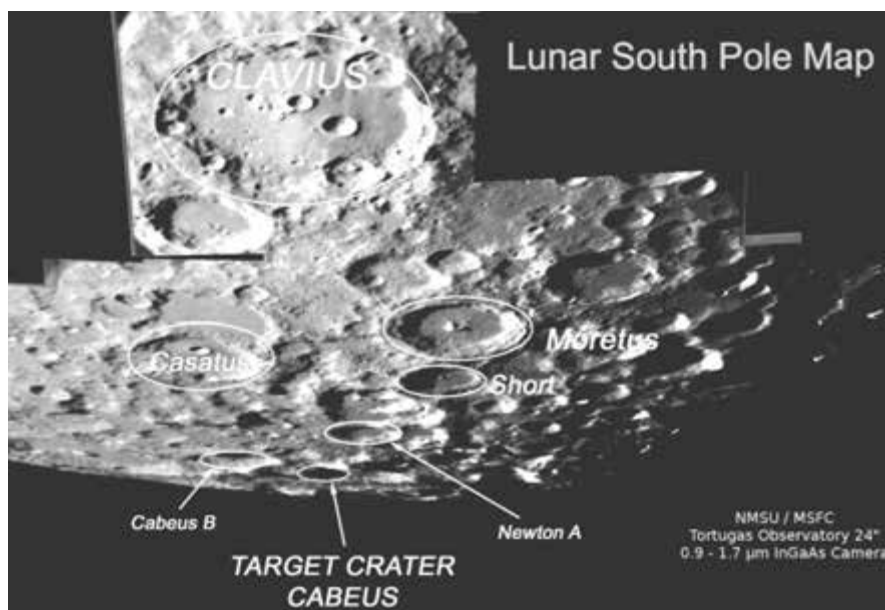


Рис. 1.2. Кратер Кабеус за 100 км від Південного полюса Місяця, що був вибраний метою польоту двох космічних апаратів LCROSS (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

2. Місяць

Місяць відноситься до низько альбедних супутників, рухається по дещо витягнутій (майже еліптичній) орбіті (при ексцентриситеті – 0,0549) та середній відстані до Землі 384399 км; орбіта нахилена до площини екліптики на кут $5^{\circ}08'43''$. Його середнє значення густини ($3,3464 \text{ г/см}^3$) значно менше земної ($5,518 \text{ г/см}^3$). Для періоду його обертання (тривалості «місячного місяця») існує 5 понять, які означають проміжки часу між двома проходженнями Місяця через: одне й те ж місце (для земного спостерігача) відносно Сонця – **Синодичний (29,53 земної доби)**; одне й те ж місце серед зір на небесній сфері – **Сидеричний (27,3217)**; через перигей – **Аномалістичний (27,55)**; через той же вузол орбіти (висхідний, або низхідний) – **Драконічний (27,21)**, а також проходження центра диска Місяця через середню точку весняного рівнодення – **Тропічний (27,3216)**.

Оскільки сидеричний та синодичний періоди досить близькі, то Місяць завжди повернутий до Землі тим же боком.

Хоча в дійсності спостерігається приблизно 60% його поверхні. Це зумовлено так званим явищем **лібрації** (від лат. *libratio* – хитання, коливання) [127, 128], яку розділяють на оптичну ($\pm 7^{\circ} 54'$ по довготі та $\pm 6^{\circ} 41'$ – по широті) і фізичну (2").

Відзначимо, що лібрація по довготі зумовлена нерівномірним рухом уздовж еліптичної орбіти та рівномірним осьовим обертанням, а по широті – не перпендикулярністю осі обертання до площини орбіти.

Крім того, у русі Місяця проявляються ще й інші періодичні зміни: **нутація** – досить короткоперіодичні коливання, які накладаються на **прецесію осі обертання** тіла під дією обертального моменту через зовнішні гравітаційні впливи; **регресія вузлів** – поступове переміщення на захід вузлів, в яких орбіта Місяця перетинає екліптику, яке зумовлене гравітаційним впливом Сонця; **евекція** – періодичне збурення руху Місяця, яке викликане зміною гравітаційного притягання Сонця при русі Місяця орбітою навколо Землі протягом місяця.

Напрямок руху Місяця практично співпадає із напрямком руху більшості тіл у Сонячній системі, тобто, проти руху годинникової стрілки, якщо дивитися на орбіту супутника з північного полюса світу.

При русі орбітою навколо Землі змінюються й умови освітлення його видимого диску: від майже всього диску (**Повний Місяць**) до майже повністю неосвітленого (**Новий Місяць**); проміжні умови відповідають **Першій** й **Останній** чверті. Якщо новий та повний Місяці співпадають з його нахожденням у місячних вузлах, то спостерігаються явища **Сонячного** і **Місячного** (рис. 2.1, 2.2) затемнень. Вони бувають повними і частковими, а сонячні затемнення бувають і кільцевими, у випадку, коли навколо Місяця залишається видимою прилімба область Сонця.



Рис. 2.1. Затемнений Місяць і зоряне небо

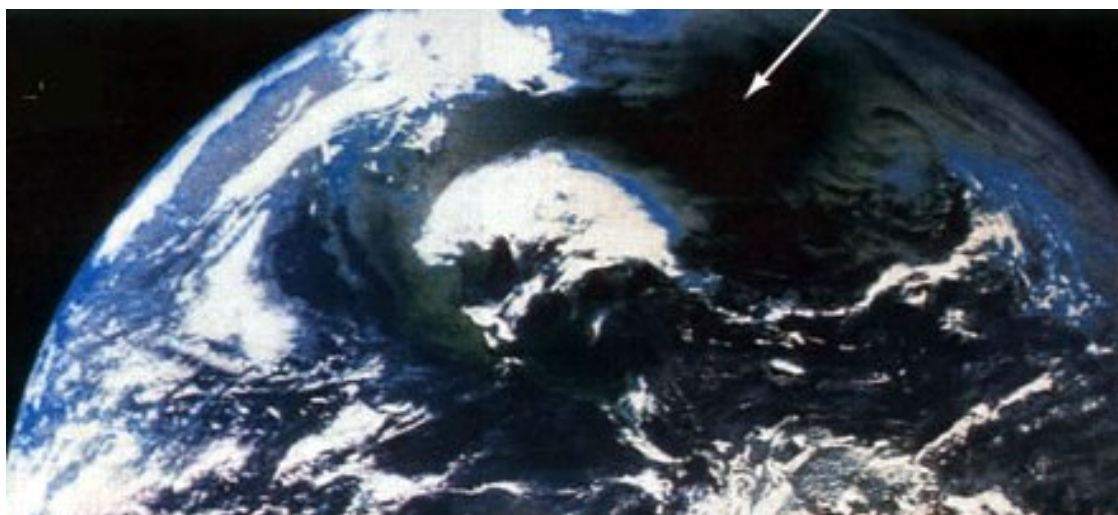


Рис. 2.2. На поверхні Землі добре помітна місячна тінь під час повного сонячного затемнення 7 березня 1970 р.

Споглядання Місяця навіть неозброєним оком (рис. 2.3) виявляє різноманіття форми і розмірів оптично неоднорідних деталей. Це дозволило ще Я. Гевелію в 1647р. скласти карту нашого нічного світила. Найголовнішим місячним хребтам, по аналогії з земними, ним було присвоєно імена: Карпати, Кавказ, Апенніни, Альпи тощо.



Рис. 2.3. Місяць над Грецією

У 1651 р. присвоєння імен продовжив Дж. Річчолі: великим темним деталям були присвоєні фантастичні імена (Океан Бур, Море Спокою, Море Криз, Море Дощів тощо); темні, дещо менші деталі, які примикають до цих морів, названі затоками (наприклад Затока Веселки); невеликі неправильної форми плями – болотами (наприклад, Гниле Болото); окремим вершинам, головним чином кільцеподібним, присвоєні імена видатних учених (Тихо Браге, Коперник, Кеплер тощо).

З ХХ ст. питаннями по упорядкуванню системи назв переймається Міжнародний Астрономічний Союз (МАС) в рамках

якого створена спеціальна Робоча група із номенклатури. У 1962 р. була сформована концепція, згідно котрої:

1. Протяжні утворення, які відносять до одного із таких понять, як океан, море, озеро чи затока, отримують латинізовані назви, котрі мають емоційний характер;

2. Гірські масиви отримують латинізовані назви, які відповідають географічним назвам гір на Землі;

3. Кратери та окремі вершини гір (піки, миси) називають іменами астрономів та інших видатних науковців (але посмертно); а тому на картах зворотного боку Місяця появилися імена К. Ціолковського, Ю. Гагаріна, С. Корольова та інших. Заборонено використовувати імена релігійних та політичних діячів, філософів та полководців 19 і 20 століть.

4. Борознам, долинам й ланцюжкам із кратерів дають імена кратерів, які розташовані поруч. Певним винятком були три гігантських ланцюжки в районі Моря Східного на зворотній стороні Місяця, яким присвоєно ще й такі власні імена ГДЛ, ГИДР, РНИИ на честь найперших радянських дослідницьких організацій, які започаткували розвиток ракетної і космічної техніки.

У формуванні місячного рельєфу приймали участь деякі внутрішні та зовнішні чинники, однак тривалий час йшла боротьба між прихильниками вулканічного і метеоритного механізму походження кратерів, які відповідно були запропоновані в 1880-х роках І. Шретером та у 1824 р. Ф. Груйтуйзенем. На думку останнього, при ударі метеорита поверхневий шар продавлювався, внаслідок чого й утворювався кратер, але строгу теорію процесу взаємодії метеорита з поверхневим шаром (теорія вибуху) було розроблено лише в 1937 р. К. Станюковичом, яка активно розроблялась у 1947-1960 роках.

Ще наземними спостереженнями показано, що моря займають до 40% поверхні видимої поверхні Місяця та є низинними рівнинами та посічені тріщинами й невисокими звивистими валами (рис. 2.4). Багато з них є оточеними концентричними хребтами кільцевих форм.

Світліша поверхня густо укрита численними кратерами, борознами, кільцеподібними хребтами тощо. На видимому боці Місяця близько 300000 кратерів мають діаметри більші від 1 км, а найбільші з них сягають кількох сотень кілометрів.

Кратери з діаметрами менше 15-20 км мають простішу чашоподібну форму (рис. 2.5), тоді як більші кратери складаються із округлого валу та мають круті внутрішні схили, на котрих інколи

спостерігалися тераси, та порівняно плоского дна, заглибленого, порівняно з навколишньою місцевістю.



Рис. 2.4. Море Спокою (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)



Рис. 2.5. Кратер Ван де Граафа шириною 243 км (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Довкілля деяких кратерів насичені досить світлими променями, що розбігаються в усі сторони (рис. 2.6, ліворуч), а у центрі – гірки (рис. 2.6, праворуч). Ці системи можуть бути: вторинними тріщинами, які утворилися при утворенні основного центрального кратера; осколками основного астероїдного тіла, які знаходяться або на поверхні цих морів, або ж перекривають деякі гірські породи. Інколи тектонічні розриви перетинають моря та кратери, або ж самі перекриваються більш молодими утвореннями. Вважається, що вік деяких наймолодших із великих кратерів становить у десятки, а можливо й сотні мільйонів років, а найстаріших – 3-4 млрд. років.



Рис. 2.6. Ліворуч – кратер Тихо із світлими променями, а праворуч – відносно молоді кратери Ератосфен діаметром 61 км та Коперник (на лімбі) (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Кратери діаметром більше 90 км умовно розділені на «вторинні» (молодші), контури яотрких накладаються на контури, як правило, більших за розміром «первинних». Материки і моря характеризуються різною густиною кратерів. Так, кількість тих кратерів, що мають діаметри від декількох десятків метрів і аж до найбільших на площі в 1 км^2 на валу кратера Альфонс у 3, а на материку – у аж 30 разів більша, ніж на морях. За даними радарної та лазерної локації побудовані рельєфні карти (рис. 2.7). Найвища точка знаходиться у південній частині басейну Діріхле-Джексона (на північ від кратера Корольова) зворотного боку Місяця, а найглибша – в кратері Антоніаді, найбільший перепад висот на поверхні супутника сягає 19,81 км.

Поряд з макрорельєфом існує і мікрорельєф (розмір в межах від 0,06 до 1860 мкм), який сформувався під впливом сонячних вітрів і

ударів мікрометеоритів та названий **реголітом**. Що стосується пористості ґрунту поверхневого шару, то за даними аналізу показників датчиків динамічних навантажень на опори посадочних шасі КА було отримано оцінки від 0,35 до 0,8 (на глибині 5-10 мм), а за оптичними спостереженнями їх величина становить – 0,91 у верхньому шарі товщиною в кілька мікрон. На гравіметричній карті в межах $\pm 50^\circ$ по довготі і широті зареєстровані місця з гравітаційними аномаліями, природа яких приписана локальним концентраціям маси (так звані **маскони**) в межах між 10^{-6} та 10^{-5} його повної маси. Їх положення співпадає з центрами морів округлої форми (Море Дощу, Ясності, Нектару, Криз та Вологості). У морів неправильної форми (Океан Бур та Море Спокою) ніяких ознак гравітаційних аномалій на даний час не виявлено.

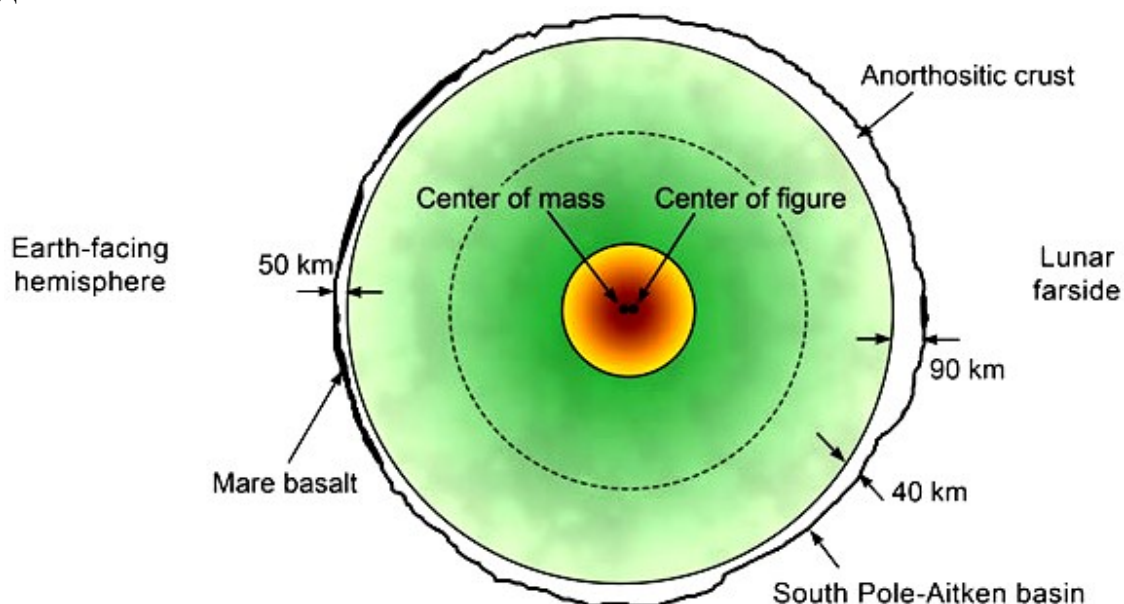


Рис. 2.7. Висотний профіль Місяця за даними радіолокації

Щодо природи (мінералогічного складу) поверхневого шару, то наземні дослідження виявили смугу піроксену на довжині хвилі 0,9 мкм. В той же час 6 пілотованих КА «Аполлон» та 3 автоматичних КА «Луна» доставили на Землю з різних областей поверхні відповідно 381 і 0,32 кг ґрунту (рис. 2.8). Їх лабораторний аналіз показав, що ґрунт відповідає породам вулканічного типу [430, 465, 466, 725] (лава) і породам, які виникли в процесі дроблення і розплавлення місячної речовини при падінні метеоритів, а також частки метеоритної речовини [154, 647-649], вік яких оцінюється в десятки та сотні мільйонів років.

Всі існуючі зразки чітко розділяються на дві великі групи – материкову й морську. Морські породи – це залізисті базальти,

подібні до тих, з яких складається дно океанів нашої Землі. Материкові – складаються із речовини, збагаченої з'єднаннями алюмінію, кальцію й магнію і матеріалу, що утворився у процесі ударно-вибухової переробки древньої місячної кори на самих ранніх етапах розвитку; вони не мають аналогів у земних породах.



Рис. 2.8. Зразок ґрунту – анортозит – доставлений з місячного плоскогір'я у місці посадки КК «Аполлон-16»

В той же час, виявлено ряд геохімічних особливостей (рис. 2.9), які відрізняють їх від земних та від метеоритних порід. Насамперед – тоді відмічали відсутність у місячних зразках води й інших летких компонентів (наприклад, вуглекислоти, лугів), а також органічних залишків. Внаслідок цього на Місяці у десятки разів менше різних видів мінералів, і серед них зовсім відсутні мінерали, що містять воду і сильно окислені елементи.

Породи Місяця багаті такими хімічними елементами як кальцій, цирконій, алюміній тощо, що є досить тугоплавкими й важко леткими (табл. 2). Такі характеристики порід, напевно, типові для небесних тіл проміжного розміру (менших Землі, але більших за невеликі астероїди), які мали період магматичного розвитку своїх надр, але не змогли через свій невеликий розмір довго утримувати леткі компоненти, які виділялися. За вмістом радіоактивних ізотопів визначено вік порід на Місяці: 4,46 млрд. років – найстаріші породи, ≈ 4 – для більшості місячних морів (Море Спокою, Море Ясності, Океан Бур) та 3,87 – для Моря Дощів. Експерименти з місячної поверхні показали ознаки дуже слабкої атмосфери; так, було знайдено

гелій, неон, аргон та, можливо, ще й молекулярний водень із сумарною концентрацією вночі $\approx 2 \cdot 10^5$ молекул в см^3 ; зареєстровано також пиловий шару на певній відстані до поверхні, який проявлявся світінням західного лімба місячного горизонту після заходження Сонця та підвищеного (порівняно до очікуваного) світіння денного і нічного неба в ультрафіолеті (УФ) і особливо велике – у видимій ділянці спектра; воно залежало від зенітної відстані до Сонця.



Рис. 2.9. На цьому зображенні зростаючого Місяця невеликі контрасти кольорів були спеціально перебільшені. Море Спокою – це синя область справа від центра. Білі промені виходять із кратера Тихо внизу зліва. У кратері Коперник – зліва від центра можна побачити багряні відтінки. Різні кольори, хоча й перебільшені, відповідають реальним розходженням у хімічному складі місячної поверхні: відтінки синього кольору спостерігаються в областях, багатих титаном, жовтогарячий і пурпурний – вказують на райони, відносно збіднені титаном і залізом.

Таблиця 2. Середній склад місячного ґрунту в місцях посадок КА (%).

КА	Кремне-зем SiO ₂	Глинозем Al ₂ O ₃	Оксид титану TiO ₂	Закисле залізо FeO	Палена магнезія MgO	Негашене вапно CaO
Аполлон-11	40.5	10.1	10.4	19.2	7.0	11.5
Аполлон-12	44.9	8.9	3.6	20.5	10.6	9.8
Аполлон-14	48.1	16.7	1.5	9.5	10.2	10.7
Аполлон-15	46.7	10.2	2.0	19.9	8.8	10.6
Аполлон-16	44.9	27.2	0.5	5.0	6.0	14.6
Аполлон-17	39.0	9.0	11.9	18.8	8.5	10.8
Луна-16	44.0	13.8	4.8	18.7	6.4	11.8
Луна-20	45.2	22.8	0.5	7.5	9.7	14.7
Луна-24	46.0	12.2	1.0	21.6	7.4	12.2

Наявність пилу пов'язують з метеорним бомбардуванням поверхні. Згідно наближених оцінок, коли приймалося, що пил рівномірно розміщений на відстані Місяць - Земля, концентрація частинок у 10 разів більша міжпланетного значення на відстані 1 а. о. Середній радіус частинок було оцінено в 10 мкм.

Місяць тривалий час вважався єдиним природним супутником нашої Землі та найближчим до неї небесним тілом. Але на початку 21 століття було виявлено, що Земля рухається своєю орбітою навколо Сонця і супроводжувана не тільки Місяцем, але й ще кількома маленькими супутниками, які навіть під час мінімального зближення із Землею розташовані набагато далі, ніж Місяць, тому вони видні тільки у дуже потужні телескопи. Їх назвали квазі-супутниками (схожими на супутники) оскільки вони обертаються не навколо самої Землі, а навколо уявної лінії земної орбіти.

Першим з таких об'єктів став астероїд 3753 Круїньє, який по складній спіралі рухається навколо Сонця по одній орбіті з Землею. Площина його орбіти сильно нахилена до земної, тому зіткнення з ним нам не загрожує, оскільки в моменти перетину з орбітою Землі він перебуває або вище, або нижче неї. Мінімальна відстань між Круїньє і Землею становить 15 млн. км, що у 40 разів є більшим, ніж до Місяця.

Цей астероїд рухається по витягнутій орбіті. Але «віссю» його переміщень у космосі служить орбіта Землі і він здійснює навколо неї один виток за рік, і за багато років поступово проходить шлях у вигляді спіралі, «намотаної» навколо орбіти Землі.

Ще один астероїд, для якого була вивчена динамічна еволюція орбіти – астероїд 2002 AA29 – рухається поруч із орбітою Землі і є

першим із відомих астероїдів, який здійснює періодичні геоцентричні переходи по спіралі (рис. 2.10). Цей астероїд уже протягом кількох десятиліть залишається дуже близько до Землі (у межах 0.2 а.о.)

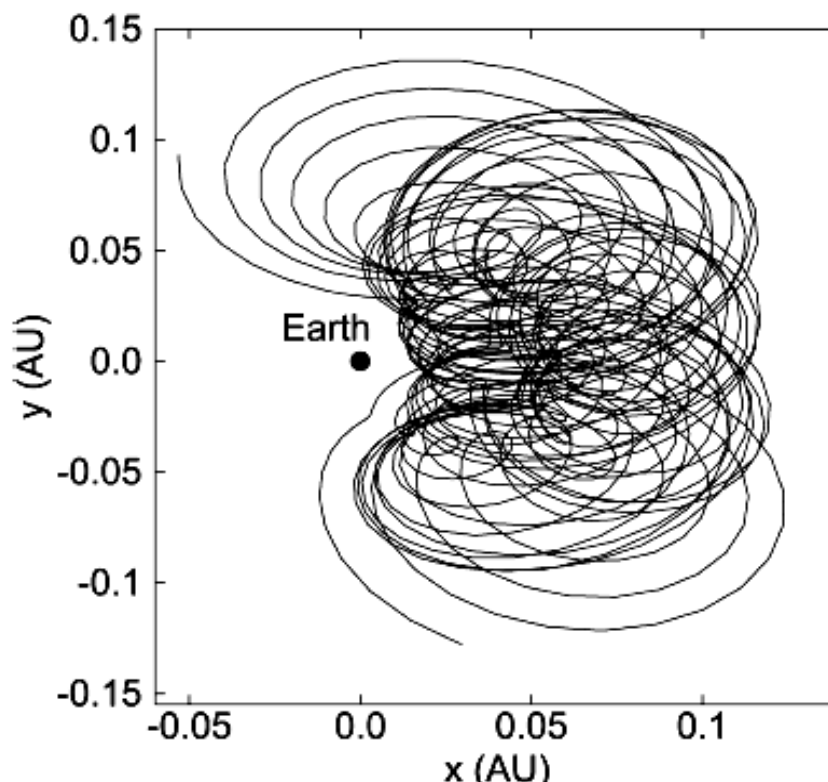


Рис. 2.10. Геоцентричні рухи астероїда 2002 AA29 протягом кількох десятиліть.

Кілька років по тому було відкрито ще три астероїди, що перебувають у подібному ж динамічному резонансі з Землею.

2.1. Особливості вулканізму на Місяці.

Вулканічна активність у Сонячній системі, в основному пов'язана із Землею, з вулканами на супутнику Юпітера Іо, з давно згаслими вулканами Марса та на крижаних супутниках Сатурна Титані та Енцеладі. Але в ранній історії Сонячної системи лава виливалася і на поверхню інших планет та їх супутників, і навіть на Меркурії та Місяці. Раніше вважали, що всі вулкани Місяця охолонули від 1 до 2 млрд років тому. Але аналіз знімків, отриманих з камерою апарату Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), вказав на області, на яких виверження вулканів відбувалося в останні 33 млн років.

Причому вулканізм на Місяці відрізняється від вулканізму на Землі. Найстаріші скелі на Землі мають вік ~ 3.9 млрд років, а базальт

на морському дні Землі має вік близько 0.2 млрд років. Вулканізм Землі – це сучасний процес. І вулкани Землі геологічно молоді з віком менше кількох сотень тисяч років. Виверження вулканів Землі, переважно, відбуваються уздовж дуже довгого ланцюжка гір; гори Анди показують краї літосферної плити, Гавайські острови показують минулі рухи плити по мантії.

На Місяці немає доказів тектоніки плит. Більшість вулканічних вивержень на Місяці закінчилися 3-4 млрд. років тому. Вважалося, що молоді потоки мають вік близько 1 млрд. років. На більшій частині поверхні Місяця є рівнини з базальтовими лавами, які називаються «моря». Місячне виверження відбувалося на дні великих і старих кратерів. Тому багато місячні моря мають практично круглу форму. Місячні гори розташовані на краях цих басейнів, оточуючи місячні моря. Майже всі моря знаходяться на видимому боці Місяця, і менше 2% - на іншому боці Місяця. Тому гори там вищі, і кора там набагато товща. Таким чином, основними факторами вулканізму на Місяці є висота поверхні та товщина кори.

Місячна гравітація становить 1/6 земної. Тому рушійні сили лавових потоків на Місяці – слабші. Плоскі та гладкі поверхні морів означають, що місячна лава була дуже рідка. І потік лави легко розливався великою територією. Найменша гравітація означає, що виверження, які супроводжуються вибухом будуть викидати лаву далі, ніж Землі. Тому виверження на Місяці поширювали лаву в широкому пласкому шарі, а не конусом, як на Землі. Через це великих вулканів на Місяці немає. Відсутність води на Місяці дуже впливає на місячний вулканізм. Адже без водяної пари насильницькі виверження на Місяці мають мало шансів. Натомість лава плавно і безшумно виходить на поверхню.

Ще «Аполлоном-15» з місячної орбіти виявили топографічну аномалію 2 км у поперечнику, яку вважали недавно зруйнованим вулканічним кратером. Її назвали "Ina" (рис. 2.11). Пізніше, на зображеннях, отриманих за допомогою LRO, було знайдено невеликі ділянки, які є порівняно недавніми відкладеннями базальтової лави (рис. 2.12). Ці аномалії назвали "irregular mare patches" (IMP). Вони містять шорсткі і гладкі поверхні та кілька кратерів розміром трохи більше 20 м. Це вказує на їх молодий вік. Усього знайшли 70 IMP. Тобто після п'яти років спостережень з камерою LRO стало зрозуміло, що «Ina» не особлива, а одна з багатьох аномалій. Усе це свідчить про набагато триваліший проміжок місячного вулканізму, і, можливо, більш високу температуру місячних надр, ніж передбачалося раніше. Така велика кількість і поширення цих ділянок передбачає, що

вулканічна активність була поширеною ще недавно. Три таких ділянки зі слідами вулканічної активності датуються менш ніж 100 млн років, а вік Іна може бути меншим за 50 млн років.



Рис. 2.11. Аномалія "Іна" шириною близько 2 км. Видно гладкі пагорби і шорсткі западини. Фото: NASA із LRO.

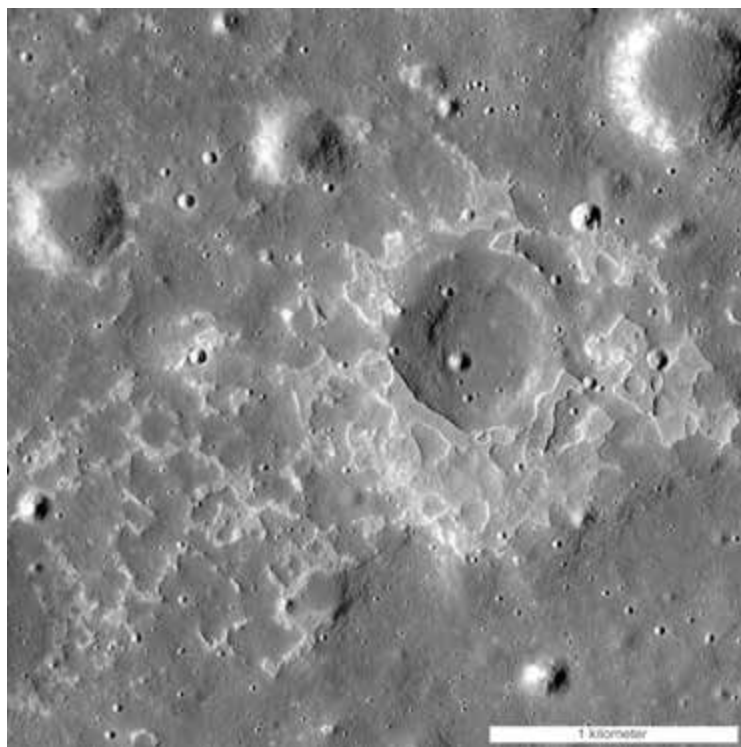


Рис. 2.12. Нещодавно знайдена аномалія "Maskelyne", що свідчить про "недавню" вулканічну активність. Фото: NASA.

На невидимому боці Місяця після ретельного аналізу даних, переданих на Землю орбітальним зондом LRO, виявлено конусоподібні вулкани віком близько 800 млн. років. Вони розташовані біля північного полюса між кратерами Комптон та Белкович (СВ на рис. 2.13). Розміри вулканів біля основи мають ширину від 800 до 5000 м і висоту до 6 км.

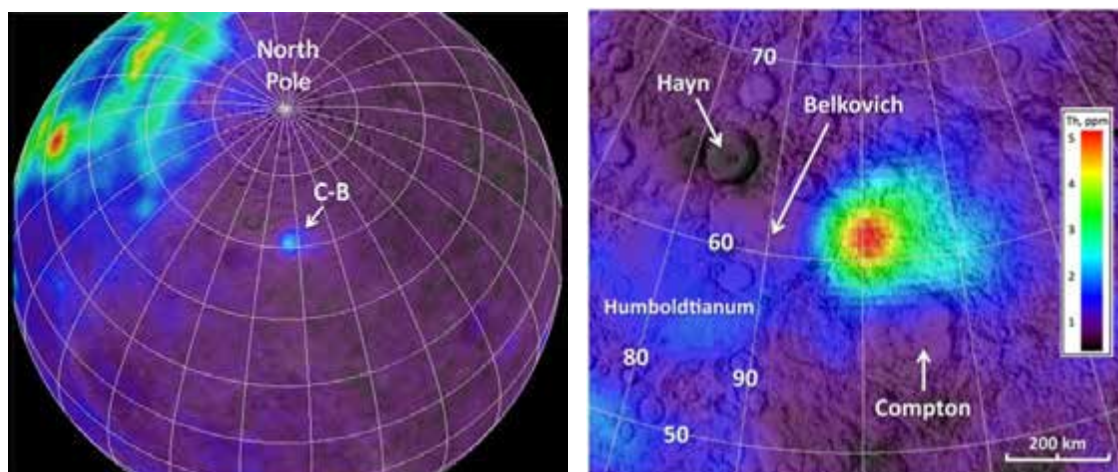


Рис. 2.13. Зліва – розташування конусного вулкана між кратерами Комптону та Белковича (С-В) на невидимому боці. Справа – конусна аномалія Комптона-Белковича на знімках, отриманих зондом LRO.

На схилах вулканів наприкінці 1990-х років знайдено радіоактивний елемент торій. На поверхню торій, швидше за все, потрапив під час виверження, коли магма вийшла тріщинами з надр Місяця і застигла на схилах. Спектральний аналіз ґрунту на схилах згаслих вулканів виявив ще й кремній. Наявність кремнію не характерна поверхні Місяця. Ці згаслі вулкани розташовані відокремленою групою, далеко від решти місячних вулканів. Виверження тягучої та позбавленої металів лави, що формують класичні конуси вулканів на Землі, на Місяці відбувалися дуже рідко. Тому ці вулкани є унікальними. Більшість торію похована під купою метеоритної крихти.

З'ясувалося, що ці виверження покривали площі до 70 тис. кв. км. Основною причиною великого розкидання магми й попелу та інших слідів виверження є відсутність атмосфери та низька сила тяжіння на Місяці. Після вивчення, доставленого на Землю «Аполлонами» місячного матеріалу, цю речовину відтворили в лабораторних умовах. Потім речовину розплавляли при температурі 1500 К та тиску 45 тис. бар, які характерні для умов усередині Місяця. Виявилося, що магма на Місяці – занадто щільна для того, щоб викликати тектонічну

активність на поверхні супутника, і дуже важка для того, щоб виходити на поверхню. Вважається, що рух літосферних плит завершився на Місяці близько 3,6 млрд років тому.

Поступове охолодження Місяця підігрівало геологічні процеси ще 2.6 млрд років. Воно могло припинитися близько мільярда років тому. Однак, цілком можливо, що Місяць залишався геологічно активним і набагато довше. Про це свідчить топографічна карта Місяця, складена за знімками поверхні, отриманими зондом LRO за його роботи на орбіті Місяця. Виявилося, що на звороті Місяця є кілька западин. Найбільші западини знаходяться на височині за 130 км на північний схід від кратера Віртанен.

Поверхневий реголіт накопичується при падінні метеоритів зі швидкістю 5-8 см за 1 млн. років. Це дозволило датувати вік місячних ярів. Зіставивши глибину ярів зі швидкістю накопичення реголіту, було отримано деякі висновки про те, що западини є наслідком вулканічних процесів у надрах Місяця, а чи не зіткнення з небесними тілами. Ці процеси призвели до утворення тріщин лише близько 50 млн років тому. Відомо, що близько 3.8 млрд років тому Місяць пережив зіткнення з тілом діаметром до 300 км. При цьому на місячній поверхні утворився кратер шириною 1120 км і глибиною кілька кілометрів. Згодом він був залитий лавою і став Морем Дощів із площею 829 тис. кв. км.

Ще два інші великі моря утворилися на звороті Місяця – Московське та Східне – при падінні космічних тіл діаметром близько 100 та 110 км. Наразі надійно встановлено, що всі вулкани на Місяці діяли на протязі понад 4 млрд років. Хоча раніше припускали, що вулканічна діяльність різко зупинилася 1 мільярд років тому. Але навколо місячних морів було знайдено багато вулканів та магматичних утворень з віком 100 млн років, а можливо, що серед них були і вулкани, які затихли 50 млн років тому.

І якщо на Місяці станеться доволі сильний місяцетрус, то, можливо, це призведе до виверження лави на її поверхню. Тому вважають, що, скоріше всього, саме так було близько сотні мільйонів років тому. Встановлено, що вихолодження поверхні Місяця поступово позначається на стані магми у її ядрі. Пониження температури робитиме вулканічну масу менш щільною, що й призведе до її виверження. Незважаючи на те, що поверхня супутника зараз є досить спокійною, дані про підземні поштовхи та високий відсоток розплавлених скельних порід (до 30%) свідчать про те, що в його глибинах ще збереглися великі запаси рідкої магми.

На Землі такі магмові пласти мають тенденцію рухатися у напрямку поверхні і вивергатися через кратери вулканів. На Місяці ми не бачимо аналогічної картини через те, що розплавлена порода в її надрах має надто високу щільність. Завдяки комп'ютерному моделюванню отримані дані дозволили розрахувати щільність магми у будь-якій точці Місяця. І майже у всіх випадках згодом вона виявлялася менш щільною порівняно із застиглими зразками.

В даний час Місяць продовжує охолоджуватися, і слідом за її поверхнею тверднуть і шари з титановою магмою. Вона поступово втрачає щільність і тому втрачає властивості природної перешкоди. Так що в майбутньому потоки магми можуть знову рясно вилитися на поверхню Місяця. Лава з вулканів в аномалії Комптона-Белковича має не базальтову основу, а кремнієву. Тому там можлива освіта нових конусних вулканів.

3. Супутники Марса

Супутники Марса [14] (рис. 3.1) також вкриті кратерами різного розміру, найбільші з них досягають третини від діаметра супутника (рис. 3.2); їх назвали D'Arrest, Todd, Sharpless, Wendell, Holl, Stickney та Roshe на Фобосі та Swift і Voltaire на Деймосі.

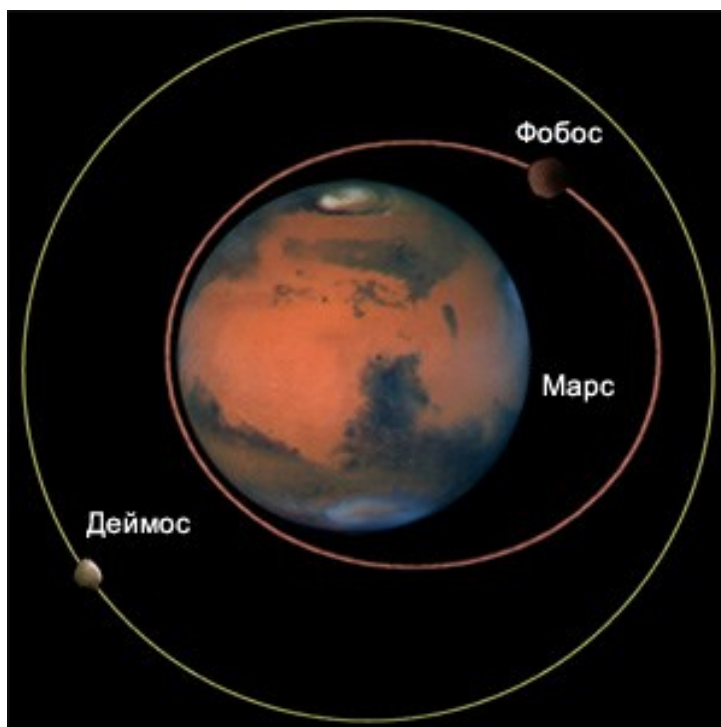


Рис. 3.1. Орбіти супутників Марса

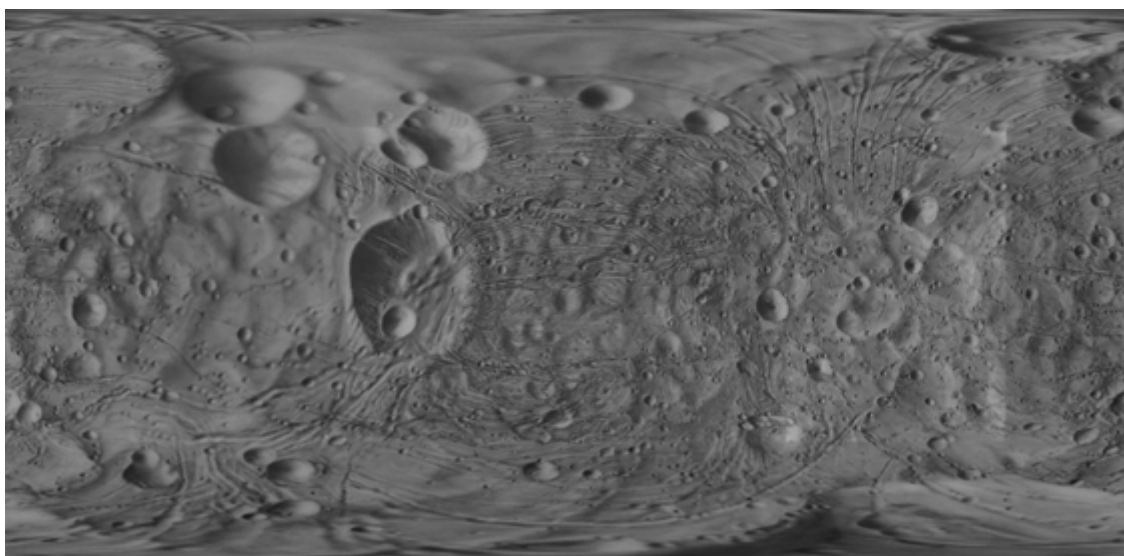


Рис. 3.2. Карта Фобоса за даними КА «Марс Експрес»

На топографічній карті поверхні Фобоса знайдено 260 кратерів із діаметром від 300 до 11120 м й глибиною від 2 до 960 м; для них відношення «глибина/діаметр» знаходиться у межах від 0,002 до 0,29. Так, найбільший кратер (рис. 3.3), який названо на честь Chloe Angeline Stickney Hall, математика і дружини астронома Asaph Hall, який виявив в 1877 р. полярні шапки Марса, має діаметр понад 9 км; висота його кільця по периметру місцями більша 1 км, заглиблення дна перевищує 1 км, а на його дні присутня центральна гірка висотою ≈ 350 м.

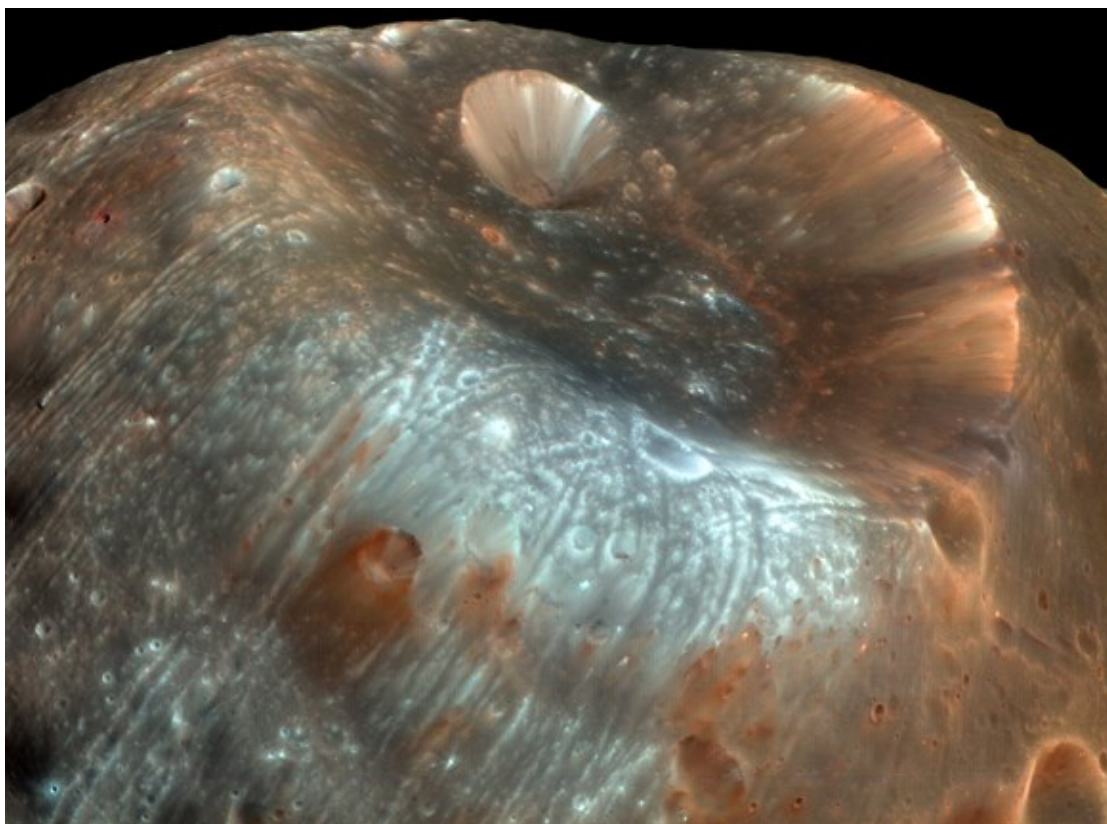


Рис. 3.3. Кратер Стікні на Фобосі

Всі деталі на поверхні Фобоса (див. рис. 3.3) розділені на 4 групи; це:

1) ударні кратери та безпосередньо пов'язані із ними деталі (це вибухові відкладення та реголіт);

2) окремі деталі, які можливо приписувати їх ендегенному походженню (відмітимо, що вони присутні лише на Фобосі), які включають ринво- та граткоподібні деталі;

3) альбедні та текстурні деталі (наприклад, темні деталі у кратерах, яскраві ободи кратерів та певні «потoki» на їхніх схилах); 4) гірські грані та кряжі.

В кратерах супутників виявлені місця «стікання» речовини до їх дна.

На фоні надзвичайно низької величини середнього альбедо Фобоса (менше 0,05), альбедо країв і стін багатьох кратерів місцями сягає 30%, що приписується викинутому при утворенні ударних кратерів матеріалу.

Поверхня Деймоса (рис. 3.4, 3.5) на масштабах від десятків до кількох сотень метрів надзвичайно гладка [592]. Світлішими переважно є припідняті ділянки та схили кратерів, темнішими – є улоговинами. Це може вказувати на те, що зовсім незначні контрасти в альбедо на поверхні зумовлені процесами у порівняно товстому шарі реголіту, котрий спочатку міг бути викинутим при сильному ударному процесі, а пізніше протягом тривалого часу осідав на поверхню цього супутника товстим шаром товщиною до 200 м.

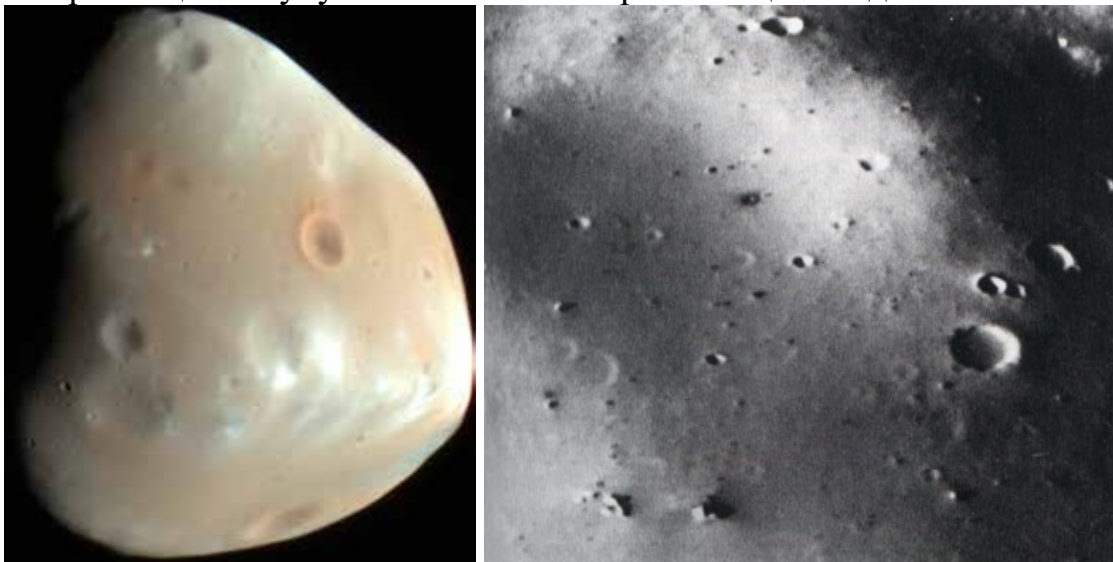


Рис. 3.4. Фото поверхні Деймоса

Рис. 3.5. Поверхня Деймоса з «Вікінга-2». На області розміром 1,2×1,5 км видні деталі до 3 м у поперечнику

Домінує думка, що супутники Марса – це астероїди (рис. 3.6), які потрапили свого часу в гравітаційний полон Марса (першим був захоплений Фобос). Існує гіпотеза, згідно котрої при формуванні планети (або відразу після його завершення) міг утворитися один, але крупний супутник, котрий під дією певних гравітаційних сил зруйнувався. Основна маса отриманих осколків упала на поверхню Марса, а невеликі фрагменти залишилися на орбіті й стали сучасними супутниками. А отже, не виключено, що Фобос та Деймос можуть відноситись до обломків єдиного протопланетного тіла і збереглися ще з тих пір, коли планет ще не існувало.



Рис. 3.6. Зображення астероїда Ітокава

4. Супутники Юпітера

Якщо Галілеєві супутники [37, 38, 46, 455, 578, 589] мають великі розміри та є сферичними й високо- (Іо [113, 129, 155, 203,], Європа і Ганімед [295, 386, 387, 486, 479, 533, 534, 703]) та середньо-альбедними (Каллісто [58, 95, 109, 244, 311, 312, 359, 389, 403, 425]) (див. рис. 4.1), то внутрішні (рис. 4.2) і зовнішні супутники Юпітера мають невеликі розміри, низьке альbedo і неправильну форму. Вони згруповані в підкласи, які носять назви найбільших тіл.



Рис. 4.1. Зображення супутників (зліва направо) Іо, Європа, Ганімед та Каллісто (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

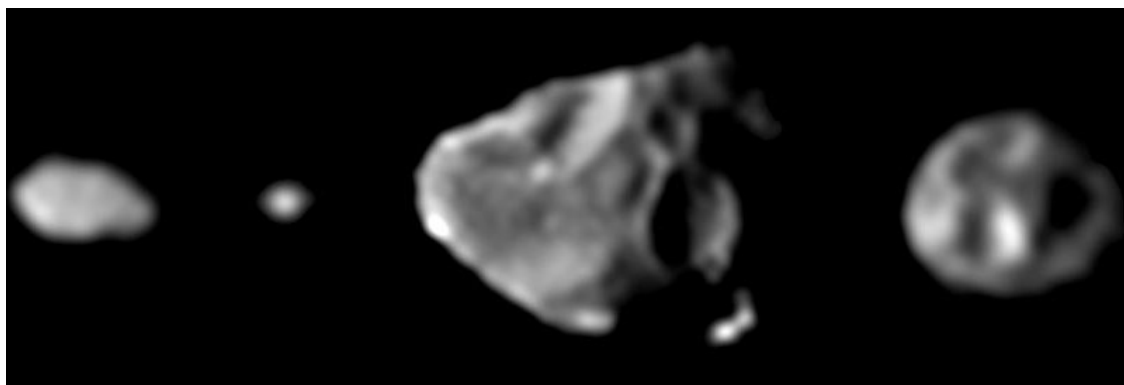


Рис. 4.2. Зображення з КА «Галілео» супутників (зліва на право) Метіс, Адрастея, Амальтея та Теба

Ближче до відомих галілеєвих супутників розташовані супутники [547, 550] із прямим рухом, котрі умовно розділяють на три підгрупи:

1) у групі Фемісто є тільки цей супутник на середній відстані 7 млн. км до Юпітера та нахилом 45° ;

2) у групі Гімалії є 5 супутників (Гімалія, Леда, Елара, Лісителя та S 2000/J11) на середніх відстанях ≈ 11 млн. км і нахилах близько 30° до площини екватора центральної планети;

3) єдиний супутник S/2003 J20 із великою піввіссю 17 млн. км та нахилом у 55° .

Супутники із зворотним рухом поєднуються ще в три-чотири групи:

1) це група Ананке із великими півсями 18-21 млн. км і нахилами $145-150^\circ$ (Еванте, Евпоріе, Іокасте, Гарпаліке, Герміппе, Праксідіке, Ортозіе, Тіоне, Ананке й S/2003 J3, J4, J6, J12, J15, J16, J18, J21);

2) група Карме (Кале, Еврідоме, Пазіфее, Ісоное, Еріноме, Халдене, Карме, Тайгете, Каліке, Етне, S/2002 J1, S/2003 J1, J5, J17, J9, J10, J11, J19) з великими півсями для їх орбіт 22-24 млн. км та нахилами $162-165^\circ$;

3) група Пасіфе (Мегакліте, Сінопе, Пасіфе, Спонде, Автоное, Каллірое, S/2003 J2, J8, J14) і середніми відстанями 23-28 млн. км та нахилами $147-152^\circ$.

Інколи говорять про 4-ту групу з умовною назвою Сінопе.

Розкид швидкості руху членів однієї групи є близьким до швидкостей відриву від батьківського тіла, які для супутників із зворотним рухом є близькими до 30 м/с, а розкид швидкості руху батьківських тіл різних груп є 200 м/с.

Відсутність наявності супутників в проміжній області нахилів орбіт $55^\circ < i < 130^\circ$ можна пояснити тим, що вони повинні мігрувати до області галілеєвих супутників.

Крім того, ще певна кількість супутників не мають належати до жодної із названих груп. Найвіддаленіший із відомих на грудень 2006 р. супутник обертався на відстані у 28,57 млн. км (0,19 а. о.) від Юпітера, здійснюючи один оберт протягом 982,5 діб.

При огляді галілеєвих супутників опустимо лише Іо. Адже йому характерна дуже сильна вулканічна діяльність, а тому його розглянемо пізніше.

Європа. Ландшафтові Європи [92, 112, 115, 120, 126, 130, 135, 259, 264, 274, 343-345, 364, 444, 445, 452, 495, 497, 521-525, 650, 651, 688, 696-698, 736, 737, 789, 797] характерним є рівнини (див. рис. 4.3), хаотичні ділянки (чи хаоси) (рис. 4.4, 4.5), ділянки ліній та смуг (рис. 4.3, 4.4), а ще хребти (рис. 4.4) та кратери (рис. 4.7). Не виключають, що глобальною мережею ліній є тріщини в товстій крижаній корі, які

зумовлені певними тектонічними процесами. Ширина таких розломів складає від кількох одиниць до кількох сотень кілометрів, при їх протяжності інколи до понад 3000 км.



Рис. 4.3. «Ластовиння» на видимій поверхні Європи

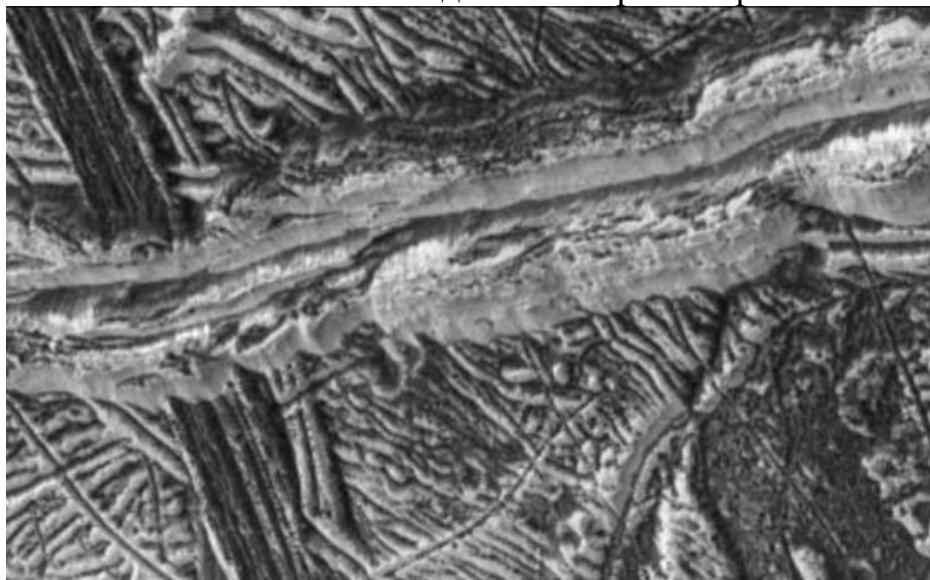


Рис. 4.4. Два хребти, що взаємно перетинаються, на поверхні Європи

Багато із цих ділянок є ніби складеними з окремих блоків, які розділені розломами з виглядом борозен [27, 54, 61, 125, 233, 300, 301, 352, 373, 412, 419, 420, 507, 536, 579, 582, 583, 605, 658, 665, 768, 774,

778]. На рис. 4.5 наведено мозаїку поверхні, названої Конамара, із хаотичним рельєфом та порівняно недавніми змінами на поверхні. Блоки з різною формою – є шматками розламаної кори, а тріщини, котрі перетинають цю поверхню зверху хаотичної структури, вказують на пізніше замерзання такого трохи підплавленого середовища у поверхневу кору [62, 116, 118, 148, 217, 348, 394, 409, 413, 514, 515, 517, 398, 529, 530, 541, 555, 607, 704, 772].

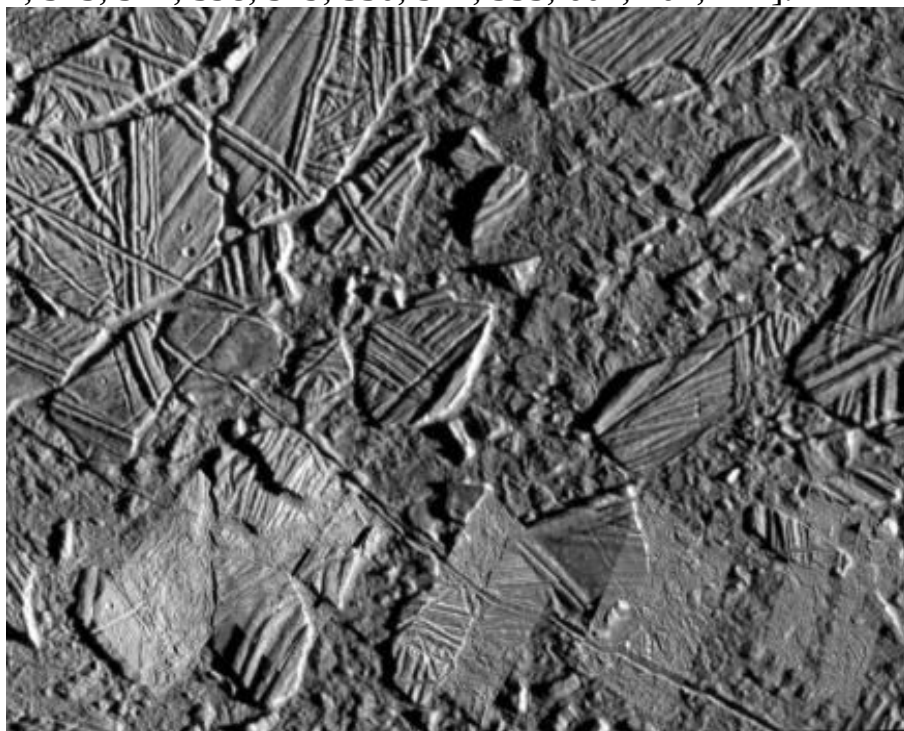


Рис. 4.5. Фрагмент поверхні супутника Європа із хаотичним рельєфом Конамара

На поверхні супутника Європа виявлені 5 достатньо великих ударних кратерів із діаметрами 10-80 км (рис. 4.6). Досить незвичним є кратер Тайр (перекладається як колесо). Його концентричні кільця вказують на досить молодий рельєф. Кратери із меншим розміром навколо нього є сформованими із великих осколків породи, яка була вибита при головному ударі під час утворення кратера Тайр. Згідно одній із гіпотез тіло, яке сформувало подібну поверхню, могло пройти крізь всю поверхневу кору у менш крихкі більш глибокі шари, у яких відбувся головний підрив, від епіцентру котрого розповсюджувалася ударна хвиля.

При порівняння зображень з КА «Вояджер» та «Галілео» не виявив помітних змін на поверхні супутника [271, 272, 291, 298, 308-311, 393, 395, 399-401, 458, 467, 471, 476, 480, 481, 494]. Оскільки шар поверхні цього супутника є досить згладженим, з перепадом висот

меншим від 50 м, то й це можна трактувати як дуже молодим рельєфом, або ж як існування певного постійного механізму для його згладжування.

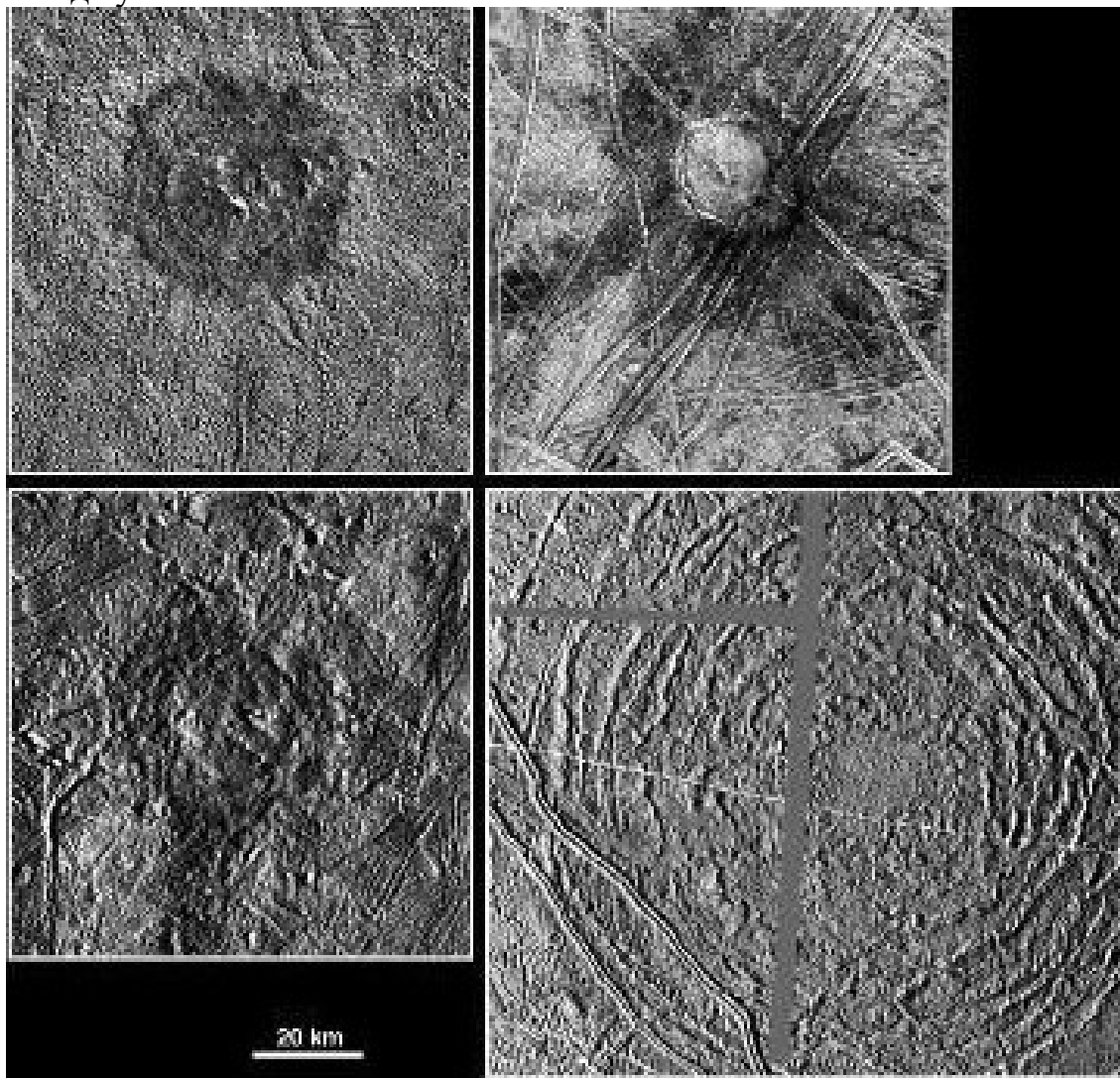


Рис. 4.6. Вигляд найбільших ударних кратерів Європи (за годинниковою стрілкою з верхнього лівого кута): Пвілл, Цілікс, Тайр та Маннаннан

Ганімед [35, 75, 123, 149, 263, 282, 322, 365, 527, 599, 600, 784] різноманіттям структури своєї поверхні нагадує Місяць. Причому, одна з його півкуль є «морською», інша — «материковою». Проте, дуже цікавим являється те, що навіть найтемніша із його областей є майже у 5 разів світлішою від темніших районів Місяця (див. рис. 4.7-4.9).

Середня густина Ганімеда є близькою до $1,94 \text{ г/см}^3$ (Європа – $3,04 \text{ г/см}^3$); це вказує на значну долю крижаної складової.

Темні області майже суцільно вкриті кратерами, а світліші – ще й широкими розломами.

Кратери, зазвичай, оточені досить світлим ореолом із променів з викинутого матеріалу [151, 769]; деякі з них є досить яскравими (з альбедо до 100%); вони, скоріше за все, є прикладом ударного походження та вважаються молодшими.

Також існують явні сліди активних тектонічних процесів.

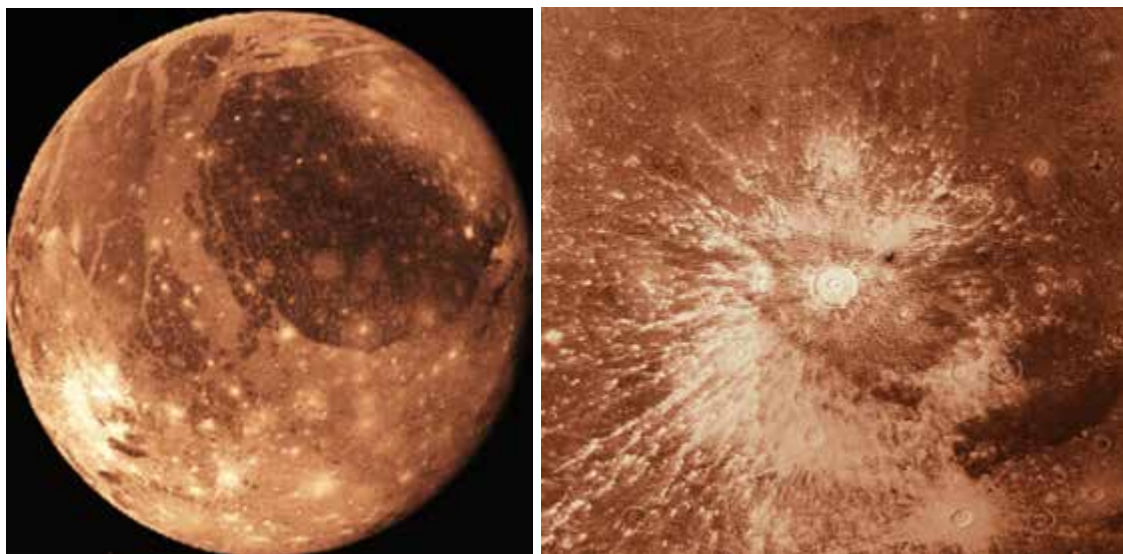


Рис. 4.7. Півкуля Ганімеда (ліворуч); праворуч – відносно молодий ударний кратер з променями (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)



Рис. 4.8. Ланцюг із 13 кратерів Енкі на поверхні Ганімеда (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Сюрпризом стало відкриття на супутнику магнітного поля (750 нТ на екваторі) та власної магнітосфери з протяжністю майже до 2 його радіусів. Магнітосфера супутника є зануреною у магнітосферу Юпітера, утворюючи в магнітосфері Юпітера своєрідну каверну з діаметром до 4 радіусів Ганімеда.

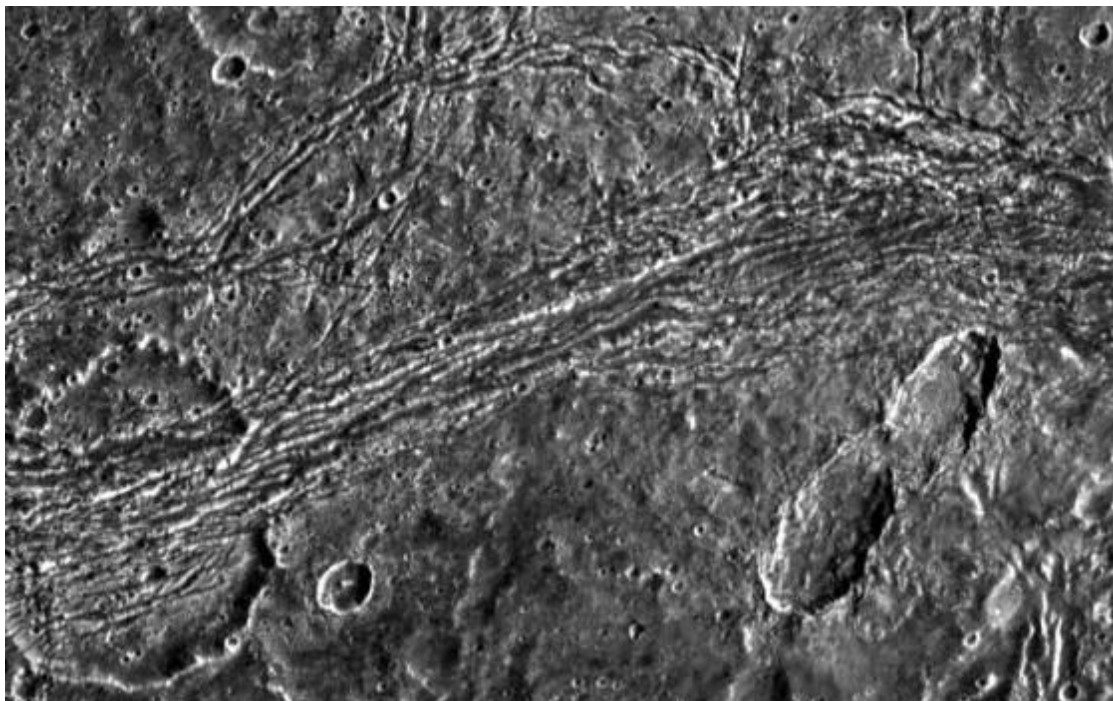


Рис. 4.9. Область Ніколсона на поверхні Ганімеда з розміром 111×93 км (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Одна із гіпотез щодо походження магнітного поля супутника допускає пропозицію, що воно є подібним до магнітного поля нашої Землі; тобто, воно наводиться з динамо-механізму при обертанні розплавленого залізного (чи із суміші із сульфідом заліза) ядра. Підтвердженням такої пропозиції може бути його дипольний характер. Наявність у супутника рідкого ядра приписують дії припливно-відпливних сил. Внаслідок цього температура у силікатному ядрі періодично підвищується, запобігаючи його досить швидкому охолодженню, а рухи рідкого металевого ядра у межах електропровідного контуру може забезпечити плавучість та його конвекція.

Згідно запропонованій іншій гіпотезі, магнітне поле супутника Ганімеда наводиться в провідному шарі солоного океану під товстою (130-150 км) корою з криги. Проте для цього необхідно нереально великі швидкості перемішування подібної «рідини» (близько 1 м/с).

Хоча у порізаній тріщинами та хребтами поверхні супутника Ганімед можна знайти деяку подібність із морфологією супутника Європи. Проте звертає на себе увагу суттєва відмінність між даною парою супутників: масштаб деяких морфологічних структур. Якщо на Європі ландшафт торосів формувався порівняно невеликими блоками, то структура льодів на Ганімеді утворена дуже великими тектонічними зсувами. Ударні кратери розрізняють за віком по їх зовнішньому вигляді. Наприклад, кратери, які утворилися зовсім недавно, мають, переважно, світле дно та яскраві промені довкола них, котрі оголюють чисту поверхню із криги.

Виходячи із кількості метеоритних ударних кратерів, вік найстаріших ділянок на поверхні Ганімеда оцінюють у 3-3,5 млрд. років. А дуже великі розміри та порівняно невисоке середнє значення поверхневої густини кратерів вказують на доволі значну товщу його крижаної кори та на те, що на лід з води [213-215, 218, 219, 231] там припадає майже половина загальної маси.

На зображеннях Ганімеда із високою просторовою роздільною здатністю добре помітні дивні, ні на що не схожі, трохи зламані ряди багаточисленних паралельних хребтів і долин, котрі утворюють химерну структуру супутникової поверхні, концентруючись переважно у світлих регіонах супутника. Ширина подібних долин та хребтів становить від одиниць до декількох десятків кілометрів; висота цих хребтів – менша від кількох сотень метрів та протяжністю у тисячі кілометрів. Часом вони перетинаються та змінюють свій напрям у точках перетину; вони, інколи, навіть перетинають деякі з ударних кратерів. На подібних хребтах та долинах кількість ударних кратерів значно менша, і це вказує на їх суттєво молодший вік.

У зв'язку з цим, висловлено припущення про те, що дані смуги виникали під дією своєрідного розтягування крижаної кори Ганімеда, котрі можуть вважатись проявом певної локальної тектоніки. В темних районах південної півкулі були виявлені досить незвичні кратери-фантоми, котрі виділялися лише відтінком, хоча й зовсім не мали якогось вираженого рельєфу.

Каллісто. Даний супутник являється ще більше кратерованим (рис. 4.10) та не показує якихось помітних слідів своєї тектонічної активності; вік поверхні супутника оцінюється приблизно у 4 млрд. років.



Рис. 4.10. Зображення півкулі Каллісто (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Вважають, що найяскравіші ділянки на зображеннях поверхні (рис. 4.11) – це лід, тоді як темні – є сильно еродованою старою поверхнею із невеликим вмістом крижаних порід. Унаслідок віддаленості від Юпітера Каллісто не приймає помітної участі в орбітальних резонансах із іншими супутниками; тому він практично не розсіює припливну енергію.

Оскільки в його надрах запасів радіоактивних елементів майже немає – вони вичерпалися, то він, мабуть, є найбільш інертний не лише серед галілеєвих супутників, але й із усіх крупніших супутників в Сонячній системі.

Його кратери та хребти характеризуються порівняно невеликим перепадом висоти на поверхні, а розміри переважної більшості кратерів становлять десятки кілометрів. Найбільші із них можуть бути оточеними серіями із концентричних валів, котрі нагадують тріщини величезних розмірів, згладжених повільним переміщенням льоду.

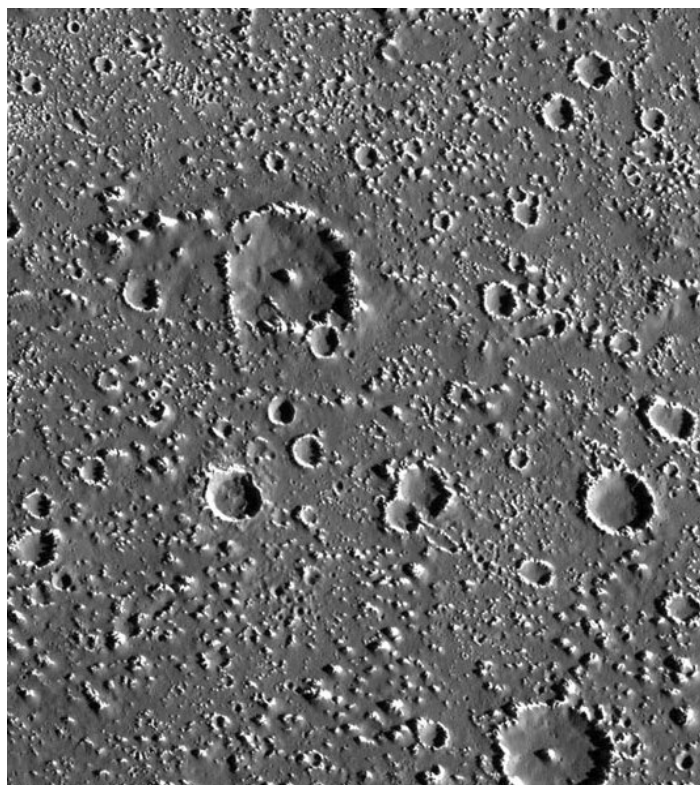


Рис. 4.11. Зображення поверхні Каллісто
(<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Найпомітнішими з них є три великих ударних басейни із багатьма кільцями: Валхалла (рис. 4.12), Асгард (рис. 4.13) та Адлінда, котрі, як вважають, можуть бути результатом зіткнення Каллісто із доволі крупними астероїдами із розміром у 10-20 км. Досліджуючи велику кількість свіжих кратерів, вік даних басейнів оцінили у понад 3 млрд. років.

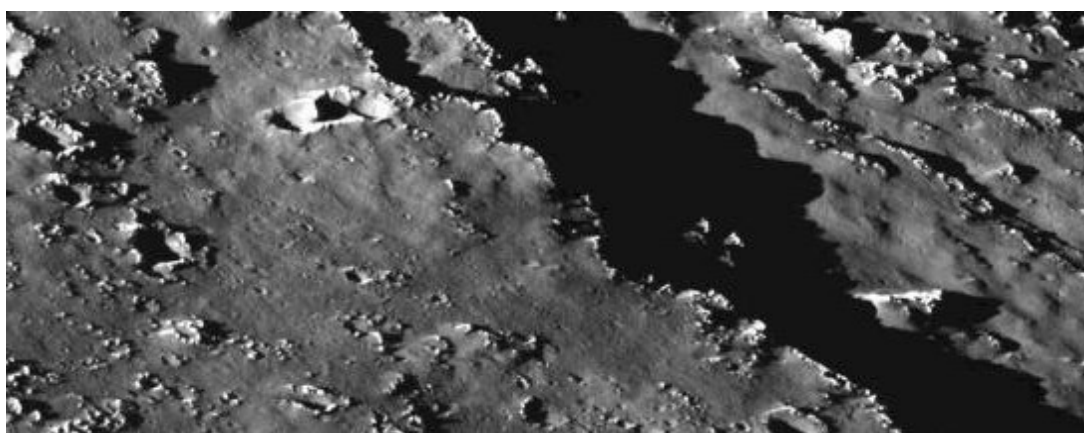


Рис. 4.12. Ділянка поверхні супутника Каллісто розміром 30×30 км у середині ударної структури Валхалли (обрив кільцевої структури)

Виявлення варіацій магнітного поля вказує на присутність тонкого електропровідного шару, розташованого приблизно на глибині у 200 км від його поверхні. Ним може бути океан солоної води глибиною майже 20 км.

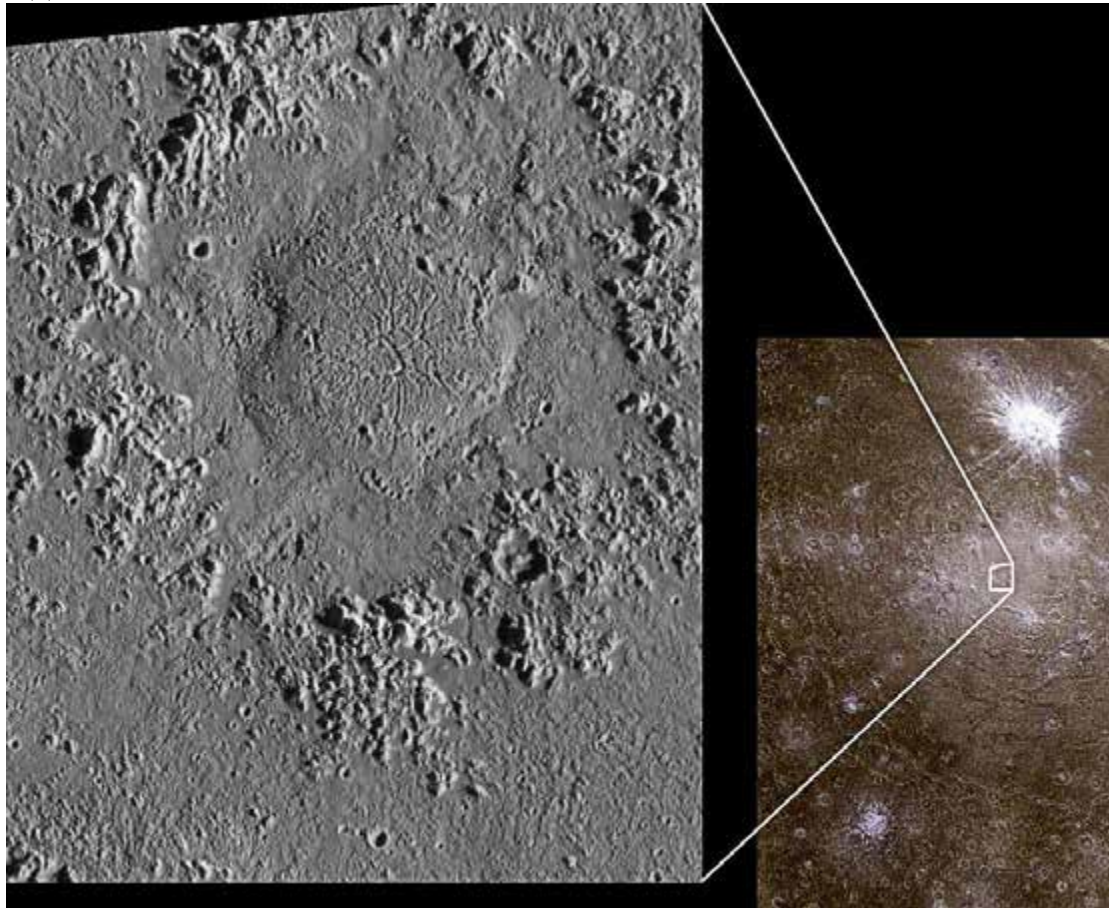


Рис. 4.13. Невеликий ударний кратер Дох знаходиться на величезній ударній структурі Асгард. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Вважається, що основною складовою поверхневих шарів цих галілеєвих супутників є водяний лід (із можливим розміром зерен близько 100 мкм), який вкриває ділянки площею 50-100% для Європи, 20-65% – для Ганімеда та лише 5-25% – для Каллісто. На Каллісто відкрита малопотужна атмосфера (переважно із вуглекислого газу, парціальний тиск якого становить $7.5 \cdot 10^{-12}$ бар на поверхні за температури близько 150 К). Але є підстави для того, щоб тиск його атмосфери був у 20-100 разів вищим, а до складу такої атмосфери можуть ввійти ще й водяна пара та молекулярний кисень.

5. Супутники Сатурна

За допомогою ширококутної камери зонда «Кассіні» 30.05.2007 р. з відстані 1,76 млн. кілометрів зроблено знімок околиць Сатурна (рис. 5.1), за допомогою якого вдалось знайти ще один його супутник [132-134, 164, 165]. Він став «ювілейним» – 60-тим супутником. Це тіло виявився розміром близько двох кілометрів. На знімку разом з нововідкритим супутником, котрий спочатку офіційно іменувався S/2007 S4, видно ще три супутники Сатурна – яскравий і крупний Мімас і два невеликих, Метон і Паллен, які також були відкриті за допомогою КА «Кассіні». Поки що цього «новонародженого» назвали «Френк».

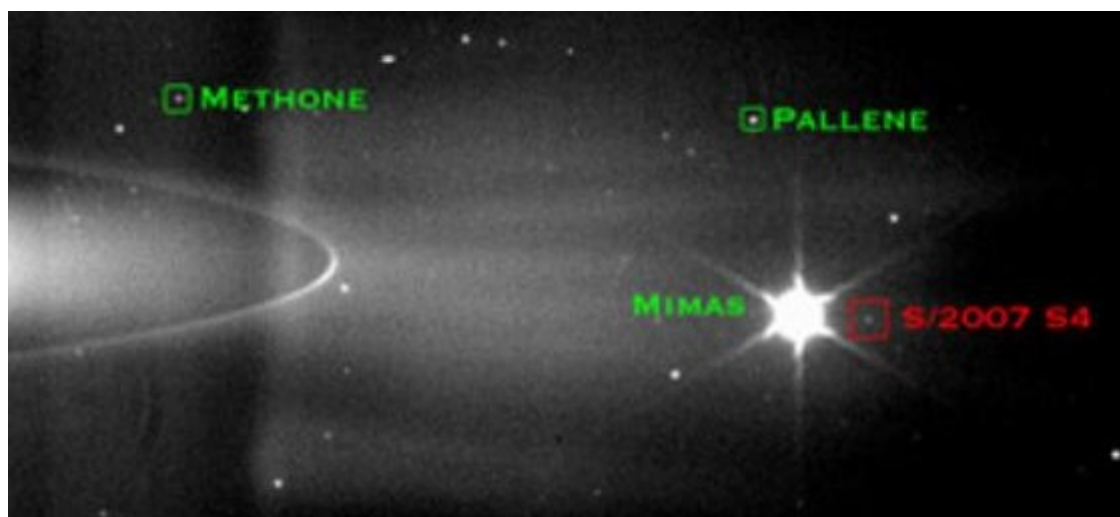


Рис. 5.1. «Портрет» ювілейного шестидесятого супутника Сатурна

Зонд «Кассіні» детальніше вивчив даний супутник в деталях у грудні 2009 р., коли він наблизився до Френка на відстань 11700 км. Слід зазначити те, що Френк став найменшим із супутників, замінивши на цьому посту трикілометрового Метона, який до цього моменту вважали найменшим з нововідкритих тіл, котрі обертаються навколо цієї планети-гіганта і які мають поперечники близько 5-8 км.

Нагадаємо, що коли зонд «Кассіні» стартував до Сатурна у 1997 р., у цієї планети було відомо лише 18 супутників. А Френк став 17-м об'єктом, який дослідники побачили за допомогою зонда. Лише протягом 2006 року команда під керівництвом Д. Джуїтта з університету Гавайїв, які працювали на японському телескопі Субару на Гавайях, повідомила про відкриття 9-ти супутників Сатурна із наземних спостережень. Всі вони відносяться до так званих

ірегулярних супутників [52, 72, 101, 103, 106, 160, 168, 230, 238, 289, 429, 459, 470, 473, 616, 640, 659, 670], які відрізняються витягнутими еліптичними орбітами і, як вважають, не сформувалися разом з планетами, а були захоплені їх гравітаційним полем. Відмітимо, що всього з 2005 по 2010 рр. команда Джуїтта виявила 23 супутники Сатурна, а також нові супутники Урану і Юпітера.

Нагадаємо, також, що найперший із людей, хто відкрив перший супутник Сатурна, став знаменитий голландський астроном Християн Гюйгенс. В 1655 р. в околицях планети він розгледів Титан, який став шостим відомим супутником у Сонячній системі після нашого Місяця і чотирьох галілеєвих супутників Юпітера.

Подібно Юпітеру, у Сатурна супутники великих розмірів (Титан, Япет, Діона, Мімас Рея, Тефія та Енцелад) є майже сферичної форми, а малі – умовно тривісних еліпсоїдів, або ж уламків неправильної форми (рис. 5.2-5.8).



Рис. 5.2. Прометей (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

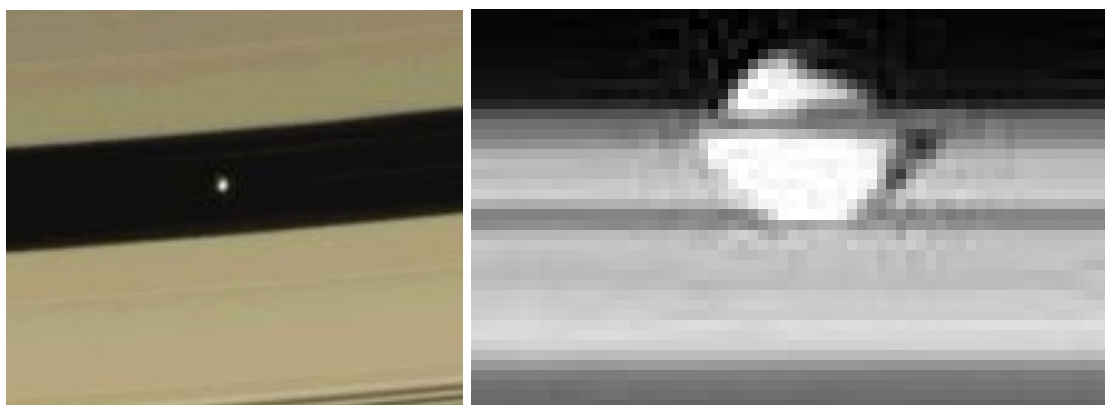


Рис. 5.3. Ліворуч – маленький супутник Пан у проміжку Енке (18.01.2007). Пан має 26 км у діаметрі, проміжок Енке – шириною 325 км. Праворуч – цей же супутник Сатурна видно крізь кільця планети (29.04.2008).

Атлас є ще одним супутником Сатурна, що має вигляд «літаючої тарілки» (рис. 5.4) через своєрідні «нарости» речовини в його екваторіальній області.

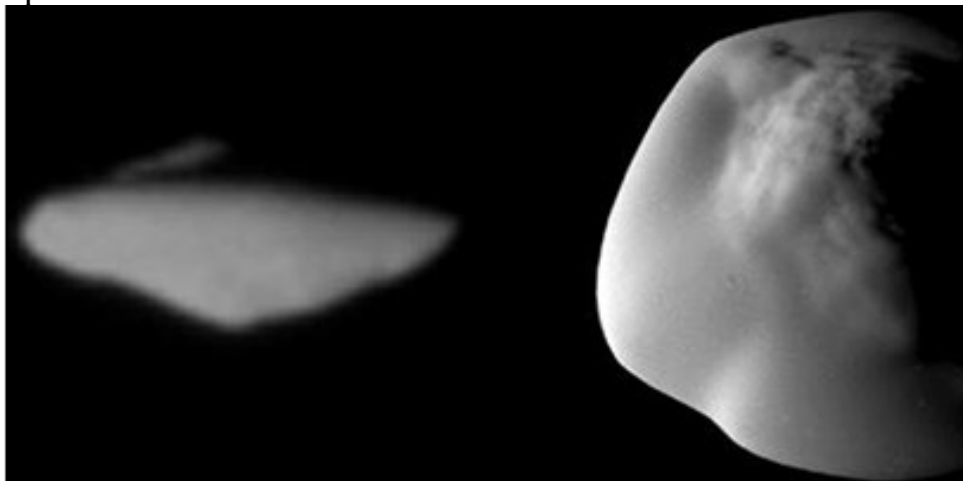


Рис. 5.4. Атлас має довгасту форму з кількома кратерами. Вигляд збоку і зверху (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>).

Вважається, що супутник **Пандора** [661], розміром $110 \times 88 \times 62$ км, ніби «пасе» вузьке кільце F, динамічно втримуючи його (рис. 5.5). По отриманих з КА Кассіні зображеннях знайшли, що вона покрита шаром крижаного пилу. Незначна поцяткованість поверхні кратерами говорить про швидке оновлення поверхні супутника.

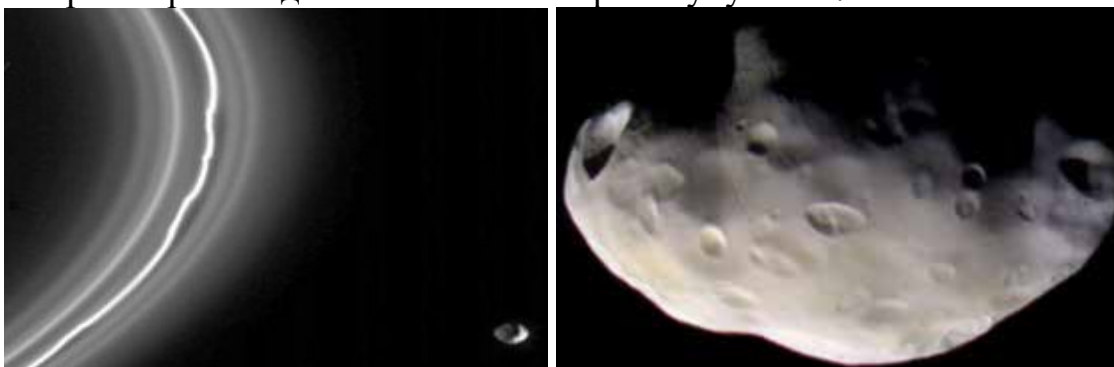


Рис. 5.5. Ліворуч – знімок освітленої Сонцем і Сатурном Пандори. Праворуч – Пандора зблизька. (05.09.05 з відстані 52000 км). Європейське космічне агентство, НАСА

На наведеному детальному зображенні можна розрізнити деталі рельєфу розміром більше 300 м при видимому розмірі Пандори від лівого до правого краю в даному ракурсі складає близько 80 км. Видно, що кратери на Пандорі припорошені якоюсь речовиною і від цього вони виглядають більш гладкими і пологими, ніж, наприклад, на схожому на губку іншому супутнику Сатурна – Гіперіоні. Поверхню

даного супутника перетинають дивні жолобки й складки. Почасти інтерес до Пандори обумовлений тим, що вона разом з близьким супутником Прометеєм допомагає утримувати частинки, які утворюють кільце F Сатурна, і надає йому дійсно кільцеподібну форму.

Янус та **Епіметей** знаходяться практично на одній орбіті з радіусом 151472 і 151422 км, відповідно. Вони періодично міняються місцями. Янус – невеликий супутник (193×173×136 км), відкритий Одуеном Дольфюсом в 1966 р., коли система планетних кілець при спостереженнях із Землі була видна із ребра. Орбіта супутника лежить відразу за основною системою кілець, і він коорбітальний із Епіметеєм. Обидва супутники, цілком можливо, є фрагментами одного тіла, зруйнованого в результаті ударної дії. Через невелику відмінність у радіусах орбіт приблизно через кожні 4 роки Епіметей доганяє і переганяє Януса. Тому у такому ракурсі (рис. 5.6) супутники Сатурна Янус (рис. 5.7) і Епіметей (рис. 5.8) спостерігаються кожні 4 роки.

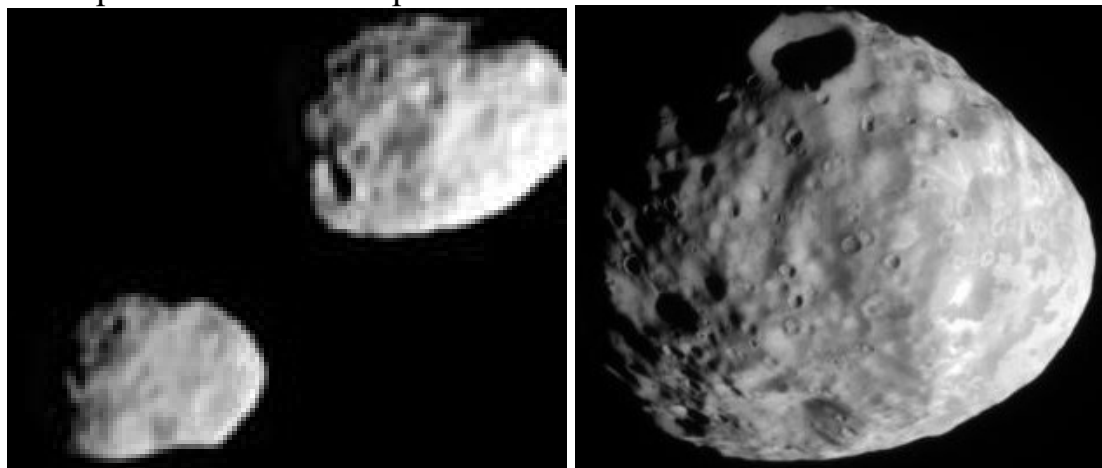


Рис. 5.6. Супутники Янус та Епіметей міняються місцями кожні 4 роки (з 21 січня 2006 року до 2010 Янус знаходився ближче до Сатурна, а після навпаки: ближче Епіметей). Янус на відстані 40000 км, а Епіметей – за 15000 км від КА «Кассіні»

Рис. 5.7. Зображення Януса із близької відстані (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

На Епіметеї два найбільших кратери офіційно отримали назви. Кратер на лівому лімбі супутника названо Pollux, а кратер внизу – Nilaira. Зазвичай, відмінності кольорів поверхні ідентифікують як регіональні варіації хімічного складу матеріалів, що їх вкривають. Проте варіації кольору можуть бути викликані залежністю від

довжини хвилі при його освітлені під різними кутами. Пропонується, що такими фотометричними ефектами цілком можна пояснити синій відтінок в областях, де сонячне світло вертикальніше падає на поверхні супутника.

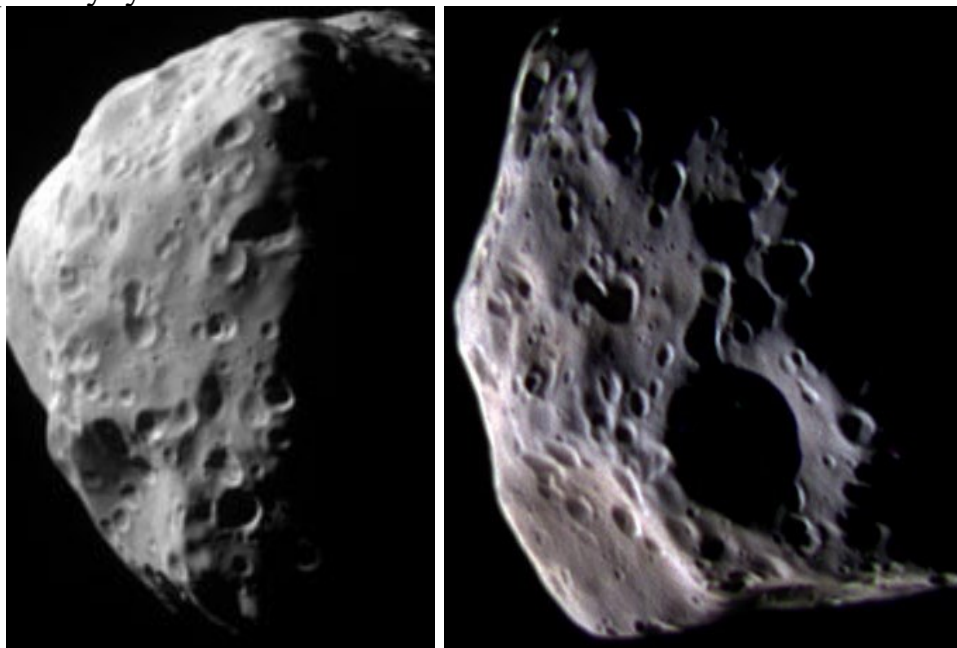


Рис. 5.8. Ліворуч – зображення супутника Сатурна Епіметей з КА Кассіні з відстані 87000 км 14.07.2005; показані його північно-східні території. Праворуч – зображення Епіметея з КА Кассіні 30.03.2005 з відстані 74600 км

На рис. 5.9 приведено маленький супутник Дафнія в оточенні кілець; його розмір оцінено в межах 6-8 км, і він створює гравітаційні хвилі, які проявляються найбільш яскравими деталями в місцях підвищеної концентрації крижаних частинок кілець.

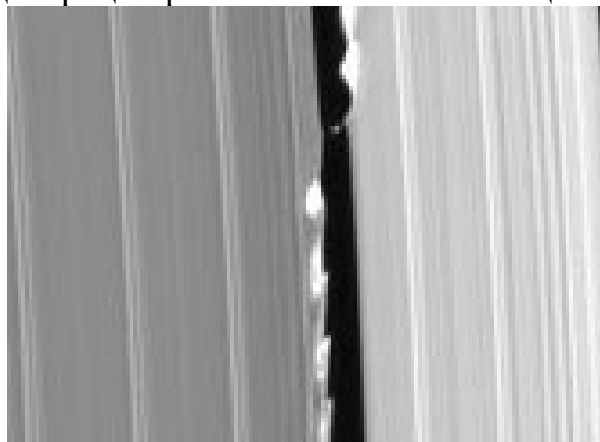


Рис. 5.9. Знімок крихітного супутника Дафнія (Daphnis), орбіта якої пролягає у проміжку Кеплера.

Великі (класичні) супутники, зазвичай, постійно обернені одним боком до Сатурна (синхронне обертання). Деякі з них розглянемо нижче.

Поверхні **Мімаса** [93, 232] (сидеричний період 0,942422 доби, густина ($\approx 1,17 \text{ г/см}^3$), **Тетії** (1 доба 2 години 19 хвилин), **Діона** [740] (2 доби 17^h 41^m, густина – $1,4 \text{ г/см}^3$) **Реї** [70, 506] (4,518212 діб) дуже подібні, сильно кратеровані та мають крижаний склад з невеликою домішкою силікатних матеріалів. Новіші кратери стирають більш старі; це може бути свідченнями практичної відсутності зараз активної тектонічної діяльності.

Найбільший кратер Гершель на поверхні **Мімаса** (рис. 5.10) знаходиться майже посередині оберненої до Сатурна півкулі. Його діаметр сягає 130 км (майже 1/3 діаметра супутника), а в центрі цього кратера знаходиться гора діаметром $\approx 30 \text{ км}$ і висотою до 6 км. Відносно довкілля стінки кратера піднімаються на $\sim 5 \text{ км}$, а переважна частина дна – опущена на 10 км. Протилежні боки кратера вкриті розломами й тріщинами, що, можливо, є зумовленим зіткненням з метеороїдом і припливними ефектами від Сатурна.



Рис. 5.10. Дві півкулі Мімаса (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Супутник **Тетія** [249, 505, 516] має сидеричний період 1 доба 2 години 19 хвилин і середню температуру $T=87 \text{ К}$, а середнє значення густини – 1 г/см^3 – роблять супутник особливо схожим на шматок чистого льоду. Як видно з рис. 5.11, на поверхні супутника практично відсутні контрастні альбедні деталі, а сама поверхня усіяна ударними кратерами, серед яких найпоширенішими є так звані кільцеві кратери.

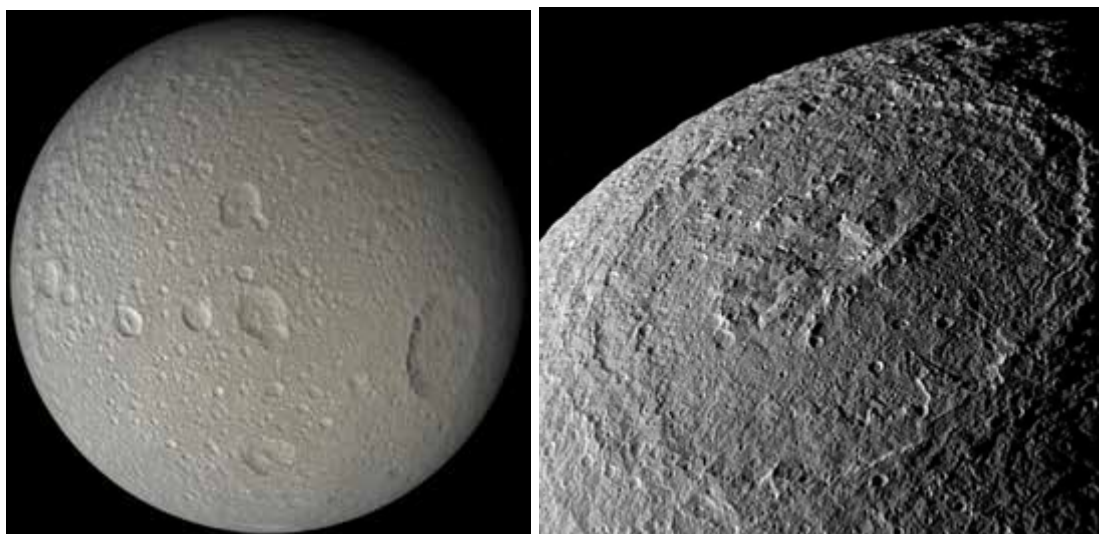


Рис. 5.11. Тефія (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Рис. 5.12. Величезна ударна структура Одісей на Тефії (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Праворуч на рис. 5.11 знаходиться кратер Пенелопа, вкритий численними і досить молодими новоутвореннями. Три невеликі кратери, розташовані у лінію нижче від Пенелопи – Аякс (Ajax), Поліфемус (Polyphemus) і Феміус (Phemius) – мають бути результатом від падіння на поверхню супутника Тефії уламків якоїсь розірваної гравітацією Сатурна комети (по аналогії з кометою Шумейкера-Леві 9 навколо Юпітера). Найбільшим (із діаметром у 450 км) є старий кратер з назвою Одісей (рис. 5.12), який інколи називали Великою Улоговиною і який розташований на ведучій стороні Тефії.

В його середині розташовано багато невеликих кратерів; але у деяких напрямках від центральної частини він показує кілька концентричних хвиль підвищень із головним кільцевим валом – так званих «цирків». Він є досить плоским, без високих гір на кільцевих структурах та значного центрального пікового підвищення, котрі зазвичай спостерігаємо на Меркурії та Місяці.

На Тефії присутня також гігантська долина (Ithaca Chasma) довжиною понад 1000 км, при ширині ~100 км та глибиною у 3-5 км (рис. 5.13), котра розташована із протилежного до Одісея боку та є мережею тріщин і засипаних численними обвалами розломів, що простягнулися по диску з півночі на південь.

Великий ударний кратер Телемахус (Telemachus) в північній частині долини (рис. 5.14) та багато інших меншого розміру вкривають велику частину цього каньйону. Це свідчило про його дуже великий вік. Нові молоді кратери є дуже світлими.

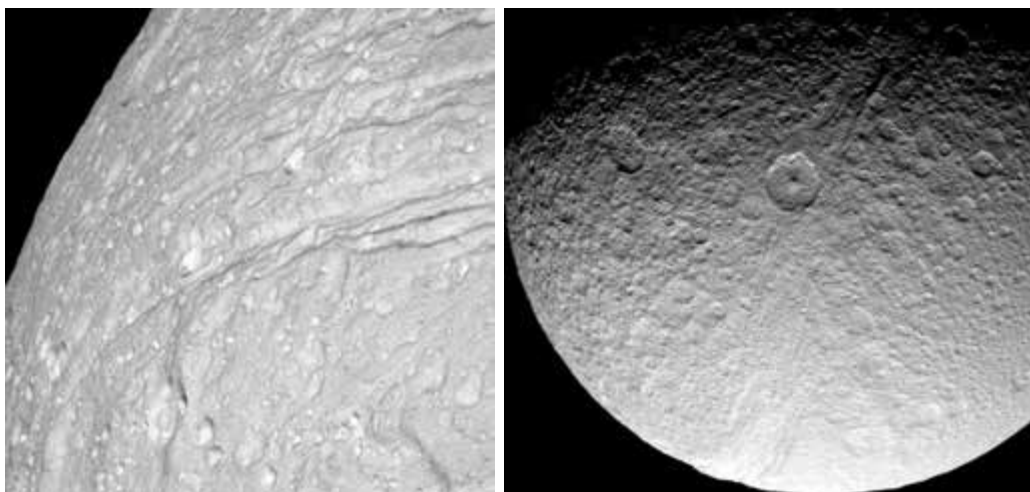


Рис. 5.13. Каньйон Ітака на Тефії (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Рис. 5.14. Кратер Телемахус (Telemachus) в північній частині долини Ітака на Тефії (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

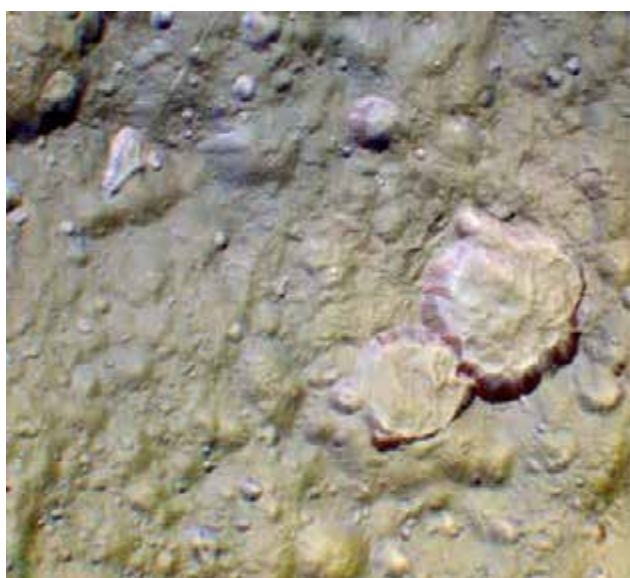


Рис. 5.15. Екваторіальна область Тефії з роздільною здатністю 213 м/піксель (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Існування таких потужних ударних структур може говорити про те, що в околицях Сатурна було багато великого розміру планетезималей. Те, що старші (великі) кратери сильніше вкриті молодшими утвореннями, означає, що вони були утворені ще на дуже ранній стадії існування нашої Сонячної системи.

Існує й дещо інша гіпотеза стосовно долини Ітака, згідно якої Тефія не весь час була повністю замерзлою: у деякий момент в минулому частина її поверхні, ймовірно, була в рідкому стані, а тому ударні кратери мали можливість набувати згладженої форми.

Оскільки через певний час поверхня охолоджувалась та тверднула, тому відбувалось її розширення і це супроводжувалось розтріскуванням поверхневого шару. За таких обставин, сумарне значення площі поверхні такого супутника могла збільшуватися на майже 10%. Ділянки із суттєво меншою щільністю ударних кратерів можуть вказувати на можливу геологічну активність в минулому, що й привело до згладжування поверхневого шару. Як видно з рис. 46, на дні багатьох кратерів Тефії присутня дуже світла речовина, що відрізняє їх від кратерів, наприклад, на Япеті, на дні яких знаходиться темна речовина. Не виключають, що Тефія ще й зараз викидає у навколишній простір речовину, тобто, проявляє якусь вулканічну активність, чи, хоча б на те, що на поверхні цього супутника присутні діючі гейзери, на що вказало дослідження зворотних траєкторій потоків частинок, котрі рухаються поруч із орбітою Тефії.

Діона. Її орбітальний період складає 2 доби 17^h 41^m; відстань від центру Сатурна – 377000 км, густина – 1,4 г/см³, а поверхня є дуже світлою (із відбивною здатність певних ділянок майже у 100%). Як видно із рис. 5.16 (ліворуч), поверхня супутника [740] носить сліди викидів матеріалів (наприклад, від ударів досить крупних метеоритів) з виглядом системи променів, та добре відомих зі спостережень Місяця та які на Діоні, можливо, є водним інієм. Діаметр найбільшого кратеру на Діоні становить майже 100 км. Там, також, присутня утворена, ймовірно, тріщинами в корі звивиста долина (рис. 5.16, праворуч).

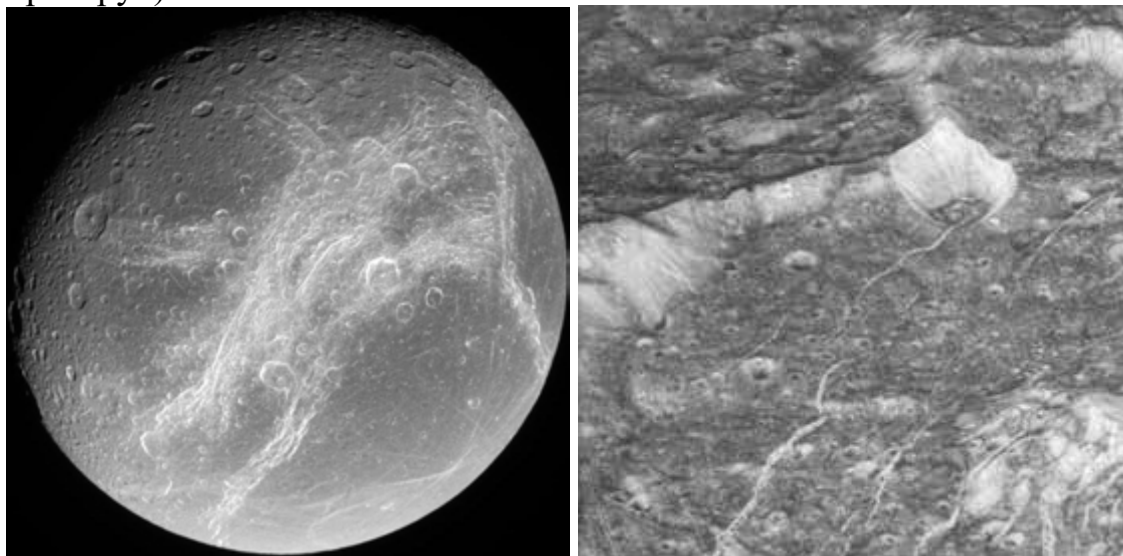


Рис. 5.16. Ліворуч – південна полярна область Діони зі складною сіткою тектонічних розломів, праворуч – ландшафт середини кратера Падуга (Padua Linea) діаметром 60 км (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Діона завжди повернута до Сатурна одним і тим же боком, а тому ведуча півкуля мусила б мати більшу насиченість ударними кратерами, тоді як у дійсності більш кратерованою є ведена півкуля. Це можна вважати наслідком від потужних зіткнень, унаслідок яких даний супутник розвернувся і півкулі помінялись місцями. Зараз лідируюча частина півкулі є досить однорідно яскравою (нижня частина на рис. 5.17), а ведена – має мережу із яскравих смужок на значно темнішому фоні, на яких видно як дуже світлі ударні кратери невеликого розміру, так і порівняно невелика кількість крупних кратерів.

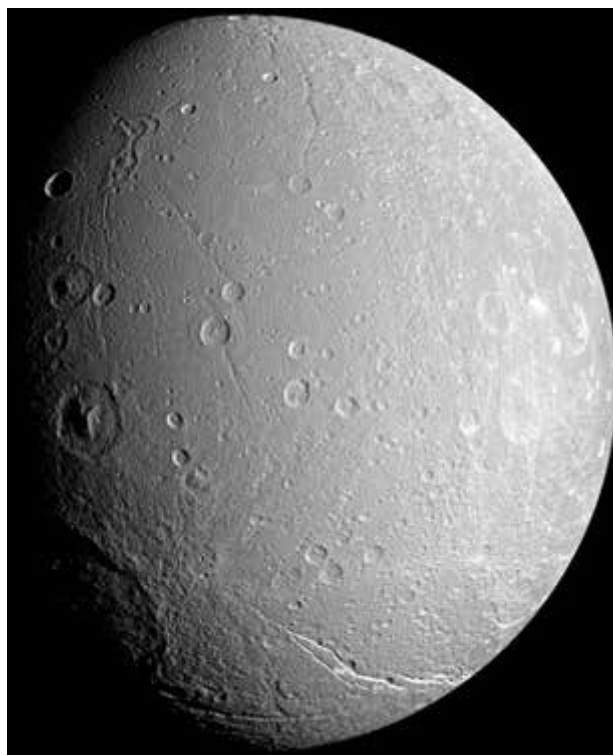


Рис. 5.17. Поверхня Діони з добре помітною невідповідністю щільності кратерів на двох півкулях супутника – лідируючій (внизу) і веденій (зверху) (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Зображення із високим просторовим розділенням, показали, що смужки, скоріше за все – це складна мережа тектонічних розломів, котрі є суттєво молодшими, ніж переважна більшість із цих кратерів. Появу таких смужок спочатку пояснили тим, що відразу після утворення – Діона була дуже активною (скоріше всього, за рахунок крижаного вулканізму); у результаті цього частина рельєфу заново було вкрита рідкою субстанцією; при цьому, деяка частина залишилася у вигляді досить світлих смужок. Але зображення із високим просторовим розділенням ясно показали, що ці смужки є не

замерзлими потоками попередньо рідкої речовини. Швидше за все, це складна сітка із тектонічних розломів, котрі мають бути значно молодшими, від більшості із кратерів.

Як видно з рис. 5.16, у південній області поверхні Діони є досить світлі розломи, котрі відрізняються від трохи темніших розломів північної полярної області; це часто приписують їх різному віку. Світлі радіальні смуги з прямими лініями розломів справа внизу – це область Касандри. Навколо Діони виявили ще й викинутий матеріал, котрий, можливо, підтверджує її вулканічну активність, яка поставляє матеріал до кільця Е Сатурна.

Рея. Орбітальний період цього супутника [73, 136,] складає 4,51821 діб при середній відстані від центру планети 527108 км, і він постійно обернений одним і тим же боком до Сатурна. Її поверхня повністю покрита стародавніми структурами кратерів з розміром до 300 км). Там, майже у центрі на рис. 5.18, чітко вирізняється біла пляма величезного розміру із молодим кратером ударного походження. Вся поверхня цього супутника Сатурна дуже світла і навіть найтемніші області мають величину альбедо понад 50%. В центрі багатьох кратерів присутні піки. Її лідируюча півкуля сильно кратерована та однорідно яскрава. На задній півкулі (рис. 5.19) присутня мережа із яскравих смуг, які мають вигляд світліших валів на досить темному фоні. Вони, можливо, складаються із льоду, який заповнює розломи. Тому там дуже мало кратерів.



Рис. 5.18. Велика біла пляма на Реї
(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Рис. 5.19. Ведена півкуля Реї (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

За складом і геологічною історією Рея схожа на Діону: для обох супутників суттєво відрізняються ведуча і ведена півкулі, передня півкуля Реї досить сильно кратерована і однорідно світла, ведена півкуля містить темні ділянки і мережу дуже яскравих тонких смуг. На перших порах вважали, що вони могли бути утворені в результаті викиду води чи льоду на поверхню (кріовулканізм). Проте ретельні дослідження крупно масштабних знімків з КА «Кассіні» показали, що світлі утворення представляють собою не викиди речовини, а крижані хребти і обриви.

Рей має ділянки з різним ступенем кратерованості, що вказує на те, що в деяких областях поверхня супутника істотно переформовують у період після інтенсивних метеоритних бомбардувань, які мали місце на початку формування нашої Сонячної системи, а рельєф кратерів згладжений через поступове опливання за геологічно тривалі проміжки часу. З допомогою спостережень з апаратурою КА «Кассіні» також встановили, що у Реї присутня дуже розріджена атмосфера з кисню та вуглекислого газу.

Гіперіон. Сидеричний період супутника складає 21 добу 6 годин 39 хвилин, його густина $\approx 0,544 \text{ г/см}^3$. Супутник [88, 99, 163, 330, 390, 667, 669] піддається гравітаційному впливу з боку Сатурна та його інших найбільших супутників, а тому його рух є дуже хаотичний. Він досить темний з альбедо 0,2-0,3 і має суттєво неправильну форму (рис. 5.20). Його поверхня носить сліди дуже інтенсивного бомбардування метеоритами. Відмітимо, що найбільший із кратерів має розмір такий же, що й сам супутник.

Через зумовлені Титаном збурення у русі Гіперіона, його близьке до синхронного обертання, має можливість порушуватися на кілька десятків відсотків протягом декількох тижнів. Таку поведінку пов'язують із резонансом 4:3 з супутником Титан (на 4 оберти Титану довкола Сатурна припадає три оберти Гіперіона).

Структурою поверхневого шару він виділяється серед усіх тіл Сонячної системи і виглядає своєрідною гігантською «губкою». Його виняткова пористість викликає практично повне поглинання дрібного і навіть досить крупного космічного сміття. Тобто метеорити просто провалюються у глибокі шари супутника, утворюючи за собою все новіші глибокі отвори. Інколи у цих отворах стає видимим невідомий темний матеріал, із якого, цілком можливо, утворені внутрішні пласти. Дно багатьох кратерів також темніше довкілля.

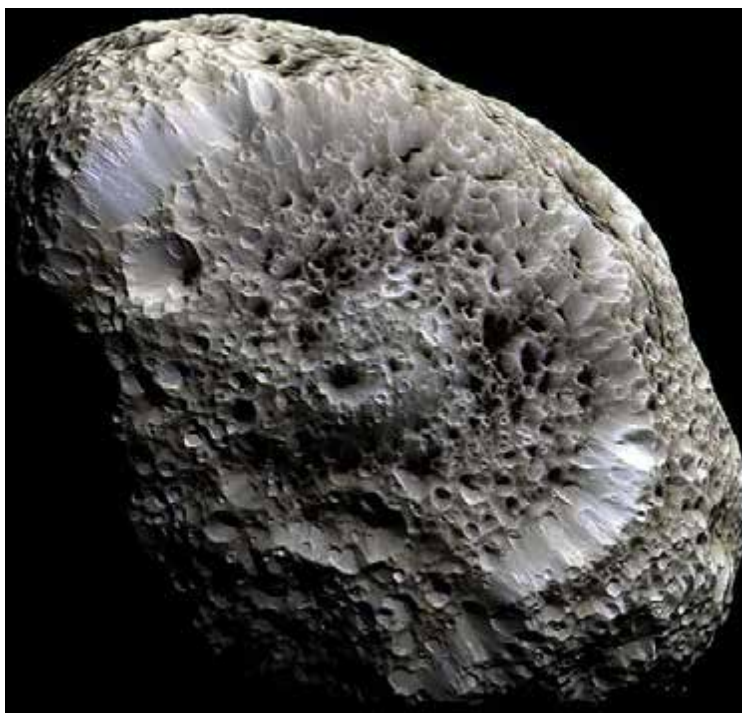


Рис. 5.20. Гіперіон з КА «Кассіні» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

На поверхні були виявлені і яскраві деталі, які можуть свідчити про те, що в цих місцях товщина темної речовини сягає усього декілька десятків метрів. Схили усіх кратерів є досить гладкими. Вважається, що на 42% Гіперіон складається з порожнин, а на відсотки, які залишилися – головним чином припадає водяний лід. Згідно останнім оцінкам Гіперіон на майже половину складається із порожнин та ще – із водяного льоду. Передані з КА «Кассіні» із відстані у 500 км зображення (рис. 5.21) показали, що поверхневий шар Гіперіона насичений різного розміру кратерами, а також те, що вони є дуже глибокими і добре збереженими. На їхньому дні видно дуже темний матеріал, із якого, дуже можливо, складені внутрішні шари Гіперіона.

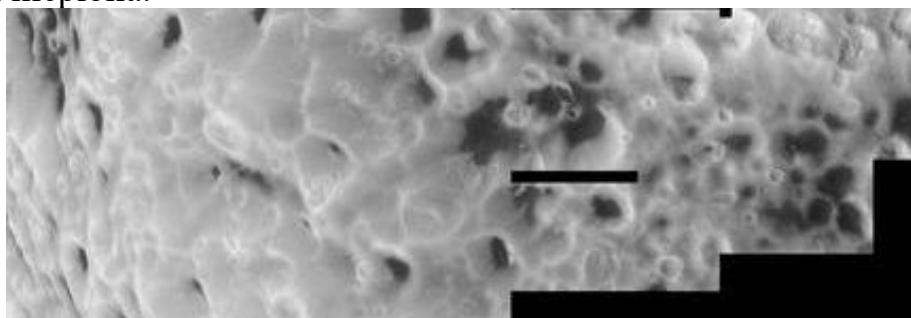


Рис. 5.21. Поверхня Гіперіона показує темну речовину на дні кратерів (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Япет. Сидеричний період Япета [55, 96, 102, 144, 247, 404, 421, 453, 454, 478, 641, 663, 785, 795] складає 79 діб 7^h 56,6^m. При густині 1,16 г/см³ він має майже сферичну форму. Подібно до астероїда 433 Ерос, у якого альbedo його протилежних півкуль відрізняється у 10 разів (від 0,05 до 0,5). Темна півкуля [158, 169, 388, 520, 537, 631, 643, 767] називається Областю Кассіні (Cassini Regio), а світла (рис. 5.22) – Землею Ронсевальдською (Roncevaux Terra) на згадку щодо знаменитої битви, у якій відзначився один з героїв французької «Пісні про Роланда».

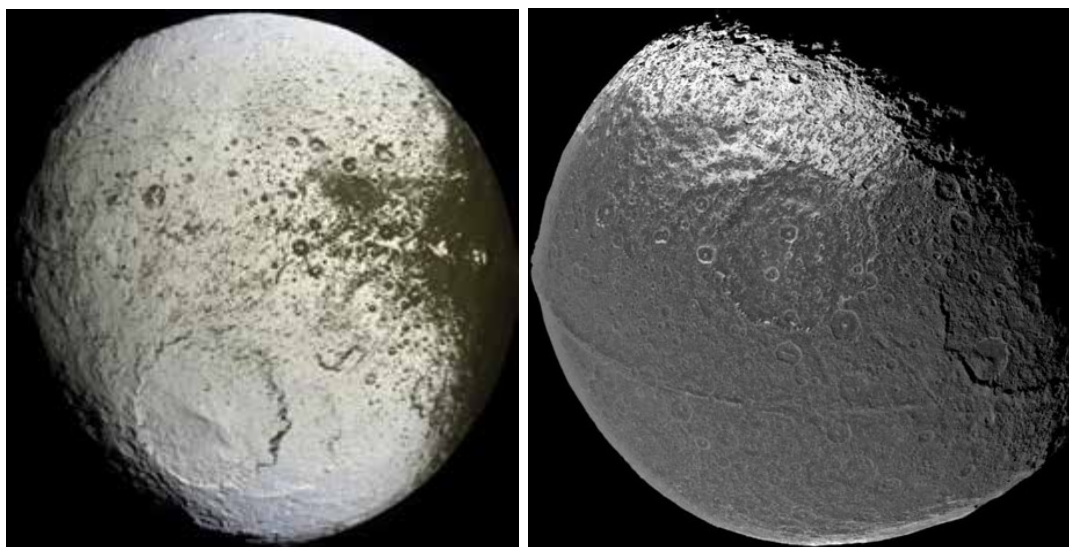


Рис. 5.22. Япет з КА «Кассіні» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Рис. 5.23. Екваторіальний «виступ» на Япеті (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Шар на його поверхні характеризується достатньо високим значенням густини ударних кратерів і наявністю деяких специфічних деталей (див. рис. 5.23). Біля стінок висотою в 15 км одного з кратерів (діаметром 600 км) виявлено гігантський обвал, уламки якого розкидані на відстані до 120 км (рис. 5.24). Існують світлі ділянки, що вказують на нові утворення, дно яких і/або стінки ще укріті льодом.

Вважається, що природа відмінностей відбивних властивостей поверхні Япета певним чином пов'язана із його рухом орбітою довкола Сатурна: викиди водяної пари та подальша конденсація інію відбувалися на всіх сторонах супутника. Проте взаємодія із плазмосферою Сатурна змогла поступово цей іній знищити на його передньої півкулі; темна передня сторона зумовлена підвищеним бомбардуванням зарядженими частками, і це викликало потемніння матеріалу.



Рис. 5.24. Знімок поверхні Япета (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Зараз стала популярною гіпотеза, що передня півкуля «забруднена» пилом, який викидається з Феби – іншого супутника Сатурна. При багатьох зіткненнях світлі та легші матеріали поступово випаровуються, тоді як темні та важчі – продовжують залишатися на поверхні. На зображеннях виявлені гігантські хребти гір, висота котрих інколи досягає 20 км; один із них має ширину до 20 км, висоту до 13 км та довжину понад 1500 км (на рис. 5.25 – виступи на лімбі). Вони могли утворюватися у результаті швидкого обертання супутника ще у епоху його створення та поступового охолодження. На це вказує його велика сплюснутість. Або ж він міг утворитися з матеріалу первинних кілець Сатурна.

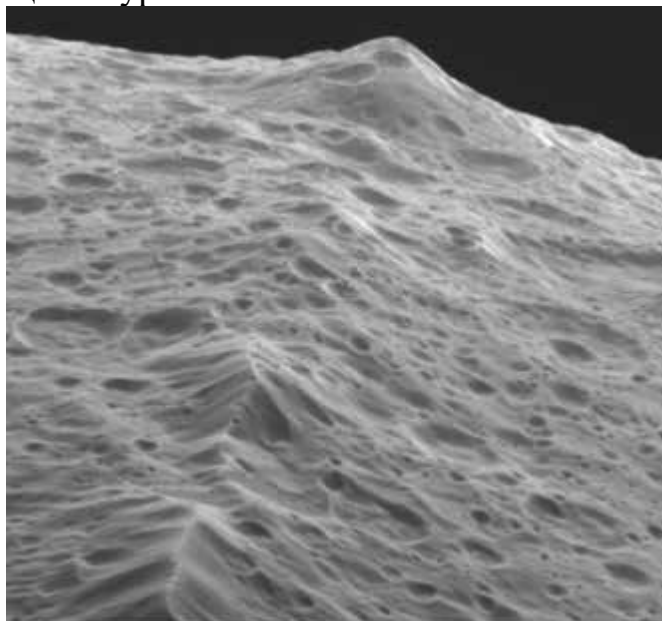


Рис. 5.25. Гірський хребет в екваторіальній частині; деякі вершини сягають у висоту до 20 км над середньою поверхнею Япета (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Відмічають, що на дуже світлих частинах поверхні Япета є присутніми загадкові дуже темні плями (рис. 5.26). Вважають, що присутня там яскрава речовина – є водяним льодом, а темна – це кам'янистий пил, викинутий із інших супутників (наприклад, із Феби), які обертаються біля Сатурна у протилежних до Япета напрямках.

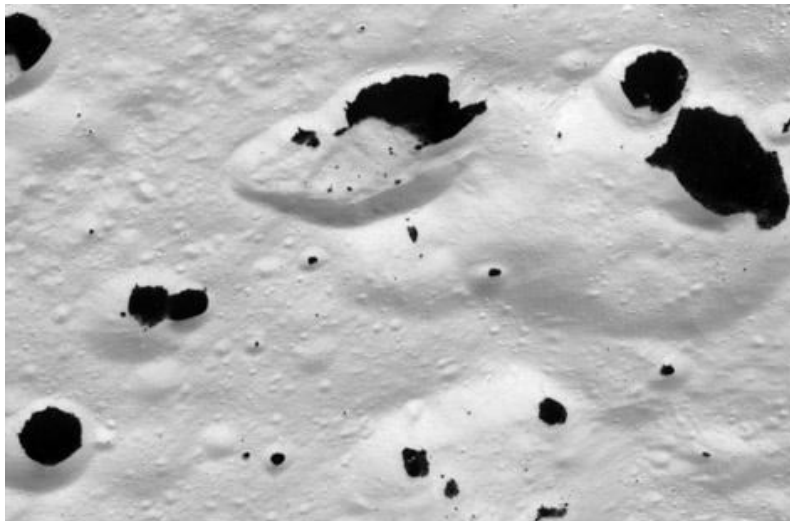


Рис. 5.26. Темний матеріал на стінах кратерів і в долинах Япета (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Феба (рис. 5.27). Цей супутник [131, 519] обертається довкола планети в зворотному напрямку із періодом 1.5 роки. Це зумовило припущення про те, що він являється захопленим Сатурном астероїдом (з густиною – 1.62 г/см^3). Температура поверхні знаходиться у межах 70-111 К. Його поверхня є дуже темною (середнє альbedo всього 0,07), хоча там присутні ізольовані округлі яскраві плями з альbedo до 0,12 на високих північних та південних широтах.



Рис. 5.27. Феба (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Зображення Феби (рис. 5.27, 5.28) вказують на її дуже нерегулярну форму і значну насиченість кратерами ударного походження з розмірами до 1 км, котрі часто навіть перекриваються; вони можуть бути наслідком від її інтенсивного бомбардування у минулому порівняно невеликими астероїдами з розміром до 100 м у поперечнику. Це могло відбуватися протягом порівняно короткого відрізка часу. Також відмічено, що багата різними льодами поверхня супутник укрита шаром досить темного матеріалу, товщина котрого змінюється від однієї області до іншої.

Свідченням цього є стінки окремих кратерів, на котрих темніший матеріал при русі донизу, залишає світліший матеріал на поверхні стінок. А при обвалах на внутрішній стороні стінок оголюється світліший матеріал. Також виявили незвичні шаруваті структури, які проявляється у чергуванні темних та світлих смуг; така почерговість особливо добре проявляється у кратері, розташованому у верхній частині зображення на рис. 5.28 (ліворуч).

Кратерам були надані імена героїв-аргонавтів із грецьких міфів: найбільший з них знаходиться вгорі на рис. 5.28 – Ясон (Jason), зліва від нього – розташований Ергінус (Erginus), а внизу, на межі з тінню – Ойлеус (Oileus).

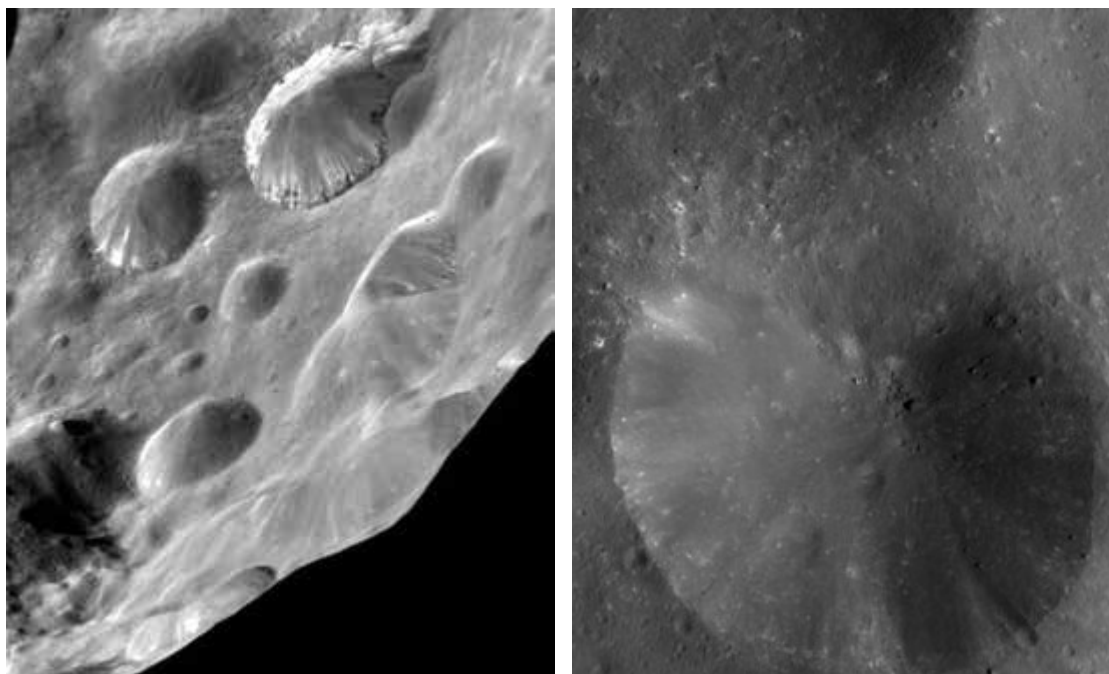


Рис. 5.28. Ліворуч – шарувата структура на стінках кратерів Феби. Праворуч – крупно масштабний знімок кратера на Фебі. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Супутник **Атлас** [124] назвали на честь героя, який також є Титаном та якого Зевс поставив тримати на своїх плечах усі небеса; він – син Япета та німфи Кліменти, і є братом Прометея й Епіметея. Ця пара супутників за рахунок гірських наростів на екваторі мають дуже оригінальну сплюснуту форму.

Супутник **Пандора** [661] з розмірами $110 \times 88 \times 61$ км, є «пастухом» вузького кільця F, надаючи йому кільцеподібної форми і динамічно стримуючи його. Але його поверхневий шар порівняно мало насичений ударними кратерами. Це може вказувати на його досить швидке оновлення, він покритий жолобами та складками.

На рис. 5.9 показано супутник **Дафнія** (з діаметром близько 7 км). Він знаходиться у проміжку Кіллера між кільцями Сатурна. Видно, що він створює навколо себе гравітаційні хвилі, які проявляються найбільш у місцях з підвищеною концентрацією льодяних частинок кілець.

Супутник **Єлена** розміром $36 \times 31 \times 30$ км (рис. 5.29) знаходиться у своєрідній гравітаційній пастці. У 2006 р. він рухався на 72° попереду від Діони, а згідно деяких даних, він ще й погойдується навколо так званої точки Лагранжа L4, то наближаючись, то віддаляючись від Діони.

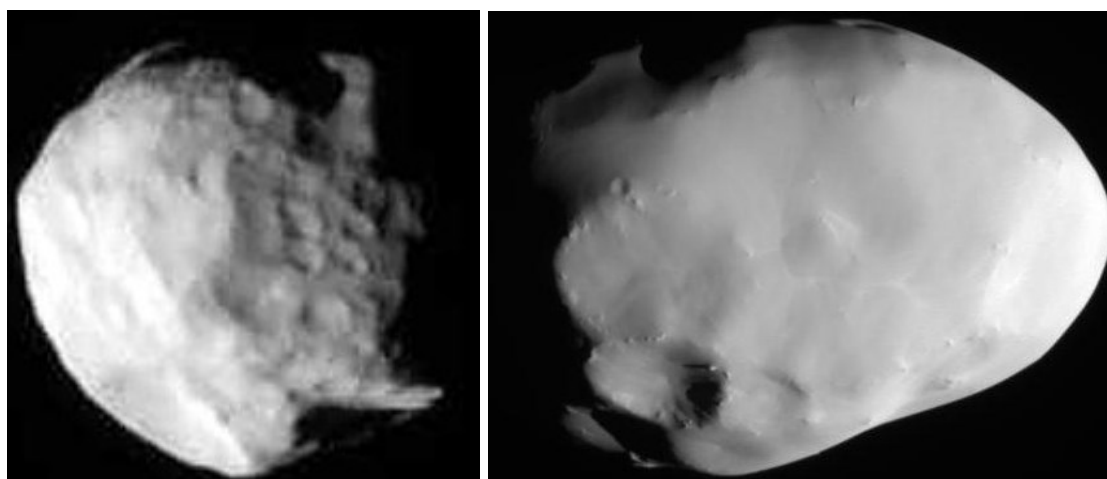


Рис. 5.29. Зображення супутника Єлена
(http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Рис. 5.30. Зображення Телесто з КА Кассіні в жовтні 2005 р.
(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Протягом тривалого часу позаду Діони, у іншій точці Лагранжа не знаходили об'єкта близького за масою до Єлени. Й тільки на зображеннях з КА «Кассіні» вдалося виявити зовсім маленький супутник **Полідевк** із середнім значенням діаметру близько 3.5 км. Згідно грецькій міфології Єлена – є дочкою Тітирус, однією із амазонок; вона була подругою богині Венери.

Зображення на рис. 5.30 показує поверхню іншого супутника – **Телесто** ($\approx 29 \times 22 \times 20$ км). Його досить гладка поверхня вказує на те, що вона, скоріше всього, вкрита, як і Пандора, пилом із криги.

Супутник **Прометей** [661] ($145 \times 85 \times 62$ км) (Рис. 5.2) рухається орбітою з радіусом у 139800 км й кожні 14.7 годин значно впливає на кільце F Сатурна, унаслідок періодичного зближення та віддалення від нього при своєму переміщені по дуже ексцентричній орбіті (рис. 5.31).

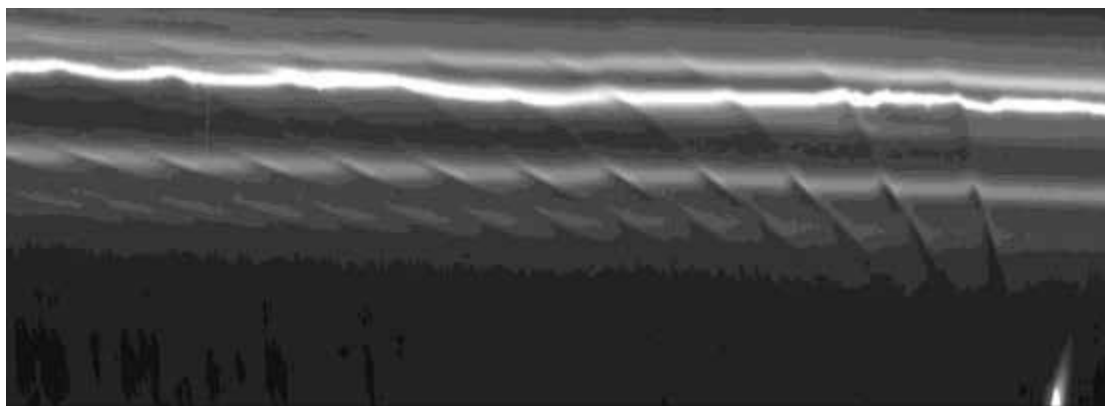


Рис. 5.31. Гравітаційний вплив Прометея на кільце F Сатурна. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

На поверхні цього супутника видно долини, гірські хребти та декілька кратерів на веденій півкулі із діаметрами понад 20 км, та трохи більшими – понад 50 км – на передній півкулі.

Через свої низькі значення густини та порівняно високі альбедо – здається ймовірним, що Пандора, Янус, Прометей та Епіметей – є дуже пористими тілами, укритими кригою.

6. Супутники Урана

Орбіти супутників Урана – дуже оригінальні: вся супутникова система (рис. 6.1) лежить в екваторіальній площині планети, яка сама по собі є майже перпендикулярною до площини навколосонячної орбіти планети. По цій причині супутники рухаються не у площині орбіти Урану (саме так відбувається для супутників інших планет), а практично перпендикулярно до неї. Зараз відомо про 27 супутників Урана [45, 83, 90, 91, 94, 97, 98, 105, 153, 156, 258, 280, 290, 305, 306, 326, 350, 382-384, 492, 548, 568, 609, 629, 656].



Рис. 6.1. Порівняльні розміри Урана і шести найбільших його супутників. Зліва направо: Пак, Міранда, Аріель, Умбріель, Титанія та Оберон (<http://wikipedia.org/wiki/>)

Загальна картина для системи сателітів Урана така: між кільцями та головними супутниками розташовується внутрішня група із 13 супутників малого розміру, далі знаходяться п'ять головних супутників, а ще далі – розташована зовнішня група із решти супутників невеликого розміру. Усі малі супутники є досить темними; вони відбивають менше 7% падаючого на них світла – як найтемніші ділянки Місяця. 18 найближчих від планети супутників, у тому числі й 5 більших, рухаються в середині магнітосфери Урана, ніколи не виходячи за її межі.

Усе це формує картину будови планетної магнітосфери ще складнішою, адже кожен із супутників здійснює на неї зворотний вплив. Температура поверхні супутників знаходиться на рівні 60 К і ні в одного з них не виявлено помітної атмосфери, оскільки всі вони занадто малі для того, щоб утримувати оболонку з газу.

Оскільки густина більших супутників близька до $1,5 \text{ г/см}^3$, то вважається, що по об'єму вони складаються на 50% із водяного льоду, на 30% – із льодів метану й аміаку та на 20% – зі звичайних гірських порід (силікатів – з'єднань кремнію з іншими хімічними елементами).

На зображеннях із КА «Вояджер-2» вдалося виявити світлі викиди, котрі можуть бути водяним льодом, снігом або інієм, а також ударні кратери значних розмірів, у центрах яких знайдена досить темна речовина. Її наявність вказує на можливу гейзерну активність.

Присутність там великих розломів, зсувів кори, тріщин свідчить про значні тектонічні процеси в недалекому минулому.

4 відносно великих супутників – Титанія і Обертон (рис. 6.2), Умбріель (рис. 6.1) та Міранда (рис. 6.3, праворуч) – мають відносно низьке альbedo (від 0,16 до 0,23), і лише в Аріеля (рис. 6.3, ліворуч) воно сягає 0,38.



Рис. 6.2. Зображення Титанії (ліворуч) і Оберона (праворуч) (http://nssdc.sfc.nasa.gov/photo_gallery)

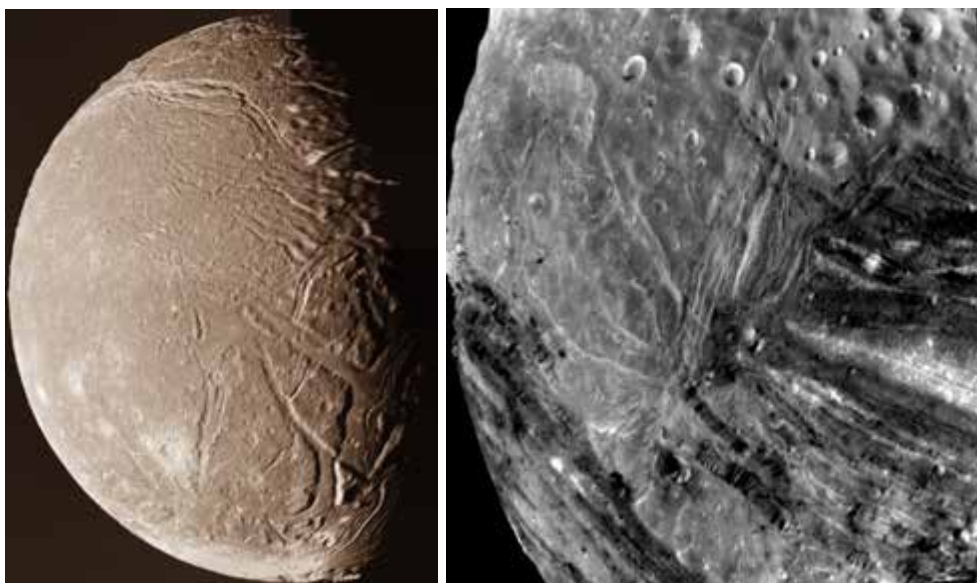


Рис. 6.3. Ліворуч – зображення Аріеля; праворуч – зображення Міранди (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Найбільшим супутником планети Уран є **Титанія** [260, 333, 673] з діаметром 1577 км. Вона була відкрита ще Вільямом Гершелем 11.01.1787, через 6 років після відкриття Урана. Титанія (рис. 6.2, ліворуч) розташовується на відстані 436 тис. км до Урану. Орбітальний період і період обертання близькі до 8,7 днів. Тому Титанія завжди повернена до Урану одним боком і є синхронним супутником.

Титанія має найбільшу густину ($1,711 \text{ г/см}^3$) серед всіх супутників Урана. Радіус ядра Титанії дорівнює приблизно 520 км. Вважають, що вона складається приблизно на 50% з льоду, на 30% із гірських порід, інші 20% із з'єднань метану.

Орбіта Титанії розташована в магнітосфері Урана, тому ведена півкуля супутника постійно піддається впливу плазми магнітосфери.

Поверхня Титанії має легкий червоний відтінок, хоча сам супутник темний. На поверхні свіжі сліди від ударів мають синій колір, а гладкі рівнини – червоний. Почервоніння поверхні Титанії цілком можна пов'язати з космічною ерозією, через постійну дію заряджених часток і мікрометеоритів. Геологічну структуру поверхні складають каньйони, обриви і кратери. Найбільший кратер (Гертруда) має розмір до 326 км, а найбільший каньйон (Мессінський) у довжину сягає 1500 км. Там є сітка тектонічних розломів із ознаками древнього вулканізму. Проте відносно мала кількість древніх ударних кратерів (і особливо великих) могла бути зумовлена певними процесами, котрі призвели до їхньої руйнації.

Рифти та звивисті долини схожі на русла річок з довжинами до 1000 км. Подібні русла оточені системою достатньо світлих відкладень. А стіни ряду каньйонів здаються дуже світлими, скоріше всього, через їх покриття льодом. Відносно молодими ударними кратерами є яскраві плями із радіальними променями.

Цікавими утвореннями також є лінійні каньйони розломів та найчисельніші дрібні ударні кратери утворені при падінні залишків протопланетного матеріалу, чи його уламків, котрі оберталися довкола Урана. Вважають, що древній рельєф супутника, був повністю зруйнованим під дією виділень внутрішнього тепла у ранню епоху при утворенні Титанії.

При розігріві – його поверхня плавилася, і відбувалася внутрішня диференціація матеріалу, при котрій важчі породи опускалися. Цей факт приводив до додаткового виділення тепла. І тільки після охолодження на утвореній після багаторазової перебудови унаслідок

тектонічних процесів поверхні – були утворені спостережувані дрібні кратери.

Подібний процес глобальної перебудови поверхні залишається все ще недоведеним, але й дуже ймовірним.

Найцікавішим супутником виявилася **Міранда**, найменший із 5 великих супутників Урану. Саме Міранду [53, 87, 759] вдалося вивчити краще від усіх тому, що при прольоті апарата «Вояджер-2» знаходився до неї найближче. Практично колова орбіта супутника Міранда знаходиться від планети на середній відстані в 129900 км. Орбітальний період і період ротації збігаються за часом і становлять 1,4 земних діб. Міранда, як Уран і всі його супутники, відчувають суттєві зміни сезонів і протягом 42 років то південна, то північна полярні області почергово знаходяться в повній темряві.

Середній діаметр Міранди складає близько 470 км і вона характеризується найменшою густиною серед основних 5 супутників із значенням 1.15 ± 0.15 г/см³. Вважають, що Міранда має силікатне ядро з мантиєю із водного льоду. А товщина мантиї дорівнює приблизно 135 км при радіусі ядра 100 км.

Існує гіпотеза, що лід на супутнику представлений у вигляді так званих клатратів із замороженої пористої суміші метану, водяного льоду й окису азоту. Внаслідок наявності останньої складової на поверхні може створюватися відмінна теплоізоляція, у результаті чого в надрах супутників утримується теплова енергія. Цілком можливо, що це призвело до розширення ядра на 1%, через що на поверхні супутника також могли утворитися тріщини.

Завдяки спостереженням в інфрачервоній ділянці спектру, на її поверхні вдалося виявити присутність водяного льоду в суміші з силікатами і карбонатами, а також аміак. У Міранди досить різноманітна і цікава по геологічній будові поверхня. На супутнику є численні тріщини, долини, обриви, розломи, яри, рівнини тощо. Деякі з цих регіонів настільки старі, що втратили свою виразність. Її поверхня досить сильно кратерована (діаметр 0,5-50 км), порізана величезними борознами й тріщинами глибиною до кількох кілометрів і вкрита торосами плит, котрі насунулися одна на іншу, тощо. Для пояснення подібної структури відразу ж запропонували гіпотезу, що тільки не сформоване тіло супутника зазнало розколу при катастрофічному зіткненні із крупною планетезималлю. Проте утворені частини не змогли розійтися, а знову були з'єднані, хоча й із зсувом на декілька кілометрів.

На поверхні є також безліч викидів темної і світлої речовини. Ретельне дослідження таких чорно-білих смуг на отриманих з КА фотографіях призвело до припущення, що за час еволюції поверхня даного супутника піддавалася перебудові близько п'яти разів. На колись активне перетворення поверхні Міранди вказує і виявлена там майже правильна трапеція розміром 140×200 км (рис. 6.4), яку умовно було названо «шеvron».

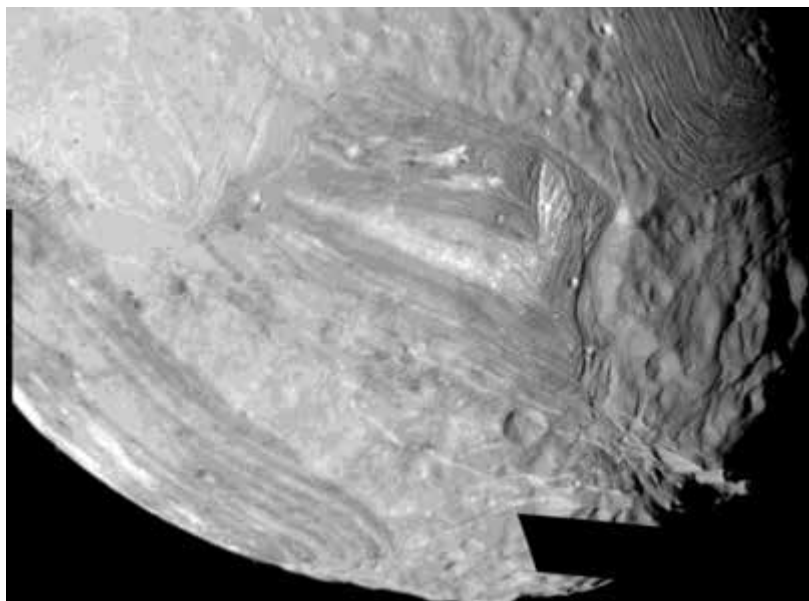


Рис. 6.4. Трапеція на поверхні Міранди (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Ця трапеція утворена темними та світлими смугами, які мають вигляд великої кількості паралельних гряд, котрі сходяться із іншою майже такою системою, з утворенням практично прямого кута. Дуже дивним є і продовження цього шеврона: там знайдено глибокий (до 20 км) і широкий розлом (рис. 6.5); його круті схили виходять за межі видимої на фото частини супутника.

Не менш загадкові утворення (а можливо, навіть, тієї ж природи) розташовані ще і майже на термінаторі, який, подібно й іншим супутникам (через положення осі обертання Урана), у час спостережень постійно перебував біля екватора Міранди. Одне з таких утворень окантоване таким же набором світлих та темних смуг, хоча й ширших, ніж це має місце у шеврона; та й загальна площа такого утворення, цілком можливо, у разів 5 є більшою від площі шеврона. Такі об'єкти ще древні римляни назвали «Цирки Максимі», вважаючи їх своєрідними «великими стадіонами». На них практично

повністю відсутні кратери ударного походження; це вказує на відносну молодість таких утворень.

Подібне утворення перебуває і в діаметрально протилежній стороні супутника та нагадує там слід після оранки, представляючи собою близько півтора-двох десятків паралельних гряд, які розділені подібними долинами, які повторюються через 5-7 км. Уся система далі повертається практично під прямим кутом та йде далі за термінатор. Такий «стадіон» дуже схожий на систему паралельних борозен, які спостерігаються на супутнику іншої планети-гіганта Юпітера – Ганімеді.

Таким чином, маленька Міранда збрала на своїй невеликій території колекцію із практично усіх існуючих геологічних форм, котрі зустрічаються у Сонячній системі.

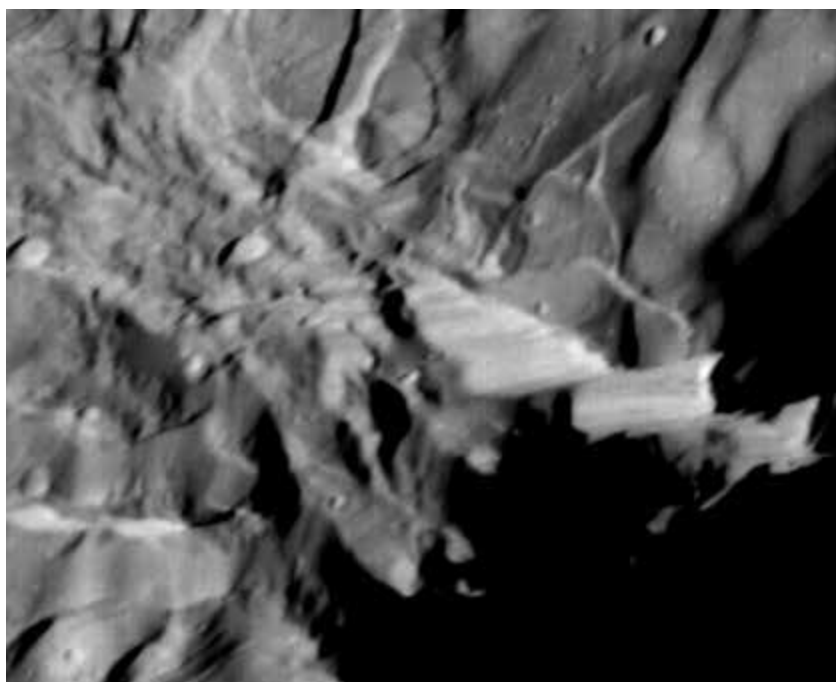


Рис. 6.5. Крупномасштабне зображення дуже глибокого розлому на поверхні Міранди (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Оскільки гіпотеза про об'єднання розколотого первинного тіла не пояснює, чому на інших частинах на поверхні супутника збереглися древні ударні кратери, то допускається, що свого часу існував нерівномірний нагрів надр Міранди, через що локальне розплавлення приповерхневої кори змогло оголити деякі плити, котрі потім випливали із надр, котрі тепер ми бачимо на її поверхні.

Супутник Урана **Умбріель** (рис. 6.6) відкрив Вільям Лассел 24 жовтня 1851 р. Він займає третє місце по віддаленості до планети на відстані 266000 км. Орбітальний період збігаються у часі з періодом обертання супутника і становить 4,1 доби. Тому Умбріель [159] є синхронним і повернутим до своєї планети одним боком. Він займає третє місце за розміром і четверте за масою серед всіх супутників Урана при середній густині $1,39 \text{ г/см}^3$.



Рис. 6.6. Зображення Умбріеля
(http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

З цього слідує висновок про те, що даний супутник складається переважно із водяного льоду, тоді як інші більш щільні складові становлять менше 40% від маси супутника. Умбріель може мати ядро радіусом ~ 317 км з каменю і мантию із водяного льоду. Присутність водного льоду на видимій поверхні було підтверджено за допомогою інфрачервоної спектроскопії.

Поверхня супутника Умбріель скоріше всього носить первинний характер великих ударних утворень з високою густиною, що проявляється в багаторазовому накладанні і перекриванні кратерів. Його поверхневий шар досить темний (середнє альbedo $\approx 0,16$) і навіть навколо його кратерів повністю відсутні світлі викиди. Практична відсутність відтінків на поверхні може бути наслідком її старовини і потужної переробки під дією заряджених частинок і нейтральних атомів, які вриваються в поверхню.

Між півкулями супутника спостерігається деяка колірна відмінність: так виявилось, що передня, дещо червоніша веденої.

Вважають, що подібне почервоніння викликається своєрідним космічним «вивітрюванням» через вплив заряджених часток і мікрометеоритів.

Ще інше пояснення полягає в тому що виділення тепла в надрах Умбріеля в епоху його утворення по якійсь причині було недостатнім для плавлення кори і гравітаційної диференціації, тому суміш льоду й темних кам'яних порід залишилася на поверхні в первозданному вигляді і по цій причині викиди матеріалу навколо ударних кратерів практично не відрізняються від основної поверхні.

Надзвичайно цікавим виявилось те, що на поверхні Умбріеля знайдено кілька великих кратерів з дуже світлим дном, найбільший з яких знаходиться на екваторі. Особливість положення осі обертання Умбріеля проявляється в тому, що його екваторіальні області в даний час практично постійно перебувають на термінаторі супутника, на границі дня й ночі.

Для пояснення існування білого дна тільки в деяких крупних одиничних кратерах припускають факт, що темний шар має обмежену товщину і під ним перебуває чистий лід. За таких умов лише найбільші метеороїди змогли б пробити темну кору й оголити чисті шари водяного льоду. Цілком можливо, що темний шар має різну товщину в різних місцях.

Під час прольоту КА «Вояджер-2» були виявлені ударні кратери з діаметром аж до 210 км. Всі кратери на супутнику мають центральні піки і не мають, за винятком одного, променів. Кратер з променями назвали Ванда, і його діаметр становить майже 131 км. На його дні є кільце, яке утворене світлими породами, вибитими з надр супутника. Як і інші супутники, Умбріель поцяткована каньйонами.

Супутник **Аріель** (Рис. 6.3, ліворуч) [159, 618] є найяскравішим супутником Урана і займає четверте місце за розміром. Він був відкритий 24 жовтня 1851 р. Вільямом Ласселем. Більшість відомостей про нього було отримано при польоті «Вояджера-2», котрий зміг сфотографувати 35% поверхні цього супутника. А його орбіта знаходиться від планети на відстані близько 190 тис. км і має малий ексцентриситет. Орбітальний період і період його обертання відбуваються за рівний інтервал часу, який становить 2,5 дні. Це вказує на те, що Аріель повернутий до планети весь час тим же боком.

Густина супутника становить приблизно $1,66 \text{ г/см}^3$, що вказує на те, що його склад сформований з однакових частин гірської породи і льоду. Вважають, що Аріель має ядро з каменю, вкрите мантиєю із

водного льоду; радіус ядра супутника дорівнює приблизно 372 км, що становить близько 64% від радіуса всього супутника.

Із використанням інфрачервоної спектроскопії, на його поверхні вдалося виявити ще й вуглекислий газ, найбільша концентрація якого спостерігалася на півкулі супутника, яка знаходиться позаду при русі по орбіті. Аріель є найсвітлішим з 5 великих супутників, відбиваючи майже 40% падаючого світла.

У багатьох місцях на супутнику видно відкладення білого кольору, найімовірніше, водяний іній.

Поверхневий шар супутника Аріель вкритий кратерами, долинами, тріщинами й складками а його вигляд не виключає в минулому значної геологічної активності. Проте, якщо для Титанії не викликає сумніву наявність дуже давньої геологічної активності, то Аріель має всі ознаки порівняно «молодої» активності.

Очевидно, що основним джерелом для його енергії могло бути припливне тертя, яке викликане резонансом з Умбріелем і Мірандою. Але зараз такого резонансу у русі Аріеля вже немає.

Глибина тріщин (рифтів) на Аріелі інколи сягає 10 км, і вони простягаються на кілька сотень кілометрів. Відмічено, також факт, що навколо основного русла долин утворена ще й мережа їх притоків. Ширина тріщин часто доходить до 30 км. Їхнє гладке дно вказує на те, що вони могли утворитися в результаті переміщення якихось мас.

Найімовірніше, що вони утворилися в епоху інтенсивної перебудови крижаної кори Аріеля, яка супроводжувалася її розломом, стискуваннями та тектонікою. Проте на видимій поверхні супутника зареєстровано дуже мало метеоритних кратерів. І це вказує на її молодість у геологічних масштабах. У якості матеріалу, що заповнює долини та знаходиться уздовж них пропонується лід із можливою домішкою аміаку та метану. У якості можливої природу цього льоду при низьких температурах розглядають і водяний вулканізм у минулому.

Оберон (рис. 6.2, праворуч) [159] є другим за величиною та за масою супутником Урана. Його відкрив ще Вільям Гершель у 1787 р. Орбіта Оберона знаходиться на відстані в 584000 км до планети і він є найвіддаленішим з п'яти великих супутників. Оберон також є синхронним супутником, з часом обороту навколо осі і руху по орбіті рівним близько 13,5 діб. Припускають, що на 50% супутник складається з льоду, із сполук азоту й метану на 20%, та із твердих гірських порід на 30%. Густина Оберона рівна 1,63 г/см³. Супутник може мати кам'яне ядро та крижану кору-мантію; за припущенням,

між мантією і ядром може знаходитися шар з води, який знаходиться в рідкому стані. Під дією наднизьких температур лід супутника набуває властивостей практично як гірська порода, тому при падінні метеорита лід розпорошується по поверхні, залишаючи темні плями.

«Вояджер-2» отримав лише одне зображення Оберона крупним планом, де видно до 40% його поверхні; проте лише 25% були придатні для вивчення його геологічної будови. Виявилося, що Оберон займає друге місце по темноті поверхні та має найчервоніший серед основних супутників відтінок; поверхня вкрита великою кількістю кратерів. Все це свідчило про те, що поверхня сформована в результаті падіння астероїдів і кометних ядер, а на етапі ранньої еволюції, під час певного розтягування верхньої кори, була утворена система тріщин і обривів.

Зараз вважають, що поверхня Оберона давніша, ніж у решти супутників Урана. Це пояснюється великою кількістю «молодих» і «старих» ударних кратерів. Діаметр найбільшого і кратерів (з назвою Гамлет) рівний 206 км.

Несподіванкою виявилася наявність дуже темного дна у великих та молодих ударних кратерах, які оточені світлими променями. Це вказує на певну гейзерну вулканічну активність у водяному варіанті, при якій крізь розриви, що утворилися в крижаній корі, на поверхню супутника могла вилитися забруднена вода, котра при охолодженні утворює дуже темну частину поверхні. Через усю південну півкулю Оберону проходить досить широка долина, котра свідчить про тектонічні процеси у минулому. Поряд із багатьма великими кратерами там видно ще й темні потоки, які частково заповнювали їх дно і затвердівали. Очевидно, що у попередні часи на супутнику діяли потужні внутрішні сили та потоки тепла, котрі навіть могли періодично зруйнувати його тверду кору та викликали її переміщення. Саме розломи у корі Оберона можуть бути теперішніми проявами цих рухів.

Зображення Оберона, Титанії, Умбріеля та Аріеля дуже подібні, та багато в чому нагадують Міранду. Їх поверхні також вкриті старими кратерами ударного походження та сіткою тектонічних тріщин (рифти, звивисті долини, лінійні жолоби та ін.), що є ознаками древнього вулканізму.

13 внутрішніх супутників мають розмір менше 150 км та обертаються вони у інтервалі відстаней від центру Урана 49000-80000 км (при екваторіальному радіусі Урана 25559 км) та є дуже темними. Вважається, що вони можуть бути залишками крупніших тіл, котрі

розпалися у так званій сфері Роша центральної планети і спричинили утворення тієї або іншої системи кілець. Зараз деякі з них ніби «пасуть» утворене ними ж окреме кільце «Епсилон» Урана.

Супутники Корделія й Офелія (з діаметром 15-25 км) виявилися такою ж групою супутників пастухів кільця, як і деякі супутники Сатурна для його кілець, що підтверджує гіпотезу про супутники-пастухи, які є для кілець своєрідними мішенями, по орбітах яких групується матеріал останніх.

Особливо темним є супутник Пак (середнє альbedo близько 0,11, але є й деталі з альbedo 0.02-0.03) за розміром (150 ± 10 км) займає проміжне місце між головними і нововідкритими супутниками. За формою він є практично ідеальною сферою і таким же дуже темним, що й кільця Урана (альbedo 0.02-0.03).

Це пояснюють тим, що поверхня ряду супутників Урана значною мірою складається із вуглецево-вмісних молекул. Усі вони знаходяться в досить потужній плазмосфері Урана. Тому унаслідок тривалого бомбардування поверхні цих супутників зарядженими частинками метан і його похідні розпадаються із вивільненням чистого вуглецю (тобто, сажі).

Супутники рухаються у потужній магнітосфері Урана, і досить оригінально взаємодіють з нею. Магнітна вісь диполя Урана нахилена до її осі обертання під кутом у 59° . Тому за половину оберту планети навколо своєї осі (8.62 години) полярність частини магнітосфери, у якій знаходиться супутник, змінюється на протилежну. Це приводить до періодичної зміни в опроміненні радіацією всієї поверхні супутника. А за тривалий час взаємодії поверхонь з плазмосферою вся її поверхня стає дуже темною.

7. Супутники Нептуна

Серед 14 супутників Нептуна [85, 140, 141, 220, 622, 700] (рис. 7.1) лише Тритон має великий розмір та надзвичайно велике альbedo (0.78). А високоякісні зображення існують лише для трьох із них (Тритон, Нерейда й Таласа).

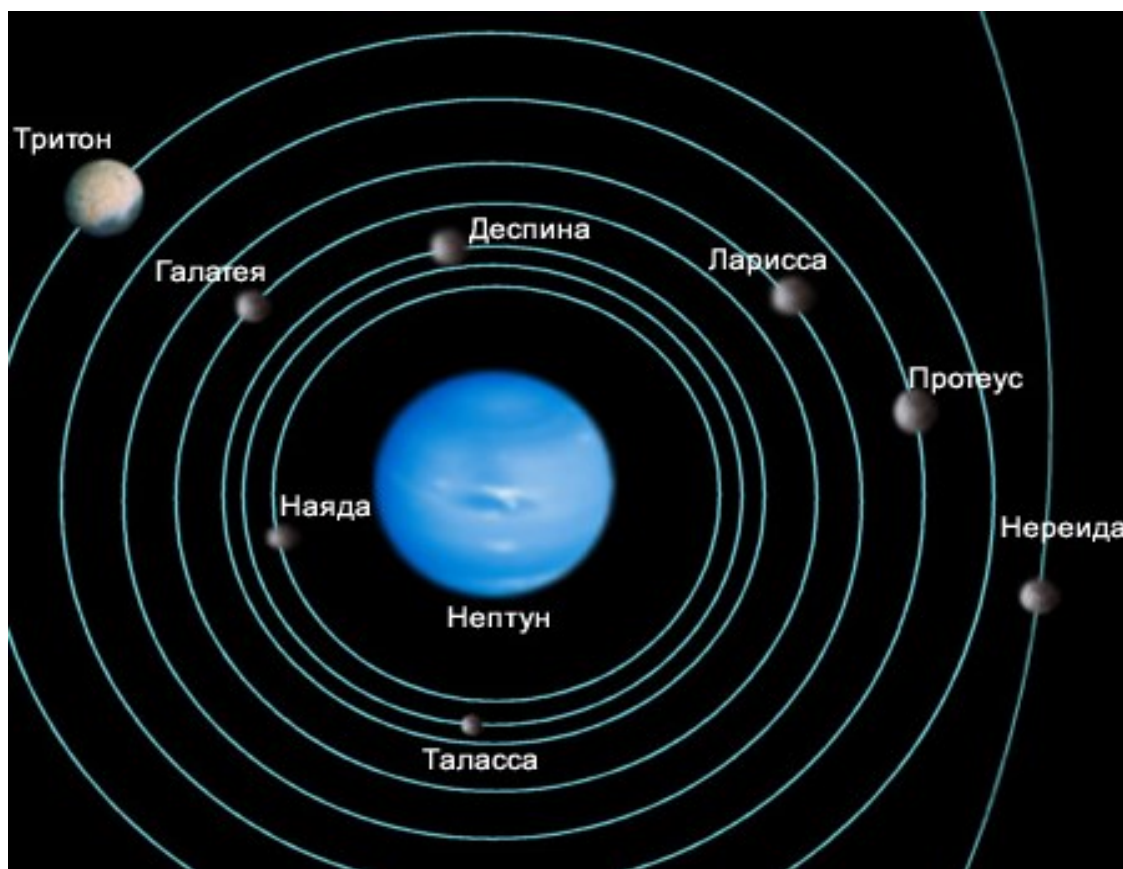


Рис. 7.1. Система супутників Нептуна.

Тритон (рис. 7.1) [56, 157, 161, 162, 166, 167, 248, 278, 279, 315, 335, 511, 531, 546, 559, 560, 638, 689, 733] є одним із найбільших супутникових тіл Сонячної системи (розміром поступається лише Місяцю, Титану і Галілеєвим супутникам Юпітера). Він був відкритий 10.10.1846 Вільямом Ласселлем через кілька днів після відкриття центральної планети. Навколо Нептуна Тритон обертається по коловій орбіті дуже швидко (період обертання – 5,88 діб); планетна орбіта нахилена на кут 157° (23°) до екваторіальної площини; маса – $2.14 \cdot 10^{22}$ кг і він має майже сферичну форму.

Через досить велику густину (2.061 г/см^3) допускають, що він може мати велике ядро із твердих порід (навіть металеве), яке може

вміщувати до 2/3 від маси супутника. Своїми розміром, структурою та іншими властивостями він дуже схожий на Плутон. Поверхнева температура склала лише 38 К. Він постійно обернений одним боком до Нептуна та є у Сонячній системі єдиним, у якого, за такого великого розміру і порівняно близької відстані до планети (до Нептуна він ближчий, ніж Місяць до Землі), має місце зворотне обертання.

По складу Тритон відносять до групи силікатно-крижаних тіл [100]. У його спектрі була виявлена навіть слабка смуга метану, яка може відповідати лише дуже розрідженій атмосфері з азоту зі слідами метану CH_4 і його похідних від результатів фотолізу: етану, етилену, ацетилену і т.п. Поверхневий тиск становить 15 мікробар, що в 67000 разів менше за тиск в атмосфері Землі.

Дистанційні спостереженнями змогли ще й виявити деякі ознаки смуг метанового інію на поверхні. Це дозволяє припустити факт, що поверхня Тритона складається з кам'яних матеріалів. Зображення Тритона на рис. 7.2 змонтовано із десятка окремих кадрів, зроблених 25.08.1989 р. На зображенні представлена обернена до Нептуна півкуля з південною полярною шапкою. Колір мозаїки Тритона було синтезовано об'єднанням зображень у червоному, зеленому і синьому фільтрах. Блідо-рожеві деталі складають обширну південну полярну шапку, можливо, з льоду метану, який під дією сонячного світла сформував суміші червонуватого кольору.

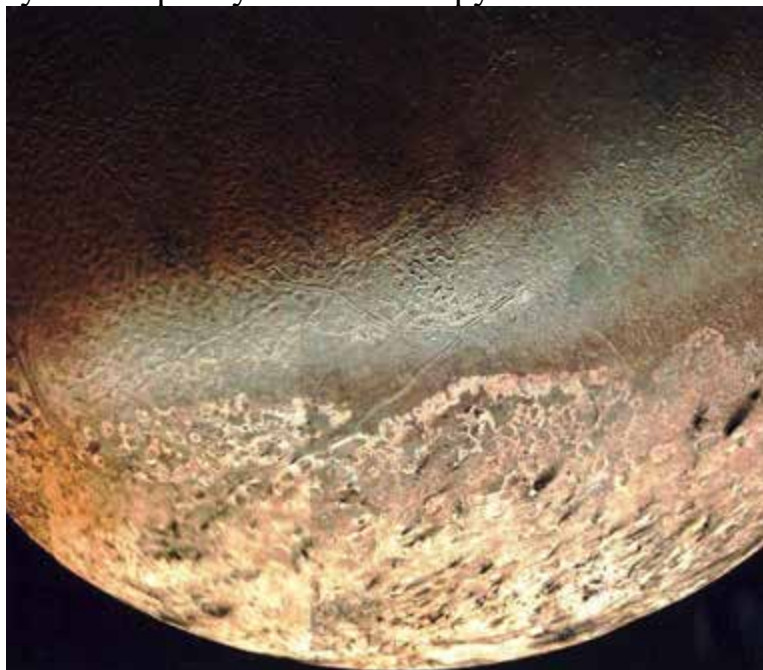


Рис. 7.2. Зображення Тритона з південного полюса (<http://voyager.jpl.nasa.gov/image/>)

Вважається, що темні смужки на рожевому льоду, цілком можливо, є замерзлим вугільним пилом, який випав із величезних гейзерних плюмів. Синювато-зелені деталі на цьому зображенні тягнуться уздовж екваторіальної області довкола всього Тритона і вони, можливо, представляють собою відносно свіжі утворення замороженого азоту, які були зовсім недавно вивержені із так званих кріовулканів Тритона.

В його екваторіальній області, яка, як вважається, складається із замерзлого метану, спостерігаються різноманітні типи поверхонь, у тому числі величезні крижані скелі й темні смуги, тріщини шириною ≈ 30 км і довжиною до 1000 км. Їх приписують вулканічній і гейзерній активності (рис. 7.3). вважається, що дві третини поверхні супутника покриті льодом та вона є досить молодою.

Оскільки виявлені при прольоті КА 10 гейзерів знаходились у південній приполярній області, над якою Сонце в цей період перебувало близько зеніту, то причину такої активності приписують нагріванню Сонцем. Унаслідок цього на деякій глибині під поверхнею (де є також і водяний лід, і метанові з'єднання) азотний лід починає плавитись; тиску газу, що виникає у глибинному шарі при температурі всього $+4^{\circ}\text{C}$, буде цілком достатньо з тим, щоб викинутися газовим фонтаном.

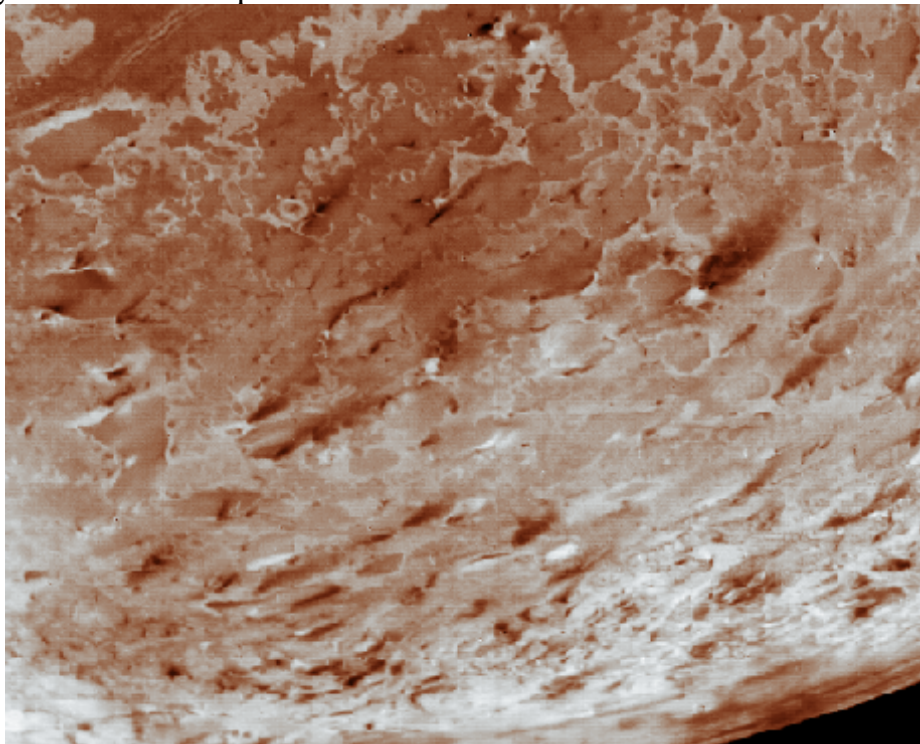


Рис. 7.3. Водяні гейзери на Тритоні
(<http://voyager.jpl.nasa.gov/image/>)

Про відносну молодість південної полярної шапки говорить ще й те, що в ній практично немає ударних кратерів, тоді як темні на рис. 7.3 плями – є маленькими вулканами. Вважається, що їх зробили подібні до гейзерів виверження азоту з домішками темнішого матеріалу з-під кори Тритона. Таким чином, Тритон долучився до Землі, Венери, Іо та Енцелада, на яких проявляється вулканічна активність у даний час; але природа вулканізму на кожному з цих тіл дуже різна (виверження на Землі й Венері і на Марсі в минулому, складаються з гірського матеріалу, на Іо – з сірки і/або сірчаных з'єднань, а на Енцеладі й Тритоні – своєрідні водяні гейзери).

Зараз прийнята наступна історична модель Тритона. В часи, коли супутник був досить теплим, над його кам'янистим ядром з діаметром біля 2000 км знаходився величезний і глибокий океан з води, який при охолодженні поступово замерзав. А тому зараз, утворена там льодова оболонка має товщину понад 180 км і лежить вище водяного океану протяжністю ≈ 150 км. Вода в океані є насиченою аміаком, метаном і різними солями. Льодяна кора такого океану знаходиться під впливом істотних механічних напруг, через що в корі супутника часто виникають тріщини великих розмірів, сліди від яких перетинаються на поверхні під різними кутами.

На поверхні супутника повинен лежати сніг, переважно з інію азоту. За деякими оцінками сумарний шар таких конденсатів може перевищувати 6 м. За отриманими КА «Вояджер-2» результатами південний полюс Тритона, що був повернутий до Сонця, тоді оточувала яскрава «полярна шапка» з дуже високою яскравістю (альbedo сягало 95%), яка займала майже половину поверхні супутника. На її дуже світлій поверхні було відмічено велику кількість темних вкраплень, з яких угору тягнуться струмені якоїсь темної речовини, які виявилися газовими гейзерами, які сягають висоти у 8 км. Вище вони змінюють кут нахилу майже на 90° і перетворюються спочатку в невеликі густі темні хмари, а потім витягуються в широкі горизонтальні шлейфи в західному напрямку довжиною більше 150 км.

Такий дивний, різкий «злам» гейзерних викидів може говорити про те, що на висоті ~ 8 км знаходиться тропопауза в атмосфері супутника, вище котрої дмуть сильні вітри. Завдяки даним, надісланими 1989 р. апаратом «Вояджер-2» стало відомо про те, що Тритон укритий тонкою атмосферою, котра на 99% складена із азоту. Ця атмосфера Тритона є динамічною та значно змінює свій хімічний склад та щільність у залежності від досить тривалого «сезону». За цей

час змінюється концентрація метану та азоту через значні зміни температури.

Наприклад, в 1998 р. Сонце перебувало у зеніті над південним полюсом супутника, й азот тоді інтенсивно випаровувався. Внаслідок цього за 10 років тиск азотної атмосфери збільшився у кілька разів. З допомогою інфрачервоного спектрографу з високою роздільною здатністю, встановленого на одному із телескопів у Південній європейській обсерваторії у Чилі, було з'ясовано, що окрім азоту та метану у супутниковій атмосфері є ще й чадний газ (CO).

Поверхня Тритона молода за геологічним віком, що вказує на можливу високу динаміку у надрах цього тіла. На поверхні супутника зовсім мало кратерів ударного походження, але знайдено велику кількість скель, заглиблень та тріщин, також там є долини та каньйони. В екваторіальній частині поверхні Тритону виявлено два дуже незвичайних утворення, які нагадують своїм зовнішнім виглядом поверхню давно застиглих озер (рис. 7.4).



Рис. 7.4. На знімку КА «Вояджер-2» показано застигле озеро з розміром 200×400 км (<http://uk.wikipedia.org/>)

Такі незвичайні озера характеризуються своєрідними терасами заввишки до 1 км. Тому припускають, що озера утворилися у час періодичного танення та замерзання поверхні. Згідно хімічного складу, тераси утворені із водяного льоду. Передбачається наявність суттєво більшої кількості подібних утворень на інших частинах поверхні супутника.

У цілому поверхня Тритона є досить світлою і відбиває до 75-80% падаючих сонячних променів. Через дуже низьку температура на поверхні Тритону, його рівнини покриває 6-7 метровий шар льоду, снігу й інію із замерзлих етану, азоту, метану та етилену. Спостережні

дані також показали, що в цій області супутника зовсім немає ударних кратерів. Виверження Тритона складаються з летких речовин, таких як азот або метан, і управляються сезонним нагріванням від Сонця.

Нереїда [594, 603] (рис. 7.5) – третій за розміром супутник Нептуна з діаметром 340 км. Він був відкритий 1 травня 1949 р. Джерардом Койпером.

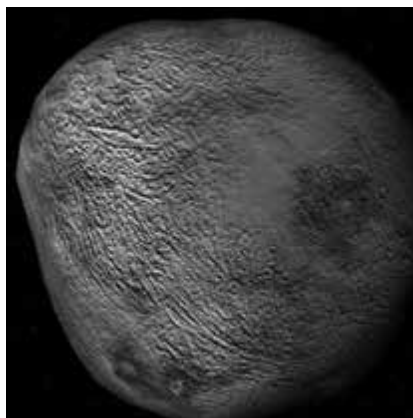


Рис. 7.5. Супутник Нереїда (<http://voyager.jpl.nasa.gov/image/>)

Протягом тривалого часу супутник вважався самим віддаленим від Нептуна. Нереїда рухається по сильно витягнутій (із ексцентриситетом 0.75) орбіті. А тому її відстань до Нептуна міняється від 1.4 аж до 9.7 млн км (з періодом обертання 360.16 доби, при альбедо 0.14). Її поверхня, як і в більшості відносно темних супутників має складну структуру, але вона слабо кратерована. Виходячи зі значного ексцентриситету орбіти, можна припустити, що супутник є астероїдом, або ж об'єктом поясу Койпера, який був захоплений Нептуном.

Таласса (рис. 7.6) – внутрішній супутник Нептуна, якого відкрили по отриманих КА «Вояджер-2» знімках у вересні 1989 р. Власне ім'я супутник отримав 16 вересня 1991 р. Ймовірно, Таласса сформувалася із залишків, колись існуючих супутників Нептуна, так само як і деякі інші супутники, розташовані на орбітах ближче від Тритона.

Таласса має неправильну, майже дископодібну форму (108×100×52 км). Слідів від геологічної активності на супутнику не вдалося виявити. Обертається Таласса нижче, ніж синхронна навколо нептунова орбіта. У результаті цього, орбіта супутника повільно знижується під впливом припливних сил. А тому Таласса повільно

наближається до Нептуна. Вважається, що досягнувши так званої межі Роша, супутник зруйнується і утворить кільце, або ж його поглине Нептун.

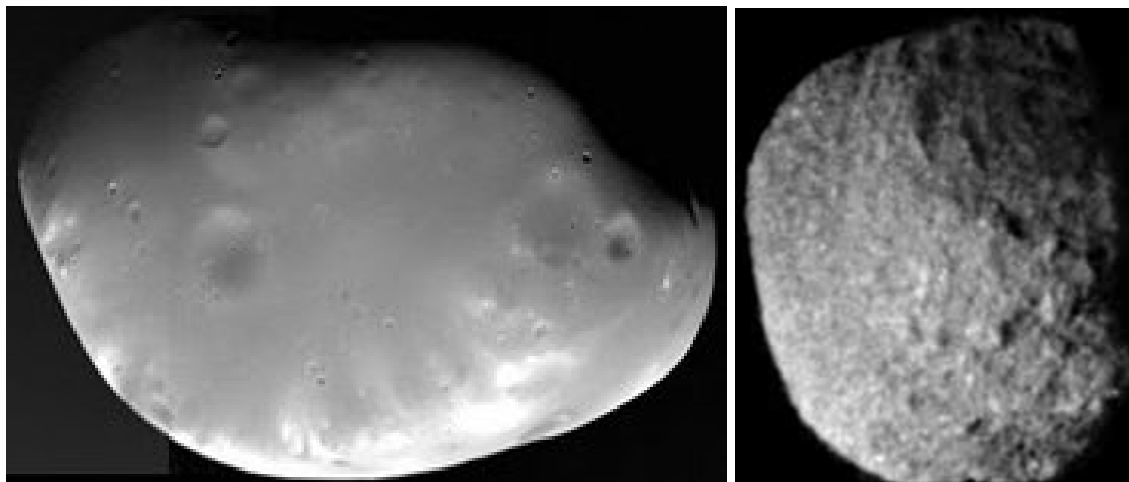


Рис. 7.6. Зображення супутника Таласа
(<http://voyager.jpl.nasa.gov/image/>)

Рис. 7.7. Протей – найбільший несферичний супутник в Сонячній системі (<http://voyager.jpl.nasa.gov/image/>)

Вважають, що так ж доля спіткає й деякі інші внутрішні супутники Нептуна: **Наяда, Галатея Деспіна і Ларисса** [662].

Протей [662] (рис. 7.7) – найбільший із помітно несферичних супутників у Сонячній системі. Так само він являється найбільшим із внутрішніх супутників Нептуна, і другим за розмірами серед усіх його супутників. Відкрили Протей по знімках, які зробив апарат «Вояджер-2» 7 липня 1989 р. Власне ім'я супутник отримав 16 вересня 1991 р. На поверхні Протея знайдено безліч кратерів, але слідів від геологічної активності там також виявлено не було.

Розміри супутника складають $440 \times 416 \times 404$ км. Хоча за розмірами він перевершує інші, але виявити його із Землі за допомогою телескопів не вдалося через те, що він знаходиться настільки близько до планети, що її блиск приховує його.

8. Змінні явища на супутниках

8.1. Місяць

У своїх дослідженнях Флоренський М.П. та Чернов В.М. стверджують, що з 1540 р. на його поверхні відмічено понад 700 різноманітних нестаціонарних явищ [721, 741, 742, 748, 750, 754, 755, 765], які проявлялись як підсилення (чи зменшення) відносної (щодо довкілля) яскравості окремих його деталей, зміни їх обрисів, появи хмаринок та інше. Не виключенням було і 20-те століття, що у значній мірі пов'язується з пулковським астрофізиком М. Козирєвим, який осінню 1955 р. виявив відмінності інтенсивності та форми контурів так званих Н і К фраунгоферових ліній кальцію в спектрах кратера Аристарх від сонячного. Це він приписав явищу люмінесценції.

Дещо пізніше, 3 листопада 1958 р., він помітив зміну яскравості центральної гірки кратера Альфонс: між 0^h та 1^h всесвітнього часу (UT) вона потемніла і стала червонуватою, а між третьою і 3.5 годинами UT – надзвичайно яскравою. У спектрі було зареєстровано інтенсивну емісію в ряді смуг, які нагадували так звані смуги Свана молекули С₂. Це було приписано дії вулкану. У сукупності отримані результати спонукали не лише до активних спостережень, але й до пошуку пояснень (падіння метеоритів, термолюмінесценція тощо).

Нарешті, у місцях посадок деяких пілотованих модулів КА «Аполлон» були встановлені сейсмометри, але їх багаторічна робота не виявила помітних тектонічних процесів в надрах Місяця.

Короткочасні місячні явища навіть отримали певну класифікацію. Так, на сьогодні розрізняють такі особливості.

Туманні явища. Припускають факт, що зникнення на короткий час деяких видимих частин рельєфу Місяця і туманні сяйва своєю причиною можуть мати вихід газів з її надр на поверхню внаслідок припливної сили Землі. Вихід газів найбільш ймовірний тоді, коли Місяць знаходиться в перигеї і приливні напруги у корі можуть привести до розтягування тріщин. Адже приливні сили Землі на Місяці майже в 33 рази потужніші, ніж від Місяця на Землі.

За роки спостережень такі явища не раз спостерігалися у Морі Криз і всередині кратера Платон.

Зміни яскравості. Так, на валах місячних кратерів Прокл, Цензорин і Аристарх, спостерігаються зміни їх альbedo, коли яскраві деталі стають ще яскравішими. Пояснюється це переміщенням хмар пилу і можливими випарами місячного льоду, присутність якого виявили космічними апаратами. Потемніння місячної поверхні були виявлені спостерігачами в кратері Пікар і Прокл.

Голубуваті саява найчастіше спостерігаються при серповидному Місяці на темному, залитому попелястим світлом, боці, або ж при місячних затемненнях. Найчастіше вони спостерігаються в кратері Аристарх. Такі факти можуть бути пояснені явищем п'єзоелектрики. Адже електричне поле може виникати в скелях завдяки механічним напруженням і викликати іонізацію та світіння.

Червонуваті саява можна також пояснюватися п'єзоелектрикою. А виявляють його за допомогою червоного і блакитного фільтрів, які поперемінно розміщують в окулярі телескопу. Спостерігали його на валу кратера Аристарх і всередині кратера Гассенді.

Тіньові явища. До них належить поява тіні там, де її не повинно бути. Наприклад, коли дно кратера опиняється в тіні у час, коли Сонце стоїть високо. Можливим поясненням даного явища – є своєрідний тепловий удар, коли при сході Сонця температура місячної поверхні за годину змінюється від -120 до $+110$ °C, і це викликає різке теплове розширення місячних порід.

Зореподібний спалах. Найбільш вірогідною причиною може бути, наприклад, падіння метеорита на місячну поверхню. Наприклад 13 травня 1972 р. неподалік від місця посадки «Аполлона-14» було зареєстровано метеоритний удар потужністю 1000 тон тротилу.

Зореподібні вогні спостерігаються від декількох хвилин до кількох години як яскрава світна точка на Місяці. Зазвичай повідомляють про вогні на темному боці молодого Місяця у віці 3-4 днів, або ж у моменти повного місячного затемнення.

Світлі рухомі об'єкти. Вони переміщуються не тільки на тлі місячного диска, але і в його околицях. Пояснення – найрізноманітніші (наприклад, переміщення газопилових хмар).

8.2. Io

Io – один із 80 відомих на час написання супутників [1-10, 12, 13, 15-18, 20-26] навколо Юпітера. Унаслідок значних збурень орбіти і зміни амплітуди великомасштабних припливів, зумовлених тяжінням Юпітера та розташованих поруч Ганімеда й Каллісто, виникає припливна енергія із потужністю у $7 \cdot 10^{13}$ Вт. Вона розігріває його надра і приводить до значної вулканічної активності.

Вважають, що ядро Io оточено скельною оболонкою. І ця кремнієва оболонка, мабуть, доходить до поверхні. Тоді як Європа та Ганімед мають ще й потужну водяну оболонку з льоду та рідини. У грудні 2000 р. були виконані унікальні одночасні дослідження з борту двох КА – „Галілео” (рис. 3) й „Кассіні”, що якраз пролітав повз Юпітер. Супутник Io – це досить масивне небесне тіло. Його радіус складає $R_{Io}=1815$ км. При середній густині 3.55 г/см^3 це дає масу на 20% більшу, ніж для Місяця. Розрахунки показали, що прискорення вільного падіння на його поверхні досягає 1.81 м/с^2 .

Ще у 1962-1963 рр. спостереження взаємних затемнень супутників у системі Юпітера виявили збільшення блиску майже на 10% відразу після виходу супутника Io із тіні, яке зберігалось протягом 15 хвилин. Дещо пізніше спектроскопічними спостереженнями допомогли виявити спочатку емісії натрію, а пізніше сірки, кальцію, калію, кисню й водню.

Багаторічними спостереженнями було показано, що ці емісії вказують на існування своєїрідної хмари навколо Io, яку інколи називають плазмовим тором. Світіння цієї хмари вказує на східно-західну асиметричність, та залежить ще й від положення Io на орбіті; це вказує ще й на довготну залежність. Її протяжність в площині орбіти Io становить майже 23 радіуси Юпітера, а в перпендикулярній площині – сягає майже до полярних регіонів Юпітера. Структура цієї хмари міняється з часом та пов'язана із положеннями супутника на його орбіті. Це світіння пов'язують із зумовленою електронами (протонами) ударною іонізацією. Більше того, вже перші спостереження на одному із найбільших радіотелескопів (РАТАН-600) виявили, що на довжині хвилі 3,9 см температура Io сягає 600 К.

Але остаточну відповідь на причину появи таких спостережних даних дали передані КА «Вояджер» зображення Io, на яких виявили вісім діючих вулканів (див. рис. 8.1). Реальність цього майже через 15 років підтвердили зображення з КА «Галілео». Згадані 8 активних вивержень тоді ж були ототожнені на поверхні супутника з «гарячими» плямками, з яких через чотири місяці був «виключений»

лише найбільший вулкан, біля якого температура становила 600 К та який названо на честь гавайського бога вулканів – Пеле.

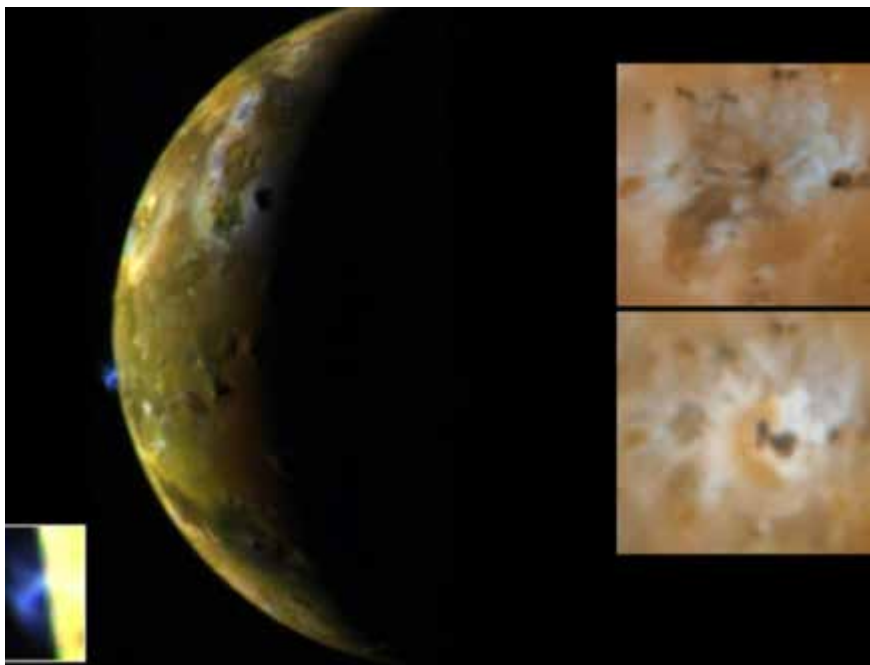


Рис. 8.1. Поверхня Іо. Ліворуч – вулканічний плюмаж висотою ~100 км. Праворуч – зміни біля вулкана Ра Патера (зверху – дані «Вояджера», внизу – «Галілео») (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Під час вивержень вулканів на Іо в космос викидаються лише найлегші елементи. А важчі елементи (наприклад, сірчаний газ і пара сірки), вилетівши з вулкана, через дуже низьку температуру оточуючого середовища, достатньо швидко конденсуються і замерзають, та у вигляді інію й снігу – випадають на поверхню супутника. Оцінки показують, що подібний процес по своїй швидкості значно випереджає руйнування молекул газу ультрафіолетовим випромінюванням Сонця – фотодисоціацію.

Сліди атмосфери Іо мають густину на 7-8 порядків меншу, ніж на поверхні Землі. Це є глибоким вакуумом при концентрації молекул близько 10^{17} м^{-3} . За таких умов діючі вулкани на його поверхні викидають фонтани газів на сотні кілометрів (рис. 8.1). Це вимагає швидкостей вильоту газу з жерла понад 1 км/с. Блідо-оранжевий колір деяких ділянок поверхні Іо викликаний відкладеннями сірки і сконденсованого сірчастого газу.

Рівноважна температура на поверхні супутника Іо на існуючій відстані від Сонця в районі екватора є близькою до 130-140 К. Дистанційні вимірювання показували існування там «гарячих» плям з

температурою 310, 400 і навіть 600 К та розмірами в межах 75-250 км. Із близької відстані «Вояджер-1» зареєстрував 8 активних вивержень великого розміру, котрі були ототожені із «гарячими» плямами на поверхні супутника. Через 4 місяці зображення КА «Вояджер-2» показали «виключення» одного з вулканів та продовження дії інших семи вулканів. Виявилось, що перестав діяти найбільший із вулканів з температурою 600 К. Його назвали на честь гавайського бога вулканів Пеле. Викиди від вивержень займали розміри 950×1400 км. Навколо його доить темного центру у всі боки розходилися потоки розплавленої речовини, яка накопичувалася у глибинних резервуарах.

Найбільші вулкани отримали власні назви: Прометей [188] (рис. 8.2), Замана, Куланн, Тукан, Тваштар [316, 451] (рис. 8.3), Ра Патера, Амірані [178], Сурт, Пеле [50, 208, 210, 432], Атен. Виявлені вулкани розділені на такі два типи. Більшість вулканів відносять до першого типу, вони мають температури $T=350-400$ К, швидкість виверження газів ~ 500 м/с та висоту газових султанів майже у 100 км.

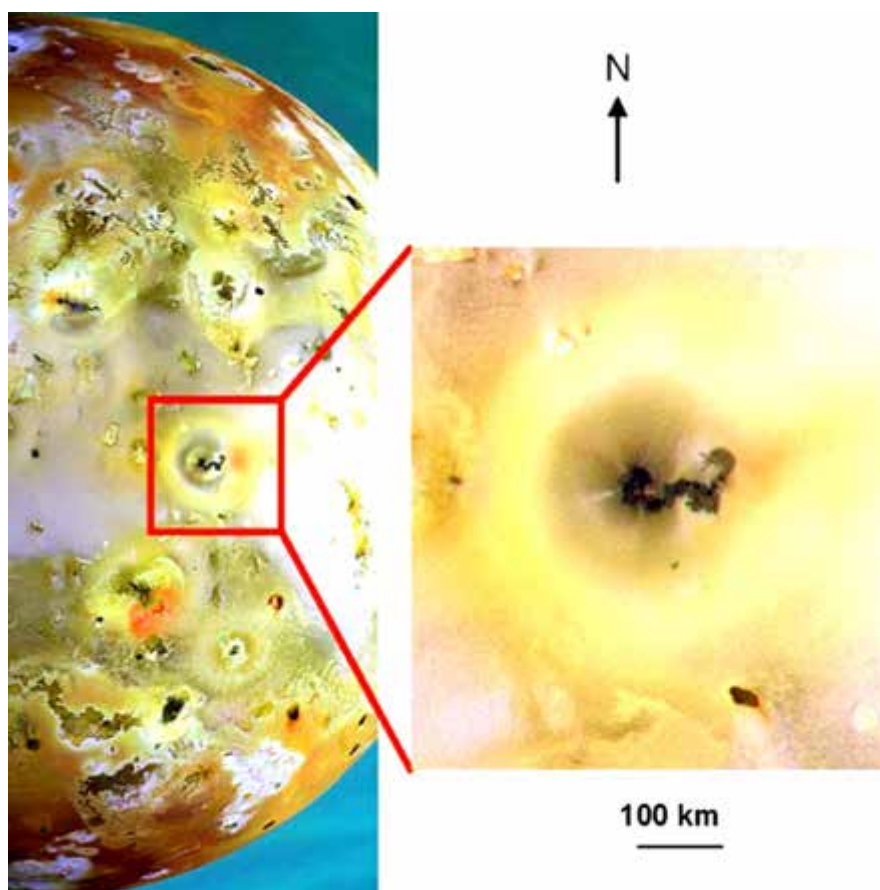


Рис. 8.2. Вулкан Прометей на Іо з КА «Галілео» 29 березня 1998 р.: праворуч – плюмаж висотою 100 км (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

До другого типу віднесли вулкани з більшими температурами, швидкостями виверження у ~ 1000 м/с, та висотами до 300 км. Можливо, що й глибини, з яких відбувається виверження – також є більшими. Їм притаманна темна, близька до кільцевої окантовка на відстанях у декілька сотень кілометрів від їх кальдер (вулкани Пеле, Атен, Сурт).

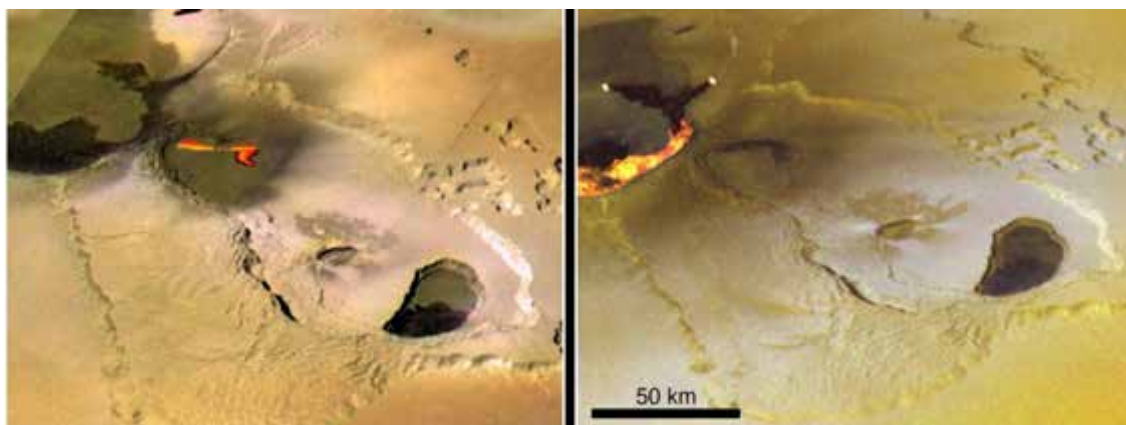


Рис. 8.3. Вулкан Тваштар на Io (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

У центрі таких вивержень часто розташовано декілька великих плоскогір'їв із обривистими краями та широкими долинами, які їх розділяють. Їх поверхня є досить темною з відтінками оранжевих та коричневих кольорів. Тільки самі плоскогір'я виділяються трохи світлішим забарвленням. Вважають, що ці виверження є гейзерами, при яких можуть відбуватися раптові фазові переходи летких речовин із рідини в газ. Це що характерно і для ряду земних вулканів.

Для сірчистого газу на Io такий перехід повинен відбуватися за температури $T \approx 400$ К; для сірки це ж відбуватиметься при $T \approx 700$ К. У цій гіпотезі менші султани відповідатимуть викидам із незначної глибини, тоді як великі – з глибоких резервуарів під поверхнею. Не виключено існування багатьох ізольованих «лінз рідкої сірки» на досить незначній глибині, які формуються проникненням у силікатну кору глибинної магми [67].

При вивченні вулканів найбільше уваги приділялось Прометею, який, за оцінками, з 6.11.1996 до 7.05.1997 викинув $0,8 \text{ км}^3$ речовини (із миттєвими виверженнями в піку до $140 \text{ м}^3/\text{с}$ і середніми – $49 \text{ м}^3/\text{с}$). Він знаходиться в точці на екваторі на зворотній від Юпітера півкулі. Температура там сягала 1400 К, що є явною ознакою силікатного вулканізму.

Для пояснення плюмажів над активним фронтом лавових потоків запропоновано просту модель, коли потужний лавовий потік може

розтопити та випарувати величезний об'єм досить багатой на SO_2 кори, котра з часом може вибухати. По фронту потоку виявлено декілька отворів, яким притаманні температури від 437 до 1263 К.

Моделювання показали, що вулкан забезпечується магмою від відносно невеликої «лінзи», верхня частина котрої знаходиться на глибині 2-3 км, а нижня – на ~ 14 км; товщину «плюмажів» оцінили всього $\approx 0,6$ м. Подібні сценарії притаманні й іншим вулканам.

Механізм утворення вулканів. Оскільки розміри Іо недостатні для того, щоб, наприклад, радіоактивний розпад окремих елементів в його надрах зміг викликати настільки сильний розігрів мантії чи кори (як в надрах Землі), то припустили, що розігрів зумовлено гравітаційною взаємодією в системі Юпітера, завдяки якій протягом одного оберту навколо Юпітера (тобто, кожні 1,7 доби) Іо міняє своє положення на середній орбіті приблизно на ± 10 км. Розрахунки показують, що при синхронному обертанні навіть з ексцентриситетом орбіти 0,004, на Іо має з'явитися помітний припливний виступ в бік до Юпітера, а в його русі по орбіті – різкі коливання (лібрація, похитування), які зумовлюють помітне прогинання супутникової літосфери та призводить до нагрівання останньої (переважно приповерхневих шарів). Енергія від такого механізму може сягати 60-80 трильйонів ват, що й було підтверджено спостереженнями.

Вимірювання Іо в інфрачервоному спектрі показали, що потужність теплового випромінювання внаслідок припливних збурень досягає 2 Вт/м^2 , що у 30 раз більше кількості тепла, котре виділяється з поверхні Землі. Вважають, що понад 99% площі поверхні Іо має $T \approx 126 \text{ К}$, яка формується сонячним випромінюванням; решта – зайнята достатньо гарячими плямами з температурою від 300 до 600 К. Є ознаки того, що тривалість існування вулканічної кальдери тим більша, чим з глибших резервуарів надходить виверження (рис. 8.3, 8.4). При виверженнях гейзерного характеру відбувається швидкий фазовий перехід летких речовин з рідини в газ. На Іо для сірчистого газу перехід має відбуватися при $T \approx 400 \text{ К}$, для сірки при $T \approx 700 \text{ К}$. Тому малі султани відповідають викидам з невеликої глибини, великі султани – з глибших резервуарів.

За таких умов у літосфері може існувати багато ізольованих «лінз» рідкої сірки на малій глибині. У силікатну кору супутника цілком можливе вторгнення глибинної магми, яка взаємодіє із рідкою сіркою, перемішується з нею та формує «лінзи» магми під поверхнею. При $T = 432 \text{ К}$ в'язкість сірки досягає мінімуму при тиску $0,006 \text{ Па}$, і сірка є дуже мобільною рідиною в корі Іо.

При нижчій температурі ($T=130\text{ K}$) SO_2 стає малов'язкою рідиною. Саме такими складовими й управляється вторгнення силікатів. Якби літосфера була збідненою сірчаними з'єднаннями на глибині кількох кілометрів, а середня густина кори наближалася до твердого базальту ($>2,8\text{ г/см}^3$), то тиск там був би достатнім для того, щоб базальтова розплавлена лава піднімалася і зі значно більших глибин.

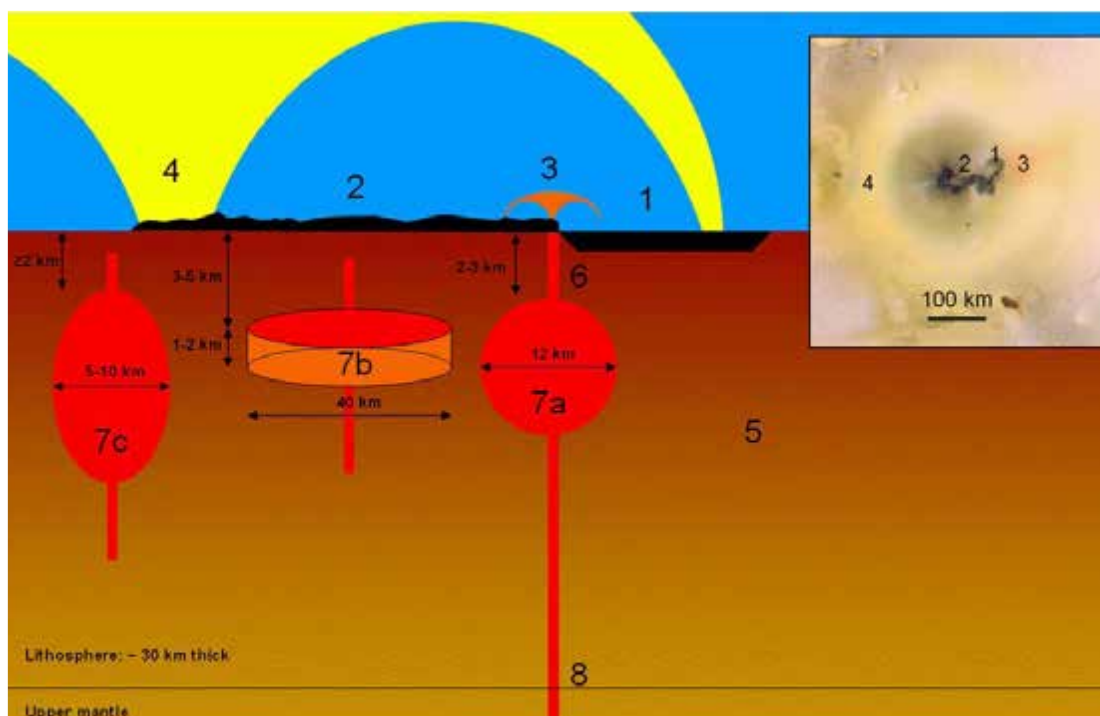


Рис. 8.4. Вулкан Прометей (на вкладці справа) і схема лави під ним. 1 – кратер Прометея, розміром 20 км. 2 – поверхня вкрита потоками лави, що витікала в 1979-1996 рр. і вкрила до 7000 км². 3 – свіжий, багатий сіркою, плюмаж ендегенного походження. 4 – залишок застарілого плюмажу. 5 – силікатна верхня кора Іо. 6 – тріщина, через яку магма поступає до поверхні із швидкістю $\approx 50\text{ м}^3/\text{с}$ через тріщину діаметром понад 3 м. 7а–7с – можливі конфігурації областей зберігання магми [720].

Дослідження вулканів на Іо вказує що тривалість існування вулканічної кальдери тим більша, чим з глибших резервуарів відбувається виверження.

Вулкани, що мають температуру 350-400 K і швидкість вивержень газових продуктів близько 500 м/с назвали вулканами першого типу; висоти їх газових султанів досягають 100 км. Вони вивергаються із неглибоких резервуарів і їх переважна більшість.

Вулкани, що мають вищі температури у кратерах, швидкість виверження газу ≈ 1000 м/с і висоту султанів до 300 км – віднесли до другого типу. Головною відмінністю другого типу є темна кільцева окантовка на відстанях у декілька сотень кілометрів від кальдер. До них відноситься вулкан Пеле та знайдені дещо пізніше Атен та Сурт. Газоконденсатне кільце навколо Пеле має характерну форму підкови. У центрах виверження розташовано кілька обширних плоскогір'їв із обривистими краями та широкою долиною, яка їх розділяє. Їх поверхня має темні відтінки оранжевого та коричневого кольорів. А самі плоскогір'я виділяються світлішими кольорами.

За допомогою інфрачервоного спектрометра КА „Галілео” проводилися спостереження вулкану Прометей на Іо протягом 1996 – 2002 рр. Прометей часом показував значне збільшення теплової емісії і це вказує на епізодичну (хоча й не періодичну) вулканічну діяльність. Об'єм матеріалу викинутого протягом одного епізоду (який визначається як інтервал від мінімальної теплової емісії, наступне виверження і знову ослаблення емісії назад до мінімуму) виверження Прометея з 6.11.1996 до 7.05.1997 оцінено в 0.8 км^3 , з миттєвою нормою виверження в піку $\sim 140 \text{ м}^3/\text{с}$, і середньою нормою виверження близько $49 \text{ м}^3/\text{с}$. Саме ці величини були використані для моделювання підповерхневої структури, умов формування магми і вірогідної глибини її залягання [189].

Розрахунки показали, що Прометей забезпечується магмою від відносно невеликої „лінзи” магми, верхня частина якої знаходиться на глибині 2-3 км, а нижня – на глибині до 14 км. Оскільки діяльність вулканів типу Прометея широко поширена на Іо, то такі дрібні „лінзи” магми базальтового, або майже базальтового складу і густини, можливо, є звичайними.

Отримані недавні оцінки об'ємів виверження вулкана Прометей за допомогою апаратури КА „Галілео” виявилися меншими, ніж при роботі КА „Вояджер” (рис. 8.5).

Прометей – один з найзнаменитіших вулканів супутника Іо. Він вивергається вже протягом кількох десятиліть. Прометей розміщується в точці з координатами 154. W, 1. S, на зворотній від Юпітера півкулі (рис. 8.2). Повне активне поле лавових потоків від Прометея покриває площу понад 7530 км^2 [182]. Польоти «Вояджерів» в 1979 р. і «Galileo» в 1996 р. показують близькі картини [437]. Температури активних полів з найвищою температурою до 1400 К [182, 186] є ознакою силікатного вулканізму [407].

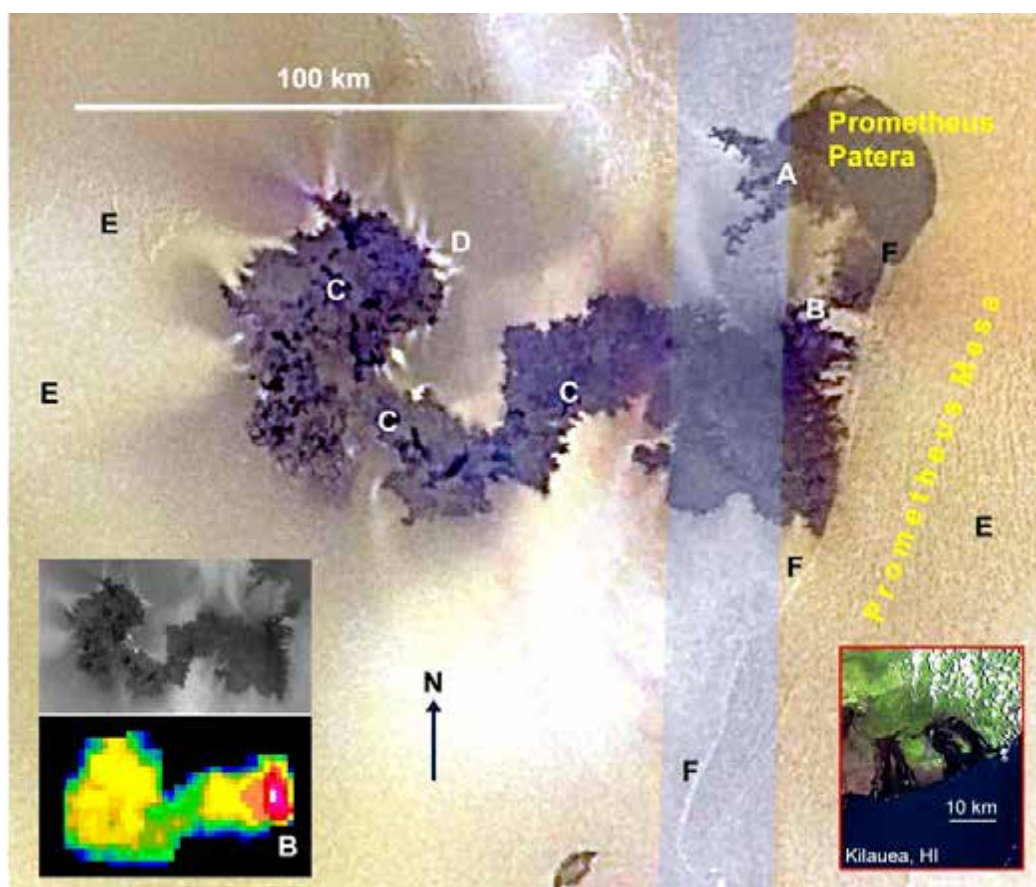


Рис. 8.5. Поле потоків в Прометей було визначене порівнянням результатів спостережень «Вояджера» і КА «Галілео» у 1979 та 1996 рр. „Молодші” потоки в точці А покривають більший потік (площею $>6360 \text{ км}^2$; активного поля С. Темні області в межах цих потокових полів активні, або були недавно активними, як видно із порівняння їх місцеположення між жовтнем 1999 і лютим 2000 рр. Холодніша поверхня супутника допомагає швидкій конденсації вулканічних викидів. Плюмажі в області D із SO_2 розташовуються між центральними несилікатними областями і частинами поверхні багатими льодом, позначені літерою Е. Вкладка з лівого боку показує теплову емісію в 5 мкм. Як бачимо, найінтенсивніша теплова емісія йде від східного краю потокового поля В. Здається що жерло вулкану локалізовано уздовж тріщини (F–F) [189].

Плюмажі Прометея формуються над активним фронтом лавових потоків [431]. У роботі [362] запропонували відносно просту модель того, як потужний потік лави розтопить і випарує великий об'єм кори, багатий SO_2 , для того, щоб потім вибухнути у вулкані. Спочатку вважалося, що весь SO_2 на західному кінці поля потоку Прометея, вивергається через єдиний 10–20 метрового діаметра отвір. Проте

зображення витоків лави навколо Прометея, отримане з високою просторовою роздільною здатністю ясно показують яскраві матеріали, що прориваються через декількох отворів уздовж фронту потоку. Тобто детальна експертиза зображень свідчить, що плюмажі мають кілька розкиданих по поверхні витоків [451]. Саме для перевірки моделі щодо відсутності єдиного центрального отвору під плюмажами над вулканом Прометей були проведені спеціальні спостереження і моделювання мафічних лав, що рухаються по збагаченій SO_2 поверхні Іо [451].

Попередні аналізи інфрачервоних спостережень Прометея показали, що в дослідженій області при температурі на поверхні 1263 К ділянка займала площу лише $0,052 \text{ км}^2$ і значно більшу область – 50.9 км^2 – з температурою 437 К. Такий розподіл температури інтерпретувався як великий активний потік лави з холодними компонентами поверхні та з гарячою яскравою лавою, що виходить через тріщини при близьких до рідини температурах (гарячий компонент) і розтікається в різні боки. Саме таку передісторію пояснюють багато які області поверхні Іо, що відповідають давно застиглій лаві при температурі близько 95 К [627].

Можна відмітити, що в [182] обчислено певні характеристики лави, пропонуючи їй ультрамафічний склад. Температура такої лави була досить високою ($\sim 1900 \text{ К}$). Але при такому її складі не потрібна більше присутність ніяких інших екзотичних речовин у магмі, щоб пояснити інфрачервоні спостереження з КА „Галілео” [356]. За певних умов лава могла б бути ще й чисто мафічною, або базальтового складу [182, 357].

Знаючи з прямих спостережень місцезрештування лави і миттєву об'ємну норму виверження, а також спостереження інфрачервоної теплової емісії з КА „Галілео” було прокалібровано бортову апаратуру. Тому надалі інфрачервоні спектральні спостереження Іо дозволили отримувати важливу інформацію про масштаби виверження і середню кількість виверженої лави.

Так було оцінено, що при потужності виверження лави рівній $21 \text{ м}^3/\text{с}$ новоутворені лавові потоки з Прометея мають товщину лише близько 0.6 м (182). Така відносно тонка товщина потоків приводить до того, що вони тверднуть швидко – менше ніж 4 доби при умовах на поверхні Іо; а при товщині лавових потоків близько 1 м температура їх поверхні знижується до 220 К приблизно за 70 днів [187].

При повторних виверженнях вулканів і середній товщині кожного лавового потоку близько 1 м – за декілька років на одному й тому ж місці утвориться своєрідний багатошаровий „бутерброд”,

товщиною в десяток метрів [187, 338] і загальний об'єм таких вивержень складе близько 70 км^3 [338, 362]. Якщо ж товщина „бутерброда” складає 30 м – то об'єм вивержень складе близько 200 км^3 . Ретельні дослідження активності вулкана Прометей показали, що його вулканічна діяльності епізодична, але не періодична [566]

Повний об'єм матеріалу, що досягає поверхні при кожному виверженні, накладає обмеження на механізм її накопичення, підняття і виверження Прометея.

Кора на Іо представляє собою складну суміш сірчистих компонентів і силікатних уламків. Очікується, що така суміш приводить до відносно низької середньої густини кори близько до поверхні. Тому тепловий градієнт кори Іо майже до літосфери по суті нульовий. Наявність такого екстремального температурного градієнта приводить до того, що сірка є твердою в більшій частині літосфери, аж до глибини в 25 км, хоча SO_2 рідкий всюди в більшій частині літосфери [354]. Розрахунки показують [514], що розподіл температури і структура літосфери Іо, можливо, дуже складні. Проте при таких умовах в літосфері може існувати багато „лінз” рідкої сірки на незначних глибинах.

В результаті теплового обміну в силікатну кору можливе вторгнення колонок магми, які взаємодіючи з рідкою сіркою перемішуються з нею і згодом формують підповерхневі „лінзи” магми. При температурі 432 К в'язкість сірки досягає мінімуму при тиску 0.006 паскалів і тому сірка – являється дуже мобільною рідиною в корі Іо. При набагато нижчій температурі ($>130 \text{ К}$) вже SO_2 стає малов'язкою рідиною. Саме ці складові й управляють вторгненнями силікатів. Якщо літосфера бідна сірчаними з'єднаннями на глибинах декількох кілометрів і середня густина кори наближається до твердого базальту ($>2800 \text{ кг/м}^3$), то тиск там був би цілком достатнім для того, щоб базальтові розплавлені лави підіймалися б сюди з більших глибин.

Порівняння наведених вище оцінок і спостережних даних з КА „Галілео” показують, що є цілком можливим те, що магма для виверження вулкана Прометей поставляється від глибокого джерела і транспортується ближче до поверхні до „лінзи”, де певний час може зберігатися; спочатку перед виверженням, ще деякий час може відбуватися дегазація – вихід газів, а вже потім вона проривається на поверхню і приводить до виходу потоку лави, а при тепловій взаємодії з твердими тілами і рідинами – до їх випаровування [182, 183, 185, 356].

Схоже, що такого типу виверження, які спостерігаються в Прометея, також існують і в інших вулканах на Іо [186, 357]. Тому можна зробити висновок про те, що для переважної більшості вулканів на Іо звичайними є відносно дрібні „лінзи” магми (рис. 8.4). Так вулкани *Zamama*, *Culann* і *Turan* також показують епізодичну діяльність. Чіткий пік в тепловій емісії вулкана *Zamama* співпав з виявленням плюмажу такої ж форми, як і в Прометея. Схожа картина спостерігається і для вулкана *Amirani* [357].

Поверхня Іо. Склад продуктів вивержень (сірка, сірчистий газ і деякі сульфіді) присутній і у вулканічних виверженнях на Землі, але до основних складових даних вивержень – вони не відносяться. Щоб судити про реальну потужність вулканізму на Іо, важливо знати, як багато речовини викидається у виверженнях. Для цього цілком можна скористатися відомостями про вік поверхні.

Для оцінки віку поверхні небесних тіл широко використовується метод підрахунку кількості метеоритних кратерів, що знаходиться на одиниці поверхні. Метод дає оцінку віку, якщо, звичайно, відома середня густина метеоритного бомбардування. По відсутності метеоритних кратерів на поверхні Іо було встановлено факт, що дана поверхня є дуже молода, менше 1 млн років.

Через низьку температуру конденсації такі складові, як сірка і сірчистий ангідрид зберігаються дуже довго. Тому поверхня складається переважно з продуктів вулканічних вивержень і це є конденсати сірки, сірчаного ангідриду, силікатної магми та інших елементів [28, 30-32, 68, 74, 76, 104, 107, 108, 110, 111, 176, 177]. Товщина шару цих відкладень оцінюється в різних місцях від 3 до 30 км. Загальна площа вулканічних кратерів на Іо складає приблизно 2% від загальної площі.

Незвичайний вигляд має вулканічний об'єкт, із назвою **Патера Ра** (рис. 8.6). Від нього радіально відходять змієподібні потоки, що тягнуться на відстані до 300 км, змінюючи свої відтінки від коричневого до світло-оранжевого і навіть сніжно-білого тонів. Природа вулканічних потоків залишається незрозумілою, як і ще загадковіші об'єкти – лавові «озера». На їх прикладі можна також дізнатися про час життя таких крупних вивержень. Найсильніший сигнал був зареєстрований тепловими радіометрами «Вояджерів» від не цілком зрозумілого об'єкту, котрий було названо **Локі** [199-202,, 204-207, 209, 211, 221, 222, 224-229, 235]. На телевізійних знімках з високою просторовою роздільної здатністю він представляє собою злегка зрізане кільцеве утворення темного відтінку. В його центрі

розміщений яскраво-жовтий об'єкт неправильної форми з розмірами приблизно в половину всього утворення, яке саме має розмір 250 км. Очевидно, темним об'єктом є озеро з розплавленої сірки, в центрі якого плаває 100-кілометровий «айсберг» із затверділої сірки (Рис. 8.7). Навколо нього на темному фоні видно дрібніші уламки – менші «айсберги» – з того ж світлого матеріалу.

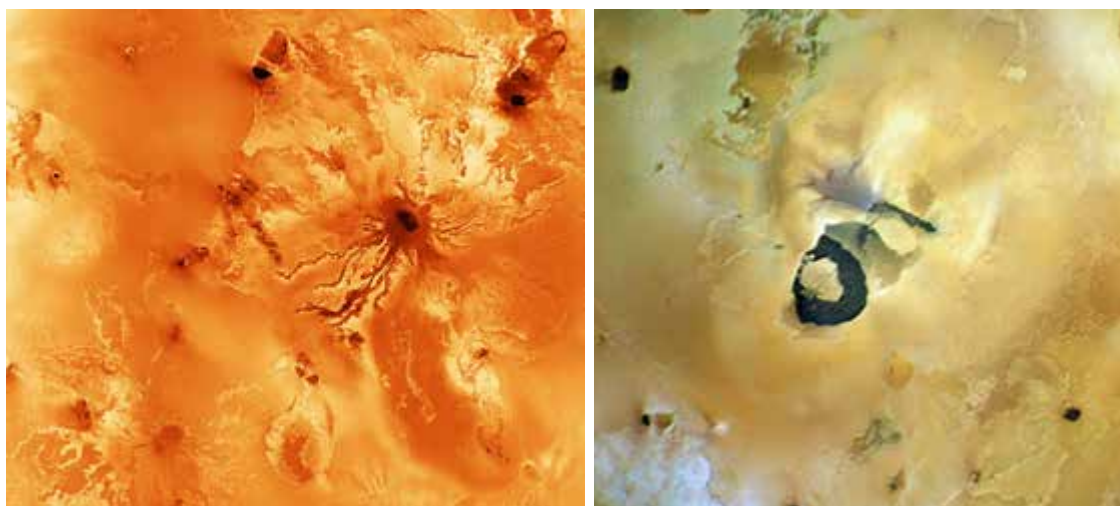


Рис. 8.6. Великий вулкан Ra Patera показує як мінімум десяток темних русел, що витікають із центрального темного отвору. Деякі з цих потоків мають довжину 300 км. (<http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/images>).

Рис. 8.7. Патера Локі. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Приблизно за 300 км на північ від центра Локі проходить розлом (тріщина), завдовжки близько 200 км з таким же темним дном, і який також має в центрі такого ж вигляду «айсберг». З обох боків цієї тріщини в небо над Іо на висоту 250 км б'ють два могутні білі газові султани, які добре розрізняються на фоні світло-сірої поверхні супутника [239, 254, 261, 268, 273, 281, 284, 285]. Вимірювання показують, що рідкий темний матеріал кальдери Локі не такий вже й темний і він світліший за поверхню Місяця.

Тепловий потік. Район Локі давав основний тепловий потік при прольоті і «Вояджера-1», і «Вояджера-2» в 1979 р. Але незабаром й наземні телескопічні спостереження також дозволили зареєструвати могутній тепловий потік [292-294, 303, 307, 313, 318-321, 325, 338-341, 360, 367, 370-372, 410], який з'являвся тоді, коли Іо входив у тінь Юпітера. Потім пригадали, що схоже явище спостерігалось і років за 15 до цього. Якби мільйони мегават енергії випромінювалося б всією

поверхнею Іо, то температура супутника зросла б всього на 2 К. Але в даному випадку випромінював, безумовно, лише дуже гарячий район відносно невеликих розмірів. Зіставлення показало також, що джерела випромінювання розподілені по поверхні дуже нерівномірно.

І з'являються вони і зникають при обертанні супутника. А поява таких гарячих плям на Іо при затемненні Юпітером Сонця пояснюється просто тим, що саме в цей час ми бачимо постійно обернену до Юпітера сторону супутника, де й розташований кратер Локі (рис. 8.7).

Подальші наземні дослідження показали, що теплове випромінювання Іо протягом послідовних спостережень незмінно різко зростає, як тільки стає видимим меридіан $300\text{--}306^\circ$ зх.д., тобто кратер вулкану Локі. Геометрія цього гігантського утворення і температура на поверхні такі, що його доповнення до випромінювання Іо складає половину.

Недавні наземні спостереження за допомогою нового метода – теплової поляриметрії – показали, що випромінювання виходить від плоскої ділянки поверхні з координатами 13° пн.ш. і 303° зх.д. А це якраз і є координати Локі. Тобто цілком можна отримати висновок, що інтенсивне виділення тепла в даному місці на Іо триває вже понад 45 років (!). У зв'язку з цим надзвичайно цікавим є те, а скільки ж ще років може безперервно відбуватися це виверження?

Різні відтінки кольорів поверхні Іо вказують на те, що окрім сірки і сконденсованого сірчистого газу, там можуть бути й інші складові. Крім того, колір відкладень сірки також залежить від температури і може бути білим, коричневим, червоним, жовтим і навіть чорним. Широкий набір кольорів можуть надавати ще й так звані полісульфіди.

Поверхня Іо покрита вулканічними викидами, які містять звичайні силікатні відкладення, разом з різними добавками сірки, які й надають їм різного кольору. У яскравіших областях поверхня може бути покритою замороженим діоксидом сірки. Темні області – регіони теперішньої, або недавньої вулканічної діяльності.

Однією з загадок Іо являється те, що у вулканічних виверженнях на Іо зовсім відсутня вода, чи іній, чи сніг [376, 380, 391, 392, 397, 402, 408, 426-428, 431-437]. Хоча, наприклад, на Землі водяна пара – основна складова всіх вулканічних вивержень. Зараз води на Іо, мабуть, немає зовсім. Але чи завжди даний супутник був без води, чи те, що його запаси води вже вичерпалися при виверженнях? Це питання ще чекає своєї відповіді, особливо якщо врахувати факт, що

Ганімед і Каллісто на 50—60% складаються з водяного льоду і, можливо, рідкої водяної мантії.

Рельєф Іо в основному рівнинний. Окрім гір в центрі комплексу Пеле (рис. 8.8), є ще декілька крупних масивів. Наприклад на поверхні Іо є також кам'яні масиви заввишки до 9 км.



Рис. 8.8. Біля центру – вулканічне виверження вулкану Пеле у 1979 р. з відстані 377 тис. км. Червонуваті, білі і чорні області складаються із суміші солей, сірки та інших викидів вулканічного походження. Чорні плями пов'язують з кратерами можливого вулканічного походження (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

На поверхні **Іо** [439-443, 446-449, 464, 469, 472, 474, 475, 532, 794] практично відсутні кратери ударного походження (рис. 8.9, 8.10). Це вказує на її молодість (до 1 млн. років). Вулканічними кратерами зайнято майже 2% від загальної площі супутникової поверхні (рис. 8.11). Причому, їх вигляд істотно різниться. Наприклад, вулкан Ра Патера виділяється змієподібними потоками, які радіально відходять від нього на відстані у 300 км; вони змінюють свої відтінки від коричневого до світло-оранжевого, чи навіть до сніжно-білого тону; проте їх природа до сьогодні мало зрозуміла. А у темному жерлі кратера вулкану Локі розташовується дуже світла пляма, тоді як його довкілля є досить однорідним.

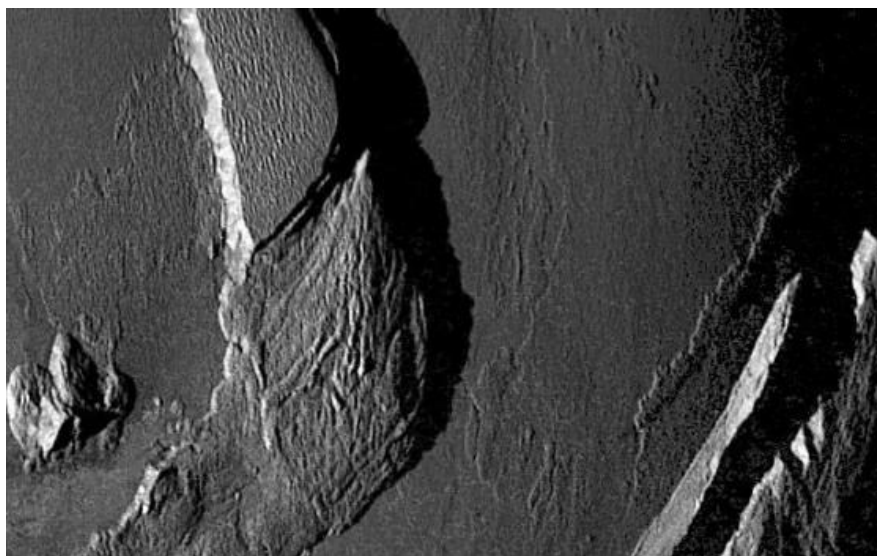


Рис. 8.9. Фрагмент поверхні Іо. Висота гори зліва ≈ 4 км, а гострих вершин в лівому нижньому куті – 1,6 км (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

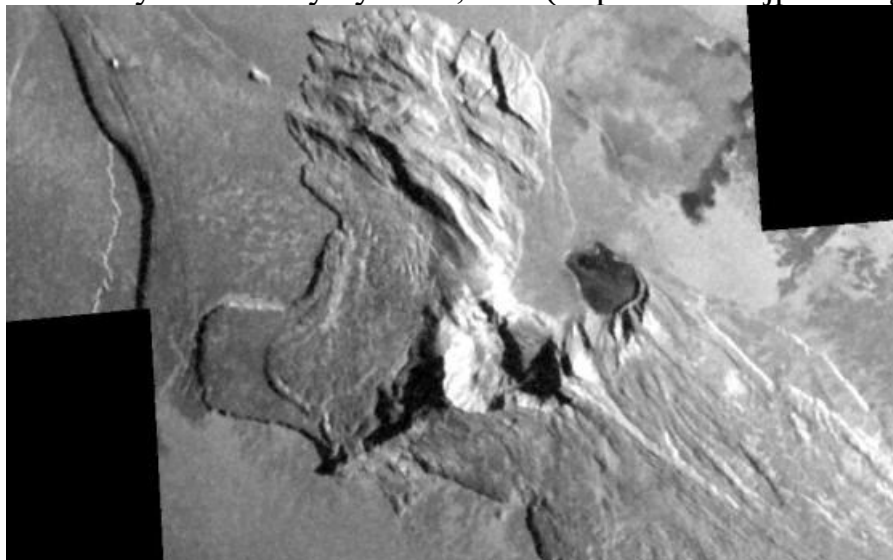


Рис. 8.10. Гора Тохіл на Іо висотою $\approx 5,4$ км із структурою, що нагадує жерло вулкана (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

На в основному рівнинному поверхневому шарі виявлено декілька гірських масивів (рис. 8.10, 8.12), з висотою аж до 9 км, та ям і куполів з розмірами від кількох десятків до декількох сотень метрів. Їх природу зрозуміти досить складно. Так, згідно з однією із версій, вони могли утворитися при взаємодії дуже розжареної лави із поверхнею Іо. Таке має місце й на Землі, коли потік лави наштовхується на водну, або ж крижану перешкоду далеко від джерела виверження. Як видно з рис. 8.12, гори піддаються процесам руйнування, про що свідчать скупчення біля підніжжя величезної кількості уламків скель і породи від обвалів.

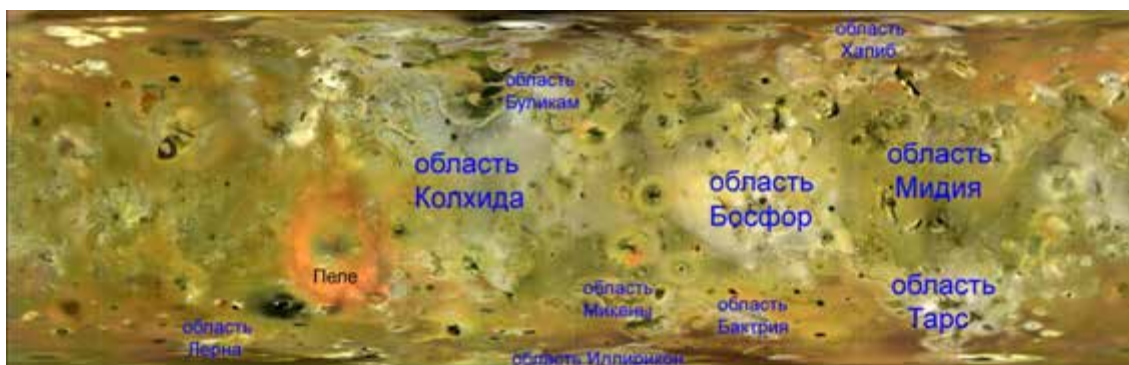


Рис. 8.11. Кольорова карта Іо (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

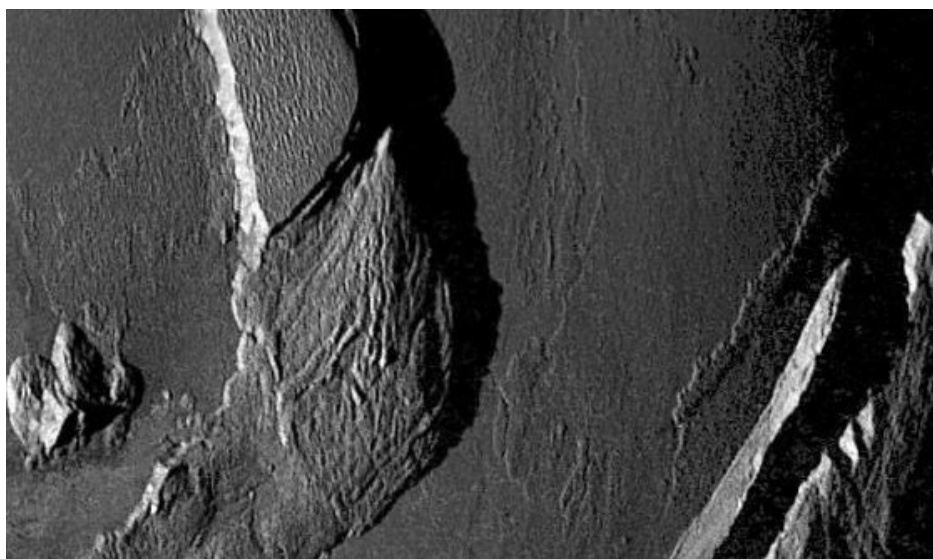


Рис. 8.12. Зображення поверхні Іо з КА «Галілео», 25.11.1999. Гори посередині мають висоту ≈ 4 км; гострі вершини в лівому нижньому куті $\approx 1,6$ км (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Наприклад помітні досить високі гори біля південного полюса (Рис. 8.13), які займають площадку близько 150×80 км. Цікавий об'єкт виявлено, також, на телевізійних знімках: це гора конічної форми заввишки до 2,5 км з діаметром біля основи близько 85 км, яку фахівці відносять до щитових вулканів і які характеризуються зовсім іншим типом вивержень (відомо, наприклад, що такі вулкани на Землі відрізняється дуже текучими лавами).

Дослідження одного з вулканів, проведене бортовою камерою Галілео і її інфрачервоним спектрометром дозволило визначити температуру лави, яка складала близько 1900 К. Це на сотні градусів гарячіше, ніж при земних виверженнях. А ще отримали, що ці потоки досить швидко холонуть. Зображене посередині на рис. 8.14 виверження вулкану Піллан має висоту близько 140 км. Саме жерло

вулкану знаходиться прямо в центрі яскравих і темних кілець. Тінь від 75 кілометрового стовпа на нижній вставці лягає вправо від виверження. Галілео пролітав прямо над цією областю в 1999 р. на висоті близько 600 км. Друге виверження з вулкана Прометей видно біля термінатора.

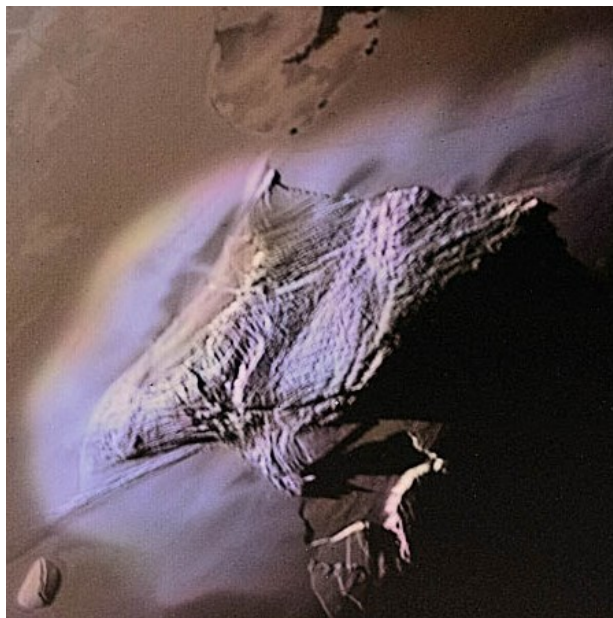


Рис. 8.13. Гора Prometheus, розміщена біля південного полюса. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Виверження на Іо мають синій відтінок, тому тіні, що відкидаються ними – червонуваті.

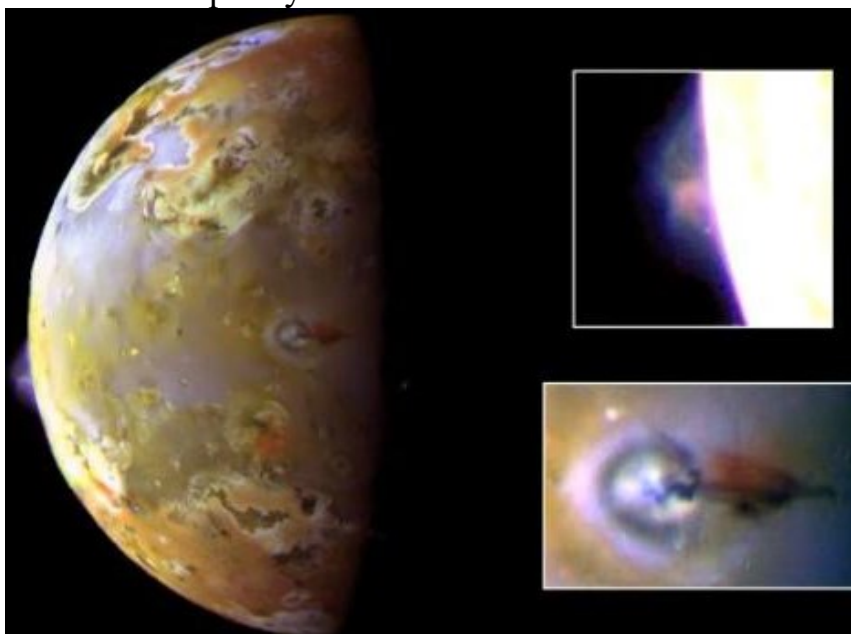


Рис. 8.14. Кольорове зображення з КА «Галілео» демонструє два вулканічні виверження на Іо (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Виверження Прометея було видне ще на знімках «Вояджера» 1979 р., що означає, що його вік не менше 18 років. В той же час, вулкан Піллан не був раніше зафіксований. Знімок отримано 28 червня 1997 р. з відстані 600000 км.

Лавовий потік Амірані на Іо є безліччю окремих потоків. Наймолодші видно (зліва на Рис. 8.15) як яскраві плями на інфрачервоному знімку інфрачервоної камери Галілео. Білі, червоні і жовті кольори на інфрачервоному знімку показують гарячі області, а сині – холодні. Амірані – це найактивніший лавовий потік, який відомий на даний момент у Сонячній Системі. На інфрачервоному знімку видні дві дуже яскраві плями та поруч інші – менш яскраві.

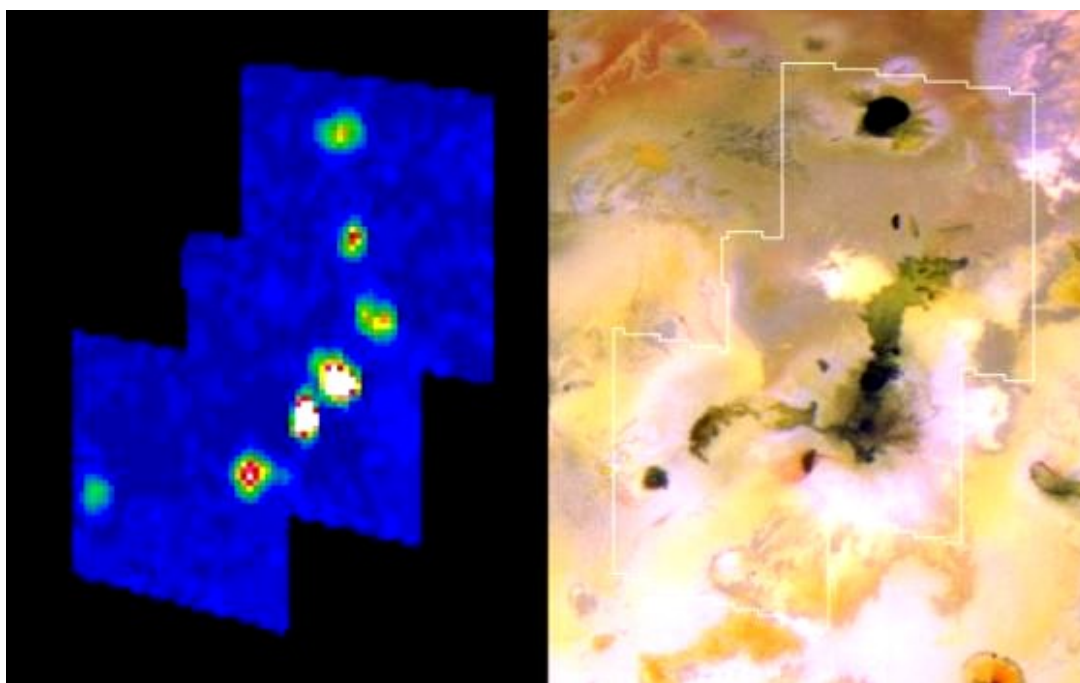


Рис. 8.15. Інфрачервоне (ліворуч) і видиме (праворуч) зображення лавового потоку Амірані отримане 6.08.2001 (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

На зображенні також видно три активні вулкани: Мауї – темна, майже кругла область внизу зліва, Дуссура – темна, майже кругла область вгорі, і поки неназвана видовжена структура, що знаходиться між Амірані і Дуссура. Червоні відкладення – це сліди попередніх вивержень. Решта світлих джерел це сліди лави, яка ще не остигла.

Відмітимо, що темний потік зліва від основного отвору Амірані – вже неактивний, оскільки його не видно на інфрачервоному зображенні. Проте 20 років тому КА „Вояджер” зареєстрував активність саме цього потоку, який взаємодіяв тоді із замерзлими

відкладеннями двоокису сірки. Порівнявши два зображення, отриманих 3.07.1999 і 6.07.2001, було виявлено 23 нових активності в області лавового потоку Амірані, який протягнувся на майже 300 км. Загалом, потік лави Амірані займає площу майже 620 км².

На Землі востаннє подібний витік лави відбувся близько 15 млн років тому уздовж річки Колумбія. Вважається, що подібні явища утворюються при могутніх вибухових виверженнях. Але Амірані – зараз достатньо спокійний, хоча більше ста тон лави викидається щосекунди.

На деяких зображеннях на Іо видно чіткі канали посередині лавових потоків. Подібні лінії, що згинаються, є досить звичайними для Землі, коли рідка лава тече дуже швидко і зустрічає на своєму шляху міжгір'я чи виступи. Для таких течій незвичайним є їх світлі кольори, оскільки на інших планетах лавові потоки є темними. Саме це дозволило запропонувати гіпотезу не про силікатне, а про сульфатне походження лавових усіх виливів на Іо.

Наведений на рис. 8.16 знімок вулкана Тупан (Tupan Caldera) на Іо зроблений КА „Галілео” в ІЧ діапазоні спектра, демонструє різноманітні види взаємодії лави з навколишньою, багатою сіркою поверхнею.

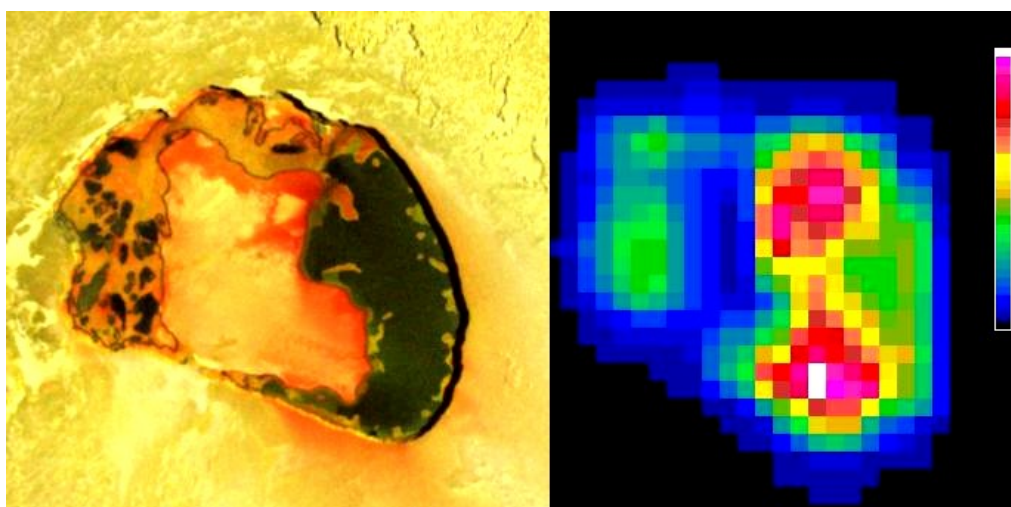


Рис. 8.16. Знімок вулкана Тупан (Tupan Caldera) на Іо зроблено КА Галілео в ІЧ діапазоні спектра. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Насиченість кольорами трохи відрізняється від того, що людина побачить своїми очима. У червоні відтінки додана інтенсивність інфрачервоного теплового випромінювання. Це зображення, отримане в жовтні 2001 р. Тупан представляє собою вулканічну структуру розміром близько 75 км і висотою схилів до 900 м. Більшість поверхні покрита червоними відкладеннями, які можна віднести до

сконденсованих сірчаних похідних, викинутих при виверженні з жерла вулкана. Лівий фрагмент на рис. 8.17 отримано у квітні 1997 р., правий – в липні 1999 р. з відстані 505600 км. Порівняння показує зміни, які відбулися після подій дворічної давності у вересні 1997 р. Відкладення розміром близько 400 км в діаметрі від виверження Піллана помітні трохи вище і правіше від центра; вони оточують Піллан і покривають частину видимого яскраво-червоного кільця, яке з'явилося до цього при виверженні Пеле.

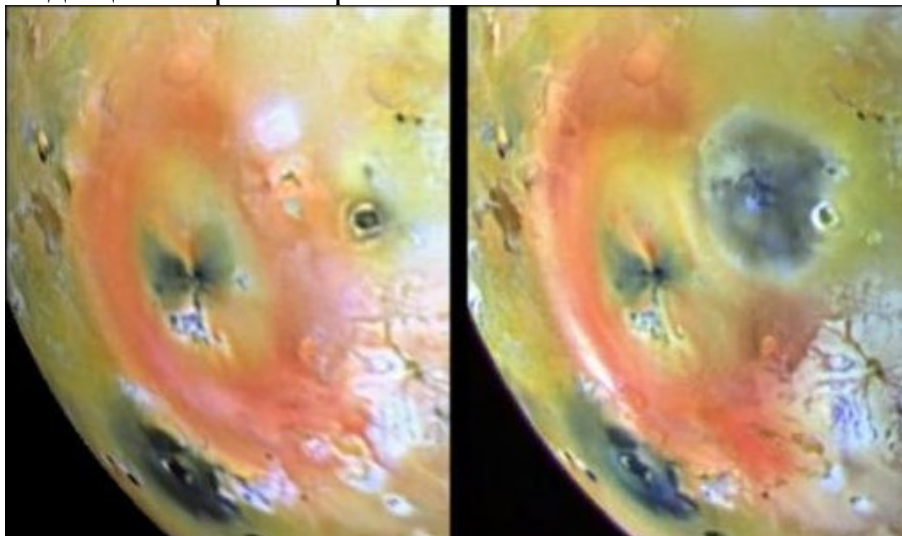


Рис. 8.17. На фото показані зміни, що відбулися у вулканічній активності вулкана Піллан (Pillan Patera) за три роки. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Червоний матеріал від викидів Пеле, що містить в собі відкладення сірки, знову почав накривати темний матеріал навколо Піллана. Це може говорити про те, що в обох вулканах до цих пір продовжується активна діяльність. До того ж, праворуч від Піллана з'явився ще один неназваний вулкан, відкладення від викиду з якого можна відмітити по світлому покриттю темного матеріалу сусіда. Деякі відмінності в кольорі з'явилися через різні умови освітлення поверхні при зйомці. Відмінності в яскравості червоного кільця Пеле і темного відкладення Баббар також є наслідком зміни освітлення. Але подібні зміни не можуть пояснити відмінності у структурі Піллана. Центр зображень знаходиться на 19° пд.ш. і 250° зх.д. і покриває територію 1650×1750 км.

Вулкан Прометей (яскраве кільце вгорі на рис. 8.18) був першим активним вулканом, виявленим КА „Вояджер” і, як видно на знімках, він все ще вивергався на протязі тривалого часу. Невелике виверження вдалося знайти біля вулкана Куланн за допомогою КА

„Галілео”. Його можна відмітити у вигляді темної структури внизу зліва на рис. 8.18, праворуч. У Прометея залишилися все ті ж характеристики у формі, розмірі і яскравості. Проте, все ж можливо, що там появився новий потік лави з жерла Прометея досить темного відтінку. До того ж, саме виверження зараз знаходиться за 75 км на захід від того місця, яке зафіксував у свій час КА „Вояджер”. Поки до кінця ще не відомо, чи це є новим джерелом для того виверження, чи все тим же.

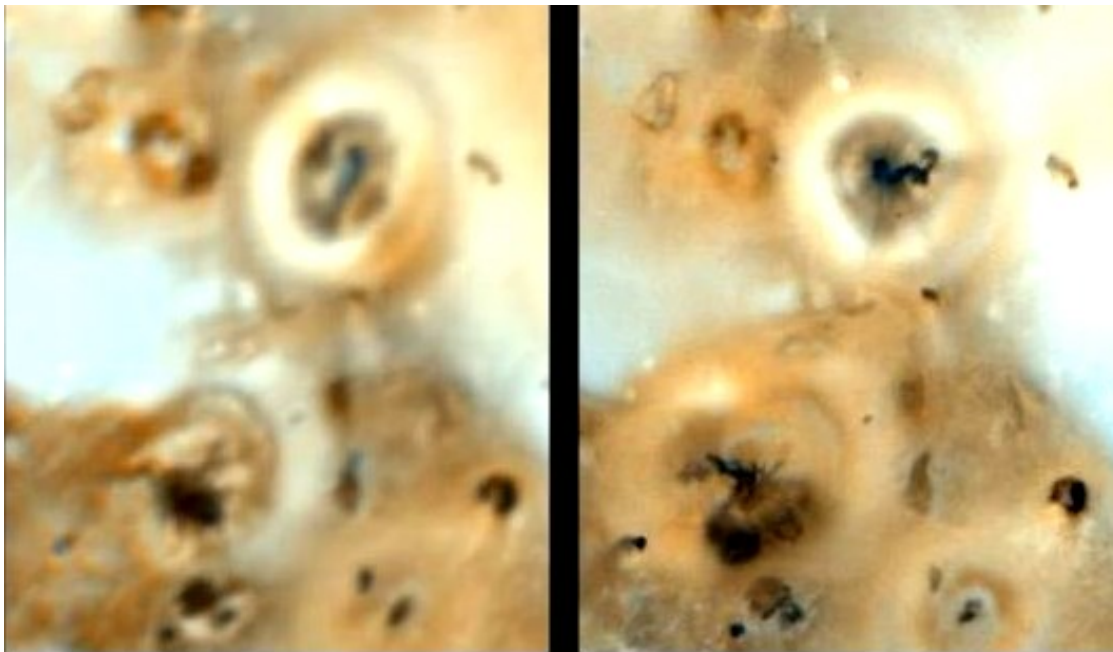


Рис. 8.18. Вулкани Іо можна на знімках «Галілео» (праворуч), і отриманих «Вояджером» у 1979 р. (ліворуч) (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

На знімку на рис. 8.19 видно гарячі точки Іо, у тому числі й нові, які не були зафіксовані раніше. Дані отримані в інфрачервоному спектрі [179, 180, 183, 187, 189-196, 198, 611-615, 617, 619-621, 623, 637, 705-707] камерами Галілео 6.08.2001. Яскрава нова точка, помічена стрілкою, знаходиться в північних широтах супутника. Це високий вулканічний викид – невідомий раніше вулкан [723б 724, 779-783,]. Частинки, які складаються з молекул оксиду сірки і схожих на сніжинки, були спіймані плазмовим інструментом, встановленим на борту станції. Починаючи з двох годин після того, як Галілео пролетів на відстані в 194 км від поверхні Іо, інфрачервоний спектрометр отримав ці дані з освітленого боку супутника. Знімок демонструє яскравість деталей на хвилі в 4.4 мкм, на якій можна реєструвати теплове випромінювання від вивержень.

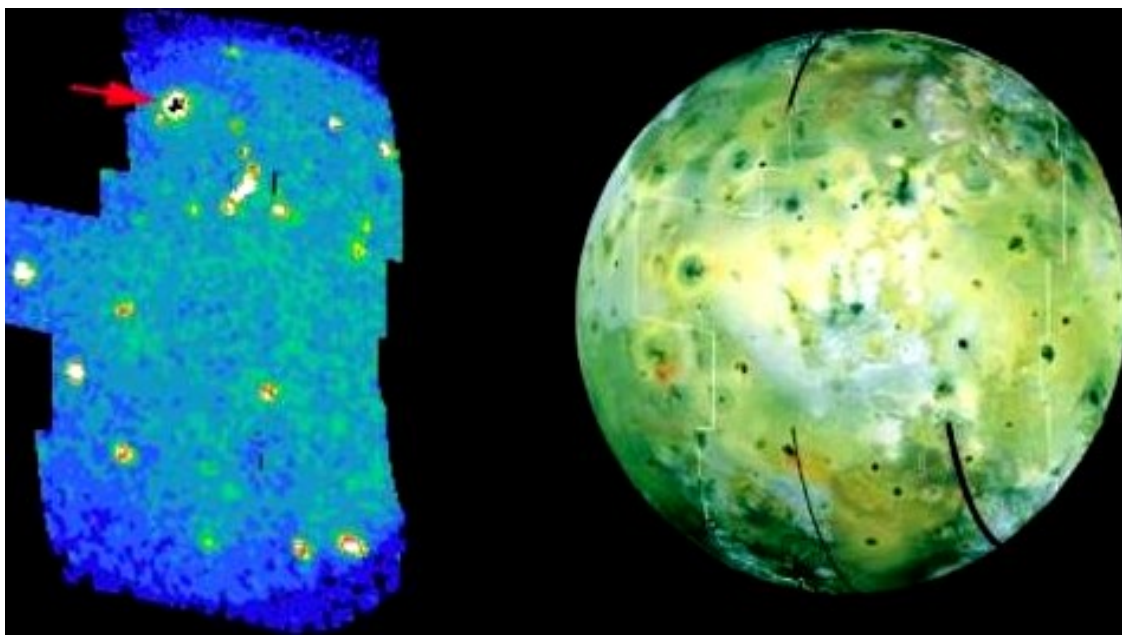


Рис. 8.19. Зіставлення гарячих точок на Іо з конкретними утвореннями на поверхні супутника. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

На ранніх зображеннях Галілео можна бачити ту ж сторону супутника (рис. 8.19, справа), що допомагає співвідносити інфрачервоні дані з конкретними геологічними структурами. Безліч вулканічних гарячих точок виглядають на інфрачервоному знімку жовтим, червоним і білим кольором, залежно від інтенсивності випромінювання. На той момент було зареєстровано 108 гарячих місць на Іо, 10 з яких були відкриті при цьому дослідженні. Більшість з відкритих вулканів дуже слабкі і не видні добре на цій карті, але їх можна знайти по теплових інфрачервоних даних.

Активна вулканічна діяльність на **Іо** приводить до утворення своєрідної атмосфери [690-695] і плазмового тора [40, 42-44, 82, 138, 146, 369, 499, 536, 540, 541, 577, 646, 665, 681, 687, 786, 793, 794]. Саме вулканічна діяльність постачає хімічні елементи на орбіту Іо, до **плазмового тору** (рис. 8.20). Спектроскопічні спостереження Іо ще у 1970-тих рр. увінчалися відкриттям емісійних деталей кількох хімічних елементів [48, 60, 81, 87, 120, 179, 387, 418, 487, 601, 668, 686].

Ще наземні спектральні спостереження показали наявність значної кількості натрію, сірки та кисню на орбіті поблизу Іо. Відкриття там діючих вулканів нібито пролило світло на наявність цих елементів [542-545, 553, 561-566, 584-586, 590, 591, 597, 700, 776] на орбіті Іо.

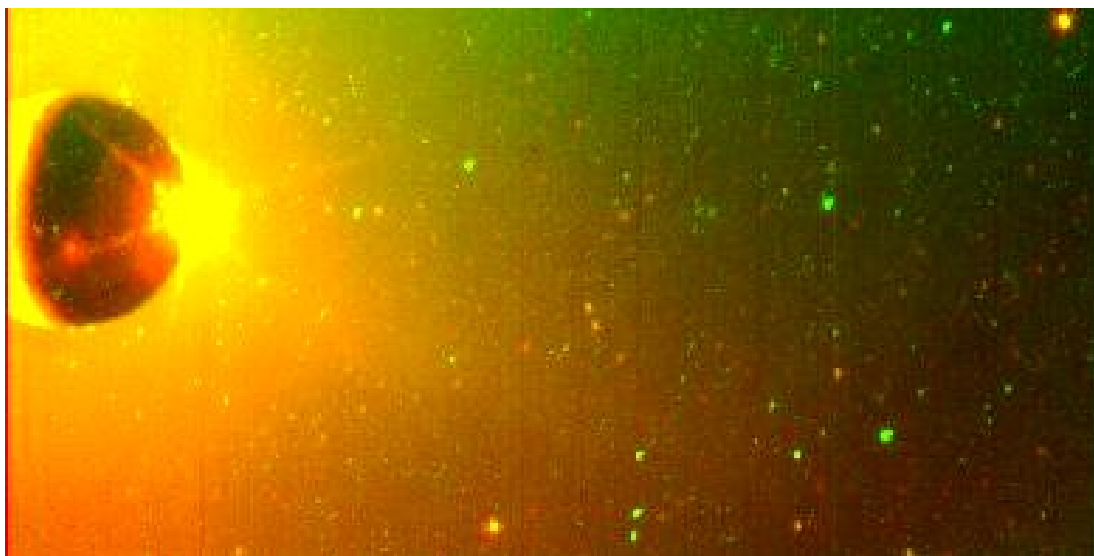


Рис. 8.20. Зображення Іо і його оточення в умовних кольорах з відстані 2.3 млн км (9.11.1996 КА «Галілео»). (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Всередині червоної плями від вулкана Пеле (нижче від центра диску Іо) видно жовту пляму. А яскравий білий спалах біля східного екваторіального краю Іо – це сонячне світло, розсіяне «плюмажем» вулкана Прометей. Червоне світіння на південь від супутника – є розсіяне світло, відбите від освітленої Сонцем півкулі. Значна частина такого випромінювання йде від натрієвої хмари Іо, яка розсіює сонячне світло в жовтій довжині хвилі в 589 нм. З порівняння теоретичного розподілу яскравості з даними спостережень було встановлено, що потужність джерела натрію має становити $2 \cdot 10^{25} \text{ с}^{-1}$. Ці атоми переважно вилітають з внутрішньої півкулі Іо із середньою швидкістю 2.6 км/с.

За даними про профілі спектральних ліній з високою роздільною здатністю було показано, що витік натрію з Іо відбувається в основному в напрямку його переміщення по орбіті. Найкраще узгодження досягається тоді, коли вибиті частинками магнітосфери атоми натрію вилітають з передньої півкулі супутника. У вересні та жовтні 1975 р. на спектрограмах довкілля Юпітера [6], а потім із спостережень у 1976-1979 рр. [15] були виявлені нові емісійні лінії з довжинами хвиль 671.7 та 673.0 нм, що ототожнили з забороненим дуплетом сірки SII. Ці яскраві емісії розташовані поблизу площини магнітного екватора Юпітера в хмарі по орбіті Іо.

Подальші спостереження Іо в 1981 р. зареєстрували лінії сірки SII в довжинах хвиль 671.6, 673.1, 406.9, 407.6 нм і SIII в 372.2 нм [9]. Виявилося, що область світіння SII поблизу Юпітера в цих лініях та в

953.1 нм (SIII), може бути представлено тором з радіусом до 6 і товщиною до 0.3 радіусів Юпітера [13].

За спектральними даними з КА «Вояджер-1, -2» у довжинах хвиль 50-150 нм, на орбіті Іо була відкрита [2] ділянка високотемпературної плазми у формі тора [213, 224, 235, 237, 247, 252, 315, 325, 364, 369] з радіусом до 1 радіуса Юпітера. Дослідження емісійного спектра в далекій УФ ділянці спектру були проведені ще й з борту супутника «IUE» в довжинах хвиль 115-195 нм [1]. Вони вказали на наявність у цій ділянці спектра багатьох емісій іонів сірки різної інтенсивності. У 1999-2003 рр. [8], на довжині хвилі 1.707 мкм було виявлено достатньо потужну емісію, інтенсивність якої досить сильно мінялася від року до року, та яка була ототожнена з молекулою SO.

Для пояснення наявності плазмового тора по орбіті супутника Іо зараз прийнято такий механізм. Період обертання Іо навколо Юпітера рівний 1.7 земної доби (~32 години). Плазмовий тор по орбіті Іо обертається практично твердотільно з швидкістю обертання магнітосфери Юпітера за $9^h 56^m$. При цьому, швидкість плазмового тора відносно поверхні Іо досягає 57 км/с. Це викликає дуже інтенсивне бомбардування поверхні супутника і призводить до того, що з його поверхні за 1 секунду вибивається до 2 тон сірчаного газу. На орбіту сірчаний газ поступає вже у вигляді одно- та двоіонізованих атомів сірки, які утворюють широкий плазмовий тор по орбіті Іо.

Тривале існування такого тора нібито добре пояснило відкриття діючих вулканів на його поверхні. Оранжевий колір деяких ділянок поверхні Іо викликаний відкладеннями сірки і сконденсованого сірчистого газу. Якщо частина продуктів вивержень розсіюється в космосі, то походження газового тора знаходить своє пояснення. Концентрація молекул [10] в атмосфері Іо досягає 10^{17} м^{-3} . Розрахунки показують, що за таких умов викидання газу на висоту у 100-600 км вимагає швидкостей вильоту газу з жерла вулканів [24, 25] понад 1 км/с. Орбіта Іо розташована практично в центрі радіаційного поясу магнітосфери Юпітера, де потоки заряджених частинок є значними. Плазма тут зосереджена в об'ємі, який тісно зв'язаний з магнітним полем планети, що обертається.

При цьому Іо активно взаємодіє і з магнітосферою Юпітера, і з самим тором. Плазмовий тор Іо має концентрацію частинок до 2000 см^{-3} і складається з електронів та переважно з іонів сірки й кисню, які утримуються там завдяки сильному магнітному полю Юпітера. Ця плазма утворюється з матеріалу нейтральної складової, що викидається з Іо [14].

Вимірювання швидкості обертання плазмового тору проводились інструментами багатьох КА. Вони показали, що період обертання плазмового тору на кілька відсотків відрізняється від жорсткого обертання внутрішньої частини магнітосфери Юпітера до відстаней $6 R_{\text{Ю}}$ від центра Юпітера. А в діапазоні $6-10 R_{\text{Ю}}$ відхилення від коротації могло досягати 10% [5]. Протягом кількох проходів КА „Галілео” через тор Іо, було отримано факт, що плазмовий потік відстає від швидкості коротації на 2-10 км/с із відхиленнями 2-3 км/с [4].

Іо грає істотну роль у формуванні магнітосфери Юпітера (рис. 8.21). Адже до 1 тони газу й пилу за секунду викидається із тонкої атмосфери Іо. Цей матеріал переважно складається з іонізованої і атомарної сірки, кисню і хлору; атомарних натрію й калію; молекулярних діоксиду сірки й чистої сірки та пилу з хлориду натрію. Ці компоненти походять від вулканічної діяльності Іо і залежно від їх іонізації і складу опиняються або в нейтральній (не іонізованій) хмарі, або в радіаційному поясі в магнітосфері Юпітера, і в деяких випадках, взагалі викидаються за її межі.

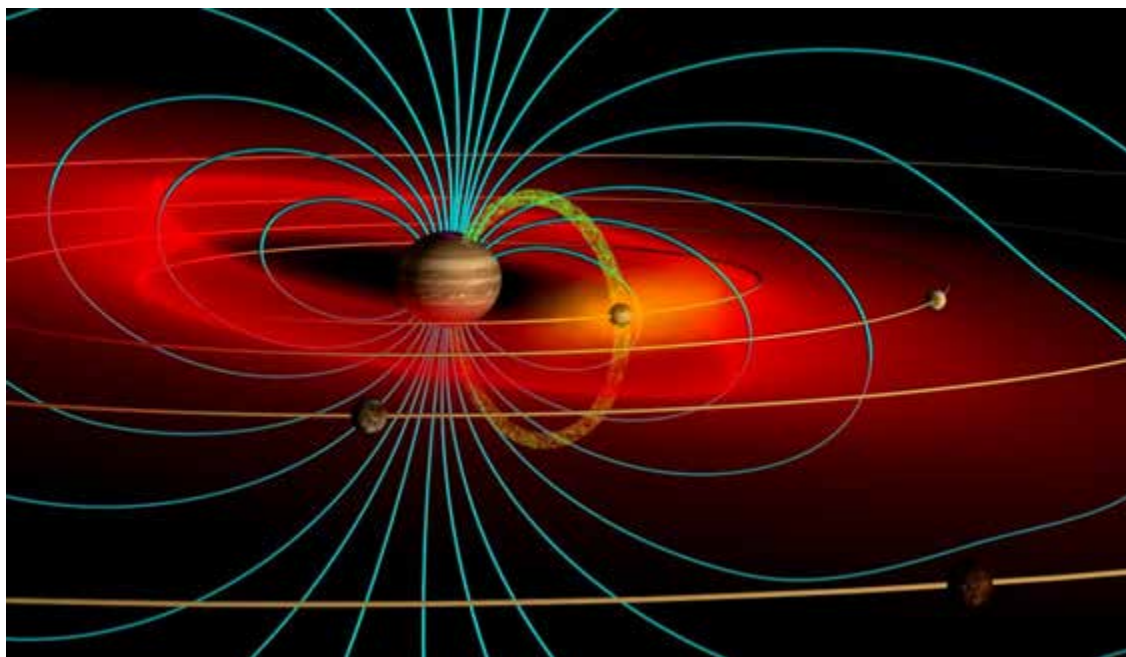


Рис. 8.21. Схема взаємодії магнітосфери і Іо. Плазмовий тор (по орбіті), нейтральна хмара (світла пляма навколо Іо), потоки заряджених частинок (від полюса Юпітера до полюса) течії, і лінії поля (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Структура хмари **натрію** міняється в часі та зв'язана з положенням супутника на орбіті [61, 198, 271, 478, 581, 625, 626, 685, 687, 778, 792,]. Причому інтенсивність фіолетової частини підкладки була найбільшою тоді, коли Іо перетинав площину магнітного екватора Юпітера, зміщення емісійного піку добре корелює з орбітальним фазовим кутом. З аналізу спектроскопічних спостережень за червень-липень 1974 р. допускалася можливість існування світіння молекул **кальцію**, що було підтверджено подальшими дослідженнями [684]. Хмара кальцію має форму півдиску і простягається на відстань до 6 радіусів Юпітера від його центру і має товщину у 2 радіуси Юпітера.

Емісію іонів **калію** відкрили за даними спостережень в 1975-1980 рр. [326, 689]. Хмара калію зі зміною магнітної широти Іо веде себе подібно до натрієвої хмари, але її інтенсивність стає значно меншою коли Іо перетинає магнітний екватор Юпітера. Детальні дослідження показали, що калієва хмара простягається вперед від ведучої сторони супутника та утворює кут $10-30^\circ$ з орбітою Іо, і це дещо менше, ніж для натрієвої хмари. Ця хмара представляє собою тривале утворення, яке через вплив сонячного випромінювання піддається періодичним змінам і в її світінні спостерігаються всі асиметрії притаманні натрієвій хмарі. Така подібність вказує що натрій і калій викидаються з одних і тих же областей поверхні Іо та формуються під дією одного й того ж фізичного механізму.

У вересні та жовтні 1975 р. на спектрограмах довкілля Юпітера [447, 484] було виявлено емісійні лінії, ототожнені з забороненим дуплетом **сірки** SII, SIII, SIV і SO [51, 117, 379, 732,] та які проявлялись у сплюснутій частині хмари, або в так званій тороїдній хмарі за рухом супутника. Емісійним лініям сірки також притаманні такі ж як і натрію просторово-часові зміни, хоча деякі спостережні дані вказують на довготну асиметрію тільки в лініях SII і не помітна в УФ лініях SIII. Це пояснили тим, що іони сірки не підпорядковані періоду обертання магнітного поля Юпітера (так звана система III).

Світіння іонів **кисню** було відкрито за спостереженнями з КА «Вояджер-1» і «Вояджер-2» та ШСЗ «IUE» [461, 462, 510]. Так, емісія була приписана бленді емісійної лінії OIII, яка з'являється в оптично тонкій плазмі; цю ж особливість можна приписати й лініям OII, спостережні інтенсивності яких відповідають моделі електронного газу. Пізніше виявили ще й емісію в лініях OI [79] та емісію іонів кисню OII інтенсивність яких у різні роки була різною (аж до повної відсутності). Спостерігались також сліди емісії, яку пов'язували з супутниками Амальтея [267, 378, 610] і Європа.

На можливу наявність емісій іонів атомарного водню вказують і експерименти з борту ШСЗ «IUE». Не виключені й емісії FeI та MgI. Дослідження закономірності зміни інтенсивності ліній різних хімічних елементів з рухом по орбіті були неоднозначними, і це зумовлено різною протяжністю в часі отриманих рядів спостережень.

Зараз найімовірнішими вважають наступні два механізми утворення плазмового тору.

1. Оскільки період обертання Іо навколо Юпітера (1,7 доби) значно більший періоду обертання магнітосфери Юпітера, то швидкість останньої щодо поверхні Іо сягає 57 км/с; це зумовлює інтенсивне бомбардування його поверхні, внаслідок чого вибивається 1-2 т/с сірчаного газу, який іонізується й утворює широкий плазмовий тор. При цьому залишається відкритою проблема наявності в торі нейтральних елементів.

2. Після відкриття на Іо активного вулканізму висловили думку, що утворення тору зумовлено викинутими на висоту в сотні кілометрів фонтанами газу, які частково розсіюються в космосі і утворюють тор. Інша частина викидів за низької температури конденсується і під дією сили тяжіння ($1,81 \text{ м/с}^2$) випадає на поверхню Іо. Оцінки показують, що швидкість цих процесів значно більша швидкості руйнування молекул газу ультрафіолетовим випромінюванням Сонця (фотодисоціацію).

Орбіта Іо розташована в тій частині магнітосфери Юпітера, де потоки заряджених частинок особливо значні (майже в центрі радіаційного поясу). Оскільки електромагнітні явища в магнітосфері Юпітера дуже інтенсивні, то обертання плазмового тора Іо в ній створює потужний електричний генератор, який між Юпітером та Іо зумовлює протікання електричного струму в $5 \cdot 10^6$ ампер, механізм продукування якого імовірно пов'язаний зі своєрідною структурою струмових оболонок в плазмосфері Юпітера, які були передбачені Х. Альфвеном для протопланетної туманності.

Кора Іо є сумішшю сірчаних компонентів і силікатних уламків і може мати відносно низьке середнє значення густини поруч з її поверхнею, тому її тепловий градієнт буде практично нульовим майже до літосфери. Наявність такого екстремального температурного градієнта приводить до того, що сірка є твердою в більшій частині літосфери аж до глибини в 25 км, тоді як рідкий SO_2 присутній у більшій частині літосфери [64, 438, 482, 487, 627].

Структура поверхневого шару. Практична відсутність помітних метеоритних кратерів (рис. 8.22) вказує на те, що поверхня Іо дуже молода (до 1 млн. років) і складається переважно з продуктів

вулканічних вивержень товщиною в 3-30 км. Цими продуктами є конденсати сірки, сірчаного ангідриду, силікатної магми та інших елементів.

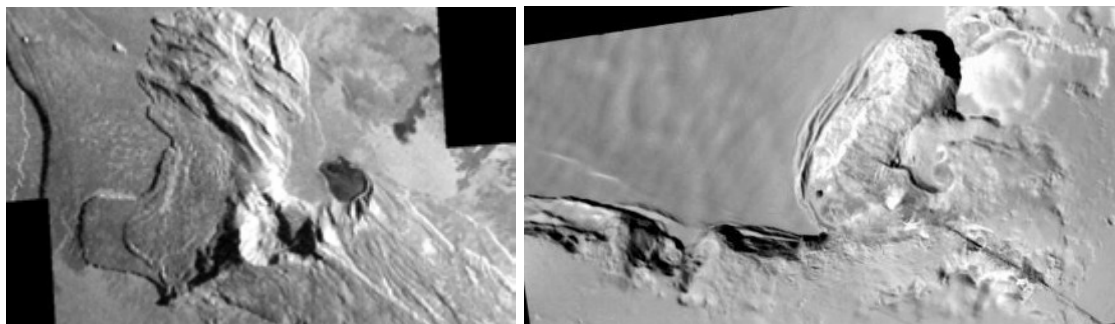


Рис. 8.22. Зліва – зображення гори Тохіл висотою близько 5,4 км, справа – обрив в області Телегонус

Вулканічні кратери займають $\sim 2\%$ загальної площі поверхні супутника, їх вигляд суттєво різниться. Так, вулкан Ра Патера вирізняється тим, що радіально від нього відходять змієподібні потоки на відстань до 300 км, які ще й змінюють відтінки від коричневого до світло-оранжевого і навіть сніжно-білого тонів, однак їх природа поки що мало зрозуміла.

В той же час, у темному джерелі кратера вулкана Локі знаходиться світла пляма, а його довкілля досить однорідне. На переважно рівнинному поверхневому шарі супутника виявлено ряд гірських масивів з висотою до 9 км, поряд з ними – ями й куполи розміром від десятків до сотень метрів, які є найбільш складними у розумінні їх природи. Так, за однією з версій вони утворюються при взаємодії розжареної лави з поверхнею Іо.

8.3. Європа.

До КА „Галілео” основні відомості про Європу зводилися до того, що це – супутник крижаного складу з дуже гладкою поверхнею [489-491], порізаною мережею тонких тріщин. Знімки з КА „Галілео” з високою просторовою роздільною здатністю не показали ніяких ознак вулканічних вивержень. Проте через деякий час появились публікації з посиланнями про нечасті спостереження над лімбом супутника „султанів” газу. Вони включали водяну пару, аміак та деякі інші гази. Льодяну оболонку цього супутника вкривають тріщини і нагромадження з льоду. Те, що це саме сніг та лід із води – було підтверджено спектральними спостереженнями.

Вважається, що виділеного за рахунок припливного механізму тепла недостатньо для сильного розігріву існуючої там маси льоду. Зареєстровані поля деяких температурних аномалій, швидше за все, представляють виходи потоків внутрішньої теплової енергії. Тому деякі фахівці пропонують модель конвективного виносу тепла з розігрітих надр Європи. Виконані розрахунки показали, що під порівняно тонкою літосферою, перебуває океан рідкої води глибиною до декількох десятків кілометрів [34, 49, 57, 65, 66, 77, 122, 269, 287, 288, 346, 366, 396, 407, 526, 552, 567, 596, 628]. Ломка льоду і утворення торосів із поверхневих льодів, імовірно, триває й у цей час [114, 147, 150, 170-175, 240-243, 265, 323, 329, 346, 369, 411, 424, 528, 557, 558, 636, 657, 757, 771].

Нерідко на поверхні Європи спостерігаються смуги з темними краями. Це пояснюють явищем кріовулканізму (виверженнями води з-під льоду в центрі тріщин) [237, 554, 556, 635]. Явищами кріовулканізму пояснюють і наявність окремих малих і великих темних плям. На рис. 8.23 (праворуч) показана область поверхні Європи розміром 15×20 км.

В правому нижньому куті – знаходиться темна і досить гладка місцевість. Вона може бути місцем, в якому з глибин на поверхню поступав талий лід. Посередині цієї ділянки видно відносно яскравий горбок. Також на знімку видно два хребти: один молодий і достатньо яскравий, шириною близько 5 км, з добре помітними краями і внутрішньою нерівною долиною. Інший, очевидно старий, порівняно гладкий, шириною близько 2 км з невеликими борознами. Глобальна мережа ліній (рис. 8.23, ліворуч) – це тріщини в товстій крижаній корі, що викликаються тектонічними процесами.

Ці розломи не супроводжуються помітними рухами кори, а самі тріщини заповнюються розчином оранжевого кольору, який при температурах на поверхні Європи, швидко твердіє. Ширина розломів на різних частинах поверхні складає від одиниць і до сотень кілометрів; їх протяжність інколи досягає 3000 км і навіть більше.

Вода, що виливається, миттєво закипає і відразу ж замерзає; а деяка її частина, яка випарувалася, випадає на поверхню у вигляді снігу й інію в радіусі кількох сотень кілометрів від джерела.

Саме кипіння забирає дуже багато тепла. Тому в умовах Європи шар льоду в півметра утворюється всього за декілька хвилин. З підрахунку кількості кратерів більше 10 км слідує, що поверхня Європи має вік близько 1,5 млн років; підрахунки дрібніших кратерів вказують на вік до 30 млн років. А отже, Європа ще досить геологічно активна.

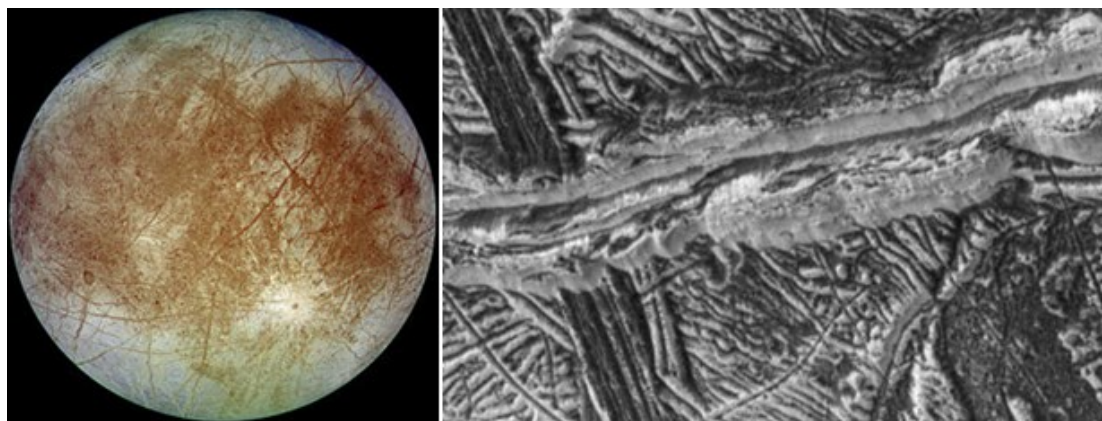


Рис. 8.23. Ліворуч – поверхня Європи, поверненої до Юпітера. Яскраві білі утворення – це викиди від молодих ударних подій. Праворуч – фрагмент поверхні з КА «Галілео» з висоти 1300 км показує два хребти на Європі, що взаємно перетинаються (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Щоб отримати точнішу відповідь, було запропоновано визначати, наскільки забруднена поверхня Європи сіркою. Сірка викидається з іншого супутника – Іо – і, потрапляючи у вигляді іонів у потужну магнітосферу Юпітера, потім постійно бомбардує поверхню Європи. Щільність цього потоку добре відома, тому вміст сірки може незалежно оцінити вік поверхні. Виконані з різних КА вимірювання дали такі результати. Сірки виявилося суттєво менше, ніж очікувалося, а середня швидкість випадання опадів на поверхню Європи за рахунок виверження води складає близько 0.1 м за 1 млн років. Звідси слідує, що зі всієї поверхні супутника викидається не менше 100 кг води за секунду [286, 570, 632-635, 790].

Природа темних плям на поверхні Європи і темної речовини в багатьох борознах – до кінця не ясна. Пропонують, що подібний колір дають сульфат магнію та інші з'єднання, що містять сірку. Джерелом цих речовин можуть бути як вулкани на Іо, так і надра Європи, а також метеорити. А темний матеріал може складатися з мінералів, утворених при випаровуванні солоної води з океану Європи, адже він може бути багатий різними реагентами з сірчаною кислотою. Темний матеріал найбільш сконцентрований в регіонах з недавнім зовнішнім руйнуванням. Поєднання темного матеріалу із зовнішнім руйнуванням свідчить, що темний матеріал виходить із нижніх горизонтів ґрунту, а можливо і від основного океану. А тому представляє собою ключі до в'ясування його хімічного складу. Проте екзогенні процеси також є важливими для в'ясування особливостей в утворенні і розповсюдженні темного матеріалу по поверхні супутника.

Появу асиметричності спектральних смуг, котрі пов'язані з водними складовими, добре пояснюється присутністю гідратованої сірчаної кислоти ($\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), яка могла сформуватися при залученні ендегенної, чи екзогенної сірки, або SO_2 [3]. В даному випадку, сірка могла б бути фарбувальним агентом, який приводить до появи червоних кольорів не крижаних компонентів у візуальних довжинах хвиль.

Цілком можливо що істина знаходиться десь між цими крайніми випадками, адже суміші різних концентрацій замерзлих у воді гідратованих солей MgSO_4 і Na_2SO_4 та сірчаної кислоти H_2SO_4 в лабораторних умовах мають хороше співпадіння спектральних особливостей по формі і позиції спектральних смуг для поглинання груп H_2O в діапазоні спектра 1.5-2.0 мкм, отриманих при спостереженнях спектрів поверхні Європи від не крижаного матеріалу за допомогою адаптивної оптики КЕК телескопів [12].

Можна сказати про те, що темна не крижана складова зовнішньої поверхні Європи – одна з найактивніших крижаних складових у Сонячній Системі. Це особливо цікаво з геологічної точки зору щодо наявності океану під його поверхнею. Аналіз спектральних даних [7] вказує на наявність у спектрі веденої сторони Європи смуги поглинання майже в довжині хвилі 280 нм, яка за положенням та формою нагадує смугу А-Х молекули SO_2 . Була висловлена гіпотеза, що вона виникає внаслідок розсіювання УФ випромінювання в кристалічній решітці водяного льоду шляхом утворення зв'язку S-O, коли в решітку попадають атоми сірки. У багатьох роботах з порівняння лабораторних і спостережних спектрів були зроблені висновки про необхідність існування на супутнику сильно збагаченого сіркою поверхневого шару [11].

8.4. Енцелад

Супутник планети-гіганта [14, 16] Сатурна [13, 15, 17] Енцелад [89, 139, 142, 331, 362, 501, 503, 504, 551, 587, 595, 598, 639, 642, 708-711, 758, 761, 762, 766, 770, 787] діаметром близько 505 км, обертається навколо центральної планети на відстані понад 238 тис. км.

Для більшості планет Сонячної системи характерним є значний нахил між площинами їх екваторів і площинами орбіт. Цей факт дозволяє реєструвати відмінності у надходженні сонячної енергії до їх різних широтних поясів за час обертання навколо Сонця. Оскільки екватор Сатурна нахилений до площини її орбіти майже на 27° , то на

цій планеті ми від 1977 року досліджували зміни сезонів. Нам вдалося зареєструвати значні зміни характеристик атмосфери Сатурна і пов'язати їх із сезонними варіаціями надходження сонячної енергії до різних широтних поясів [20, 22, 26, 27, 30]. Планета обертається навколо Сонця за 29.45 років. Через значний ексцентриситет орбіти (0.06) і те, що Сатурн проходить перигелій орбіти на відстані ≈ 9 а. о. при літі у південній півкулі, а афелій – на відстані понад 10 а. о. при літі у північній півкулі (рис. 8.24), то наші розрахунки [24] показали, що південна півкуля Сатурна в середньому отримує на 25% більшу енергію від Сонця, ніж північна.

У моменти рівнодення Сатурн знаходиться від Сонця майже на середній відстані. Особливо відчутні зміни надходження сонячної енергії спостерігаються на високих широтах планети. Адже при максимальних кутах нахилення вони можуть у рази перевищувати надходження енергії в умовах рівнодення [29]. При проведенні даного аналізу ми використали результати наших спостережень [8, 22-26, 30], отримані аматорами, іншими науковцями [6, 14, 21] і дані з космічних апаратів [12] у 1964-2020 рр.

Оскільки Енцелад рухається майже в екваторіальній площині планети Сатурна (нахил між орбітами менший 0.02°) і лібрація його осі обертання менша від 1.5° , то це однаково позначається на притоці сонячного світла до широтних поясів і на зміні фізичних характеристик на поверхні супутника і в атмосфері планети.

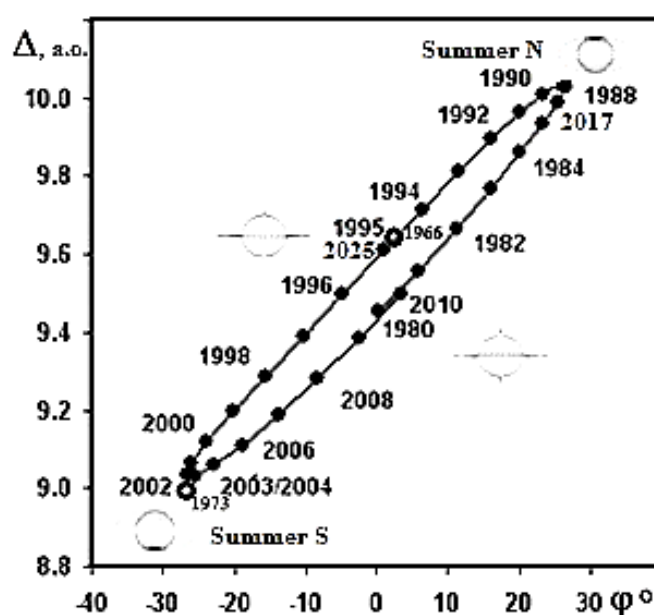


Рис. 8.24. Залежність зміни радіуса-вектору (Δ) Сатурна від зміни сатурноцентричного схилення (ϕ) за період 1966-2025 рр. [29].

На відміну від Іо, такий супутник Сатурна як **Енцелад** демонструє гейзерну активність. Він має (рис. 8.25) незвично гладку і яскраву поверхню (альbedo ~90-100%), котра нерівномірно покрита кратерами ударного походження, гірськими хребтами та жолобами, а також міжгір'ями, рівнинами, «зморщеними» місцевостями та іншими деформаціями, які можуть свідчити про існування в його середині якоїсь речовини у рідкому стані (рис. 8.26).

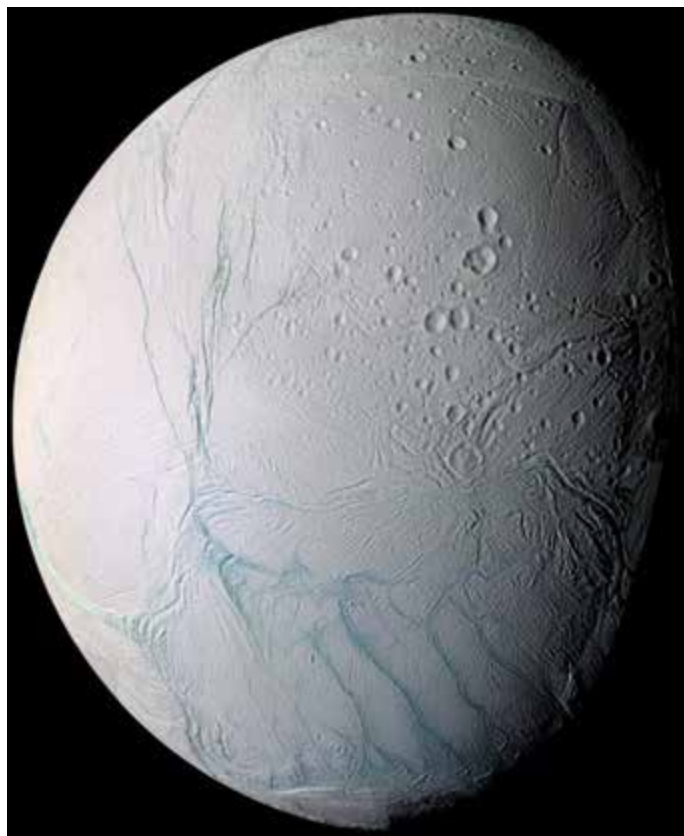


Рис. 8.25. «Тигрові» смуги
(http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery).

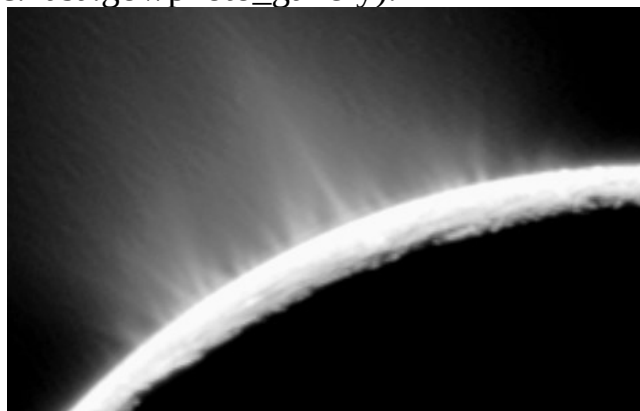


Рис. 8.26. Викиди замерзлої води із Енцелада (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

Як видно з рис. 8.27, південна полярна область є осередком досить відчутної геологічної і тектонічної активності. Вона покреслена паралельними тріщинами («тигровими смугами») із довжиною до 130 км, розташованими одна від іншої на майже 40 км. Вони являють собою 4 западини глибиною до 2 км. Їх назвали, Олександрія, Каїр, Багдад і Дамаск, на честь тих міст, які згадуються у «Казках тисяча й одна ніч»). Поверхня супутника суцільно покрита велетенськими валунами з діаметрами по 10-20 м.

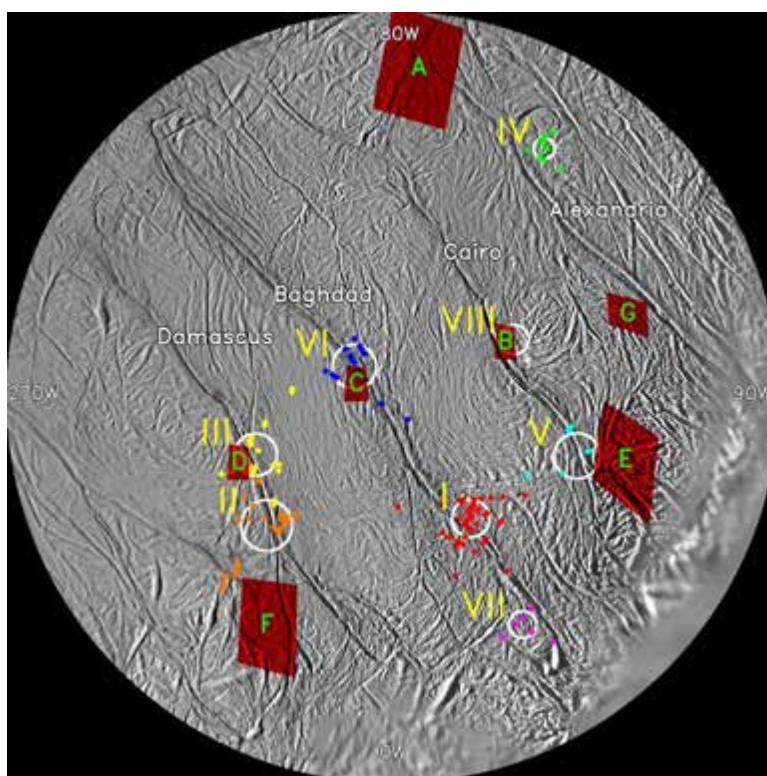


Рис. 8.27. Південний полярний регіон: Римські цифри – передбачувані місця виверження, чотирикутники – ділянки підвищеної температури, обведені кружками точки – окремі фонтани (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

На його поверхні розрізняють сліди від не менше ніж 5 етапів у його геологічній еволюції. Так, регіони без кратерів датували віком менше від 100 млн. років. У якості можливого джерела такої активності зараз вказують на енергію припливного розсіяння супутником Діоною та самим Сатурном. Хоча цьому дуже суперечить, наприклад, невелика витягнутість орбіти.

Незважаючи на його порівняно невеликі розміри, він подібно до іншого супутника Сатурна Титана, також має помітну атмосферу [6, 7, 24]. Більшість даних по Енцеладу отримано з допомогою космічного

апарата (КА) „Кассіні” [9, 28]. На зображеннях видно досить гладкий ландшафт його поверхні (рис. 8.25). Це говорить про значну геологічну активність супутника. Його поверхня відбиває падаюче на неї світло, майже як тільки що випавший сніг.

Такі активні геологічні процеси на супутнику говорять про те, що у його середині речовина може й зараз знаходитись у рідкому стані. Причиною розігріву надр Енцелада і його водяного «вулканізму» (рис. 8.26) можуть бути, наприклад, припливні сили [3] з боку Сатурна [19, 20, 23], чи від поруч розташованих супутників Мімаса, Тефії та Діони [25]. У 2005-2017 рр. наукові прилади КА «Кассіні» вказали, що вся поверхня Енцелада у південній полярній області виявився осередком відчутної геологічної активності (рис. 8.27).

Фонтани на рис. 8.26 мають різні розміри та середні висоти ~100 км, через які викидається пара й крихітні крапельки води, що потім кристалізуються на поверхні Енцелада. Температура біля смуг на декілька десятків градусів є вищою, ніж в навколишніх рівнинах. Серед них особливо виділяються ряд «гарячих точок» (рис. 8.27), які подібні земним гейзерам.

Найвищу температуру було зареєстровано у найяскравішому розломі Дамаск, у якому вона інколи сягала 93 К (проти 72 К в довкіллі). В той же час було знайдено декілька гейзерних потоків, котрі не пов'язували із жодною із високотемпературних ділянок. Наприклад, у так званій області Багдад не фіксувалось підвищення температури, але там були знайдені діючі гейзери.

З виявлених 4-ьох розломів три є активними практично по всій довжині, тоді як четвертий – тільки частково; а найтепліші їх частини – є джерелами гейзерів. Викинуті гейзерами деякі нейтральні молекули та їх іонізація під дією магнітного поля центральної планети Сатурн формують плазмовий тор в області екватора. Існування гейзерної активності дозволяє стверджувати, що давно сформована поверхня супутника повністю змінилася під дією геологічних процесів протягом останніх декількох сотень мільйонів років.

Нагрівання супутника викликається взаємодією з супутниками Мімас і Діона припливно-відпливному механізму, енергії якого достатньо для розплавлення багат шарових надр даного супутника під товстою (до 100 км) корою з чистого водного льоду, який містить у собі велику кількість гідратованого аміаку, або ж під значно тоншою корою (до 25 км), якщо вона складається лише з гідратованого аміаку.

На Енцеладі виявлена змінна в часі атмосфера: 65% водяної пари, 20% H_2 , а решта 15% – CO_2 , N_2 і чадного газу. Характер розподілів густини пари води з висотою вказує на те, що швидше за все, вона

виділяється із якогось «підземного» теплового джерела. Особливо значні її кількості виявлені в районі навколо південного полюса, котрий представляє своєрідну оазу у крижаній пустелі із суттєво вищою температурою (вище 90 К у порівнянні з очікуваним 72 К).

Також знайшли декілька гейзерних викидів, не пов'язаних з високотемпературними ділянками. Крупномасштабні знімки поверхні супутника показали, що вся його льодяна поверхня майже суцільно покрита гігантськими валунами, діаметром близько 20 м, та тріщинами. Помітили, що ці валуни обминають тріщини. А отже тріщини є молодшими формуваннями. Найтепліші області у смугах розташовані в місцях, які ототожнені зі струменями гейзерів. А отже, саме вони є джерелами гейзерів.

10.10.2008 «Кассіні» пройшов за 25 км від поверхні супутника, і врізався у викиди замерзлої водяної пари, яка виривалася з тріщин у «тигрових» смугах. Дослідження показали, що в деяких місцях Енцелада вода може знаходитися лише в декількох сотнях метрів від поверхні [10, 11]. Для пояснення таких спостережливих особливостей поверхні супутника поруч з гейзерними викидами біля «тигрових» смуг, найкраще підходить досить грубо подрібнений кристалічний лід. Подібні частинки льоду, найімовірніше, появляються при конденсації гейзерних викидів. Деяка їх частина повертається на поверхню своєрідними опадами [1, 12].

Таким чином, результати досліджень Енцелада показали, що лінійні особливості в південному полярному регіоні супутника («тигрові» смуги) мають аномально високі витоки тепла і є очевидним джерелом гейзерів [8, 27]. Саме через ці розломи і далі крізь отвори на зовнішній поверхні викидається рідина з океану, яка й може бути безпосередньою причиною спостережуваної теплової емісії. Результати численних спостережень вказують на те, що ці спектри краще за все узгоджуються з моделлю, в якій поверхня нагрівається через вузький отвір (діаметром близько 20 м) до температури близької до 225 К, і/або через значно ширший отвір (діаметром близько 180 м) до температур в межах від 130 до 155 К.

Але тільки у 2005 р. наукові прилади КА «Кассіні» змогли покращити наше розуміння природи багатьох, зареєстрованих на Енцеладі ефектів. Наприклад, на південному полюсі Енцелада замість очікуваних 72 К, температура у деяких місцях перевищувала 90 К. Тобто, південний полюс супутника є осередком відчутної геологічної активності (рис. 8.28).

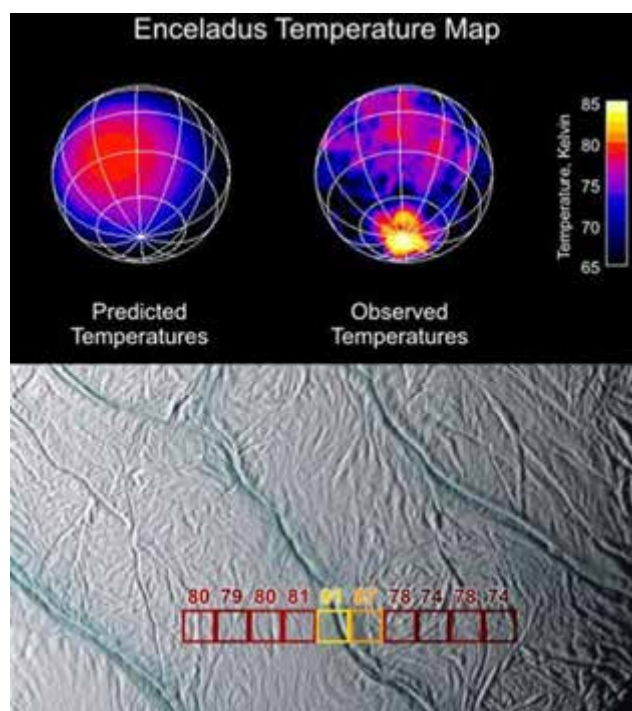


Рис. 8.28. Зверху – карта температури Енцелада 14.07.2005 показує гарячі плями у південній полярній області. Знизу – «тигрові» смуги і значення температури у них [7].

У цій області виявлено майже паралельні тріщини довжиною до 130 км, на відстанях 40 км одна від іншої. Їх назвали «тигрові» смуги [31]. Ретельні дослідження показали, що саме через них угору викидається пара та краплини води. Вони швидко замерзали і частина з них падала на поверхню Енцелада. Температура у цих смугах є на десятки градусів вищою, ніж на навколишніх рівнинах. Але навіть у середині цих смуг вдалося виявити ще більш «гарячі» точки, порівняно з навколишньою територією. Спостереження показали, що «свіжі» викиди гейзерів відбуваються якраз із цих гарячих точок у «тигрових» смугах (рис. 8.29). На Енцеладі їх можна вважати своєрідним водним вулканізмом.

Детальні знімки показали, що «тигрові» смуги є западинами на рельєфі супутника, глибиною до 2 км. Всього відомо чотири таких лінії. Їх назвали Alexandria, Cairo, Baghdad, Damascus – на честь міст, що згадуються в арабських «Казках тисячі й однієї ночі» (рис. 8.29, ліворуч). Проте, наприклад, у смузі Багдад було знайдено декілька гейзерних викидів, які не пов'язані ні з однією з ділянок з підвищеною температурою. Як можливе джерело активності для гейзерів називають припливне розсіяння енергії [3] супутником Діона і самим Сатурном. Одне з найкращих уявлень про високотемпературне

випромінювання з активних областей південного полюса супутника, КА „Кассіні” отримав при прольоті біля Енцелада 12.03.2008. У результаті цих досліджень, на карту південного полюса була накладена карта теплового випромінювання [32].

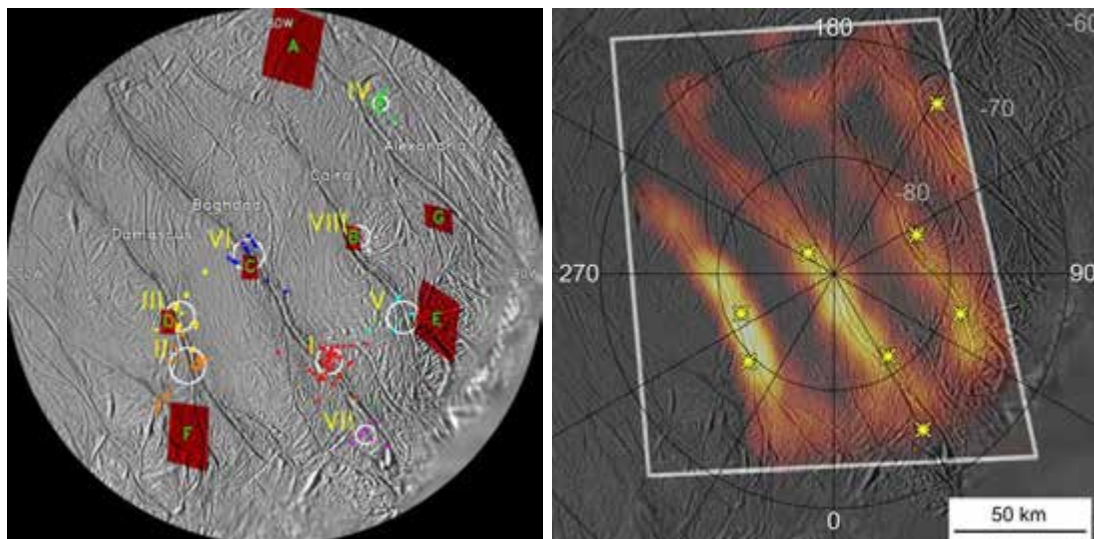


Рис. 8.29. «Тигрові» смуги на Енцеладі. Ліворуч – показано 8 місць вивержень (кружки), ділянки підвищеної температури (чотирикутники), окремі фонтани (точки в кружках) [13]. Праворуч – найвищі температури (до 93 K) зареєстровані уздовж Damascus Sulcus (ліворуч, внизу), температура на поверхні в інших областях – нижча 72 K (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fe/Jet_Spots_in_Tiger_Stripes_PIA10361.jpg).

На самому зображенні чітко видно чотири «тигрові смуги». По всій довжині (понад 130 км) цих розломів зафіксовано високотемпературне випромінювання. Найтепліші області смуг розташовані в місцях, які ототожнені зі струменями гейзерів (зірочки на Рис. 3, праворуч). Проведені КА «Кассіні» дослідження показують, що рівень активності розломів дуже сильно змінюється по їх довжині. Найтепліші їх частини якраз і є джерелами недавніх гейзерів. Дані для цієї карти були отримані в період з 16-тої по 37-му хвилину після найближчого прольоту КА біля Енцелада на відстанях між 14000 і 32000 км від поверхні супутника. У ніч на 10.10.2008 КА «Кассіні» пройшов всього за 25 км від поверхні супутника. Після цього КА пройшов через викиди замерзлої водяної пари, що виривалася з «тигрових» смуг.

Зміну температури поверхні біля «тигрових» смуг на Енцеладі моделювали в рамках двовимірної моделі, яка включала передачу

тепла в нижніх горизонтах ґрунту із чистого водного льоду внаслідок теплопровідності від вертикального розлому, у якому підтримується постійна температура, і зовнішнім нагріванням та випромінюванням поверхні з альбедо близько 0.8 [12]. При моделюванні розглядалося ще й нагрівання стінок розломів водяною парою і рідкою водою [8, 9]. Після цього були порашовані спектри випромінювання поверхні у спектральному діапазоні 9-16 мкм і порівнювалися зі спостережними даними.

При розрахунках температуру отвору гейзера змінювали в межах 175-273 К. Рис. 8.30 показує порівняння модельних кривих теплового випромінювання і спектрів, отриманих КА «Кассіні» від південного полярного регіону навколо тигрової смуги «Саіго» (рис 8.29, ліворуч), де зосереджене одне з «гарячих» джерел “В” [12]. Методом найкращого наближення спектрів і модельних розрахунків отримано, що температура в розломі складає близько 223 К для квадрата «5» і 195 К – для квадрата «6» [1] при умові, що гейзерна активність у даний момент відсутня.

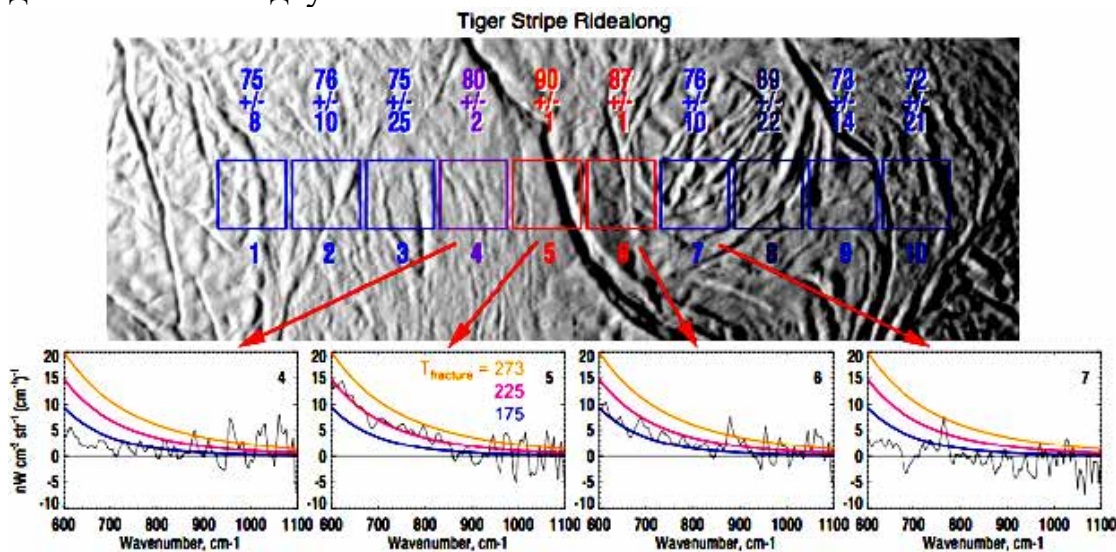


Рис. 8.30. Зверху – кожен квадрат показує область поверхні Енцелада, яку покриває один детектор спектрометра в діапазоні 9-16 мкм (6×6 км). Внизу – модельні спектри для температур розлому 273, 225, і 175 К і спостережні спектри вказаних областей, отриманих КА „Кассіні” [1].

Якщо ж розрахунки проводити для випадків, коли маємо розломом зі змінною шириною, то метод найкращого наближення для квадрата «5» дає температуру поверхні близько 130 К при ширині розлому 180 м; а для квадрата «6» – краще всього підходить температура розлому 155 К при ширині розлому близько 22 м.

Проведені модельні розрахунки та відповідні дані щодо фізичних умов води в різних агрегатних станах дозволили оцінити можливі параметри для «тигрових» смуг у південній полярній області Енцелада [5, 10, 14]. Для існуючих чотирьох довгих розломів приблизно по 130 км кожний [9], при температурі у смугах 225 К вимагається, щоб їх середня ширина була всього лише 8 см. І така вимога забезпечує вихід через такі розломи водяної пари у кількості 150 кг/с.

Адже таку оцінку викинутої гейзерами пари води [2-4, 25] було отримано зі спостережень покриття зірок Енцеладом [16]. Припускаючи, що вся поверхня Енцелада складається переважно із водного льоду, оцінки вказують, що сумарний потік тепла, що виходить через тигрові смуги у південній полярній області Енцелада становитиме 5.8 ± 1.9 ГВт [12]. Це узгоджується з сильними смугами H_2O в довжинах хвиль 1.04, 1.25, 1.5, 1.65 і 2 мкм в спектрах областей, що включають тигрові смуги. Для пояснення таких спостережних особливостей якнайкраще підходить грубо подрібнений кристалічний лід, що вкриває супутникову поверхню біля «тигрових» смуг.

Таким чином, результати досліджень Енцелада показали, що лінійні особливості в південному полярному регіоні супутника, названі «тигрові» смуги, мають аномально високі витoki тепла і є очевидним джерелом цих гейзерів. Для пояснення цих спостережень різними авторами було запропоновано декілька можливих механізмів.

Представлені в роботі [1] результати показали, що нагрівання в «тигрових» смугах має відбуватися через розломи від теплих, лежачих на певній глибині під поверхнею, водних морів. Результати спостережень показали, що отримані спектри якнайкраще узгоджуються з моделлю, в якій поверхня нагрівається через вузький (діаметром до 20 м) отвір до температури 223 К, і/або через значно ширший отвір (діаметром близько 180 м) до температур 130-155 К.

На переважній частині поверхні супутника Сатурна Енцелада кратерів немає зовсім. А у тих місцях, де вони все ж були зареєстровані – їх щільність була відносно дуже малою. Це може вказувати на те, що первинно сформована поверхня даного супутника з часом повністю змінилася під дією певних геологічних процесів. Для пояснення цих фактів було запропоновано те, що така геологічна активність достовірно була присутня за останні декілька сотень мільйонів років. Цілком можливо, що вона має місце й зараз [21, 24].

Відмітимо, що на початку дослідження супутника було достатньо важко знайти задовільне пояснення тому, що невеликий Енцелад з діаметром трохи більшим від 500 км, зміг настільки нагрітися, щоб

розплавитись. Такий супутник навряд чи зміг би містити достатню кількість радіоактивних елементів з тим, щоб бути нагрітим за їх рахунок. Та й орбіта його має незначний ексцентриситет для можливого пояснення нагрівання припливною взаємодією з центральною планетою гігантом, чи з іншими розташованими біля супутника [1, 4].

Нагадаємо, що ще до польоту космічного апарата «Вояджер-2» була отримана перша вказівка на те, що орбіта Енцелада співпадає з малопотужним кільцем Сатурна Е [2]. Це може говорити про тісний зв'язок між супутником і цим кільцем. Адже виверження із супутника мають бути джерелом речовини для поповнення матеріалом цього кільця. Тому після короточасного дослідження Енцелада з пролітної траєкторії «Вояджером-2», розв'язання цієї проблеми відклали на пару десятиліть до іншого слушного моменту.

Цей момент настав із запуском космічного апарата «Кассіні» [9]. При одному з перших підходів до супутника, установлений на цьому КА панорамний спектрограф UVIS працював в ультрафіолетовому діапазоні на довжинах хвиль 56-190 нм. В його завдання входило сканування околиць даного супутника Сатурна. Цим оточенням стала ледве помітна атмосфера [8], утворена атомами й молекулами, вибитими з поверхні Енцелада при бомбардуванні мікрометеоритами і винесеними назовні гейзерними викидами [10].

31.10.2008 КА пройшов уже на відстані близько 200 км від поверхні супутника. І цього разу його прилади [25] виявили, що тонкі струмені яскравого крижаного матеріалу [11, 12] віддаляються від активної південної полярної області [3, 6, 7] на десятки тисяч кілометрів від поверхні Енцелада, і поповнюють кільце Е. Отже, струмені гейзерів, що виринаються з поверхні при русі супутника по орбіті, залишають хвіст за Енцеладом. Ті ж частинки, які вилітають по ходу руху супутника – будуть випереджати його (рис. 8.31). Нагадаємо, що рух самого супутника відбувається проти годинникової стрілки, як і багатьох інших тіл у Сонячній системі. Крім того, магнітосфера центральної планети гіганта Сатурна також впливатиме на рух частинок у цих струменях, змінюючи їх напрямки, а, можливо, й потужність даних потоків.

Інша цікава структура на рис. 8.31 – це порожня область, яка залишається в кільці після проходу Енцелада. Вважається, що вона зв'язана з так званим «підмітаючим» ефектом від Енцелада, який розміщений прямо в центрі кільця Е. Таким чином найдрібніші крижані осколки – це, ймовірно, є основним джерелом тих частинок,

які безперервно поповнюють найбільш віддалене широке кільце Е Сатурна. Воно розтягнулося на понад 300 тисяч км по радіусу.



Рис. 8.31. Супутник Енцелад у кільці Е Сатурна (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery).

Вважається, що цей невеликий супутник Енцелад діє й на досить значне магнітне поле Сатурна так, що воно обертається трохи повільніше, ніж сама планета-гігант. Отримані з КА «Кассіні» дані показали, що лінії магнітного поля Сатурна при обертанні планети взаємодіють з зарядженими частинками, які викидаються в простір гейзерами Енцелада. Таку інформацію вдалось отримати при вимірюваннях за допомогою двох приладів: радіохвильового плазмового датчика і магнітометра.

Магнітометр для КА «Кассіні» спеціально був створений для вимірювання величини і напрямку магнітного поля навколо Сатурна. Вже під час перших трьох близьких прольотів зонда біля Енцелада 17 лютого, 9 березня і 14 липня 2005 р. магнітометру вдалось зафіксувати викривлення в магнітному полі біля даного супутника. Таке поле могло виникнути при взаємодії частинок із його атмосфери з магнітосферою Сатурна. Нейтральні частинки газів, що викидаються гейзерами, формують своєрідний тор навколо Сатурна [5]. Адже, як тільки частинки отримували заряд, вони формували під дією магнітного поля Сатурна диск із іонізованих газів (своєрідної плазми), який оточує планету в екваторіальній площині. Ці частинки взаємодіють з магнітним полем настільки, що швидкість обертання

плазмового диска поступово знижується. І тому період його обертання є тривалішим за добу на Сатурні [15, 20].

Відмітимо, що розрахунки доби на планетах-гігантах є нелегкою справою, оскільки немає певної точки на поверхні, від якої можна було б вести початок відліку. Тому одним з варіантів стало обчислення періоду обертання магнітного поля по радіометоду. Це було здійснено для всіх планет-гігантів Сонячної системи. Але визначення радіоперіоду Сатурна було важким тому, що мала місце поява іншого періодичного імпульсу, який не пов'язаний з обертанням магнітного поля. Крім того, радіоперіод обертання постійно змінювався протягом і років, і навіть місяців. Так, доба розрахована за даними спостережень з КА «Кассіні», виявилася майже на 6 хвилин довшою, ніж та, яка була розрахована за отриманими апаратурою КА «Вояджер-2» даними на початку 1980-х. Це складає різницю майже в 1%. По радіоспостереженнях з КА «Кассіні» було знайдено зв'язок між радіоімпульсом і обертанням магнітного поля Сатурна. Так виявилось, що при кожному обертанні спостерігається асиметрія у радіовипромінюванні. Також вдалось знайти зв'язок між обома сигналами і випромінюванням матеріалу, що вивергається з надр Енцелада.

Грунтуючись на отриманих нових даних спостережень було запропоновано дві гіпотези для пояснення існуючих змін радіосигналу. Перша – говорить про те, що викиди [22, 23] гейзерами Енцелада [18, 19] могли бути менш активними при прольоті КА «Вояджер-2». Друга гіпотеза говорить про те, що можуть бути якісь сезонні зміни [16, 17] в осьовому обертанні протягом обертання Сатурна [13, 14] навколо Сонця за понад 29 років. Тобто, перша гіпотеза говорить про те, що залежно від потужності гейзерів на Енцеладі може змінюватися кількість викинутих частинок, які потрапляють у плазмовий диск. І саме ці зміни регулюють тривалість радіоімпульсу, збільшуючи його, чи зменшуючи при меншій активності Енцелада.

Також, згідно з отриманими дослідженнями космічним апаратом «Кассіні», було зроблено висновок про те, що викиди з Енцелада не тільки поповнюють кільце Е, але й підчищаються ще й зовнішніми краями іншого більш потужного кільця А. І це, не дивлячись на те, що кільце А Сатурна й Енцелад розділені відстанню у 100 тисяч км. Тобто, між ними існує тісний фізичний зв'язок, про який вказується, наприклад, в роботі Уїльяма Фаррелла [5]. Це з'ясувалося в результаті отриманих спостережень, які довели, що доля викинутого з Енцелада матеріалу прямує аж до зовнішніх країв кільця А Сатурна.

В даний час це один з досить помітних сюрпризів, які піднесли гейзери Енцелада. Так виявилося, що подібні викиди з надр супутника іонізуються під впливом сонячного світла і зіткнень з іншими атомами й електронами. Далі, заряджені частинки вступають у взаємодію з магнітним полем Сатурна, і починають свій рух у просторі навколо планети. Потім вони захоплюються радіаційними поясами Сатурна і починають рухатися від полюса до полюса. На своєму шляху ці частинки проходять через кільце А, змінюють траєкторію, захоплюються цим кільцем і стають частиною кільця.

Таким чином, при дослідженнях Енцелада з допомогою апаратури космічного апарата «Кассіні» було з'ясовано, що гейзерні виверження поповнюють матеріалом кільце Е Сатурна. Отримані дані дозволили встановити, що магнітосферне оточення Сатурна сповільнюється цим же матеріалом, який в результаті перетворюється на електрично заряджені частинки, що переміщуються по магнітосфері центральної планети гіганта. Отримані пізніше апаратурою КА «Кассіні» дані підтвердили, що плазма, створена в торі навколо Сатурна, захоплюється ще й кільцем А.

У роботі Фаррелла із спостережних даних КА «Кассіні» вдалось показати, що області на внутрішній стороні плазмового тора, які взаємодіють з кільцем А, випромінюють певні радіосигнали. Ці сигнали були зафіксовані приладами станції. Вони нагадували своєрідний маяк, який став певним показником щільності плазми в цьому торі. При зближенні з кільцем А, частота сигналів поступово зменшувалася. Це вказувало на зменшення щільності плазми через поглинання деяким матеріалом у кільцях. При прольоті космічного апарату «Кассіні» над щілиною між кільцями, частота сигналів у цьому місці збільшувалася. Це доводило той факт, що щільність плазми тут ставала вищою, скоріше всього, через очищення цього місця простору від матеріалу кілець.

8.5. Титан

Супутник Сатурна Титан являється другим за своїм розміром супутником у Сонячній системі [19]. При наземних спостереженнях видно не його поверхню, а досить щільна атмосфера. А тому діаметр Титану, виміряний по твердій поверхні виявився майже на 112 км меншим від трохи більшого супутника Юпітера Ганімеда. Діаметр Титана є рівним 5152 км. При радіусі орбіти у 1.222 млн. км, його орбітальний період є синхронізованим із обертанням біля планети та становить 15.945 земних діб.

Титан є досить масивним і на ньому дуже холодно [36, 327, 328, 349, 575,]. І чим нижча температура атмосфери, тим легше Титану її утримувати. Під впливом гравітації масивного тіла молекули більшості газів можуть утримуватися біля нього. А якщо це небесне тіло ще й дуже холодне (нагадаємо, що на поверхні Титана $T=94\text{ K}$), то кінетична енергія газових молекул там є малою. Це дає змогу навіть порівняно легким елементам залишатися біля цього небесного тіла. Саме тому на Титані утримується досить густа атмосфера.

Атмосфера [44, 351, 357, 414, 573, 574, 678, 680, 699, 713, 726, 730,] Титана складена із азоту з домішками метану й деяких інших газів. Вона має товщину більшу від 200 км та створює тиск на поверхні у 1.47 бар [734, 760, 763]. Значення температури біля поверхні виявилось близьким до 94 K, що є температурою конденсації азоту.

Хмари Титана є достатньо прозорими [84, 796] в діапазоні довжин хвиль 0.85-1.05 мкм для того, щоб навіть виконати його картографування. В результаті за зображеннями вдалося зареєструвати ряд деталей з розмірами понад 500 км. Це були континенти, моря, ряд кратерів [40, 250, 488, 493, 728, 788]. І якщо у 1980 р. апаратурою «Вояджера-1» були помічені тільки зміни яскравості видимої поверхні хмар, то у 1994 р. з апаратурою космічного телескопа Хаббла вдалось уперше розгледіти на передній півкулі Титана величезний континент.

Ще із наземних спектроскопічних спостережень були виявлені смуги поглинання метаном у спектрах супутника Сатурна Титан. Це дозволяло навіть у докосмічну еру говорити про наявність у Титана досить потужної атмосфери. Але її властивості були досліджені пізніше, за даними спочатку з КА «Вояджер», та більш досконало – з КА «Кассіні», який на орбіті Сатурна працював з 2004 року. 14 січня 2005 р. на поверхню Титана висадився посадковий модуль «Гюйгенс», доставлений на орбіту Сатурна «Кассіні».

Як видно з рис. 8.32, його атмосфера не є суцільним газово-аерозольним шаром. Метан і аміак, можливо, колись знаходились у льодяній мантиї супутника; азот перебував у формі аміаку NH_3 і пізніше – появився в атмосфері при дисоціації під дією сонячного УФ. А метан, також під дією ультрафіолету – міг дисоціювати на етан, етилен, ацетилен тощо. Температура й значення тиску біля його поверхні були такими, що багато які із атмосферних складових могли перетворюватися в аерозолі (краплини, сніжинки, іній). А водень, що виробляється при таких реакціях, утікає з Титана та формує по орбіті супутника водневу хмару.



Рис. 8.32. Мозаїки Титана за (зліва направо) 28.10.2005, 26.12.2005 і 15.01.2006 (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Цю хмару, із шириною до 80000 км, було зареєстровано й апаратурою із апарата «Кассіні». Її існування свідчить про те, що верхні шарі атмосфери супутника весь час руйнуються, і її новоутворені складові тягнуться шлейфом по орбіті.

Молекули водню були виявлені у його атмосфері ще при наземних спостереженнях. Тоді такий факт здавався парадоксальним, оскільки маса супутника є все ж малою для того, щоб утримати настільки легкий газ. Тому були висловлені припущення про те, що водень є продуктом фотодисоціації метану та аміаку, які, у свою чергу, виділяються із надр протягом тривалої еволюції атмосфери Титана. Інші складові також могли утворюватися в результаті фотолізу аміаку, й потім тривалий час накопичувалися в атмосфері.

Склад атмосфери Титана певною мірою говорить про особливості походження цього небесного тіла. Наприклад, цікавим є ізотопний склад азоту в атмосфері Титана. Він різко відрізняється від земного азоту. Загадкою залишається чотирикратне (в порівнянні із Землею перевищення вмісту такого ізотопу як азот-15, по відношенню до азоту-14. А у порівнянні із Юпітером [726], в якого ізотопи все ще збереглися у майже первинному стані [721], таке перевищення складало аж 6 разів. Для планети Земля це пояснюють великими втратами, які колись давно відбулися у земній атмосфері. Проте, згідно подібній методиці, втрати атмосфери на Титані мали б бути значно більш катастрофічними. Але навіть природа можливих катастрофічних подій на супутнику Титан все ще залишається невідомою.

Уже найперші повідомлення із космічних апаратів говорили про можливість існування на поверхні супутника Титан морів, озер та боліт із рідкого азоту, островів із замерзлого метану та із силікатів на

його «сухій» поверхні. Там виявилося можливим і випадання дощів із рідкого метану. Подібні факти дозволили запропонувати ряд ідей для порівняння водного циклу на нашій Землі з процесами на Титані.

Так, ще спостереження з Землі показали, що переважна більшість хмар з'являлися на Титані протягом зміни сезонів. Ґрунтуючись на побудованих моделях циркуляції припустили, що подібна активність хмар може тривати там близько 25 років. Після цього вона майже повністю припиняється на 4-5 років. А потім знову поновлюється на наступний термін у протилежній півкулі.

При спуску зонда «Гюйгенс», який на парашутах опускався на поверхню протягом 2,5 годин з висоти 1270 км, проводилось ряд експериментів з вивчення атмосфери і структури поверхневого шару (рис. 8.33).



Рис. 8.33. Поверхня Титана з висоти близько 8 км; світліша частина – суша (http://www.beugungsbild.de/huygens/titan_shoreline.html)

Наприклад, багатократні вимірювання під час спуску показали, що у верхній атмосфері Титана, азот складає 98,4%, метан – 1,6%. Його концентрації поблизу поверхні зросла до 5%. У незначних кількостях виявлені й деякі інші гази, переважно вуглеводневі – етан, пропан, ацетилен (C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_2). Товстий шар метанового аерозолі розташовується на висотах 18-23 та 23-25 км; вище – допускається наявність смогу із продуктів фотодисоціації метанового газу: на висоті у 50, 60-80, 200, 375 та навіть у 500 км над поверхнею (рис. 8.34).

Температура на початку спуску становила 70,5 К, а на поверхні – зросла до 93.7 ± 0.3 К; тиск на поверхні склав – $1,47 \pm 0,01$ бар. Було визначено й ізотопний склад атмосфери, згідно якого відношення

$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ у тричі перевищує земне значення, та в 6 – юпітеріанське, яке вважається збереженим майже у первинному стані. Несподіванкою було виявлення такого ізотопу, як аргон-40, який трактується як свідчення можливої наявності вулканічної діяльності на Титані з викидами водяного льоду та аміаку.

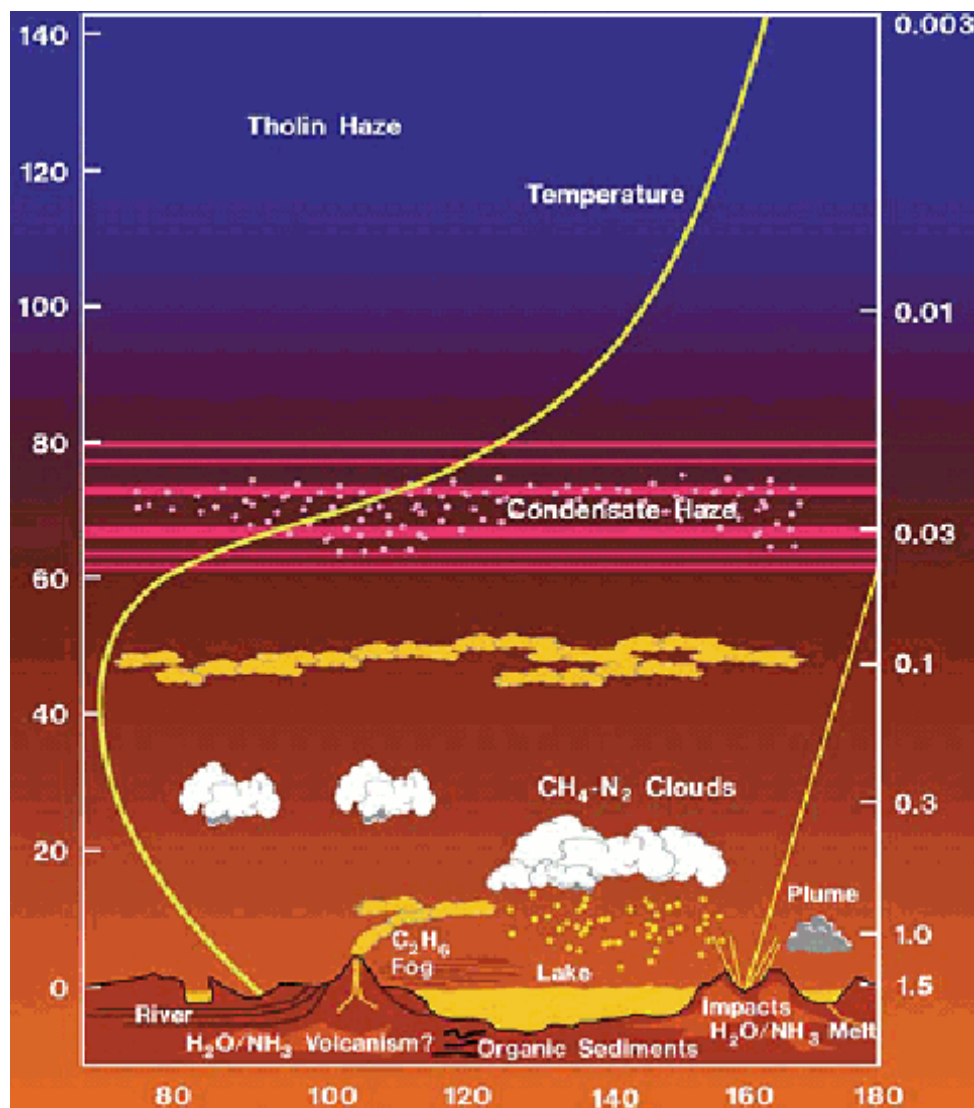


Рис. 8.34. Можлива структура атмосфери Титана. Ліворуч – висота, км праворуч – тиск у барах; ордината – T , К (<http://ael.gsfc.nasa.gov/saturnTitan.shtml>)

Вимірювання швидкості вітру при спуску зонда показали, що на висоті ~ 120 км вона була близько 120 м/с, при 60 км – вона різко впала і в межах останніх 7 км польоту – становила всього декілька метрів за секунду; а на поверхні – в межах 0.3 м/с.

При спуску зонда здійснювався ще й звукозапис, з метою реєстрації сигналів можливих електричних розрядів в атмосфері супутника. Це дозволило отримати ще й звуки, які супроводжували спуск та посадку зонда «Гюйгенс». При ударі об поверхню апарат відчував короточасні перевантаження до 15·G при відносній швидкості майже у 5 м/с. При посадці, розташований в нижній частині апарата пенетратор увійшов у ґрунт супутника на 0.15 м.

Коли низ станції торкнувся невідомої поверхні, то встановлений на її борту мікрофон зафіксував дивний звук. Це був не глухий удар об тверду породу, не сплеск на рідкій поверхні, а щось середнє між ними. Подібний звук свідчив, що апарат упав на сильно насичений рідиною ґрунт, який дуже нагадує вологий пісок, або ж крижану «кашу» із тонким «настом» (рис. 8.35). Напрямок вітру біля поверхні співпадав з напрямком обертання Титана: тобто, із заходу до сходу. При спуску напрямок вітру двічі мінявся: спочатку це було на висоті біля 6 км, а вдруге – приблизно за 700 м до поверхні.

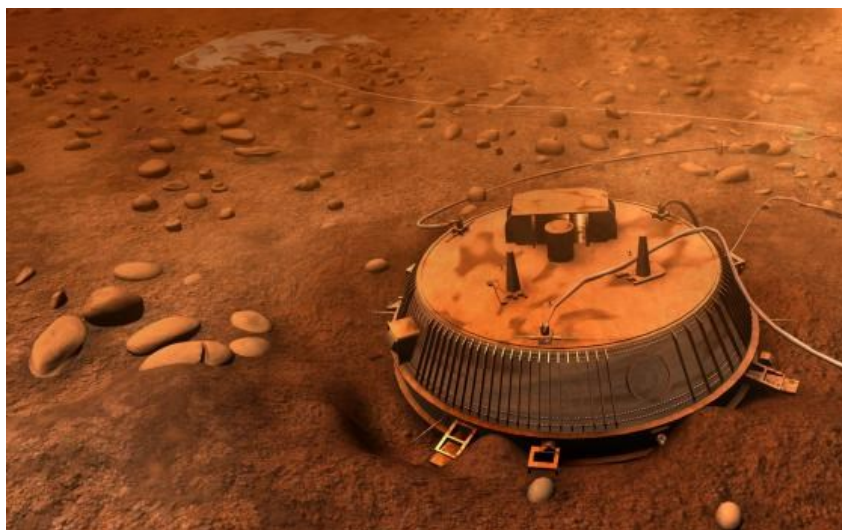


Рис. 8.35. Панорама складена з отриманих на поверхні супутника знімків. Кольори добавлені до чорно-білого зображення на основі палітри кольорового знімка у місці посадки (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery).

При спуску, прилади апарату «Гюйгенс» досліджували атмосферу та отримували зображення поверхні Титана. На висотах 23-25 км над поверхнею виявили потужний шар метанових хмар. На панорамному зображенні (рис. 8.36), складеному зі знімків, зроблених з висот, відповідно (зверху вниз) 30, 8, 1.5 і 0.3 км – можна бачити те, що апарат сідав у геологічно дуже складному районі.

Місце посадки знаходиться унизу в крайній правій частині нижньої панорами. Там видно гірські райони, метанові хмари та метановий туман, адже при спуску «Гюйгенса» із висоти 30-25 км поверхню було видно ще дуже погано. Туман зник на висоті близько 19 км; потім з'явилися щільні хмари з розривами; й лише на висотах нижче 18 км видимість стала кращою.

Отримані дані дозволили підтвердити висновки про те, що на Титані є «суша», та значні площі поверхні, укритої рідиною. У верхній частині зображення на рис. 8.37 видно гірську частину. А у рівній темній поверхні на передньому плані, в нижній його частині, вгадується відбитий прибережний рельєф. Останній факт може вказувати на те, що темна поверхня є рідким середовищем.

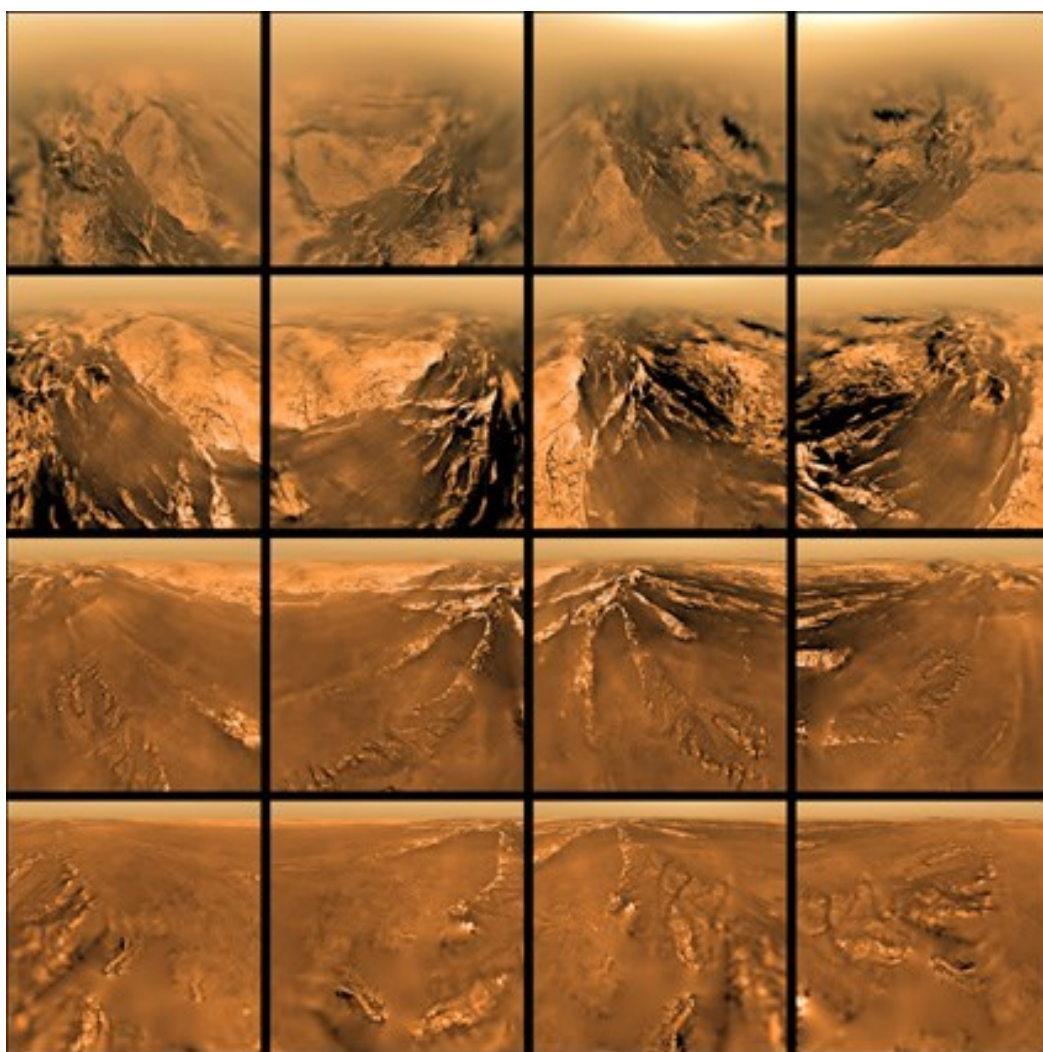


Рис. 8.36. Мозаїчна панорама поверхні Титана, складена зі знімків, зроблених з висот, відповідно (зверху вниз) 30, 8, 1.5 і 0.3 км (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery.)

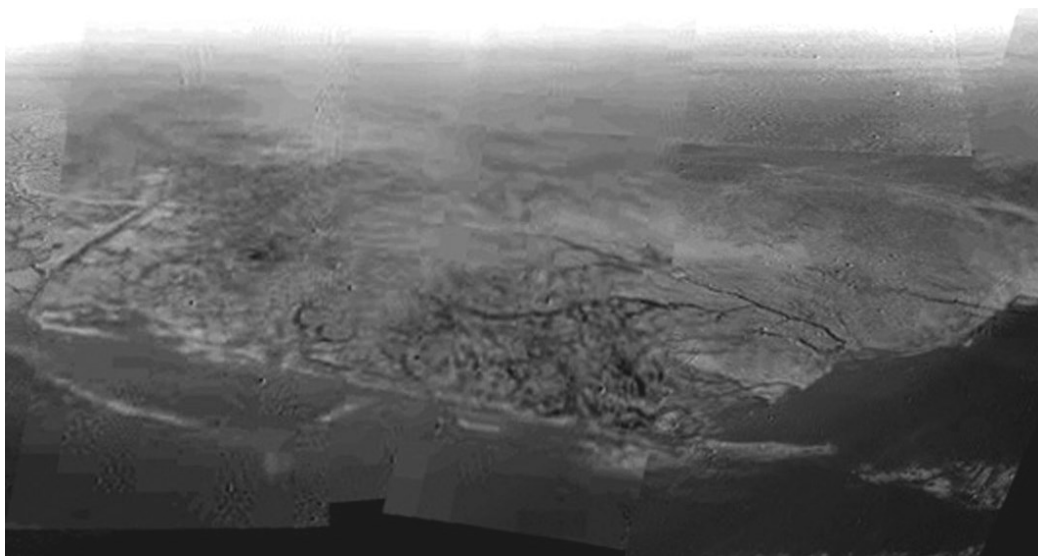


Рис. 8.37. Знімок поверхні Титана, зроблений при спуску апарату. Видно берегову лінію озера (чи моря) з висоти 8 км; світліша частина місцевості – суша (http://www.beugungsbild.de/huygens/titan_shoreline.html).

Головною причиною вітрів на Титані називають припливні сили, пов'язані із тяжінням Сатурна. Швидкість вітрів та циркуляція атмосфери визначалися після остаточного відновлення траєкторії спуску зонда по даних, які вдалося отримати за допомогою аналізу радіосигналів, переданих зондом та отриманих наземними радіотелескопами.

Камери зонда передали також найперші зображення поверхні Титана в місці його посадки. По отриманих після посадки серії знімків, вдалося створити фільм із 98 окремих кадрів. На ньому були зареєстровані деякі «артефакти», які періодично з'являлися у полі зору. Із долею ймовірності можна припустити, що це падаючі «сніжинки».

На рис. 8.38 показано два послідовні кадри, отримані з посадкового модуля через кілька секунд. Стрілками на правій частині знімку вказані точки, в яких явно представлені зміщення шарів «грунту» на метановій поверхні Титана навіть через такий короткий проміжок часу. Ледве помітна на знімках димка – виявилася метановим туманом. Панорама на рис. 8.38 демонструє мікрорельєф у вигляді розкиданих округлих каменів, поперечник найбільшого з яких сягає 15 см. Їх згладжені контури зможуть утворитись при тривалих перекочуваннях у потоці рідини. Вважається, що вони складаються із водяного льоду, котрий при дуже сильному холоді набуватиме кам'яної твердості. А рідиною, що насичує там ґрунт, є зріджений

метан. Таким чином, поверхня Титана нагадує губку, яка вкрита тонкою плівкою із все ще не ідентифікованої речовини, яка своїми фізичними властивостями нагадує глину, або ж вологий пісок.

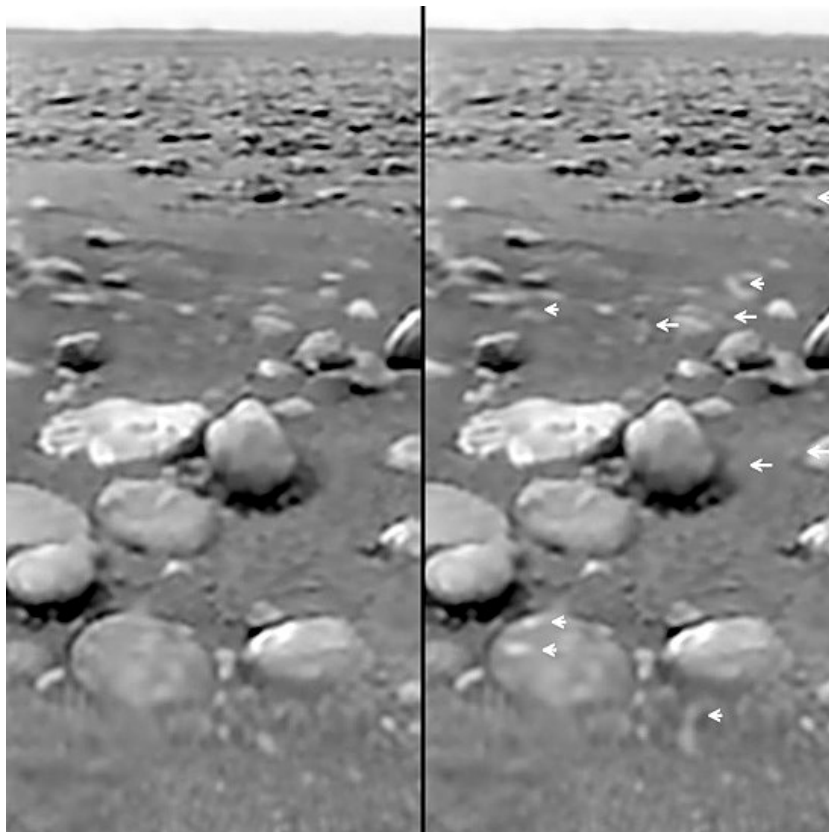


Рис. 8.38. Зміщення на поверхні Титана (стрілки) на двох послідовних знімках з різницею в часі всього кілька секунд (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Згідно однієї з моделей зміна напрямку вітрів у верхній частині атмосфери зумовлена відмінністю температури між північною та південною півкулями, тоді як унизу – це відбувається на межі потужних циркуляційних потоків так званого поясу Хендлі. У момент цих спостережень південні півкулі як Сатурна, так і Титана були обернені до Сонця й там було літо, що продовжувалося практично до 2010 р. Тепле повітря піднімалось і перетікало до північної півкулі, де воно охолоджувалося і, опустившись, поверталося назад до південної півкулі; саме це й є суттю утворення поясу Хендлі. Згідно такій моделі, у момент посадки «Гюйгенса» в південній частині Титана повинне бути теплішим на 10 К, ніж того, що було на екваторі. Такий величезний пояс Хендлі може бути тільки на об'єктах з дуже

невеликими швидкостями обертання (нагадаємо, що на супутнику Титан тривалість доби є трохи меншою шістнадцяти земних діб).

У цілому, область посадки зонда «Гюйгенса» нагадує пустельні регіони на Землі, у яких русла річок та водоймища наповнюються лише після дощу, які потім поступово висихають [734]. Рідкий метан також просочується під поверхню. Запаси метану на поверхні супутника Титан повинні постійно поновлюватись з якогось все ще невідомого джерела усередині супутника Сатурна. Що стосується дощів, то способи їх випадання, скоріш за все, носять сезонний [734] характер.

Метанові хмари є дуже схожими до купчастих земних хмар [718]. Відмінність була тільки у тому, що метанові краплі на Титані мають розмір майже на два порядки більший від розміру земних крапель для води. Оскільки обидва типи хмар мають практично однаковий рівень вологості, то краплі на Титані розташовуються на більший відстані одна від іншої. Тому хмари там мають суттєво меншу щільність і тому їх важко детектувати.

Моделі, утворені за цими даними, показали, що практично вся атмосфера Титана знаходиться у постійній циркуляції. У момент спостережень величезні маси трохи тепліших газів рухалися із південної півкулі у бік північного полюса, і потім – поверталися назад. Результати комп'ютерного моделювання глобальної циркуляції в атмосфері Титану показали, що температура поступово знижувалася із півдня на північ, де в момент висадки зонду була зима [730]. По цій причині, через відмінності в умовах нагрівання супутникової поверхні, відмічалася значна різниця у тиску між протилежними півкулями. Адже південна півкуля у той момент була обернена до Сонця.

Вся атмосфера Титана обертається у той же бік, що й сам супутник в цілому, проте суттєво швидше. Це явище називається супер-ротація і дещо ріднить супутник Титан із планетою Венера [727, 731].

В тропосфері Титана метанові хмари – дуже динамічні: вони виникають буквально за півгодини внаслідок підйому повітря від середньої тропосфери на рівень тропопаузи; там не виключена і наявність етанових хмар (наприклад, подібно хмара спостерігалась узимку у північній півкулі на широтах 50-70° на всіх спостережуваних довготах). У видимій ділянці спектра протяжний серпанок з хмар пропускає до самої супутникової поверхні майже 10% від падаючого світла. Це дає майже у 1000 разів меншу освітленість ніж це спостерігається в полудень на Землі.

Відмітимо, що під впливом сонячного ультрафіолету у верхній атмосфері Титану, після серії хімічних перетворень, із метану й інших вуглеводнів та азоту цілком можуть бути сформовані досить крупні молекули. Ця органічна речовина у концентрованому вигляді дуже схожа на темну смолу. Саме вона випадає на поверхню Титана у вигляді своєрідної аерозольної мряки – толіну. Розрахунки показали, що протягом 1000 років може накопичитися шар таких відкладень товщиною до 1 мм; а за мільйон років – його набереться аж до 1 м. Проте зрозуміло, що такий шар розташовуватиметься по Титану дуже нерівномірно. Адже існують атмосферні опади у вигляді метановий дощ. Він іде час від часу з метанових хмар і змиває чорну накопичену органіку з підвищень, залишаючи їх крижані масиви світлішими. Незначна димка, видима на зображенні поверхні Титана (рис. 8.38) в місці посадки апарату – це метановий туман. Також там були зареєстровані падаючі «сніжинки», які періодично з'являлися в полі зору.

Ще із наземних спостережень було показано, що хмари появляються на Титані при зміні сезонів, тривалість кожного з яких триває понад 7 років. Хоча сучасні моделі циркуляції атмосфери не виключають періодичності хмарової активності (тривалістю близько 25 років з перервами в 4-5 років). Як видно з рис. 8.34, температурний мінімум (у тропопаузі) в атмосфері Титана припадає на висоту ~44 км ($T=70$ К і тиск 0,11 бар). Нижче вона починає рости й досягає біля поверхні ~94 К, а вище лежить стратосфера, у якій температура росте із висотою: і на висоті в 250 км вона сягає 186 К, а вище – знову починає падати. В атмосфері Титану на висотах між 500 і 1000 км розташовано аж шість так званих інверсійних шарів із різницею температур між ними близько 20-30 К; на висоті 1500 км температура складає ~140 К.

Заряджені частинки у магнітосфері Сатурна, сонячний вітер та космічні промені викликають іонізацію атмосфери Титана та утворюють іоносферу, а максимум електронної концентрації припадає на висоту 60 км. Нарешті, було виявлено взаємодію між магнітосферою Сатурна й атмосферою Титана, що проявляється у вигляді газової хмари, яка слідує за супутником його орбітою навколо Сатурна. Таким чином, своєрідні тори виявлені не лише в Іо та Енцелада, але й у Титана.

Механізми перетворення поверхні на Землі і на Титані виглядають схожими: річкова ерозія, вітрове перенесення речовини з формуванням дюн (рис. 8.39), вилив лави з вулканічних куполів, підняття гірських хребтів уздовж розломів кори тощо. І навіть

основний хімічний компонент атмосфери на Землі й Титані співпадає: це азот. Проте хімічний склад інших елементів різко відрізняється від їх земних аналогів. Роль кам'яних гірських порід там відведена водному льоду [18], а роль води – виконує рідкий метан. Яскраві плями в темних озерах вважають островами різних розмірів.



Рис. 8.39. Гряди дюн на екваторі (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Ще у 1994 р. спостереження на Космічному телескопі Хабла на передній півкулі Титана виявили величезний континент та велику кількість темних деталей. Вони були названі морями і, згідно модельних розрахунків, можуть складатися на 70% з етану, на 25% – зі метану та на 5% – з розчиненого в них азоту. Але найкраще структура поверхневого шару була вивчена за зображеннями КА «Кассіні», радар якого сканував приблизно 60% усього північного приполярного регіону (на широтах більше 60° пн. ш., екваторіальну область та значну ділянку навколо південного полюса).

На зображеннях чітко проявляються: кратерні утворення (хоча й зі значно меншою насиченістю, ніж на інших супутниках), гірські хребти, тектонічні розломи, безліч дивних темних (моря, озера) і яскравих плям, руслоподібні утворення з численними розгалуженими притоками, звивини, окремі брили тощо.

Велика яскрава область північної півкулі назвали Ксанаду (рис. 8.40, ліворуч), яку вважають не гірським хребтом, а чимось плоским, можливо навіть морем. Малу насиченість ударними кратерами пов'язують із ерозією поверхні (рис. 8.40, праворуч), перенесеннями речовини вітрами (з формуванням дюн) тощо.

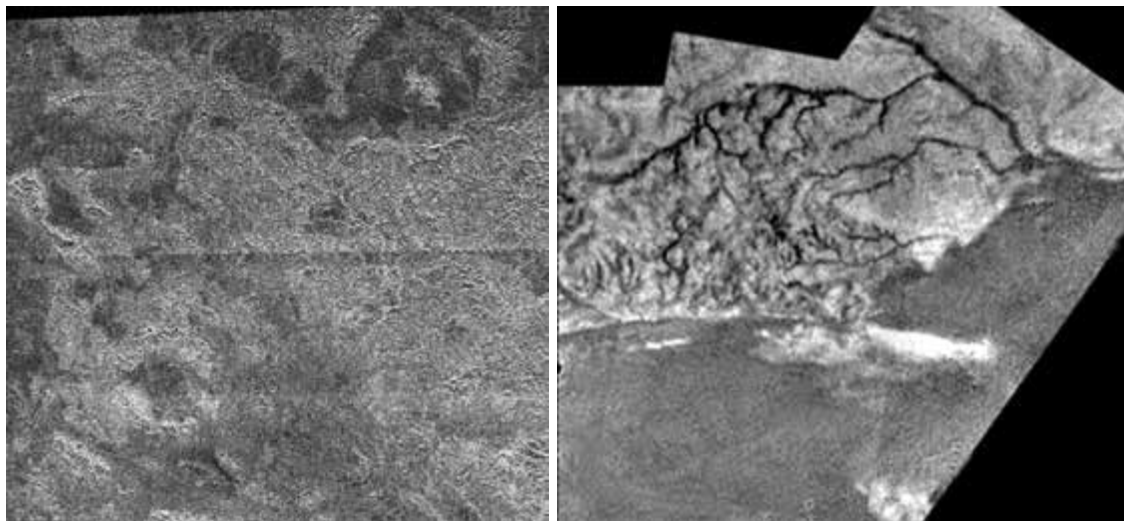


Рис. 8.40. Ліворуч – радарне зображення області Ксанаду. Праворуч – річкоподібний ландшафт Титана шириною ~5 км (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Деякі западини виявилися трохи підсушеними, або такими, що ніколи не заповнювалися рідиною повністю, або ж рідина з них вже давно випарувалася, але вони мають чіткі краї. Це, можливо, пов'язано із циркуляційними процесами.

Близько п'ятнадцяти темних областей не виявляють чітких слідів ерозії та нагадують земні кальдери, або ударні басейни, а обмеження розмірів і форм свідчить про імовірне їх вулканічне походження. У деяких із озер – береги й краї досить круті, та вирізняються підвищено радіояскравістю.

Скоріше всього, ці «водойми» заповнені метаном [722]. Випаровуючись з поверхні, саме він може формувати хмарність, з якої потім регулярно випадає дощем [726]. Опади живлять [734] численні притоки й річки, які стікають в озера між крижаними підвищеннями.

На приведеному на рис. 8.40 (праворуч) фото чітко видно русло річки, її притоки і характерну берегову лінію. Тобто, даний «прибережний» ландшафт утворюють ділянки світлішої «суші», порізані руслами метанових (і етанових) річок з численними притоками і розгалужену річкову дельту. На знімку видно навіть сліди виходу річок з берегів; це сліди добре знайомих на Землі «повеней».

Звивисті канали направлені до рівної темної частини знімка. Тому відразу ж припускали, що це берег моря, чи озера. В прибережних метанових «водах» видно і ряд островів. Ретельніша обробка зображень і вивчення результатів інших експериментів можуть привести і до дещо інших висновків. Темніші ділянки – це, швидше за все, рівнинні ділянки, покриті звичайними для Титана опадами. Руслу річок лише іноді наповнюються рідким метаном, який потім заповнює більш обширні басейни. На відміну від земної води, метан порівняно швидко випаровується і знову переходить в атмосферу [726]. Кожен наступний сезон злив і повеней змиває опади й виносить їх в низини. Виконані зондом «Гюйгенс» оцінки показали, що найбільш поширеним вуглеводнем на Титані має бути етан (C_2H_6), а рідина може складатися до 70% із етану, на 25% із метану та розчиненого у них азоту (близько до 5%).

На радарних знімках озера й моря мають вигляд дуже темних ділянок з гладкою поверхнею (наприклад, рис. 8.41, ліворуч). Темнота свідчить про те, що речовина, з яких складаються ці ділянки, добре поглинає радіохвилі, майже не даючи відбивання. Подібні параметри характерні для рідин. Але для доказу її присутності саме в цьому місці лише одного такого факту ще недостатньо.

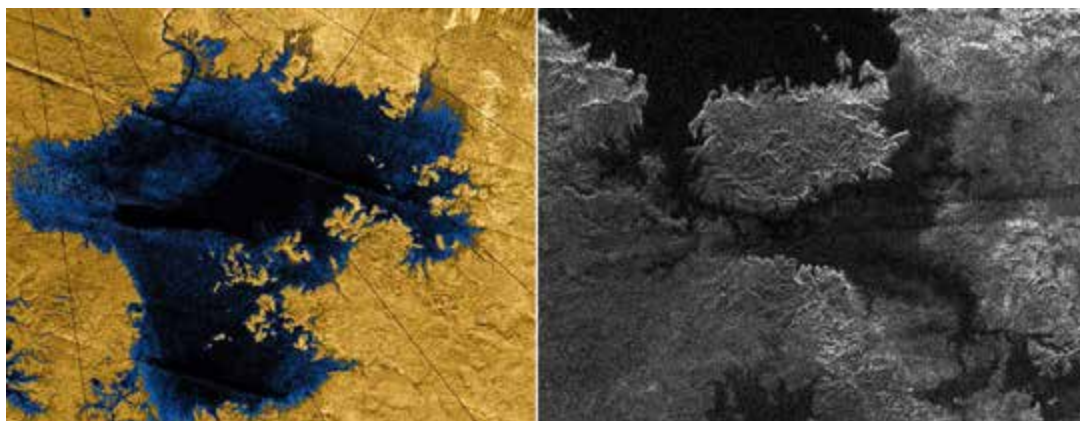


Рис. 8.41. Водойми біля північного полюса Титана: ліворуч – озеро з рідкого метану (http://www.beugungsbild.de/huygens/titan_shoreline.html); праворуч – море з великим островом (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery).

Про те, що ці темні плями дійсно заповнені рідиною, безперечно свідчать контури берегової лінії, типові для водоймищ: затоки, протоки, наявність світлих островів з порізаним рельєфом. Поблизу берегів ці ділянки світліші, що вказує на менші глибини. А в центральних частинах, де зображення зовсім чорне, глибина по

розрахунках сягає декількох десятків метрів. Звивиста форма річок, що впадають у моря, також вказує на те, що це – сліди потоків рідини. Проте довгий час залишалося невирішеним питання про те, чи є темні ділянки рідкими, чи замерзлими. Відповідь отримали улітку 2008 р. після обробки зібраних протягом піврічних спостережень даних з ІЧ спектрометром «Кассіні». Цей прилад дозволяв дистанційно визначати хімічний склад ділянок поверхні по поглинанню і відбиванню ними сонячного світла в різних ділянках спектра. Саме цим методом в одному з озер виразно виявлена наявність рідкого етану – вуглеводневого з'єднання, яке разом з метаном і розчиненим у ньому азотом скоріше всього й заповнює водоймища на Титані.

По цих розрахунках, найголовнішим компонентом озер і морів має бути метан. Але його ідентифікувати дистанційним зондуванням важко через наявність постійного метанового туману в атмосфері. Проте, оскільки фізичні умови біля поверхні Титана близькі до потрібної точки фазового стану метану, то висловили припущення про наявність там озер та морів саме з рідкого метану.

Після ретельного аналізу отриманих знімків Титана з'ясувалося, що на поверхні супутника в момент посадки зонда – стояли калюжі з рідкого метану. Це могло говорити про те, що там недавно випав дощ із метану. Додаткові дослідження в районі посадки зонда показали, що русла річок і водоймища наповнюються тільки після дощу, а потім висихають. Опади на поверхню Титана випадають у вигляді не дуже рясних дощів із метану. По характеру випадання ці дощі носять сезонний характер [730]. ІЧ знімки, зроблені зі встановленим у Чилі Дуже Великим Телескопом (ДВТ), показали, що на західній частині передгір'я найбільшого континенту Титана – Xanadu, практично постійно йде невеликий дощ.

На більшості знімків, отриманих телескопами Кека і ДВТ, метанових хмар видно більше на ранішній частині Титана, яка при обертанні першою починає появлятися на Сонці. При цьому, у час спостережень, вони конденсувались уздовж берегової лінії материка Xanadu, і потім випадали дощами.

Залежно від конкретних умов, метан або випадає дощем на поверхню, або покриває поверхню густими туманами. Ці дощі випадають (або ж там утворюються тумани) після полудня, підпорядковуючись добовому ритму.

Оскільки Титан обертається навколо осі майже за 16 земних діб, то з ранку до полудня на супутнику проходить майже 72 години. При дослідженнях із зонда «Гюйгенс» під час спуску вдалось виявити, що на поверхні Титана присутні елементи, які з'являються тільки при

наявності опадів. Радарами «Кассіні» також були виявлені на поверхні супутника озера й моря, як існуючі на момент спостережень, так і висохлі.

Тому були запропоновані гіпотези про те, що виявлені утворення хмар якраз і можуть брати участь у їх заповненні. Тобто, саме дощі є домінуючим механізмом повернення метану на поверхню з атмосфери Титана. І це може бути частиною своєрідного круговороту метану, аналогічно до круговороту води на Землі [721].

На багатьох зображеннях Титана, переданих з «Кассіні» та «Гюйгенса» видно ландшафти, які, як і на Землі, активно взаємодіють з атмосферою [726]. Проте зрозуміло, що все це відбувається у зовсім інших умовах ніж там, де за це відповідає вода й дощ з водяних хмар. На Титані ми маємо справу із так званими кріогенними твердими утвореннями, по яких протікають холодні зріджені гази. Однак разом вони показують місця у Сонячній системі, які на отриманих зображеннях є надзвичайно знайомі за виглядом (див., наприклад, рис. 8.40 і 8.41). Саме це дало підстави припускати, що світлі регіони на знімках є піднесеностями, порізаними річковими долинами, по яких метанові потоки збігають до темніших низин. Тобто, подібні структури русел і притоків розвиваються саме там, де по схилах стікають атмосферні опади. Ці річкові басейни на Титані можна назвати метанозбірними, по аналогії з водозбірними басейнами на Землі.

Вважається, що з надр газоподібний метан потрапляє в атмосферу при вулканічних і тектонічних процесах [763]. Потім він частково перетворюється на інші вуглеводневі з'єднання під впливом сонячних променів, а частково конденсується в хмари, з яких краплини рідкого метану випадають дощем на поверхню. Стікаючи в низинні регіони, метан утворює там озера й моря. З поверхні цих резервуарів він знову випаровується, поступаючи в атмосферу і беручи участь у подальшому круговороті.

Радарні дані від 22.07.2006 показали існування величезних територій, заповнених рідиною. Вважається, що темні області через їх малу відбивну здатність на радарних зображеннях і через морфологічну схожість на водоймища є басейнами озер, а поєднані з ними канали й обширні топографічні пониження – моря (див. рис. 8.41). Ці дані виявили 75 озер діаметром від 3 до 70 км кожне. Деякі із озер були трохи підсушеними. Такі висохлі водойми мають чіткі краї, які добре відсвічують на радарі.

Різна наповненість озер говорить про те, що вони непостійні і мають відношення до певних циркуляційних процесів на Титані.

Приблизно 15 темних областей не мали навіть чітких свідчень ерозії. Вони дуже сильно нагадують земні кальдери, або ударні басейни. Але їх розміри і форма говорять про те, що навряд чи вони утворилися унаслідок ударних подій. Більш імовірною для них є вулканічна природа їх походження. У декількох із цих озер існують досить круті береги з краями, які також добре помітні по збільшенню яскравості на радарних знімках. Це говорить про те, що вони можуть мати дренажні системи, як і багато відомих озер на Землі. Такі «водовідведення» були знайдені для багатьох водойм на Титані.

Яскраві плями в темних озерах є різними за розмірами островами і вони не можуть бути айсбергами, оскільки більшість можливих там хімічних матеріалів не зможуть плавати на поверхні зріджених вуглеводнів. Темні плями на радарних знімках можуть бути і слідами від матеріалу меншої щільності, який скупчився в западинах. Але знайдені у північній півкулі значні за розмірами озера стали серйозним доказом все ж таки присутності циклу круговороту рідини на Титані.

Саме 29.5-річний цикл обертання Сатурна навколо Сонця і відповідна зміна сезонів [716] дозволяє пояснити те, що під час роботи «Кассіні» в північній півкулі йшли сильні дощі, і там було багато озер. Тоді як у південній півкулі в цей же час водоймища були практично висушені.

Тобто, інструменти на борту «Кассіні» знайшли наступне підтвердження наявності на Титані в його північних широтах морів, заповнених рідким метаном і етаном. Причому, більшість із водойм були суттєво більшими, ніж моря на Землі. Деякі з них досягали розмірів до 100000 км². Радар «Кассіні» зафіксував найбільше із таких темних місць на поверхні саме біля північного полюса супутника (рис. 8.41, праворуч).

Зроблені апаратурою «Кассіні» знімки поверхні у видимому й ІЧ діапазонах дозволили уточнити хімічний склад місцевості навколо північного полюса, та підтвердили наявність там рідкого метану й етану. Великі темні ділянки розповсюджуються більш ніж на 1000 км від полюса, інколи аж до 55° пн. ш. Присутність таких морів підтвердила наявність круговороту метану на Титані [5]. На початок 2008 р. радар «Кассіні» просканував до 60% північного полярного регіону, який знаходився північніше 60° по широті. Виявилося, що 14% з цієї області вкрито озерами з вуглеводнів [738].

Після цього радаром «Кассіні» було розпочато дослідження раніше не вивченого регіону навколо південного полюса. Це дозволило детально розглянути відмінності між північним і південним

полярними регіонами. У 2009 р. у південному полярному регіоні знайшли лише три невеликих озера і було відмічено декілька малих плям, які знаходилися біля 70° пд. ш. Іншу цікаву структуру достатньо великого розміру віднесли до елементів пониження. Це можна було інтерпретувати як басейн висохлого озера, порізаного системою каналів, що живили його. Й решта частин цієї області показали велику схожість з відповідними частинами північних навколо полярних регіонів.

По схожості багатьох елементів слід говорити про те, що полюси Титана знаходяться під впливом погодних умов, які подібно до великих планет, сезонно змінюються [719]. У момент цих спостережень у південній півкулі Титана, як і в самого Сатурна, розпочався весняно-літній сезон. Тривалість кожного сезону там складає близько 7.5 років, або $1/4$ від сатурніанського року у майже 29.5 земних років. Систематичні спостереження за цими сезонними змінами, можуть дозволити нам відтворити точніші картини процесів, що відбуваються на Титані. Адже на Землі озера наповнюються в понижених рівнях, або створюються на місцях, де локальна топографія місцевості перетинається з ґрунтовими водами. Саме тому, за деякими пропозиціями вважається, що пониження, в яких знаходять озера на Титані, можуть мати відношення до вулканізму, або ж до ерозії поверхні так званого карстового типу.

В останньому випадку рідина може акумулюватися лише в певних місцях [726]. Подібні карстові водойми достатньо поширені й на Землі. Озера, які були знайдені на Титані, мають величезний інтервал наповнюваності. Це говорить про їх еволюцію, а також про те, що вони є ланками в ланцюзі, подібному до земного круговороту води. Такий факт робить Титан унікальним тілом, серед тих, що знаходяться далеко у Сонячній системі.

Цікавим є те, що видимі на Титані водойми сильно відрізняються за розміром (від 1 км^2 до 100000 км^2). Але на більше 70% обстеженої території більше знайдено великих озер. Із 700 знайдених озер переважна більшість мають площі понад 26000 км^2 . Найбільша за розміром водойма Море Кракен (за ім'ям морського чудовиська-гіганта із норвезьких міфів) досягає у поперечнику 1200 км при площі майже 400000 км^2 . Ці озера мають складні берегові лінії, на яких закінчуються досить розвинені системи каналів. Вони охоплюють тисячі квадратних кілометрів поверхні Титана.

Якщо у 2008 р. у північних широтах вище 60° поверхня Титана була буквально поцяткована численними озерами розміром від одиниць до сотень кілометрів, то в той же час у південній полярній

області знайдено лише одне велике (протяжністю до 230 км) і три невеликі озера, а також багато сухих округлих западин, схожих формою на північні озера.

Причина такого різкого контрасту ландшафтів навколо протилежних полюсів криється, найімовірніше, у відмінності природних умов між зимовим і літнім сезонами. Так, ми передбачаємо, що після 2023 р., коли в південній півкулі Титана буде кінець зими, а в північній – кінець літа, карта озер і морів знову зазнає кардинальних змін. Нагрів північної полярної області приведе до випаровування озер, перенесення метану в газоподібному стані до південного полюса і його випадання там у вигляді дощів, які заповнять висохлі до цього улоговини. А біля північного полюса можуть зберегтися лише залишки найкрупнішого моря, але вже у вигляді декількох озер скромних розмірів.

Також відмітимо важливий факт зафіксованого у 2008 р. зрушення морфологічних деталей зі своїх місць [728] по поверхні майже на 30 км за 2-3 роки. Адже це вказує на те, що глибоко під крижаною поверхнею Титана може існувати океан з аміаку й води. Цей підземний океан має містити величезні запаси води, які знаходяться під щільним шаром льоду.

Яскраві плями у цих темних озерах є островами. Вони не можуть бути чимось схожим на айсберги, адже більшість із можливих там матеріалів не можуть плавати на поверхнях із рідких вуглеводнів, а самі темні плями складаються з матеріалів меншої щільності, які скупчилися в западинах поверхні. Вважається, що ті фізичні процеси, унаслідок яких було сформовано рельєф Титана, є дуже схожими на земні.

Більшість вершин у гірських районах мають висоти ≈ 120 м, а найвищі – 1930 м. Ряд кратерних структур мають морфологію, подібну до ударних кратерів на скелястих планетах, з яскравими зубчатими обідками, а їх нечисленність вказує на молодість поверхні Титана.

Вважається, що вік кратерів з діаметрами меншими 35 км менший 200 млн. років, а більшими – дещо старіші та розповсюджені по поверхні неоднорідно. Так, на області Ксанаду їх щільність у 2-9 разів є більшою, ніж на решті поверхні. Тоді як в екваторіальних областях (на дюнах) – набагато нижча. Передня півкуля дещо більше насичена кратерами, що пов'язують із ерозією. До ударних відносять кратер Ксе (діаметр ~ 29 км, висота валу – 300-500 м, плоске дно з центральним піком і радіально викинутою речовиною) (рис. 8.42), Сінлап (діаметр 80 км, внутрішній вал розташований по колу

діаметром близько 40 км) і Менрву (рис. 8.43): діаметр 444 км, східний вал піднімається майже на 300 м, його дно знаходиться на 500 м нижче оточуючої поверхні, а його центральна область піднімається на 450 м вище за дно).

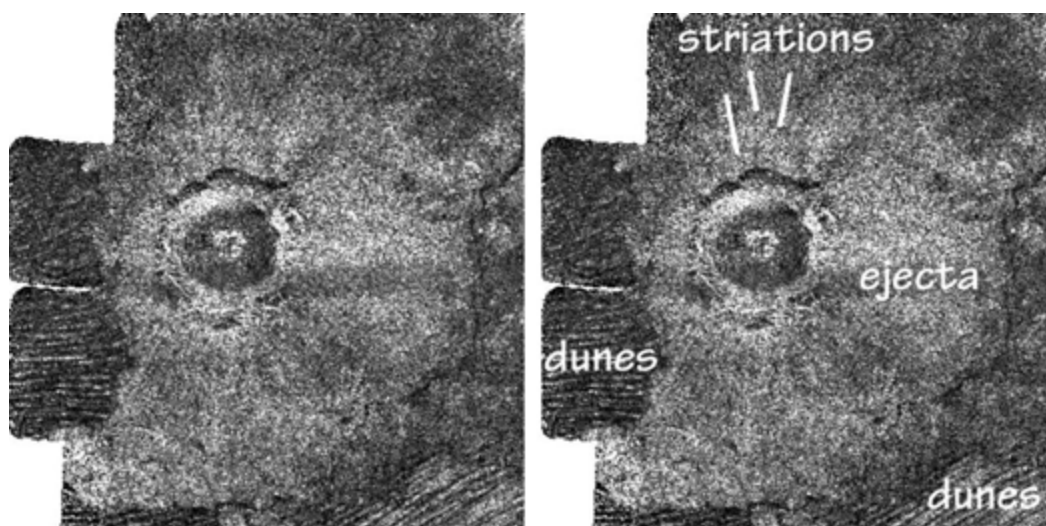


Рис. 8.42. Кратер Ксе на Титані. Північ знаходиться вгорі [27].

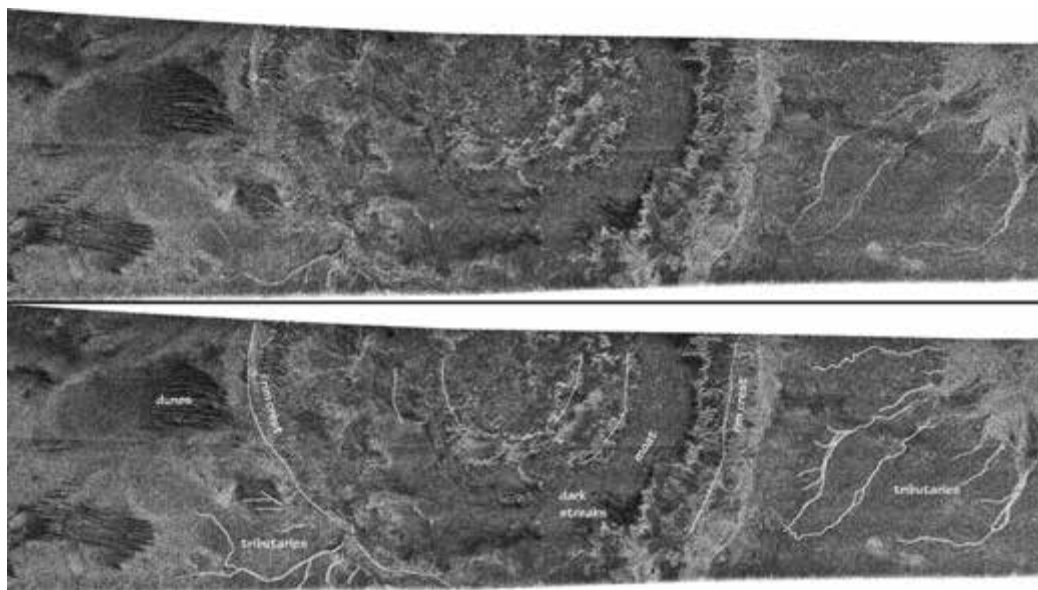


Рис. 8.43. Багатокільцевий ударний кратер Менрва ($D=444$ км) на Титані (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery)

Дослідження показують, що протилежні полюси Титана знаходяться під впливом погодних умов, які періодично змінюються. Зараз на південному полюсі Титана літо і тривалість сезону тут складатиме близько 7.5 років. Тобто, близько $1/4$ від сатурніанського року у ~ 29.5 земних років. Після спостережень за такими сезонними

змінами [730], було запропоновано ряд механізмів, які можуть формувати подібні вуглеводневі водоймища на супутнику. На Землі озера наповнюються в низинах, або створюються на місцях, де локальна топографія місцевості перетинається з ґрунтовими водами. Озера, які були знайдені на Титані, мають величезний інтервал наповнюваності, що говорить про їх еволюцію, а також про те, що це ланки в ланцюзі, подібному до земного круговороту води.

Комбінація різних радарних досліджень допомогла встановити факт про те, що озера, ймовірно, можуть бути зв'язані між собою, і тому є частиною одного великого моря. Після обробки спостережень 2008 року з інфрачервоним спектрометром КА «Кассіні», було виявлено наявність рідкого етану. Пропонувалося, що саме це вуглеводневе з'єднання разом з метаном і розчиненим у ньому азотом, скоріше всього, й заповнює водоймища на Титані. По розрахунках, етан складає близько 10% об'єму всієї рідини.

Таким чином, основною причиною різкого контрасту у ландшафтах навколо протилежних полюсів, найімовірніше, є відмінності природних умов між зимовим і літнім сезонами [730]. Можна передбачати, що у момент рівнодення у 2023 р. у південній півкулі Титана буде кінець зими, а в північній – кінець літа. І саме тоді існуючі карти розміщення озер і морів зазнають кардинальних змін. Адже нагрів північної полярної області приведе до випаровування там озер, перенесення метанового газу до південного полюса, і його випадання там дощами. Ці дощі заповнять висохлі до цього південні улоговини. А поблизу північного полюса збережуться лише залишки найкрупнішого моря і кілька озер скромних розмірів. І було б дуже доречно у 2022-2025 рр. провести відповідні спостереження в ІЧ діапазоні з телескопами Кека та Дуже Великим телескопом.

Використання моделі з роботи [44] свідчить, що кратери з діаметром менше 35 км в умовах Титана є молодшими 200 млн років; більші кратери – є старішими.

Відмічено незначну перевагу кількості кратерів на передній півкулі порівнянні з веденою. Тоді як полярні області досліджені були все ще недостатньо. Це вказує на те, що ерозійні процеси на Титані «згладжують» існуючі ударні структури. Тому такі динамічні атмосферні процеси давно вже знищили більшість із ударних кратерів, які могли утворитися на поверхні супутника у час первинного бомбардування по поверхні.

Розпізнавання кратерів ударного походження здійснюється по текстурі поверхні в середині кратерів та по формі валу викинутої речовини. Згідно радарних спостережень, вся поверхня таких кратерів

часто є досить темною. Адже зазвичай вони заповнені опадами, або потоками лави. Вулканізм також утворює круглі депресії, котрі інколи бувають схожими на ударні структури.

Більшість кратерів на Титані дуже схожі за морфологією з ударними структурами на інших тілах Сонячної системи. Наприклад, кратер Ксе (рис. 8.42) дуже схожий на ударний кратер діаметром до 29 км. Він має піднятий на майже 500 м вал, плоске заглиблене на 800 м дно з центральним піком, та радіально розташовані викиди речовини. Наявність у кратері центральної вершини вказує на те, що ці піки сформовані у льодяній корі Титана.

На рис. 8.44 показано кратер Sinlap з діаметром 79 км. Його морфологія також вказує на ударне походження. Адже контур цього валу є круглим з короткими лінійними сегментами, зруйнованими ерозією потоків рідини. Але на радарних зображеннях центрального піку немає. Проте інфрачервоні зображення з «Кассіні» вказують на існування там нецентральної світлої плями, котра могла б бути невеликим підвищенням. До того ж, кратер Сінлап має аж два чіткі вали. А вони могли утворитися лише після двох одне за одним вивержень. Внутрішній вал розташований по колу з діаметром до 40 км і є трохи темнішим, ніж дещо віддалений другий вал.

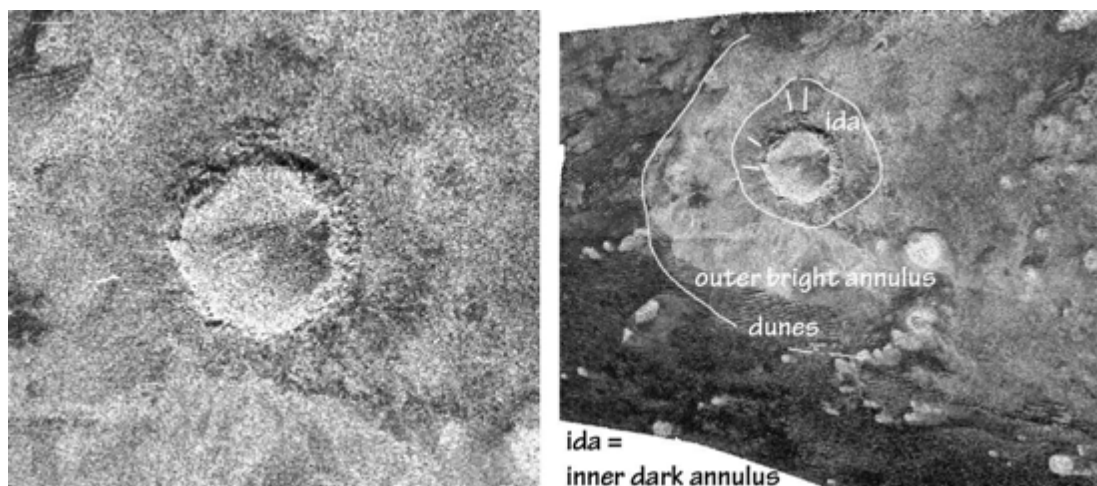


Рис. 8.44. Кратер Сінлап (D=79 км) – частково еродована ударна структура зі слабкими радіально направленими виверженнями [720].

Тобто, скоріше всього, ми маємо справу з першим виверженням після ударної події. Тоді як повторне друге виверження відбувалося дещо пізніше. І воно здійснювалося через ослаблену першою подією кору супутника. Таким чином, первинна ударна подія цілком може спровокувати повторне виверження рідкого матеріалу з-під доволі товстої кори супутника. А існування не центральної світлої плями

вказує на те, що ударні процеси цілком можуть згенерувати наявність активного вулканізму як у місці падіння, так і поруч з імпактними структурами. Характер вивержень із кратерів Ксе і Сінлап вказує на те, що кратер Ксе є морфологічно молодшим.

Найбільшим утворенням ударного походження на поверхні Титана може бути кратер Менрва з діаметром 444 км (рис. 8.43). Аналіз даного зображення вказує на те, що даний ударний кратер перекрив русло річки, яка текла з лівого нижнього кута у верхній правий кут. Східний вал кратера піднімається майже на 300 м над середнім рівнем, а його дно знаходиться на 500 м глибше. Центральна область піднята на 450 м над дном кратера. Найвища точка центральної області має висоту, однакову із східним валом.

Вік зареєстрованих кратерів знаходиться в межах від кількох сотень мільйонів до одного мільярда років. На поверхні супутника реєстрували цікаві швидкі зміни. Так, на знімках поверхні Титана, отриманих у 2008 р. було виявлено факт, що зафіксовані кілька років тому морфологічні деталі на поверхні, зрушили із своїх місць майже на 30 км. Причому вони зміщувалися зовсім не так, як прогнозувала стандартна модель обертання. Це явище можливо пояснити тим, що під крижаною поверхнею Титана може існувати океан із води та аміаку. До такого висновку прийшли із аналізу даних, отриманих зондом «Кассіні». Такий підземний океан міг містити величезні запаси води, які знаходяться під потужним шаром льоду. Тому вважають, що Титан може на половину складатися із замерзлої води. І саме ці суміші та розчини води та її пара, можуть періодично вивергатися в атмосферу через тектонічні розломи і тріщини у корі супутника.

9. Чи є життя в Європі та в (на ?) інших супутниках ?

В 1971 р. Дж. Левіс [397] запропонував стаціонарну теплову модель льодових супутників у яких вихід енергії за рахунок радіоактивного розпаду довгоживучих ізотопів калію, урану і торію в їх надрах врівноважується радіаційними втратами з поверхні. Було показано, що ядро має складатися з гідратованих силікатів та окислів заліза, окутаних дуже протяжними оболонками зі збагаченою аміаком рідкою водою [744, 773] і відносно тонкою оболонкою з водяного льоду.

Детальніший розгляд проблеми показав, що: Каллісто є тілом з корою із суміші силікатів і льоду товщиною ≈ 200 км, мантією з рідкої води до 1000 км і силікатним ядром з радіусом 1200 км; Ганімед має кору з льоду до 100 км, мантію з рідкої води 400-800 км і велике силікатне ядро радіусом 1800-2200 км; Європа має льодяну кору близько 70 км, мантію з рідкої води до 100 км і силікатне ядро радіусом 1400 км. Є вода і в Енцеладі [676].

Виходячи з цих моделей і базуючись на аналогії з арктичними організмами автори роботи [71] оцінили кількість біомаси, яку ця енергія може підтримувати. Це хоча й не може розв'язати проблему існування життя, але наводить на думку, що в супутнику Європа можуть бути обмежені в просторі і часі області, у яких фізичні умови знаходяться в межах пристосування схожих до земних життєвих форм.

Оскільки для океану Європи зумовлене сонячним освітленням джерело енергії (фотосинтезу, під дією якого, за однією з гіпотез, виникло життя на Землі) дуже слабе, то було запропоновано механізм хімічного синтезу під впливом тепла (хемосинтез), джерелом якого є сполуки сірки що утворюються при дуже високій температурі під час підводних вивержень. Інколи зародження життєвих форм пов'язують з поглинанням світла мікроорганізмами в короткий період існування новоутворених тріщин у крижаному панцирі, існування яких в поверхневому шарі Європи не викликає сумніву.

Вулканічна активність могла створити необхідне тепло та важливі хімічні елементи необхідні для живих організмів. Мікробне життя могло потенційно вижити біля гідротермальних витяжок на Європі, точно так саме, як це відбувається сьогодні на Землі.

Оскільки людство завжди вірило у життя на інших від нашого небесних тілах, то не винятком є й деякі супутники планет. Так, ще у 1970-х роках дійшли висновку, що внутрішня будова супутника Юпітера **Європа** має такий вигляд: льодова кора (30-70 км), мантія з

рідкої води (90-100 км) та силікатне ядро радіусом 1400 км. Об'єм океану в Європі перевищує об'єми Світових океанів Землі і там спостерігаються припливи висотою до 30 м. Все це, за аналогією з арктичними організмами на Землі, дозволило Колоколовій Л. і Стеклову О. (ГАО АН України) та Рейнольдз з колегами (США) на початку 1980-тих років незалежно висловити свої припущення, що і в супутнику Європа можуть бути якось обмежені у просторі та часі області, в яких можуть бути присутніми певні фізичні умови у межах пристосування схожих до земних життєвих форм [138, 518, 569, 746].

Оскільки для океанів Європи зумовлене сонячним освітленням джерело енергії (фотосинтезу), під дією котрого, за однією з гіпотез, виникло життя на Землі, дуже слабе, то був запропонований механізм хімічного синтезу під впливом тепла (так званий хемосинтез), джерелом якого є з'єднання сірки, які утворюються при дуже високих температурах під час певних підводних вивержень та які використовують деякі мікроорганізми для підтримання своєї життєдіяльності в земних умовах.

Після роботи КА «Кассіні» до сонму можливих місць для зародження життєвих форм долучився і супутник Сатурна **Титан**. Його атмосфера містить метан. Оскільки навіть за його низької температури, знайдені запаси метану в атмосфері мали б зруйнуватися протягом ≈ 10 млн. років, то його запаси мусять постійного поповнюватися завдяки біологічним процесам, або за допомогою так званого процесу серпентизації. Останній механізм виникає без участі бактерій, але для нього необхідний глибокий та прохолодний водяний океан, навіть під корою із криги. Згідно моделювання, океан має містити близько 15% розчиненого там аміаку й багато органічних сполук, серед яких є й необхідні для виникнення примітивних форм життя.

Якщо при температурі Титана можуть співіснувати рідкий та газоподібний метан, то вода [152, 299, 322, 334, 571] й аміак мусять потрапляти до атмосфери тільки у якості вулканічних викидів, тоді яка водно-аміачний розчин, скоріше всього, є основою «лави» у холодних вулканів.

Існує думка, що хімічним складом атмосфера Титана нагадує земну в далекому минулому. Адже 3.5 млрд. років тому атмосфера нашої Землі також складалася із метану та аміаку й майже не містила потрібного нам кисню. Але, незважаючи на це, тоді все ж виникли амінокислоти, які зумовили появу на Землі перших біомолекул. Переносячи це на Титан, забарвлення у його атмосфері червоно-

оранжевого відтінку приписали своєрідній «грязі» (від грецького «толін»), яка може утворюватися в результаті фотосинтезу.

Моделі «метано-обігу» в атмосфері Титану передбачали наявність системи хмар, котрі можуть бути ключем до формування органіки на поверхні супутника і її різноманітності. Деякі наукові моделі показують, що життєві форми можуть існувати і не на водній основі. А оскільки Титан має досить потужну хімічно активну, багату органічними сполуками атмосферу, то це й підштовхнуло до додаткових припущень стосовно появи життя, або ж, щодо так званих прекурсорів для життя. Так, аналіз даних з місії «Кассіні - Гюйгенс» дозволив вказати на деякі аномалії в атмосфері супутника поблизу поверхні, які узгоджуються з присутністю виробництва метану організмами. Однак станом на липень 2013 р. прямих доказів про життя на Титані немає.

Вище ми вже відмічали, що у середині 1980-тих років активізувались роботи з розробки проектів побудови бази на Місяці [653, 654, 729, 743]. Реалізацію проекту розпочав КА «Клементина», який по дорозі до астероїда 1620 Географ протягом майже 2,5 місяців (19.02.-03.05 1994 р.) вів пошуки зокрема і місць на Місяці з ознаками існування води [655, 735, 738, 739]. Справа у тому, що через практичну відсутність атмосфери поверхневий шар Місяця безпосередньо стикається із вакуумом, а тому водяний лід швидко випарується, а завдяки низькій силі тяжіння, молекули води швидко втечуть у космос.

Проте, оскільки вісь обертання Місяця відхилена лише на $1,6^\circ$ від нормалі до площини екліптики, то можуть існувати постійно затінені регіони усередині багатьох кратерів навколо місячних полюсів, які мусять бути достатньо холодними (<100 K), що може запобігати істотній сублімації водного льоду за дуже тривалий час. Такі місця були виявлені КА «Клементина» в глибоких кратерах навколо південного полюса Місяця. Серед них дуже перспективним є гігантський кратер Aitken (діаметр – 2500 км і 12 км глибина в його найнижчій точці лише за 200 км до південного полюса), на дні якого існують багато дрібних кратерів та в яких температура завжди менша ~ 100 K. При таких температурах водний лід у кратері міг би, імовірно, існувати протягом мільярдів років.

Відзначимо, що меншою є затінена область біля північного полюса. Дані КА «Клементина» показали, що деякі області довкола південного полюса бувають освітленими лише протягом часу, який менше 10% щодо теоретично необхідного для випаровування льоду.

В подальшому НАСА розробило спеціальну програму дослідження складу місячної поверхні. Для її реалізації 7.01.1998 було виведено КА «Лунар Проспектор» на низьку полярну орбіту. За даними одного з експериментів з нейтронним спектрометром з 16.01 до 27.06.1998 були побудовані карти для теплових, надтеплових та швидких нейтронів. Аналіз цих даних для полярних районів привів до цікавого висновку щодо можливої наявності відкладень водяного льоду у так званих надто «холодних пастках» із товщиною близько 0.4 м і загальною площею 1850 км².

Дослідження місячного льоду актуальні з погляду створення місячної бази не лише для життєдіяльності космонавтів, але й як можливого джерела для ракетного палива. Докладні дослідження стабільності летких хімічних з'єднань у полярних регіонах на Місяці й Меркурії щодо можливої їх сублімації на поверхні в холодних пастках і тривалого там збереження показали, що подібні з'єднання можуть існувати в деяких резервуарах і під поверхнею, оскільки в цьому випадку основні механізми видалення летких хімічних з'єднань будуть менш ефективними при мікрометеоритному бомбардуванні, опроміненні космічними променями, сублімації тощо.

Оскільки теплопровідність поверхневого шару реголіту в екваторіальних районах в 40000 разів менша, ніж у кристалічного водного льоду, то наявність навіть 0,1% льоду у приповерхневому шарі ґрунту істотно зменшить різницю між середніми температурами на поверхні й на глибині 1-2 см. Приймаючи, що вихід летких з'єднань відбувається лише за рахунок сублімації льодів, було оцінено час випаровування льодів H₂O, SO₂, CO₂. Виявилося, що підповерхневі льоди, які складаються з цих з'єднань, на глибинах 1-2 м зберігаються протягом геологічного часу при температурах ґрунту менших 145, 105 і 80 К відповідно для кожного з них.

Отже, якщо температура в холодних пастках на глибині 1-2 см практично не відрізняється від температури поверхні, то до складу полярних льодів повинні входити H₂O, SO₂ та CO₂. Якщо ж у холодних пастках буде утворюватися теплоізоляційний шар, як і в екваторіальних районах, то температура на глибинах 1-2 м є на 50-60 К вищою, від існуючої на поверхні. Тому додавання до складу полярних відкладень льодів із SO₂ й CO₂ навряд чи є можливим.

Постійне бомбардування Місяця мікрометеоритами являється причиною того факту, що практично вся його поверхня закриється шаром дрібної роздробленої речовини (реголітом) товщиною у 9-12 м. За багато років утворилася злежала пориста маса, яка є добрим термоізоляційним матеріалом.

Вода, яку можуть доставляти кометні ядра і метеорити, здатна мігрувати до відносно безпечних для неї регіонів приполярних «холодних пасток», де й зберігається тривалий час – порівнянний з віком існування нашої Сонячної системи. Воду може утворювати і доставлений сонячним вітром водень в результаті хімічних реакцій з місячним реголітом, забезпечуючи, таким чином, інше потенційне джерело полярного льоду.

Дані нейтронного спектрометра КА «Місячний Розвідник» дозволили побудувати детальну карту наявності водню навколо місячних полюсів. Згідно цієї карти він існує тільки у холодних навколо полярних пастках. Навіть встановили, що у деяких із кратерів концентрація водню є достатньо високою і відповідає 1% у перерахунку на лід з води. Але це все ж недостатньо для того, щоб не дозволити утворитись водню при бомбардуванні протонами сонячного вітру реголітових зерен. Оцінено, що водяний лід реголіту товщиною до 2 м в приполярних районах може існувати понад 2 мільярди років і може бути перемішаний у місячному реголіті з концентрацією 0.3-1%.

Таким чином, після виявлення води, полюси Місяця стали ще одним цілком придатним місцем для початку освоєння супутника нашої планети. Відповідно до даних, переданих радаром, установленим на індійському апараті «Чандраян-1», в регіоні навколо північного полюса всього виявлено більше 600 млн. тон води. Переважна її частина знаходиться на дні багатьох місячних кратерів у вигляді потужних крижаних брил. Вода на Місяці - це не тільки джерело необхідної для людини рідини, а й сировина для виробництва кисню і ракетного водневого палива.

Воду було виявлено у більше ніж у 40 кратерах із діаметрами 2-15 км. Тобто можна впевнено стверджувати, що на Місяці вода не тільки є, але її там багато.

Список використаної літератури

1. Аврамчук В.В., Шавловский В.И. Оппозиционный эффект спутника Юпитера Каллисто для $\lambda\lambda 0.407\text{--}0.755$ мкм // Кинематика и физика небесн. тел. – 1988. – Т. 4, № 6. – С. 11–14.
2. Атаи А.А., Ибрагимов Н. Б. Исследование эмиссионных линий в спектре Ио // Астрон. вестн. – 1978. – Т. 12, № 1. – С. 27–33.
3. Ботвинова В. В., Кучеров В.А. Многоцветная поляриметрия галилеевых спутников Юпитера // Астрометрия и Астрофизика. – 1980. – Вып. 41. – С. 59–63.
4. Видьмаченко А.П. Абсолютная электрофотометрия кольца В Сатурна // В кн: Физика планетных атмосфер. Ред. Мороженко А. В. – Киев: Наукова думка. – 1981. – С. 132–138.
5. Видьмаченко А.П., Мороженко А. В., Клянчин А.И. Особенности морфологии и геологии поверхности спутника Юпитера Европы // Вісник астрономічної школи. – 2011. – Т. 7, № 1. С.117– 132.
6. Видьмаченко А.П., Мороженко А. В., Клянчин А.И., Шавловский В.И., Иванов Ю.С., Костогрыз Н.М. Асимметрия отражательных свойств полушарий спутника Юпитера Европы // Вісник астрономічної школи. – 2011. – Т. 72, № 1. С.133–144.
7. Гаррис Д.Л. Интегральная фотометрия и колориметрия спутников // В кн: Планеты и спутники. Изд- во ИЛ. М.: – 1963. – С. 222–305.
8. Джадж Д.Л., Карлсон Р. У., Ву Ф.М., Хартман У.Г. Наблюдения спутников Юпитера с помощью УФ– фотометра, установленного на КА «Пионер– 10, – 11» // В кн: Юпитер. I. Происхождение, Внутреннее строение, Спутники. – Мир. М.: – 1978. – С. 341–380.
9. Джевит Д., Клейна Ян., Шеппард С. Самые странные спутники в солнечной системе // В мире науки. – 2006. – № 11. – С. 22–29.
10. Джонсон Т., Пильчер К. Спектрофотометрия и строение поверхности спутников // В кн: Спутники планет. – М.: Мир. – 1980. – С. 267–305.
11. Довгопол А. Н., Лисина Л.Р. Светлая сторона Япета // Кинематика и физика небесных тел. – 1989. – Т. 5, № 2. – С. 38–44.
12. Довгопол А. Н., Шавловский В.И. Оптические характеристики галилеевых спутников Юпитера в спектральной области 0.457–0.792 мкм. I. Зависимость отражательной способности от орбитального фазового угла вблизи оппозиции // Кинематика и физика небесн. тел. – 1985. – Т. 1, № 4. – С. 29–36.
13. Довгопол А.Н., Шавловский В.И. Оптические характеристики галилеевых спутников Юпитера в спектральной области 0.457– 0.792 мкм. II. Зависимость отражательной способности от орбитального

фазового угла вблизи $\alpha = 6^\circ$ // Кинематика и физика небесн. тел. – 1986. – Т. 2, № 3. – С. 48–51.

14. Жарков В.Н., Козенко А.В., Маева С. В. Строение и происхождение спутников Марса // Астрон. вестн. – 1984. – Т. 18, № 2. – С. 83–99.

15. Консольманьо Г.Дж., Льюис Дж.С. Модели строения и тепловой истории ледяных галилеевых спутников // В кн: Юпитер. I. Происхождение, внутреннее строение, спутники. Ред. Т. Герелс. – Мир. М.: – 1978. – С. 301–322.

16. Кузьмин А. Д., Лосовский Б.Я. Измерения радиоизлучения спутника Юпитера Каллисто // Докл. АН СССР. – 1973. – Т. 211, № 4. – С. 804–805.

17. Мороженко О. В. Результаты спектрополяриметричних спостережень планет та Галілеєвих супутників Юпітера в протистояння 1986, 1988 та 1989 рр. // Кинематика и физика небесн. тел. – 2001. – Т. 17, №1. – С. 45–57.

18. Мороженко А. В. Эффекты когерентного рассеяния в поляризационных свойствах галилеевых спутников Юпитера? // Кинематика и физика небесн. тел. – 2008. – Т. 24, № 2. – С. 155–157.

19. Моррисон Д. Радиометрия спутников и колец Сатурна // Вкн: Спутники планет. Ред. Дж. Бернс. М.: Мир. – 1980. – С. 306–340.

20. Моррисон Д., Моррисон Н. Фотометрия галилеевых спутников // В кн: Спутники планет. Ред. Дж. Бернс. – М.: Мир. – 1980. – С. 402–417.

21. Спутники планет. – М.: Мир. – 1980. – 632 с.

22. Спутники Юпитера. 1. – М.: Мир. – 1985. – 264 с.

23. Спутники Юпитера. 2. – М.: Мир. – 1986. – 446 с.

24. Спутники Юпитера. 3. – М.: Мир. – 1986. – 342 с.

25. Чигладзе Р.А. Поляриметрическое изучение спутников Юпитера // Тр.Тбил.ун- та. – 1987. – Т. 270. – С. 240–247.

26. Чигладзе Р.А. Исследование поляризационных свойств галилеевых спутников Юпитера и планеты Уран: Дис. ... канд.физ.-мат.наук. – Абастумани: Абастум. астрофиз. обсерватория. – 1989–175 с.

27. Aglyamov Y. S., Schroeder D. M., Haynes M., Vance S. Significance of Near-Surface Ice Fracture for Radio Sounding of Europa's Ice // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P51C-2081.

28. Aglyamov Yury, Schroeder Dustin M., Vance Steven D. Bright prospects for radar detection of Europa's ocean // Icarus. 2017, Vol. 281, p. 334-337.

29. Ahern A. A., Radebaugh J., Christiansen E. H. Lineations on Paterae and Mountains on Io: Implications for Internal Stresses // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p. 2821.

30. Ahern A. A., Radebaugh J., Christiansen E. H., Harris R. A., Tass E. S. Global Lineations and Regional Structural Mapping of Io's Paterae and Mountains: Implications for Crustal Stresses and Feature Evolution // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2355.

31. Ahern A., Radebaugh J., Christiansen E. H., Harris R. A. Structural Mapping of Paterae and Mountains on Io: Implications for Crustal Stresses and Feature Evolution // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P31C-2073.

32. Ahern Alexandra A., Radebaugh Jani, Christiansen Eric H., Harris Ronald A., Tass, E. Shannon. Lineations and structural mapping of Io's paterae and mountains: Implications for internal stresses // *Icarus*. 2017, Vol. 297, p. 14-32.

33. Allen D.A., Murdock T.L. Infrared photometry of Saturn, Titan and its rings // *Icarus*. – 1971. – V. 14, No 1. – P. 1–2.

34. Allu Peddinti Divya, McNamara Allen K. Material transport across Europa's ice shell // *Geophysical Research Letters*. 2015, Vol. 42, Issue 11, pp. 4288-4293.

35. Anderson J.D., Lau E.L., Sjogren W.L., et al. Gravitational constraints on the internal structure of Ganymede // *Nature* – 1996. – V. 384, No 6609.– P. 541– 543.

36. Apt J., Carleton N.P., Mackay C.D. Methane on Titan and Pluto: new CCD spectra // *Astrophys. J.* –1983.– V. 270, No 1, Pt. 1. – P. 342–350.

37. Arlot J.-E., Saquet E., Robert V., Lainey V. The Phemu 2015 campaign of observations of the mutual events of the Galilean satellites of Jupiter // European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts, Vol. 9, id. EPSC2014-57.

38. Arlot, J. E., Saquet E., Emelianov N. The results of the 2015 campaign of observation of mutual events of the Jovian satellites // European Planetary Science Congress 2015, held 27 September - 2 October, 2015 in Nantes, France, Online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, id.EPSC2015-50.

39. Arridge C. S. A time-dependent anisotropic plasma chemistry model of the Io plasma torus // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P21E-07.

40. Artemieva N., Lunine J.I. Impact cratering on Titan. II. Global melt, escaping ejecta, and aqueous alteration of surface organics // *Icarus*.– 2005. – V. 175, No 2. – P. 522–533.

41. Bagenal F., Plasma conditions inside Io's orbit – Voyager measurements // *J. Geophys. Res.*– 1985. –V90, No E1. – P. 311– 324.

42. Bagenal Fran, Nerney Edward, Steffl Andrew Joseph. Io Plasma Torus Ion Composition: Voyager, Galileo, Cassini // *American Astronomical Society*. 2016, DPS meeting #48, id.402.04.

43. Bagenal Fran, Sidrow Evan, Wilson Robert J., Cassidy Timothy A., Dols Vincent, Crary Frank J., Steffl Andrew J., Delamere Peter A., Kurth William S., Paterson William R. Plasma conditions at Europa's orbit // *Icarus*. 2015, Vol. 261, p. 1-13.

44. Baines K.H., Drossart P., Momary T.W. The Atmospheres of Saturn and Titan in the Near– Infrared First Results of Cassini/vims // *Earth, Moon, and Planets* – 2005.– V. 96, No 3– 4. – P. 119–147.

45. Baines K.H., Yanamandra– Fisher P.A., Lebofsky L.A., et al. Near– Infrared Absolute Photometric Imaging of the Uranian System // *Icarus* – 1998. – V. 132, No 2. – P. 266–284.

46. Baker A.L., Baker L.P., Beshore E., et al., The imaging photopolarimeter experiment on Pioneer– 11 // *Science* – 1975.– V. 188, No 4187. – P. 468–472.

47. Ballester G.E., Moos H.W., Feldman P.D., et al. Detection of neutral oxygen and sulphur natriions near Io using IUE // *Astrophys. J.* –1987.– V. 319, No 1, Pt. 2. – L.33–L38.

48. Barber R.J., Miller S., Stallard T.J., et al. The United Kingdom Infrared Telescope Deep Impact observations: light curve, ejecta expansion rates and water spectral features // *Icarus* – 2007. – V. 187, No 1. – P. 167–176.

49. Bassis J. N. Why Europa's icy shell may convect, but ice sheets do not: a glaciological perspective // *American Geophysical Union*, Fall General Assembly 2016, abstract #P34A-02.

50. Battaglia S. M. Io: The role of Sulfide Droplet Nucleation in Pele-Type Volcanism // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015, in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.1044.

51. Battaglia Steven M., Stewart Michael A., Kieffer Susan W. Io's theothermal (sulfur) - Lithosphere cycle inferred from sulfur solubility modeling of Pele's magma supply // *Icarus*. 2014, Vol. 235, p. 123-129.

52. Bauer J.M., Grav T., Buratti B.J., Hicks M.D. The phase curve survey of the irregular saturnian satellites: A possible method of physical classification // *Icarus* – 2006. – V. 184, No 1. – P. 181–197.

53. Bauer J.M., T.L. Roush T.R., Geballe K.J., et al. The near infrared spectrum of Miranda: Evidence of crystalline water ice // *Icarus*. – 2002.– V158, No 1. – P. 178– 190.

54. Becker T. M., Retherford K. D., Roth L., McGrath M. A., Saur J., Hendrix A. R., Royer E. M., Raut U. Far-UV Spectral and Spatial Analysis from HST Observations of Europa // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P43B-2107.

55. Bell J.F., Cruikshank D.P., Gaffey M.J. The composition and origin of the Iapetus dark material // *Icarus*. –1985.– V. 61, No 2. – P. 192– 207.

56. Benner D.Ch., Fink U., Cromwell R.H. Image tube spectra of Pluto and Triton from 6800 to 9000Å // *Icarus*. – 1978.– V36, No 1. – P. 82– 91.

57. Berg J. J., Goldstein D. B., Varghese P. L., Trafton L. M. DSMC simulation of Europa water vapor plumes // *Icarus*. 2016, Vol. 277, p. 370–380.

58. Berge G.L., Muhleman D.O. Callisto: disk temperature at 3.71–centimeter wavelength // *Science*. – 1975. – V. 187, No 4175. – P. 441–443.

59. Bergstralh J.T., Matson D.L., Johnson T.V. Sodium D–line emission from Io: synoptic observations from Table Mountain Observatory // *Astrophys. J.*– 1975. – V. 195, No 3, Pt. 2. – L131– L135.

60. Bergstralh J.T., Young J.W., Matson D.L., Johnson T.V. Sodium Dine emission from Io: a second year of synoptic observation from Table Mountain observatory // *Astrophys. J.* – 1977. – V. 211, No 1, Pt. 2. – L51– L55.

61. Berisford D. F., Foster J., Poston M. J., Hand K. P. Cryogenic Ices Under Vacuum: Preliminary Tests Related to Sampling Material on Europa's Surface // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2998.

62. Berisford D. F., Furst B., Foster J., Hofmann A., Hand K. P. Penitent Ice on Europa? Laboratory Testing of Cryogenic Ices Related to Icy Moon Surfaces // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2581.

63. Bernstein M.P., Cruikshank D.P., Sandford S.A. Near– infrared laboratory spectra of solid H₂O/CO₂ and CH₃OH/CO₂ ice mixtures // *Icarus*. – 2005.– V. 179, No 4. – P. 527– 534.

64. Bertaux J.L., Belton M.J.S. Evidence of SO₂ on Io from UV observations // *Nature*. – 1979.– V282, No 5741. – P. 813– 815.

65. Beuthe Mikael. Tidal Love numbers of membrane worlds: Europa, Titan, and Co // *Icarus*. 2015, Vol. 258, p. 239-266.

66. Beuthe Mikael. Tides on Europa: The membrane paradigm // *Icarus*. 2015, Vol. 248, p. 109-134.
67. Bierson C. J., Nimmo F. A test for Io's magma ocean: Modeling tidal dissipation with a partially molten mantle // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2016, Vol. 121, Issue 11, p. 2211-2224.
68. Binder A.B., Cruikshank D.P. Evidence for an atmosphere on Io // *Icarus*. –1964.– V. 3, No 4. – P. 299– 305.
69. Black G.J., Campbell D.B., Carter L.M. Arecibo radar observations of Rhea, Dione, Tethys, and Enceladus // *Icarus*. – 2007.– V191, No 2. – P.702– 711.
70. Blair G. N., Owen F.N. The UBV orbital phase curves of Rhea, Dione, and Tethys // *Icarus*. –1974.– V. 22, No 2. – P. 224– 229.
71. Blanc M., Prieto B.O., Andre N., Cooper J. F. Joint Europa Mission (JEM): A multi-scale study of Europa to characterize its habitability and search for life // 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April 2017 in Vienna, Austria., p. 12931.
72. Blanco C., Catalano S. On the photometric variations of the Saturn and Jupiter satellites // *Astron. Astrophys.* – 1974.– V33, No 1. – P. 105– 111.
73. Blanco C., Catalano S. Photoelectric observations of Saturn satellites Rhea and Titan // *Astron. Astrophys.* –1971.– V. 14.– N1. – P. 43– 47.
74. Bland M. T., McKinnon W. B. Deep Faulting, Stress Release, and Mountain Formation on Io // 45th Lunar and Planetary Science Conference, held 17-21 March 2014. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p.2502.
75. Bland M.T., Showman A.P., Tobie G. The production of Ganymede's magnetic field // *Icarus*. –2008.– V. 198, No 2. – P. 384– 399
76. Bland Michael T., McKinnon William B. Mountain building on Io driven by deep faulting // *Nature Geoscience*. 2016, Vol. 9, Issue 6, p. 429-432.
77. Blankenship D. B., Grima C., Young D. A., et al. Understanding Europa's Ice Shell and Subsurface Water Through Terrestrial Aanalogs for Flyby Radar Sounding // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2888.
78. Bolkvadze O.R. Polarimetric observations of Io and Europe // *Observ. and Astrophys. Lab. Univ. Helsinki Rept.*– 1981, No 2.– P. 73– 80.
79. Bonfond B., Grodent D.C., Badman S.V., et al. The complex behavior of the satellite footprints at Jupiter: the result of universal processes? // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P33C-2144.

80. Boudjada M. Y., Galopeau, P. H. M., Sawas S., Lammer H. Remote sensing of the Io torus plasma ribbon using natural radio occultation of the Jovian radio emissions // *Annales Geophysicae*. 2014, Vol. 32, Issue 9, 2014, p.1119-1128.

81. Bouzaki M.M., Chadel M., Benyoucef Bo., Petit P., Aillerie M. Simulation of the outdoor energy efficiency of an autonomous solar kit based on meteorological data for a site in Central Europa // *AIP Conference Proceedings*. 2016, Vol. 1758, Issue 1, id.030049.

82. Brandt Pontus, Westlak Joseph H., Smith Howard T., Mauk Barry, Mitchell Don. Cassini ENA Observations of an Asymmetric Europa Torus and Implications for JUICE // *American Astronomical Society*. 2016, DPS meeting #48, id.517.08.

83. Bridge H.S., Belcher J.W., Coppi B., et al. Plasma observations near Uranus: Initial results from Voyager 2 // *Science*. –1986.– V. 233, No 4759.– P. 89– 93.

84. Briggs G.A. The radio brightness of Titan // *Icarus*. – 1974.– V. 22, No 1. – P. 48– 50.

85. Broadfoot A.L., Atreya S.K., Bertaux J.L., et al. Ultraviolet spectrometer observations of Neptune and Triton // *Science*. – 1989.– V. 246, No 4936. – P. 1459– 1466.

86. Brown R.A., Chaffee F.H., Jr. High– resolution spectra of sodium emission from Io // *Astrophys. J.*– 1974.– V187, No 3, Pt. 2. – L125– 126.

87. Brown R.H. Surface of Miranda: identification of water ice // *Icarus*. – 1984.– V58, No 2. – P. 288– 292.

88. Brown R.H. The Uranian satellites and Hyperion: new spectrophotometry and compositional implications // *Icarus*.– 1983.– V56, No 3. – P. 414– 425.

89. Brown R.H., Clark R.N., Buratti B.J., et al. Composition and physical properties of Enceladus' surface // *Science*. –2006.– V. 311, No 5766. – P.1425– 1428.

90. Brown R.H., Cruikshank D.P. The uranian satellites: surface compositions and opposition brightness surges // *Icarus*. –1983.– V. 55, No 1. – P. 83– 92.

91. Brown R.H., Cruikshank D.P., Tokunaga A.T., et al. Search for volatiles on the icy satellites // *Icarus*. –1988.– V. 74, No 3. – P. 262– 271.

92. Buratti B., Veverka J. Voyager photometry of Europa // *Icarus*. – 1983.– V55, No 1.–P. 93– 110.

93. Buratti B., Veverka J. Voyager photometry of Rhea, Dione, Tethys, Enceladus and Mimas // *Icarus*. –1984.– V. 58, No 2. – P. 254– 264.

94. Buratti B., Wong F., Mosher J. Surface properties and photometry of the uranian satellites // *Icarus*. – 1990.– V. 84, No 2. – P. 206–215.

95. Buratti B.J. Ganymede and Callisto: surface textural dichotomies and photometric analysis // *Icarus*. –1991.– V. 92, No 2. – P. 312–323.
96. Buratti B.J., Cruikshank D.P., Brown R.H., et al. Cassini visual and infrared mapping spectrometer observations of Iapetus: Detection of CO₂ // *Astrophys. J.*–2005.– V. 622, No 2, Pt. 2. – L149–L152.
97. Buratti B.J., Gibson J., Mosher J.A. CCD photometry of the uranian satellites // *Astron. J.*– 1992.– V104, No 3. – P. 1618– 1622.
98. Buratti B.J., Goguen J.D., Gibson J., Mosher J. Historical photometric evidence for volatile migration on Triton // *Icarus*. – 1994.– V. 110, No 2. – P. 303– 314.
99. Buratti B.J., Hicks M.D., Tryka K.A., et al. High– resolution 330– 920 nm spectra of Iapetus, Hyperion, Phoebe, Rhea, Dione, and D– type asteroids: How are they related? // *Icarus*. – 2002.– V155, No 2. – P. 375– 381.
100. Buratti B.J., Lane A.L., Gibson J., et al. Triton’s surface properties – A preliminary analysis from ground– based, Voyager photopolarimeter subsystem, and laboratory measurements // *J. Geophys. Res., Supplement*. – 1991.– V. 96, No 1. – P. 91– 97.
101. Buratti B.J., Mosher J. A., Nicholson P. D., et al. Near– Infrared Photometry of the Saturnian Satellites during Ring Plane Crossing // *Icarus*. – 1998.– V. 136, No 2. – P. 223– 231.
102. Buratti B.J., Mosher J.A. The dark side of Japet: Additional evidence for an exogenous origin // *Icarus*. – 1995.– V. 115, No 2. – P. 219– 227.
103. Buratti B.J., Mosher J.A., Johnson T.V. Albedo and color maps of the saturnian satellites // *Icarus*. – 1990.– V. 87, No 2. – P. 339–357.
104. Buratti B.J., Nelson R.M., Lane A.L. Surficial textures of the Galilean satellites // *Nature* – 1988.– V333.– N6169. – P. 148–151.
105. Buratti J.B., Gibson J., Mosher J.A. CCD photometry of the uranian satellites // *Astron. J.*– 1992.– V104, No 4. – P.1618– 1622.
106. Buratti, B.J. Voyager disk– resolved photometry of the saturnian satellites // *Icarus*. – 1984.– V59, No 3. – P. 392–405.
107. Burns J.A., Simonelli D.P., Showalter M.R., et al. Jupiter’s ring– moon system // In *Jupiter: Planet, Satellites and Magnetosphere*, Bagenal, F., Dowling, T.E., McKinnon, W. (Eds.). Cambridge Univ. Press. Cambridge. UK. – 2004.– P. 241–262.
108. Butterworth P.S. Observations of the Galilean satellites of Jupiter from Earth orbit // *Adv. Space Res.* –1981.– V. 1, No 9. – P. 177– 184.
109. Calvin W.M., Clark R.N. Modeling the reflectance spectrum of Callisto 0.25 to 4.1 μ m // *Icarus*. –1991.– V. 89, No 2. – P. 305– 317.

110. Campbell D.B., Chandler J.F., Ostro S.J. Galilean satellites: 1976 radar results // *Icarus*. –1978.– V. 34, No 2. – P. 254– 267.

111. Campbell D.B., Chandler J.F., Pettengill G.H., Shapiro I.I. Galilean satellites of Jupiter: 12.6– centimeter radar observations // *Science*. –1977.– V. 196, No 4290. – P. 650– 653.

112. Campbell Th., Brewer J., Okutsu M., Turo D., Vignola J. Preliminary study of extraterrestrial optical vibrometry for an impactor mission to Europa // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2016, vol. 139, issue 4, p. 2077-2077 .

113. Cantrall C., De Pater I., Nelson D. M., Williams D. A., de Kleer K. Keck Near-Infrared AO Observation of Io in 2011 // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #ED33D-0976.

114. Capozella J., Pfaeffle E., Ferreira F.M., et al. Estimating mechanical properties of ice on Europa: Impact simulation and sensitivity analysis // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2016, vol. 140, issue 4, p. 3002-3002.

115. Cardoso dos Santos J., Carvalho J.P.S., Prado A.F.B.A., Vilhena de Moraes R. Searching for less perturbed elliptical orbits around Europa // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015, Vol. 641, Issue 1, article id. 012011.

116. Carlson R.W., Anderson M.S., Johnson R.E. Hydrogen Peroxide on the Surface of Europa // *Science*. – 1999.– V. 283, No 5410. – P. 2062.

117. Carlson R.W., Anderson M.S., Mehlman R., Johnson R.E. Distribution of hydrate on Europa: Further evidence for sulfuric acid hydrate // *Icarus*. –2005.– V. 177, No 2. – P. 461– 471.

118. Carlson R.W., Calvin W., Dalton J.B., et al. Europa's surface composition: What we know, what we would like to know, and how we can find out // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2007*.– abstract #P51E– 02.

119. Carlson R.W., Matson D.L., Johnson T.V., Bergstralh J.T. Sodium D–line emission from Io: comparison of observed and theoretical line profiles // *Astrophys. J.*–1978.– V. 223. No 3, Pt. 1. – P. 1082– 1086.

120. Carlson Robert W., Hand Kevin P. Radiation Noise Effects at Jupiter's Moon Europa: In-Situ and Laboratory Measurements and Radiation Transport Calculations // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2015, vol. 62, issue 5, p. 2273-2282.

121. Carr M.H. Silicate volcanism on Io // *J. Geophys. Res.* –1986.– V. 91, No 3. – P. 3521– 3532.

122. Castillo J. C., Rambaux N. Signature of Europa's Ocean Density on Gravity Data // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #P11C-2109.

123. Cessateur Gaël, Barthelemy Mathieu, Peinke Isabel. Photochemistry-emission coupled model for Europa and Ganymede // *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2016, Vol. 6, id. A17, 14 p.

124. Charnoz S., Brahic A., Thomas P.C., Porco C.C. The Equatorial Ridges of Pan and Atlas: Terminal Accretionary Ornaments? // *Science*. – 2007. – V318, No 5856. – P. 1622– 1624.

125. Chen T., Phillips C. B., Pappalardo R. T. Statistical Distribution Analysis of Lineated Bands on Europa // *American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016*, abstract #P31A-2086.

126. Cheng A.F., Ha P.K., Johnson R.E., Lanzerotti L.J. Interactions of magnetospheres with icy satellite surfaces // In: *Satellites*. Eds. J.A. Burns, M.S. Matthews. – Univ. Arizona Press, Tucson. – 1986. – P. 403– 436.

127. Choliy V. Ya., Kazantseva L. V., Morozhenko O. V., Vidmachenko A. P., Nevodovskyi P. V. Observations of stars from the lunar surface for the study of libration // *International Conference Astronomy and Space Physics in Kyiv University*. May 23-26 2017. Book of abstracts. – Kyiv, Ukraine. – P. 98-100.

128. Choliy V. Ya., Vidmachenko A. P., Kazantseva L. V., Morozhenko O. V., Nevodovskyi P.V. Study of Moon's physical libration by observing the sky from its surface // *17th Ukrainian Conference on Space Research*, Odessa, Aug. 21- 25 2017: abstracts. P. 48.

129. Christoph J. M., Williams D. A. Synthetic Aperture Radar Instrument Concept for Subsurface Geological Observations of Io // *48th Lunar and Planetary Science Conference*, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2325.

130. Cinelli M., Circi Ch., Ortore E. Polynomial equations for science orbits around Europa // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2015, Vol. 122, Issue 3, p.199-212.

131. Clark R.N., Brown R.H., Jaumann R., et al. Compositional maps of Saturn's moon Phoebe from imaging spectroscopy // *Nature*. – 2005. – V435, No 7038. – P. 66– 69.

132. Clark R.N., Brown R.H., Owensby P.D., Steele A. Saturn's satellites: near- infrared spectrophotometry (0.65– 2.5 μ m) of the leading and trailing sides and compositional implications // *Icarus*. – 1984. – V. 58, No 2. – P. 265– 281.

133. Clark R.N., Curchin J., Jaumann R., et al. Compositional mapping of Saturn's satellite Dione with Cassini VIMS and implications of dark material in the Saturn system // *Icarus*. – 2008. – V193, No 2. – P. 372– 386.

134. Clark R.N., Fanale F.P. Surface composition of natural satellites // In *Satellites*. Burns J.A., Matthews M.S. (Eds.), Univ. of Arizona Press, Tucson. – 1986. – P. 437– 491.
135. Clark R.N., McCord T.B., The Galilean satellites: New near-infrared spectral reflectance measurements (0.62– 2.5 μ m) and a 0.325– 5 μ m summary // *Icarus*. – 1980. – V. 41, No 3. – P. 323– 339.
136. Clark R.N., Owensby R.D. The infrared spectrum of Rhea // *Icarus*. – 1981. – V46, No 3. – P. 354– 360.
137. Coffin D. A., Delamere P. A., Kimura T. Two-Dimensional Modeling of the Response of the Io Plasma Torus to a Volcanic Event // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P23C-2178.
138. Coleman N. M., Coleman F. A. Mission to Europa - Lander and Orbiter Capabilities to Support the Search for Extant Life // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2354.
139. Collins G.C., Goodman J.C. Enceladus' south polar sea // *Icarus*. – 2007. – V.189, No1. – P. 72– 82.
140. Conrath B., Flasar F.M., Hanel R., et al. Infrared observations of the neptunian system // *Science*. –1989. – V. 246, No 4936. – P. 1454– 1459.
141. Consolmagno G., Schaefer M. *Words Apart: A Textbook in Planetary sciences*, be G. Consolmagno, M. Shaefer. Prentice Hall. – 1994. – 453 p.
142. Consolmagno G.J., Lewis J.S. The evolution of icy satellite interiors and surfaces // *Icarus*. – 1978. – V34, No 2. – P. 280– 293.
143. Cook A.F., Danielson G.E., Jewitt D.C., Owen T.C. Dust observations in the Jovian system // *Adv. Space. Res.* –1981. – V. 1, No 8. – P. 99– 101.
144. Cook A.F., Franklin F.A. An explanation of the light curve of Iapetus // *Icarus*. –1970. – V. 13, No 2. – P. 282–291.
145. Copper M., Delamere P. A., Overcast-Howe K. Modeling physical chemistry of the Io plasma torus in two dimensions // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016, Vol. 121, Issue 7, p. 6602-6619.
146. Coradini A., Tosi F., Gavrishin A.I., et al. Identification of spectral units on Phoebe // *Icarus*. – 2008. – V193, No 1. – P. 233– 251.
147. Cox R., Bauer A.W. Impact breaching of Europa's ice: Constraints from numerical modeling // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2015, Vol. 120, Issue 10, pp. 1708-1719.

148. Craft K.L., Patterson G. Wes, Lowell Robert P., Germanovich L. Fracturing and flow: Investigations on the formation of shallow water sills on Europa // *Icarus*. 2016, Vol. 274, p. 297-313.

149. Crary F.J., Bagenal F. Remanent ferromagnetism and the interior structure of Ganymede // *J. Geophys. Res.* – 1998. – V103, No E11. – P.25757–25774

150. Cremonese G., Lucchetti A., Simioni E. New global maps of Europa's lineaments // *American Astronomical Society*. 2016, DPS meeting #48, id.429.19.

151. Croft S.K. Icy satellites: cratering and volcanism // *NASA Tech. Memo. NASA TM– 4041*. 1988. – P. 404 – 406.

152. Croft S.K., Lunine J.I., Kargel J. Equation of state of ammonia – water liquid – Derivation and planetological applications // *Icarus*. –1988. – V. 73, No 2. – P. 279– 293.

153. Croft, S.K., Soderblom L.A. Geology of the uranian satellites // In: *Uranus*. – Eds. J.T. Bergstralh, E.D. Miner, M.S. Matthews. University of Arizona Press. – Tucson. –1991. – P. 561– 628.

154. Cross C.A. The size distribution of lunar craters // *Monthly Notices Roy. Astron.Soc.* – 1966. – V134, No 3. – P. 245– 252.

155. Cruikshank D.P. Infrared spectrum of Io, 2.8– 5.3 μm // *Icarus*. – 1980. – V. 41, No 2. – P. 240– 245.

156. Cruikshank D.P. Near– infrared studies of the satellites of Saturn and Uranus // *Icarus*. – 1980. – V41. – N2. –P. 246– 258.

157. Cruikshank D.P., Apt J. Methane on Triton: Physical state and distribution // *Icarus*. – 1984. – V. 58, No 2. – P. 306– 311.

158. Cruikshank D.P., Bell J.F., Gaffey M.J. et al. The dark side of Iapetus // *Icarus*. –1983. – V. 53, No 1. – P. 90– 104.

159. Cruikshank D.P., Brown R.H. The uranian satellites: water ice on Ariel and Umbriel // *Icarus*. – 1981. – V45, No 3. – P. 612– 617.

160. Cruikshank D.P., Brown R.H., Calvin W., et al. Ices on the satellites of Jupiter, Saturn, and Uranus // In: *Solar System Ices*. Schmitt B., de Bergh C., Festou M. (Eds). – Kluwer Academic. Dordrecht. – 1998. – P. 579– 606.

161. Cruikshank D.P., Brown R.H., Clark R.N. Nitrogen on Triton // *Icarus*. –1984. – V. 58, No 2. – P. 293– 305.

162. Cruikshank D.P., Brown R.H., Tokunaga A.T., et al. Volatiles on Triton: The infrared spectral evidence, 2.0– 2.5 μm // *Icarus*. – 1988. – V. 74, No 3. – P. 413– 423.

163. Cruikshank D.P., Dalton J.B., Dalle Ore C., et al. Surface composition of Hyperion // *Nature*. –2007. – V. 448, No 7149. – P. 54– 56.

164. Cruikshank D.P., Owen T.C., Dalle Ore, C., et al. A spectroscopic study of the surfaces of Saturn's large satellites: H₂O ice, tholins, and minor constituents // *Icarus*. – 2005. – V. 175, No 2. – P. 268– 283.

165. Cruikshank D.P., Pilcher C.B., Morrison D. Identification of a new class of satellites in the outer solar system // *Astrophys. J.*–1977. – V. 217, No 3, Pt. 1. – P. 1006– 1010.

166. Cruikshank D.P., Roush T.L., Owen T.C., et al. Ices on the surface of Triton // *Science*. – 1993. – V261, No 5122. – P. 742– 745.

167. Cruikshank D.P., Silvagio P.M. Triton: a satellite with an atmosphere // *Astrophys. J.*– 1979. – V233, No 3, Pt. 1. – P. 1016– 1020.

168. Cruikshank D.P., Veverka J., Lebofsky L.A. Satellites of Saturn – Optical properties // In Saturn. Gehrels T., Matthews M.S. (Eds) – Univ. of Arizona Press. Tucson. AZ. –1984. – P. 640– 667.

169. Cruikshank D.P., Wegryn E., Dalle O.C.M., et al. Hydrocarbons on Saturn's satellites Iapetus and Phoebe // *Icarus*. – 2008. – V. 193, No 2. – P. 334– 343.

170. Culha C., Manga M. Geometry and spatial distribution of lenticulae on Europa // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P43A-2107.

171. Culha C., Manga M. Geometry and spatial distribution of lenticulae on Europa // *Icarus*. 2016, Vol. 271, p. 49-56.

172. Culha C., Manga M. Shape of lenticulae on Europa and their interaction with lineaments // EGU General Assembly 2015, held 12-17 April 2015 in Vienna, Austria. id.7891.

173. Cutler B. B., Collins G.C., Prockter L.M., et al. Reconstructing Plate Motions on Europa with GPlates // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P31B-2059.

174. Cutler B. B., Goodman J. C. Do Europa's Mountains Have Roots? Modeling Flow Along the Ice-Water Interface // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P31A-2079.

175. Dalton J.B., Prieto-Ballesteros O., Kargel J.S., et al. Spectral comparison of heavily hydrated salts with disrupted terrains on Europa // *Icarus*. – 2005. – V177, No 2. – P. 472– 490.

176. Davies A. G., de Pater I., de Kleer K., Wilson L., Head J. W. Modelling the Thermal Signature of Large Eruptions on Io // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.1575.

177. Davies A. G., Gunapala S., Soibel A., Ting D., Rafol S., Blackwell M., Hayne P., Kelly M. Meeting the Challenge of Measuring Io's Lava Eruption Temperatures // 48th Lunar and Planetary Science Conference,

held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.1263.

178. Davies A. G., Veeder G. J., Hill S. I., Matson D. L., Johnson T. V. Charting thermal emission variability at Amirani with the Galileo NIMS Io Thermal Emission Database (NITED) // *Icarus*. 2014, Vol. 241, p. 190-199.

179. Davies A. G., Veeder G. J., Matson D. L., Johnson T. V. A New Map of Io's Volcanic Heat Flow // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.1551.

180. Davies A. G., Veeder G. J., Matson D., Johnson T. V. New Map of Io's Volcanic Heat Flow // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #P43C-3994.

181. Davies A.G. Temperature, age and crust thickness distributions of Loki Patera on Io from Galileo NIMS data: Implications for resurfacing mechanism // *Geophys. Res. Letters*. – 2003.– V30, No 21. – P.1– 3.

182. Davies A.G. Volcanism on Io: the view from Galileo // *Astronomy and Geophysics*.– 2001.– V42, No 2. – P. 210– 216.

183. Davies A.G., Keszthelyi L.P., McEwen A.S. Using Lava Tube Skylights To Derive Lava Eruption Temperatures on Io // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.405.03.

184. Davies A.G., Keszthelyi L.P., Williams D.A., et al. Thermal signature, eruption style, and eruption evolution at Pele and Pillan on Io // *J. Geophys. Res.*– 2001.– V106, No E12. – P. 33079– 33104.

185. Davies A.G., Lopes– Gautier R., Smythe W.D., Carlson R.W. Silicate Cooling Model Fits to Galileo NIMS Data of Volcanism on Io // *Icarus*. –2000.– V. 148, No 1. – P. 211– 225.

186. Davies A.G., Matson D.L., Veeder G.J., et al. Post – solidification cooling and the age of Io's lava flows // *Icarus*. –2005.– V. 176, No 1. – P. 123– 137.

187. Davies A.G., Veeder G.J., Matson D.L., Johnson T.V. Map of Io's volcanic heat flow // *Icarus*. 2015, Vol. 262, p. 67-78.

188. Davies A.G., Wilson L., Matson D., et al. The heartbeat of the volcano: The discovery of episodic activity at Prometheus on Io // *Icarus*. – 2006. – V. 184, No 2. – P. 460– 477.

189. Davies Ashley Gerard, Keszthelyi Laszlo P., McEwen Alfred S. Determination of eruption temperature of Io's lavas using lava tube skylights // *Icarus*. 2016, Vol. 278, p. 266-278.

190. Davies M.E., Abalakin V.K., Brahic A., et al. Report of the IAU/IAG/COSPAR working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 1991 // *Celest. Mech. Dynam. Astron.*– 1992.– V53, No 64. – P. 377– 397.

191. Davies, A. G., De Pater I., de Kleer K., Head J. W. III, Wilson L. Modelling Thermal Emission to Constrain Io's Largest Eruptions // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P51B-2142.

192. de Kleer K., de Pater I. Io's Loki Patera: Modeling of three brightening events in 2013-2016 // *Icarus*. 2017, Vol. 289, p. 181-198.

193. de Kleer K., de Pater I. Spatial distribution of Io's volcanic activity from near-IR adaptive optics observations on 100 nights in 2013-2015 // *Icarus*. 2016, Vol. 280, p. 405-414.

194. de Kleer K., de Pater I. Time variability of Io's volcanic activity from near-IR adaptive optics observations on 100 nights in 2013-2015 // *Icarus*. 2016, Vol. 280, p. 378-404.

195. de Kleer K., De Pater I. Two New Brightening Events at Io's Loki Patera // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P31C-2074.

196. de Kleer K., de Pater I., Davies A.G., Ádámkovics M. Near-infrared monitoring of Io and detection of a violent outburst on 29 August 2013 // *Icarus*. 2014, Vol. 242, p. 352-364.

197. de Kleer K., De Pater I., Yoneda M. Io's Volcanic Activity in 2013-2016 and Comparison with Extended Sodium Cloud Variability // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P21E-04.

198. de Kleer K., Skrutskie M., Leisenring J., Davies A. G., Resnick A., Conrad A., De Pater I., Hinz P., Defrere D., Veillet C. Resolving Io's Volcanoes from a Mutual Event Observation at the Large Binocular Telescope // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P54A-04/

199. de Kleer K., Skrutskie M., Leisenring J., et al. Multi-phase volcanic resurfacing at Loki Patera on Io // *Nature*. 2017, Vol. 545, Issue 7653, p. 199-202.

200. de Kleer Katherine R., de Pater Imke, Fitzpatrick Thomas. A Timeline of Volcanic Activity on Io in 2013-14 with Near-Infrared Surface Maps // American Astronomical Society. 2014, DPS meeting #46, id.418.13.

201. de Kleer Katherine R., de Pater Imke. The Spatial Distribution of Volcanic Events on Io in 2013-2015 // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.405.04.

202. De Pater I., Brown R.A., Dickel J.R. VLA observations of the Galilean satellites // *Icarus*.— 1984.— V57, No 1. — P. 93– 111.

203. De Pater I., Davies A. G., de Kleer K. Two Decades (almost) of Keck Observations of Io // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P23D-07.

204. de Pater I., Davies A.G., Ádámkovics M., Ciardi D.R. Two new, rare, high-effusion outburst eruptions at Rarog and Heno Paterae on Io // *Icarus*. 2014, Vol. 242, p. 365-378.

205. de Pater I., Davies A.G., Marchis F. Keck observations of eruptions on Io in 2003-2005 // *Icarus*. 2016, Volume 274, p. 284-296.

206. de Pater I., Hamilton D.P., Showalter M. R., Throop H. B., Burns J. A. The Rings of Jupiter // Chapter 6 in: *Planetary Ring Systems*, Eds. M. S. Tiscareno and C. D. Murray. 2017. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

207. De Pater I., Jaffe W.J., Brown R.A., Berge G.L. Radio emission from Io // *Astrophys. J.*– 1982.– V261, No 1, Pt.1. – P. 396– 401.

208. de Pater Imke, Laver Conor, Davies Ashley Gerard, de Kleer Katherine, Williams David A., Howell Robert R., Rathbun Julie A., Spencer John R. Io: Eruptions at Pillan, and the time evolution of Pele and Pillan from 1996 to 2015 // *Icarus*. 2016, Vol. 264, p. 198-212.

209. de Pater Imke. NIRC2 Imaging of Evolving Volcanic Activity on Io // Keck Observatory Archive. 2015, NIRC2 U014N2.

210. de Pater Imke. Time Evolution of Io's volcanoes Pele and Pillan from 1996 - 2015, as derived from Galileo NIMS, Keck, Gemini, IRTF, and LBTI observations // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.409.06.

211. Decker M. C., Ahern A. A., Radebaugh J., Christiansen E. H., Williams D. A. Paterae on Io: Geologic Mapping and Experimental Models // 45th Lunar and Planetary Science Conference, held 17-21 March 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p. 1626.

212. Delamere P.A., Steffl A., Bagenal F. Modeling temporal variability of plasma conditions in the Io torus during the Cassini era // *J.Geophys.Res.*–2004.– V. 109, No A10. – P. 45– 53.

213. Delitsky M.L., Lane A.L. Chemical schemes for surface modification of icy satellites: A road map // *J. Geophys. Res.*–1997.– V. 102, No E7. – P. 16385– 16390.

214. Delitsky M.L., Lane A.L. Ice chemistry on the Galilean satellites // *J. Geophys. Res.* – 1998.– V103, No E13. – P. 31391– 31403.

215. Dollfus A., Murray J.B., La rotation, la cartographie et la photometrie des satellites de Jupiter // *Int. Astron. Union Symp.* –1974. – N65. – P. 513– 525

216. Dols Vincent J., Bagenal Fran, Cassidy Timothy A., Crary Frank J., Delamere Peter A. Europa's atmospheric neutral escape: Importance of symmetrical O₂ charge exchange // *Icarus*. 2016, Vol. 264, p. 387-397.

217. Domingue D.L., Lockwood G.W., Thompson D.T. Surface textural properties of icy satellites: A comparison between Europa and Rhea // *Icarus*. –1995.– V. 115, No 1. – P. 228– 249.

218. Dominique D., Verbiscer A. Re-analysis of the solar phase curves of the ice galilean satellites // *Icarus*. – 1997.– V. 128, No 1. – P. 49– 74.

219. Dreibus G., Waenke H. Origin and evolution of planetary and satellite atmospheres // Eds. S.K. Atreya, J.B. Pollack, M.S. Mathehews. Tucson. – 1989.– P. 268– 288.

220. Dumas C., Terrile R.J., Smith B.A., Schneider G. Astrometry and near- infrared photometry of Neptune's inner satellite and ring arcs // *Astron. J.*–2002.– V. 123, No 4. – P. 1776– 1783

221. Dundas Colin M. Effects of lava heating on volatile-rich slopes on Io // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2017, Vol. 122, Issue 3, p. 546-559.

222. Dunn W., Branduardi-Raymont G., Elsner R. X-ray Emission from Jupiter's Aurora - Chandra Observations in 2011: CME and/or Io Connection? // *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts*, Vol. 9, id. EPSC2014-736.

223. Durante Daniele, Iess Luciano, Tortora Paolo, Zannoni Marco. Juno observation of Io Plasma Torus // 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April 2017 in Vienna, Austria., p.10296.

224. Elder C. M. The effects of melt on impact craters on icy satellites and on the dynamics of Io's interior // Thesis (Ph.D.) The University of Arizona, 2015. Publication Number: AAT 3701772: Dissertation Abstracts International, Volume: 76-09(E), Section: B. -151 p.

225. Elder C. M., Showman A. P. Melt Migration Through Io's Convecting Mantle // 45th Lunar and Planetary Science Conference, held 17-21 March 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p. 1651.

226. Elder C. M., Tackley P. J., Showman A. P. Convection and Melt Migration in Io's Mantle // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2014*, abstract #P41E-08.

227. Elder C. M., Tackley P. J., Showman A. P. Convection in Io's Partially Molten Mantle // 45th Lunar and Planetary Science Conference, held 17-21 March 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p. 2336.

228. Elder C. M., Tackley P. J., Showman A. P. Heat Loss Through Volcanism on Io // Comparative Tectonic and Geodynamics of Venus, Earth and Rocky Exoplanets, held May 4-6, 2015 in Pasadena, California. LPI Contribution No. 1839, p. 5014.

229. Elder Catherine M., Tackley Paul J., Showman Adam P. Numerical simulations of convection and melt migration in Io's mantle // American Astronomical Society. 2014, DPS meeting #46, id.411.05.

230. Ellsworth K., Schubert G. Saturn's icy satellites – Thermal and structural models // *Icarus*. – 1983.– V54, No 2. – P. 490– 510.

231. Eluszkiewicz J., Leliwa-Kopystynski J., Kossacki K.J. Metamorphism of solar system ices // In: Solar System Ices. B. Schmitt, C. de Bergh, M. Festou (Eds.) Kluwer Academic Publishers. Boston. –1998.– P. 119– 138.

232. Emery J.P., Burr D.M., Cruikshank D.P., et al. Near– infrared (0.8– 4.0 μ m) spectroscopy of Mimas, Encelad, Тетія, and Rhea // *Astron. Astrophys.* – 2005.– V435, No 2 – P. 353– 362.

233. Everett H.J., Schmidt B.E. The Effect of Bands and Ridges on Chaos Formation on Europa // American Astronomical Society, DPS meeting #48, id.429.20.

234. Eviatar A., Richardson J.D. Predicted satellite plasma tori in the magnetosphere of Uranus // *Astrophys. J.* –1986.– V. 300, No 2, Pt. 2 – P. L99– L102.

235. Fanale F.P., Brown R.H., Cruikshank D.P., Clark R.N. Significance of absorption features in Io's IR reflectance spectrum // *Nature*. –1979.– V. 280, No 5725. – P. 761– 763.

236. Farrell W.M., Kaiser M.L., Gurnett D.A., et al. Mass unloading along the inner edge of the Enceladus plasma torus // *Geophys. Res. Letters*. – 2008.– V35, No 2. – P.203.

237. Ferguson S. N., Quick L. C., Glaze L. S., Prockter L. M. Survey of Europa's E15 and E17 Regions for Putative Cryovolcanic Domes // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p. 2819.

238. Filacchione G., Capaccioni F., McCord T.B., et al. Saturn's icy satellites investigated by Cassini– VIMS I Full–disk properties 350– 5100 nm reflectance spectra and phase curves // *Icarus*. – 2007. – V. 186, No 2. – P. 259– 290.

239. Fink U., Dekkers N.H., Larson H.P. Infrared spectra of the Galilean satellites of Jupiter // *Astrophys. J.*–1973.– V. 179, No 3, Pt.3. – P. L155– L159.

240. Fink U., Larson H.P. Temperature dependence of the water– ice spectrum between 1 and 4 microns: Application to Europa, Ganymede, and Saturn’s rings // *Icarus*. – 1975.– V. 24, No 3. – P. 411– 420.

241. Fink U., Larson H.P., Gautier T.N., III., Treffers R.R. Infrared spectra of the satellites of Saturn: Identification of water ice on Iapetus, Rhea, Dione, and Tethys // *Astrophys. J.*–1976.– V. 207, No 1, Pt.2. – P. L63– L67.

242. Fischer P. D., Brown M. E., Hand K. P. Spatially Resolved Spectroscopy of Europa: The Distinct Spectrum of Large-scale Chaos // *The Astronomical Journal*. 2015, Vol. 150, Issue 5, article id. 164, 9 p.

243. Fischer P. D., Brown M. E., Trumbo S. K., Hand K. P. Spatially resolved Spectroscopy of Europa’s Large-scale Compositional Units at 3-4 μm with Keck NIRSPEC // *The Astronomical Journal*. 2017, Vol. 153, Issue 1, article id. 13, 5 p.

244. Forrest W.J., Houck J.R., McCarthy J.F. The 16– to 38– Micron spectrum of Callisto // *Icarus*. – 1980.– V41, No 3. – P. 340– 342.

245. Frank L.A., Paterson W.R. Passage through Io’s ionospheric plasmas by the Galileo spacecraft // *J. Geophys. Res.*– 2001.– V106, No A11. – P. 26209– 26224

246. Frank L.A., Paterson W.R., Survey of thermal ions in the Io plasma torus with the Galileo spacecraft // *J. Geophys. Res.*– 2001.– V106, No A4. – P. 6131– 6150.

247. Franklin F.A., Cook A.F. Photometry of Saturn’s satellites: The opposition effect of Iapetus at maximum light and the variability of Titan // *Icarus*. – 1974.– V. 23, No 3. – P. 355– 362.

248. Franz O.G. UBV photometry of Triton // *Icarus*. – 1981.– V45, No 3.– P.602– 606.

249. Franz O.G., Millis R.L. Photometrie of Dione, Tethys, and Enceladus on the UBV system // *Icarus*. –1975.– V. 24, No 4. – P. 433– 442.

250. Fulchignoni M., Ferri F., Angrilli F., et al. In situ measurements of the physical characteristics of Titan’s environment // *Nature*. – 2005.– V438, No 7069.– P. 785– 791.

251. Futaana, Y., Barabash S., Wang X.D., et al. Low-energy energetic neutral atom imaging of Io plasma and neutral tori // *Planetary and Space Science*. 2015, Vol. 108, p. 41-53.

252. Galopeau P.H.M. Role of Magnetic Field Gradient on the Beaming Cone Flattening of Io-Controlled Jovian Decameter Radiation // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #SM31C-2505.

253. Galopeau P.H.M., Boudjada M.Y. An oblate beaming cone for Io-controlled Jovian decameter emission // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016, Vol. 121, Issue 4, p. 3120-3138.

254. Gehrels T. Photometry of asteroids, in *Surfaces and Interiors of Planets and Satellites*, edited by A. Dollfus, Academic Press, London. – 1970. – P. 319– 376.

255. Gerakines P.A., Bray J. J., Davis A., Richey C.D. The strengths of near- infrared absorption features relevant to interstellar and planetary ices // *Astrophys. J.*– 2005.– V620, No 2, Pt.1.– P.1140– 1150.

256. Gerakines, P.A., Moore M. H. Carbon suboxide in astrophysical ice analogs // *Icarus*. – 2001.– V154, No 2.– P.372– 380.

257. Gerakines, P.A., Schutte W.A., Ehrenfreund P. Ultraviolet processing of interstellar ice analogs I.: Pure ices // *Astron. Astrophys.*– 1996.– V312, No 1.– P.289– 305.

258. Gibbard S.G., de Pater I., Hammel H.B. Near- infrared adaptive optics imaging of the satellites and individual rings of Uranus // *Icarus*. – 2005.– V174– N1.– P.253– 262.

259. Goel A., Krishnamoorthy S., Swenson T., et al. Design for CubeSat-based dust and radiation studies at Europa // *Acta Astronautica*. 2017, Vol. 136, p. 204-218.

260. Goguen J.D., Hammel H.B., Brown R.H. V photometry of Titania, Oberon, and Triton // *Icarus*. – 1989.– V77, No 2.– P.239– 247.

261. Goguen J.D., Sinton W.M. Characterization of Io's volcanic activity by infrared polarimetry // *Science*. – 1985.– V230, No 47221.– P.65– 69.

262. Goldberg B.A., Mekler Yu., Carlson R.W., et al. Io's sodium emission cloud and the Voyager 1 encounter // *Icarus*. – 1980.– V44, No 2.– P.305– 317.

263. Goldstein R.M., Green R.R. Ganymede: radar surface characteristics // *Science*. – 1980.– V207, No 4427.– P.179– 180.

264. Gómez L.M., Serrano E., Bordehore L.J., Sandoval S. The role of GPR techniques in determining ice cave properties: Peña Castil ice cave, Picos de Europa // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2016, vol. 41, issue 15, p. 2177-2190.

265. Gomis, O., Strazzulla G. CO₂ production by ion irradiation of H₂O ice on top of carbonaceous materials and its relevance to the Galilean satellites // *Icarus*. – 2005.– V177, No 2.– P.570– 576.

266. Goodman J.C. Do Europa's Mountains Have Roots? Erosion of Topography at the Ice-Water Interface via the "Ice Pump" // *American Geophysical Union*, Fall General Assembly 2016, abstract #P31A-2080.

267. Gradie J., Thomas P., Veverka J. The surface composition of Amalthea // *Icarus*. – 1980. – V44, No 2. – P.373– 387.

268. Gradie J.A. A polarimetric survey of the Galilean satellites // *Bull. Amer. Astron. Soc.* – 1974. – V5, No 4. – P.404.

269. Grande M., Glasser N., Lee-Payne Z. H., Pinter B. A., Knight T. M., Cook A. T. Transport of Organics through the Europa Icesheet // European Planetary Science Congress 2015, held 27 September - 2 October 2015 in Nantes, France, Online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, id EPSC2015-930.

270. Grava C., Schneider N.M., Leblanc F., et al. Solar control of sodium escape from Io // *J. Geophys. Research: Planets*. 2014, Vol. 119, Issue 3, p. 404-415.

271. Greenberg R. The icy Jovian satellites after the Galileo mission // *Reports on Progress in Physics*. – 2010. – V. 73, No 3. – P. 6801– 6821.

272. Greene T.F., Vermilion J.R., Shorthill R.W., Clark R.N. The spectral reflectivity of select areas on Europa // *Icarus*. – 1975. – V25, No 3. – P.405– 415.

273. Gregg T. K. P. Oh Give Me a Home with a Resurgent Dome: Loki Patera, Io // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2517.

274. Grima C., Blankenship D.D., Schroeder D.M. Radar signal propagation through the ionosphere of Europa // *Planetary and Space Science*. 2015, Vol. 117, p. 421-428.

275. Grimm R. E., Delory G. T., Espley J. R., Stillman D. E. Magnetotelluric Sounding of Europa's Ice Shell // 3rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Mission, held 24-27 October 2016 in Pasadena, California. LPI Contribution No. 1980, id.4032.

276. Grundy W.M., Buie M.W., Stansberry, et al. Near-infrared spectra of icy outer Solar System surfaces: Remote determination of H₂O ice temperatures // *Icarus*. – 1999. – V142, No 3. – P.536–549.

277. Grundy W.M., Schmitt B. The temperature-dependent near-infrared absorption spectrum of hexagonal H₂O ice // *J. Geophys. Res.* – 1998. – V103, No E11. – P.25809–25822.

278. Grundy W.M., Stansberry J.A. Solar gardening and the seasonal evolution of nitrogen ice on Triton and Pluto // *Icarus*. – 2000. – V148, No 2. – P.340– 346.

279. Grundy W.M., Young L.A. Near infrared spectral monitoring of Triton with IRTF/Spex I: Establishing a baseline // *Icarus*. – 2004. – V172, No 2. – P.455– 465.

280. Grundy W.M., Young L.A., Young E.F. Discovery of CO₂ ice and leading–trailing spectral asymmetry on the uranian satellite Ariel // *Icarus*. – 2003. – V162, No 1. – P.222–229

281. Guiot P., Carter J., Vincendon M., Baklouti D., Langevin Y. Searching for Signatures of Io's Silicate Crust // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.1813.

282. Gurnett D.A., Kurth W.S., Roux A., et al. Evidence for a magnetosphere at Ganymede from plasma– wave observations by the Galileo spacecraft // *Nature*. – 1996. – V. 384, No 6609. – P. 535– 37.

283. Gutierrez S., De Pater I., de Kleer K., Rathbun J. A., Spencer J. R. Occultation Observations of Io's Hot Spots in 2014 // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P23C-2183.

284. Hagfors T., Gold T., Ierikic H.M. Refraction scattering as origin of the anomalous radar returns of Jupiter's satellites // *Nature*. – 1985. – V. 315, No 6021. – P.637–640.

285. Hagfors T., Moriello J. The effect of roughness on the polarization of thermal emission from a surface // *J.Res.NBS (Radio Science)*. – 1965. – V. 69D, No 12. – P.1614–1615.

286. Hand Eric. Plumes on Europa tease NASA mission planners // *Science*. 2015, Vol. 347, Issue 6225, pp. 932-933.

287. Hand K. P., Carlson R. W. Europa's surface color suggests an ocean rich with sodium chloride // *Geophysical Research Letters*. 2015, Vol. 42, Issue 9, pp. 3174-3178.

288. Hand Kevin P., Carlson Robert W. Sea salt irradiation experiments relevant to the surface conditions of ocean worlds such as Europa and Enceladus // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.405.06.

289. Hanel R., Conrath B., Flasar F.M., et al. Infrared observations of the Saturnian system from Voyager 2 // *Science*. – 1981. – V.215, No 4532. – P.544–548.

290. Hanel, R., Conrath B., Flasar F. M., et al. Infrared observations of the Uranian system // *Science*. – 1996. – V. 233. – No 4759. – P. 70–74.

291. Hansen D., Rudolph M. L. Formation of Europa's Double Ridges Through Viscoelastoplastic Deformation Above Crystallizing Cryo-Volcanic Intrusions // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P31C-2077.

292. Hansen G.B., McCord T.B. Amorphous and crystalline ice on the Galilean satellites: A balance between thermal and radiolytic processes // *J. Geophys. Res.* – 2004. – V. 109, No E1. – P. 11– 19.

293. Hansen O.L. 12-micron emission features of the Galilean satellites and Ceres // *Astrophys. J.* – 1974. – V. 188, No 1, Pt.2. – P. L31–L33.
294. Hansen O.L. Infrared albedos and rotation curves of the Galilean satellites // *Icarus.* – 1975. – V. 26, No 1. – P.24–29.
295. Hansen O.L. Ten-micron eclipse observations of Io, Europa, and Ganymede // *Icarus.* – 1973. – V.18, No 2. – P.237– 246.
296. Hansen V.L. Geologic mapping of tectonic planets // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2000. – V.176, No 3– 4. – P.527– 542.
297. Hapke B. Coherent backscatter and the radar characteristics of outer planet satellites // *Icarus.* – 1990. – V. 88, No 2. – P.407–417.
298. Hayes R. Contributions to Crustal Mechanics on Europa from Subterranean Ocean Vibrations // *APS April Meeting 2016*, abstract #L1.032.
299. Hayne P.O. Sublimation as a Continuous and Transient Source of Water in Europa's Exosphere // *American Astronomical Society.* 2016, DPS meeting #48, id.517.06.
300. Hedgepeth J. E., Schmidt B. E. Iceberg Ahead: The Effect of Bands and Ridges During Chaos Formation on Europa // *American Geophysical Union*, Fall General Assembly 2016, abstract #P31A-2087.
301. Hedgepeth J. E., Schmidt B. E. The Effect of Existing Geologic Features on the Formation of Europa's Chaotic Terrains // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p. 2193.
302. Heggy E., Scabbia G., Bruzzone L., Pappalardo R.T. Radar probing of Jovian icy moons: Understanding subsurface water and structure detectability in the JUICE and Europa missions // *Icarus.* 2017, Vol. 285, p. 237-251.
303. Helbert J., Maturilli A., Ferrari S., Breuer D., Spohn T. Studying Io's Volcanic History Using Thermal Infrared Measurements // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015, in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.1906.
304. Helfenstein P., Currier N., Clark B.E., et al. Galileo observations of Europa's opposition effect // *Icarus.* – 1998. – V. 135, No 1. – P. 41– 63.
305. Helfenstein P., Veverka J., Thomas P.C. Uranus satellites: Hapke parameters from Voyager disk– integrated photometry // *Icarus.* – 1988. – V.74, No 3. – P.231–239.
306. Helfenstein P., Thomas P.C., Veverka J. Evidence from Voyager II photometry for early resurfacing of Umbriel // *Nature.* – 1989. – V. 338, No 6213– P. 324–326.

307. Hess S. L. G., Bonfond B., Delamere P. A. How could the Io footprint disappear? // Planetary and Space Science. 2013, Vol. 89, p. 102-110.

308. Hibbitts C. A., Paranicas C. Space Weathering of the Non-Ice Material on Europa // Space Weathering of Airless Bodies: An Integration of Remote Sensing Data, Laboratory Experiments and Sample Analysis Workshop, held 2-4 November 2015 in Houston, Texas. LPI Contribution No. 1878, p. 2062.

309. Hibbitts C. A., Paranicas C. Understanding the Space Weathering of the Nonice Material on Europa // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p. 2790.

310. Hibbitts C. A., Stockstill K., Wing B. R., Shusterman M. L., Paranicas C. Irradiated Salts and the Color of the Nonice Material on Europa // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2456.

311. Hibbitts C.A., McCord T.B., Hansen G.B. Distributions of CO₂ and SO₂ on the surface of Callisto // J. Geophys. Res. –2000.– V. 105, No E9. – P. 22541–22557.

312. Hibbitts C.A., Pappalardo R.T., Hansen G.B., McCord T.B. Carbon dioxide on Ganymede // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108, No E5. – P. 21– 22.

313. Higgins C. A., Clarke T., Imai K., Imai M., Reyes F. J., Thieman J. Jupiter's Io-D Decametric Source Morphology using the Long Wavelength Array Station 1 // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #SM51E-2534.

314. Hill T.W. Longitudinal asymmetry of the Io plasma torus // Geophys.Res.Lett.– 1983.– V10, No 10.– P.969– 972.

315. Hillier J., Helfenstein P., Verbiscer A., et al. Voyager disk–integrated photometry of Triton // Science.– 1990.– V250, No 4979.– P.59– 61.

316. Hoey W. A., Ackley P. C., Trafton L. M., Goldstein D. B., Varghese P. L. DSMC simulation of Io's unsteady Tvashtar plume // AIP Conference Proceedings. 2016, Volume 1786, Issue 1, id.160006.

317. Howell R. R. The Importance of Differing Types of Io Volcanic Activity for the Jupiter Magnetosphere // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P23C-2176.

318. Howell R. R., Rathbun J. A., Spencer J. R. Jupiter and Mutual Satellite Occultations of Io from 1985 to 2015 // American Astronomical Society. 2016, DPS meeting #48, id.429.21.

319. Howell R.R., Landis C.E., Lopes R.M.C. Composition and location of volatiles at Loki Patera, Io // *Icarus*. 2014, Vol. 229, p. 328-339.

320. Howell R.R., Nash D.B., Geballe T.R., Cruikshank D.P. High-resolution infrared spectroscopy of Io and possible surface materials // *Icarus*. – 1989.– V78, No 1.– P.27– 37.

321. Howell R.R., Rathbun J.A., Spencer J.R. Jupiter and Mutual Satellite Occultations of Io from 1985 to 2015 // *American Astronomical Society*. 2016, DPS meeting #48, id.429.21.

322. Hussmann H., Shoji D., Steinbrügge G., Stark A., Sohl F. Constraints on dissipation in the deep interiors of Ganymede and Europa from tidal phase-lags // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2016, Vol. 126, Issue 1-3, p. 131-144.

323. Huybrighs H.L. F., Futaana Y., Barabash S., et al. On the in-situ detectability of Europa's water vapour plumes from a flyby mission // *Icarus*. 2017, Vol. 289, p. 270-280.

324. Ip W.– H., Goertz C.K. An interpretation of the dawn– dusk asymmetry of UV emission from the Io plasma torus // *Naturer*. – 1983.– V302, No 5905.– P.232– 233.

325. Jacobson R. The Orbits of the Regular Jovian Satellites // *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts*, Vol. 9, id. EPSC2014-73.

326. Jacobson, R.A., Campbell J.K., Taylor A.H., Synnott S.P. The masses of Uranus and its major satellites from Voyager tracking data and Earth– based uranian satellite data // *Astron. J.*– 1992.– V103, No 6.– P.2068– 2078.

327. Jafe W., Caldwell J., Owen T. Radius and brightness temperature observations of Titan at centimeter wavelength by the Very Large Array // *Astrophys.J.*– 1980.– V240– N2, Pt.1.– P.806– 811.

328. Jafe W., Caldwell J., Owen T. The brightness temperature of Titan at 6 centimeters from the Very Large Array // *Astrophys.J.*– 1979.– V232, No 1, Pt.2.– L75– L76.

329. James P.B. Geophysical Constraints on Europa's Ice Shell and Rocky Core from a Flyby Mission // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2513.

330. Jarvis, K.S., Vilas, F., Larson, S.M., Gaffey, M.J. Are Hyperion and Phoebe linked to Japet? // *Icarus*. – 2000.– V146, No 1.– P.125–132.

331. Jaumann R., Stephan K., Hansen G.B., et al. Distribution of icy particles across Enceladus' surface as derived from Cassini– VIMS measurements // *Icarus*. –2008.– V193, No 2.–P.407– 419.

332. Jessup K.L., Spencer J.R. Spatially resolved HST/STIS observations of Io's dayside equatorial atmosphere // *Icarus*. 2015, Volume 248, p. 165-189.

333. Johnson P.E., Greene Th.F., Shorthill R.W. Narrow- band spectrophotometry of Ariel, Umbriel, Titania, and Triton // *Icarus*. – 1978.– V36, No 1.– P.75– 81.

334. Johnson R.E., Quickenden T.I. Photolysis and radiolysis of water ice on outer solar system bodies // *J. Geophys. Res.*– 1997.– V102, No E5. – P. 10985– 10996.

335. Johnson T.V. Triton's Interior and Heat Flow // *Bull. Am. Astron. Soc.* –1990.– V22, No 3. – P.1128.

336. Johnson T.V., Lunine J.I. Saturn's moon Phoebe as a captured body from the outer Solar System // *Nature*. – 2005.– V435, No 7038.– P.69–71.

337. Johnson T.V., Matson D.L., Blaney D.L., et al. Stealth plumes on Io // *Geophys. Res. Lett.* –1995.– V22, No 23. – P. 3293– 3296

338. Johnson T.V., McCord T.B. Galilean satellites. The spectral reflectivity 0.30– 1.10 microns // *Icarus*. – 1970.– V13, No 1.– P.37– 42.

339. Johnson T.V., McCord T.B. Spectral geometric albedo of the Gallilean satellites 0.3– 2.5 microns // *Astrophys. .J.* – 1971.– V169, No 3.Pt1.– P589– 594.

340. Johnson T.V., Morrison D., Matson D.L., et al. Heat flow from Io: longitudinal distribution // “Lunar and Planet. Sci. Vol. 15, Abstr. Pap. 15th Conf., 12– 16 March 1984, Pt 1” Houston, Tex.– 1984.– P.409– 410.

341. Johnson T.V., Pilcher C.P. Satellite spectrophotometry and surface composition // *Planetary satellites* (J.A.Burns, Ed.). Univ.of Arizona Press, Tucson. – 1977.– P.232– 268.

342. Johnson T.V., Veeder G.J., Matson D.L. Evidence for frost on Rhea 's surface // *Icarus*. – 1975.– V24, No 4.– P.428– 432.

343. Jones Geraint. Akon - A Penetrator for Europa // EGU General Assembly 2016, held 17-22 April, 2016 in Vienna Austria, p.16887.

344. Jun I., Paranicas C., Goldsten J. O., Meitzler R., Peplowski P. N., Maurer R. Radiation Science Enabled by the Radiation Monitoring Subsystem (RMS) for the Planned Europa Mission // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #SM51E-2538.

345. Jurac S., Johnson R.E., Richardson J.D., Paranicas C. Satellite sputtering in Saturn's magnetosphere // *Planet. Space Sci.* – 2001. – V. 49. – N3– 4. – P. 319– 326.

346. Kachingwe M., Rhoden A., Lekic V., Hurford T. Jr., Henning W. G. Lineament Azimuths on Europa: Implications for Evolution of the European Ice Shell // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P51B-2141.

347. Kalousová Klára, Schroeder Dustin M., Soderlund Krista M. Radar attenuation in Europa's ice shell: Obstacles and opportunities for constraining the shell thickness and its thermal structure // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2017, Vol. 122, Issue 3, p. 524-545.

348. Kalousová Klára, Souček Ondřej, Tobie Gabriel, Choblet Gaël, Čadek Ondřej. Water generation and transport below Europa's strike-slip faults // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2017, Vol. 121, Issue 12, p. 2444-2462.

349. Karkoschka E. Methane, ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and Titan from CCD– spectrophotometry // *Icarus*. – 1998.– V133, No 1.– P.134– 146.

350. Karkoschka E. Voyager's eleventh discovery of a satellite of Uranus and photometry and the first size measurements of nine satellites // *Icarus*. – 2001.– V151, No 1.– P.69–77.

351. Karkoschka E., Tomasko M.G. Rain and dewdrops on Titan based on in situ imaging // *Icarus*. – 2009.– V199, No 2. – P. 442– 448.

352. Kedar S., Pike W. T., Standley I. M., et al. The Europa Seismic Package (ESP): 2. Meeting the Environmental Challenge // 3rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Mission, held 24-27 October, 2016 in Pasadena, California. LPI Contribution No. 1980, id.4134.

353. Keller H.U., Arpigny C., Barbieri C., et al. First Halley Multicolour camera imaging results from Giotto // *Nature*. – 1986.– V321, No 6067.– P.320– 326.

354. Kellogg P.J., Goetz K., Howard R.L. et al. Measurement of direct current electric fields and plasma flow speeds in Jupiter's magnetosphere // *J. Geophys. Res.*–1993.– V. 98, No A8. – P. 13307– 13314.

355. Keszthelyi L., Jaeger W.L., Turtle E.P., et al. A post– Galileo view of Io's interior // *Icarus*.– 2004.– V169, No 1. – P. 271– 286.

356. Keszthelyi L., McEwen A.S., Phillips C.B., et al. Imaging of volcanic activity on Jupiter's moon Io by Galileo during the Galileo Europa Mission and the Galileo Millennium Mission // *J. Geophys. Res.*– 2001.– V106, No E12. – P. 33025– 33052.

357. Khare B.N., Sagan C., Arakawa E.T., et al. Optical constants of organic tholins produced in a simulated Titanian atmosphere – From soft X– ray to microwave frequencies // *Icarus*. – 1984.– V60, No 1. – P. 127– 137.

358. Khurana K.K., Keszthelyi L.P., Jia X. Understanding Io's Interior Structure from Electromagnetic Induction // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P31B-2057.

359. Khurana K.K., Kivelson M.G., Russell C.T., et al. Absence of an internal magnetic field at Callisto // *Nature*. – 1997.– V. 387, No 6630.– P. 262– 264.

360. Kieffer H.H., Smythe W.D. Frost spectra: comparison with Jupiter's satellites // *Icarus*. – 1974.– V21, No 4.– P.506– 512.

361. Kieffer S.W., Lopes– Gautier R., McEwen A., et al. Prometheus: Io's Wandering Plume // *Science*. –2000.– V. 288, No 5469. – P. 1204– 1208.

362. Kieffer S.W., Lu X., Bethke C.M., et al. A Clathrate Reservoir Hypothesis for Enceladus' South Polar Plume // *Science*. – 2006.– V. 314, No 5806. – P. 1764– 1766.

363. Kimura T., Yamazaki A., Murakami G., et al. Continuous Monitoring of Jupiter's Aurora and Io Plasma Torus with the Hisaki Satellite during Joint Observing Campaign with Juno // *American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016*, abstract #P33C-2143.

364. Kirk R. L., Howington-Kraus E., Hare T. M., Jorda L. The Effect of Illumination on Stereo DTM Quality: Simulations in Support of Europa Exploration // *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016, Vol. III-4, 2016, pp.103-110.

365. Kivelson M.G., Khurana K.K., Coroniti F.V., et al. Magnetic field and magnetosphere of Ganymede // *Geophys. Res. Letters*. – 1997.– V24, No 17. – P. 2155– 2158.

366. Kivelson M.G., Khurana K.K., Russell Ch.T., et al. Galileo Magnetometer Measurements: A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa // *Science*. – 2000.– V289, No 5483.– P. 1340– 1343.

367. Kivelson M.G., Khurana K.K., Walker R. J. A Magnetic Signature at Io: Initial Report from the Galileo Magnetometer // *Science*– 1996.– V273, No 5273.– P.337– 340

368. Kivelson M.G., Khurana K.K., Walker R.J. Io's Interaction with the Plasma Torus: Galileo Magnetometer Report // *Science*. – 1996. – V274, No 5286.– P.396– 398.

369. Klasner M. W., Gross J., Tindall S. E. Subsumption on Europa's Icy Surface: A Physical Analogue Modeling Approach // *48th Lunar and Planetary Science Conference*, held 20-24 March 2017. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2751.

370. Kliore A.J., Fjeldbo G., Seidel B.L., et al. The atmosphere of Io from Pioneer 10 radio occultation measurements // *Icarus*. – 1975.– V24, No 4.– P.407– 410.

371. Knicely J., Everett M. E., Sparks D. W. Magnetic anomalies on Io and their relationship to the spatial distribution of volcanic centers // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2014*, abstract #GP51B-3720.

372. Knicely Joshua, Everett Mark E., Sparks David W. Magnetic anomalies on Io and their relationship to the spatial distribution of volcanic centers // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2017, Vol. 269, p. 133-147.

373. Kollmann P., Paranicas C., Clark G., Roussos E., Lagg A., Krupp N. The vertical thickness of Jupiter's Europa gas torus from charged particle measurements // *Geophysical Research Letters*. 2016, Vol. 43, Issue 18, p. 9425-9433.

374. Kouchi A., Kuroda T. Amorphization of cubic ice by ultraviolet irradiation // *Nature*. – 1990.– V344, No 6262, – P. 134– 135.

375. Krimigis, S.M., Armstrong T.P., Axford W.I., et al. The magnetosphere of Uranus: Hot plasma and radiation environment // *Science*. – 1986.– V233, No 4759.– P. 97– 102.

376. Krüger H., Geissler P., Horányi M., et al. Jovian dust streams: A monitor of Io's volcanic plume activity // *Geophys. Res. Letters*. – 2003.– V. 30, No 21. – P. SSC 3– 1.

377. Kruse S., Klavetter J.J., Dunham E.W. Photometry of Phoebe // *Icarus*. – 1986.– V68, No 1.– P.167– 175.

378. Kulik I., Jockers K., Ground-based photometric observations of Jupiter's inner satellites Thebe, Amalthea, and Meris at small phase angles // *Icarus*. – 2004.– V170, No 1.– P.24– 34.

379. Kupo I., Mekler Yu., Eviater A., Detection of ionized sulfur in the jovian magnetosphere // *Astrophys.J.*– 1976.– V205, No 2, Pt.2.– L51– L53.

380. Kuskov O. L., Belashchenko D. K. Molecular dynamics estimates for the thermodynamic properties of the Fe-S liquid cores of the Moon, Io, Europa, and Ganymede // *Solar System Research*. 2016, Vol. 50, Issue 3, pp.165-183.

381. Kuznyetsova Y., Vidmachenko A., Steklov A. (2020) Astrobiology aspect of Moon' study in the process of colonization. 20-th Gamow International Astronomical Conference-School "Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, high energy physics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology", Ukraine, Odessa, August 9-16, p. 21-22.

382. Kuznyetsova Yu., Matsiaka O., Shliakhetskaya Y., Krushevskaya V., Vid'machenko A., Andreev M., Sergeev A. Spectral Researches of Uranus and Neptune Atmospheres // 45 Lunar and Planetary Institute Science Conference, held 17-21 March, 2014. LPI Contribution No. 1777. p. 1836.

383. Kuznyetsova Yu., Vidmachenko A., Matsiaka O., Shliakhetskaya Y., Yushkin M., Krushevskaya V. Researches of Long-Term Variations in

Uranus and Neptune Spectra // Odessa Astronomical Publications. 2015, vol. 28, no. 2, p. 285-288.

384. Lanzerotti L.J., Brown W.B., MacLennan C.G. Effects of charged particles on the surfaces of the satellites of Uranus // J. Geophys. Res. – 1987. – VA92, No 13. – P.14949– 14957.

385. Laqnzerotti L.J., Robbins M.F., Tolk N.H., Neff S.H. Scans of Io, Europa, and Ganimede in the NaD region // Publs Astron.Soc.Pacific. – 1974. – V87, No 517. – P.449– 453.

386. Laver C., de Rater I., Roe H., Strobel D.F. Temporal behavior of the SO 1.707 μm ro– vibronic emission band in Io's atmosphere // Icarus. – 2007. – V189, No 2. – P.401– 408.

387. Lebofsky L.A. Feieberg M.A., 2.7– to 4.1– μm spectrophotometry of ice satellites of Saturn and Jupiter // Icarus. – 1985. – V63, No 2. – P.237– 242.

388. Lebofsky L.A., Feierberg M.A., Tokunaga A.T. Infrared observations of the dark side of Iapetus // Icarus. – 1982. – V49, No 3. – P.382– 386.

389. Lebofsky L.A., Identification of water frost on Callisto // Nature. – 1977. – V269, No 5631. – P.785– 787.

390. Lebofsky L.A., Rieke G.H., Lebofsky M.J. Infrared reflectance spectra of Hyperion, Titania, and Triton. // Icarus. – 1981. – V46, No 2. – P.169– 174.

391. Lee Th. Spectral albedos of the Galilean satellites // Comm.Lunar Planet.Lab. – 1972. – V9, No 166. – P.166– 180.

392. Lellouch E., Ali-Dib M., Jessup K.-L., et al. Detection and characterization of Io's atmosphere from high-resolution 4- μm spectroscopy // Icarus. 2015, Vol. 253, p. 99-114.

393. Leonard E. J., Pappalard, R. T., Yin A., Patthoff D. A., Schenk P. High-Resolution Topography and its Implications for the Formation of Europa's Ridged Plains // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P21B-03.

394. Leonard E. J., Patthoff D. A., Senske D. A., Collins G. C., Bunte M. K., Doggett T. Updating the Global Geologic Map of Europa // Third Planetary Data Workshop and The Planetary Geologic Mappers Annual Meeting, held June 12-15, 2017, in Flagstaff, Arizona. LPI Contribution No. 1986, id.7025.

395. Leonard E. J., Patthoff D. A., Senske D. A., Collins G. C., Bunte M. K., Doggett T. Updating the Global Geologic Map of Europa // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2357.

396. Levine W. G., Leitner M. A., Vance S. D. Geochemical Constraints on Europa's Ocean Composition and Possible Signatures of Hydrothermal Activity // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2500.

397. Lewis J.S. Satellites of the outer planets: their physical and chemical nature // *Icarus*. – 1971.– V15, N2. – P.174– 185.

398. Liang Mao-Chang, Shemansky D. E., Yung Yuk. On the formation of the atmosphere of Europa // American Astronomical Society. 2016, DPS meeting #48, id.517.07.

399. Ligier N., Poulet F., Carter J. Surface composition of Europa based on VLT observations // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P54A-07.

400. Ligier N., Poulet F., Carter J., Brunetto R., Gourgeot F. VLT/SINFONI Observations of Europa: New Insights into the Surface Composition // *The Astronomical Journal*. 2016, Vol. 151, Issue 6, article id. 163, 16 p.

401. Lioliou G., Barnett A. M. GaAs Spectrometer for Electron Spectroscopy at Europa // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P41A-2066.

402. Lockwood G.W., Lumme K., Thompson D.T. The recent photometric variability of Io // *Icarus*. – 1980.– 44, No 2.– P.240– 248.

403. Lockwood G.W., Thompson D.T. Photoelectric photometry of Europa and Callisto 1976– 1991 // *J.Geophys.Res.*– 1992.– V97, No E9.– P.14761– 14772.

404. Loewenstein R.F., Harper D.A., Hildebrand R.H., et al. Far-infrared photometry of Titan and Iapetus // *Icarus*. – V43, No 3.– P.283– 287.

405. Lopes R.M.C., Williams D.A. Io after Galileo // *Rep. Prog. Phys.*– 2005.– V. 68. – N2 – P. 303–340.

406. Lopes-Gautier R., Douté S., Smythe W.D., et al. A Close-Up Look at Io from Galileo's Near-Infrared Mapping Spectrometer // *Science*. – 2000.– V. 288, No 5469. – P. 1201– 1204.

407. Lorenz Ralph D. Europa Ocean sampling by plume flythrough: Astrobiological expectations // *Icarus*. 2016, Vol. 267, p. 217-219.

408. Lorenz Ralph D. Io Volcanic Plumes: Spacecraft Flythrough Hazard Evaluation // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2015, vol. 52, issue 3, p. 990-993.

409. Lorenz Ralph D. Lander rocket exhaust effects on Europa regolith nitrogen assays // *Planetary and Space Science*. 2016, Vol. 127, p. 91-94.

410. Louis C., Lamy L., Zarka P., Cecconi B., Hess S. Updated modeling of Io and non-Io Radio Auroral Emissions of Jupiter // *European*

Planetary Science Congress 2015, held 27 September - 2 October 2015 in Nantes, France, Online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, idEPSC2015-830.

411. Lucchetti A., Cremonese G., Schneider N. M., Plainaki C., Mazzotta Epifani E., Zusi M., Palumbo P. Simulation of Europa's water plume // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. 2016, vol. 87, p. 192.

412. Lucchetti A., Plainaki C., Cremonese G., et al. Loss rates of Europa's exosphere // *European Planetary Science Congress 2015*, held 27 September - 2 October 2015 in Nantes, France, Online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, id. EPSC 2015-487.

413. Lucchetti A., Plainaki Ch., Cremonese G., et al. Loss rates of Europa's tenuous atmosphere // *Planetary and Space Science*. 2016, Vol. 130, p. 14-23.

414. Lunine J.I. Climate evolution on Mars, Earth, and Titan: was the ancient Sun fainter? // *Planetary Systems, the long view*. Eds. L.M. Celnikier, J. Tran Thrank Van. 1998.— P. 231– 236.

415. Lynch D.K., Mazuk A.L., Russell R.W., Hackwell J.A, 8– to 13– μm spectra of Saturn's A and B rings // *Icarus*. – 2000.– V146, No 1.– P.43– 47.

416. Lyot B. L'aspects des planetes au Pic du Midi dans une lunette de 60 cm d'ouverture // *Astronomie*.– 1953.– V67.– P.3– 21.

417. Macy W.W. Jr., Trafton L.M. Io's sodium emission cloud // *Icarus*. 1975. V25, No 3. P.432-438.

418. Makarov V.V., Efroimsky M. Tidal Dissipation in a Homogeneous Spherical Body. II. Three Examples: Mercury, IO, and Kepler-10b//*The Astrophysical Journal*. 2014, V. 795, No1, article id.7,10 p.

419. Manga M., Michaut C. Formation of lenticulae on Europa by saucer-shaped sills // *American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016*, abstract #P44A-03.

420. Manga Michael, Michaut Chloé. Formation of lenticulae on Europa by saucer-shaped sills // *Icarus*. 2017, Vol. 286, p. 261-269.

421. Matthews R.A. The darkening of Japetri and the origin of Hyperion // *Q. J. R. Astron. Soc.* – 1992.– V33, No 3.– H253–258.

422. Maynard-Casely H. E., Brand H. E. A., Wilson S. A. Exogenic and endogenic Europa minerals // *American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016*, abstract #MR34A-08.

423. Mazarico Erwan, Genova Antonio, Neumann Gregory A., Smith David E., Zuber Maria T. Simulated recovery of Europa's global shape and tidal Love numbers from altimetry and radio tracking during a dedicated flyby tour // *Geophysical Research Letters*. 2015, Vol. 42, Issue 9, p. 3166-3173.

424. McCarthy Christine, Cooper Reid F. Tidal dissipation in creeping ice and the thermal evolution of Europa // *Earth and Planetary Science Letters*. 2016, Vol. 443, p. 185-194.

425. McCord T.B., Carlson R.W., Smythe W.D., et al. Organics and other molecules in the surfaces of Callisto and Ganymede // *Science*. – 1977.– V278, No 5334. – P. 271– 275.

426. McCord T.B., Coradini A., Hibbitts C.A., et al. Cassini VIMS observations of the Galilean satellites including the VIMS calibration procedure // *Icarus*. –2004.– V. 172, No 1. – P. 104– 126.

427. McCord T.B., Hansen G.B., Clark R.N., et al. Non– water–ice constituents in the surface material of the icy Galilean satellites from the Galileo near– infrared mapping spectrometer investigation // *J. Geophys. Res.* – 1998.– V103, No E4. – P. 8603–8626.

428. McCord T.B., Hansen G.B., Hibbitts C.A. Hydrated Salt Minerals on Ganymede's Surface: Evidence of an Ocean Below // *Science*. –2001.– V. 292, No 5521. – P. 1523– 1525.

429. McCord T.B., Johnson T.V., Elias J.H. Saturn and its satellites: Narrow band spectrophotometry (0.3–1.1 μm) // *Astrophys. J.* – 1971.– V. 165, No 2, Pt.1 – P. 413–424.

430. McCord Th.B., Johnson T.V. Lunar spectral reflectivity (0.3 to 2.5 μm) and implications for remote mineralogical analysis // *Science*. – 1970.– V169, No 3948. – P. 855– 858.

431. McDoniel William J., Goldstein David B., Varghese Philip L., Trafton Laurence M. The interaction of Io's plumes and sublimation atmosphere // *Icarus*. 2017, Vol. 294, p. 81-97.

432. McDoniel William J., Goldstein David B., Varghese Philip L., Trafton Laurence M. Three-dimensional simulation of gas and dust in Io's Pele plume // *Icarus*. 2015, Volume 257, p. 251-274.

433. McEwen A. S., Turtle E. P., IVO Team. The Io Volcano Observer for Discovery 2015 // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.1627.

434. McEwen A., Turtle E., Hibbard K., Reynolds E., Adams E. Io Volcano Observer (IVO): Budget travel to the outer Solar System // *Acta Astronautica*. 2014, Vol. 93, p. 539-544.

435. McEwen A.S., Keszthelyi L., Geissler P., et al. Active Volcanism on Io as Seen by Galileo SSI // *Icarus*. –1988.– V. 135, No 1. – P. 181– 219.

436. McEwen A.S., Keszthelyi L., Spencer J.R., et al. High– Temperature Silicate Volcanism on Jupiter's Moon Io // *Science*. –1998.– V. 281, No 5373. – P. 87.

437. McEwen A.S., Simonell D.P., Senske D.R., et al. High-temperature hot spots on Io as seen by the Galileo solid state imaging (SSI) experiment // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – V. 24, No 20. – P. 2443– 2446.

438. McEwen A.S., Soderblom L.A., Johnson T.V., Matson D.L. The global distribution, abundance, and stability of SO₂ on Io // *Icarus.* – 1988. – V. 75, No 3. – P. 450– 478.

439. McEwen A.S., Turtle E.P., Thomas N. The Io Volcano Observer (IVO) for NASA Discovery 2015 // EGU General Assembly 2015, held 12-17 April 2015 in Vienna, Austria. id.14564.

440. McFadden L.A., Bell J., McCord T.B. Visible spectral reflectance measurements 0.3–1.1 μ m of the Galilean satellites at many orbital phase angles 1977– 1978 // *Icarus.* – 1980. – V. 44. – N3. – P. 410– 430.

441. McGovern P. J. Formation and Growth of Mountains on Io: A Distinct Element Method Modeling Approach // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015, in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.2886.

442. McGovern P. J., Kirchoff M. R., White O. L., Schenk P. M. Magma Ascent Pathways Associated with Large Volcanoes on Io // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.1341.

443. McGovern Patrick J., Kirchoff Michelle R., White Oliver L., Schenk Paul M. Magma ascent pathways associated with large mountains on Io // *Icarus.* 2016, Vol. 272, p. 246-257.

444. McGrath M. A., Sparks W. B., Spencer J. R. Search for Trace Species in Europa's Exosphere // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P11C-2111.

445. McGrath Melissa, Sparks William, Spencer John. Search for Trace Species at Europa // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.409.04.

446. McGruder Chima, Sivaramakrishnan Anand, Greenbaum Alexandra. Resolving Volcanism on Io with Aperture Mask Interferometry // American Astronomical Society. 2016, AAS Meeting #227, id.125.06.

447. Mekler Y., Eviatar A., Kupo I. Jovian sulfur nebula // *J.Geophys.Res.*– 1977. – V. 82, No 19. – P.2809– 2814.

448. Mekler Yu., Eviator A. Spectroscopic observations of Io // *Astrophys.J.*– 1974. – V. 183, No 3, Pt.2. – L151–L152.

449. Mendez Loriane, Cotté Cédric, Prudor Aurélien, Weimerskirch Henri. Variability in foraging behaviour of red-footed boobies nesting on Europa Island // *Acta Oecologica.* 2016, Vol. 72, p. 87-97.

450. Milazzo M.P., Keszthelyi L.P., McEwen A.S. Observations and initial modeling of lava SO₂ interactions at Prometheus, Io // *J.Geophys. Res.*—2001.— V. 106, No E12. — P. 33121– 33128.

451. Milazzo M.P., Keszthelyi L.P., Radebaugh J., et al. Volcanic activity at Tvashtar Catena, Io // *Icarus*. — 2005.— V. 179, No 1. — P. 235–251.

452. Milillo Anna, Plainaki Christina, De Angelis Elisabetta, Mangano Valeria, Massetti Stefano, Mura Alessandro, Orsini Stefano, Rispoli Rosanna. Analytical model of Europa's O₂ exosphere // *Planetary and Space Scien.* 2016, Vol. 130, p. 3-13.

453. Millis R.L. UBV photometry of Iapetus // *Icarus*. — 1973.— V. 18, No 2.— P.247– 252.

454. Millis R.L. UBV photometry of Iapetus: results from five apparitions // *Icarus*. — 1977.— V31, No 1.— P.81– 88.

455. Millis R.L., Thompson D.T. UBV photometry of the Galilean satellites // *Icarus*. — 1975.— V. 26, No 4.— P.408– 419.

456. Mischenko M.I. The angular width of the coherent backscatter opposition effect: an application to ice outer planet satellites // *Astrophys.Space.Sci.*— 1992.— V. 194, No 2.— P.327– 333.

457. Moerchen M.M. Hot electron plasma moves in from Io // *Science*. 2014, Vol. 345, Issue 6204, p. 1574-1574.

458. Molaro P., Barbieri M., Monaco L., et al. The Earth transiting the Sun as seen from Jupiter's moons: detection of an inverse Rossiter-McLaughlin effect produced by the opposition surge of the icy Europa // *Monthly Notices of the Royal Astron. Society*. 2015, Vol. 453, Issue 2, p.1684-1691.

459. Momary T.W., Baines K.H., Yanamandra– Fisher P.A., et al., The saturnian satellites in the near– infrared: Absolute photometry at ring plane crossing // *Icarus*. — 2000.— V. 148, No 2. — P. 397–406.

460. Moore M.H., Hudson R.L., Far– infrared spectral studies of phase changes in water ice induced by proton irradiation // *Astrophys. J.*— 1992.— V. 401, No 1, Pt.1. — P. 353– 360.

461. Moose H.W., Clarke J.T. Ultraviolet observations of the Io torus from the IUE observatory // *Astrophys.J.*— 1981.— V. 247, No 1, Pt.1.— P.354– 361.

462. Moose H.W., Durrance S.T., Skinner T.E., et al. IUE spectrum of the Io torus: identification of the $^5S_2 \rightarrow ^3P_{2,1}$ transition of SIII // *Astrophys. J.*— 1093.— V. 275, No 1, Pt.2.— L19– 23.

463. Morgan J.S. Temporal and spatial variations in the Io torus // *Icarus*. — 1985.— V. 62, No 3.— P.389– 414.

464. Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P. Shadow Mechanism and the Opposition Effect of Brightness of Atmosphereless Celestial Bodies // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2013, vol. 29, no. 5, p. 228–236.

465. Morozhenko O. V., Vidmachenko A. P. Features of the method for mapping of physical characteristics of lunar surface according to the data of ultraviolet polarimetry // 17th Ukrainian Conference on Space Research, Odessa, Aug. 21– 25 2017: abstracts. P. 43.

466. Morozhenko O. V., Vidmachenko A. P. Possible space experiment “Mineralogical mapping of the Moon’s surface” // 17th Ukrainian Conference on Space Research, Odessa, Aug. 21– 25 2017: abstracts. P. 44.

467. Morrison D., Cruikshank D.P. Thermal properties of the Galilean satellites // *Icarus*. – 1973.– V. 19, No 2.– P.224– 236.

468. Morrison D., Cruikshank D.P., Murphy R.E., et al. Thermal inertia of Ganymede from 20–micron eclipse radiometry // *Astrophys.J.*– 1971.– V. 167, No 3, Pt.2.– P. L107– L111.

469. Morrison D., Cruikshank D.P., Murphy R.E., Temperatures of Titan and Galilean satellites at 20 microns // *Astrophys.J.*– 1972.– V. 173– No3, Pt 2. – P. L143– L146.

470. Morrison D., Cruikshank D.P., Pilcher C.B., Rieke G.H., Surface compositions of the satellites of Saturn from infrared photometry // *Astrophys. J.* – 1976.– V. 207. – No 3, Pt 2. – P. L213–L216.

471. Morrison D., Morrison N.D., Lazarewicz A.R. Four– Color Photometry of the Galilean satellites // *Icarus*. – 1974.– V23, No 3.– P.399– 416.

472. Morrison D., Telesco C.M. Io: Observational constraints on internal and thermophysics of the surface // *Icarus*. – 1980.– V. 44, No 2. – P. 226– 233.

473. Morrison, D., Johnson, T.V., Shoemaker E.M., et al. Satellites of Saturn—Geological perspective. In: Gehrels, T., Matthews, M.S. (Eds.), *Saturn*. Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ. – 1984.– P. 609–639.

474. Moullet A., Lellouch E., Gurwell M., Moreno R., Black J., Butler B. Distribution of alkali gases in Io's atmosphere // *American Astronomical Society*. 2015, DPS meeting #47, id.311.31.

475. Moullet Arielle, Lellouch Emmanuel, Gurwell Mark, Moreno Raphael, Black John, Butler Brian. Constraining the volcanic contribution to Io's atmosphere with ALMA maps // *American Astronomical Society*. 2014, DPS meeting #46, id.411.01.

476. Muñoz-Iglesias V., Prieto-Ballesteros O., Bonales L. J. Conspicuous assemblages of hydrated minerals from the H₂O-MgSO₄-

CO₂ system on Jupiter's Europa satellite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014, Vol. 125, p. 466-475.

477. Murcray F.J., Goody R. Pictures of the Io sodium cloud // *Astrophys.J.*– 1978.– V. 226, No 1, Pt.1. – P. 327– 335.

478. Murphy R.E., Cruikshank D.L., Morrison D. Radii, albedo, and 20–micron brightness temperature of Iapetus and Rhea // *Astrophys.J.*– 1972.– V. 177, No 2., Pt.2. – L93– L95.

479. Murray B.C., Westphal J.A., Wildey R.L. The eclipse cooling of Ganymede // *Astrophys.J.*– 1965.– V. 141– No 4. – P.1590– 1592.)

480. Murray B.C., Wildey R.L., Westphal J.A. Observations of Jupiter and the Gallilean satellites at 10 microns // *Astrophys.J.*– 1964.– V. 139, No 3. – P.986–993.

481. Murray J.B. New observations of surface markings on Jupiter's satellites // *Icarus*. – 1975.– V. 25, No 3.– P. 397–404.

482. Nash D.B. Io's 4– μ m band and the role of absorbed SO₂. // *Icarus*. – 1983.– V. 54, No 3. – P.511–523.

483. Nash D.B., Conel J.E., Spectral reflectance systematics for mixtures of powdered hypersthene, labradorite and ilmenite // *J.Geophys. Res.* – 1974. – V. 79. – P. 1615– 1621.

484. Nash D.B., Fanale F.P. Io's surface composition based on reflectance spectra of sulfur/salt mixtures and proton– irradiation experiments // *Icarus*. – 1977.– V. 31, No 1. – P.40–80.

485. Nash D.B., Nelson R.M. Spectral evidence for sublimates and absorbates ob Io // *Nature*. – 1979.– V. 280, No 5725.– P.763–766.

486. Nash D.V., Matson D.L., Johnson T.V., Fanale F.P. Na–D line emission from rock specimens by proton bombardment: implications for emissions from Jupiter's satellites Io // *J. Geophys.Res.*– 1975.– V. 80, No 14.– P. 1875–1879.

487. Nassh D.B., Fanale F.P., Nelson R.M. SO₂ frost: UV– visible reflectivity and Io surface coverade // *Geophys.Res.Lett.*– 1980.– V. 7, No 9. – P. 665–668.

488. Neish C.D., Somogyi Á., Lunine J.I., Smith M.A. Low temperature hydrolysis of laboratory tholins in ammonia – water solutions: Implications for prebiotic chemistry on Titan // *Icarus*. –2009.– V. 201, No 1.– P. 412– 421.

489. Nelson R. M., Boryta M. D., Hapke B. W., et al. Jupiter's Satellite Europa: Polarization Properties Explained by a Sub-Micron, Highly Porous Regolith // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.1686.

490. Nelson R. M., Boryta M. D., Hapke B. W., et al. Jupiter's Satellite Europa: Evidence for an Extremely Fine-Grained, High Porosity Surface // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.405.02.

491. Nelson R. M., Boryta M. D., Hapke B. W., Shkuratov Y., Vandervoort K., Vides C. L. Understanding Europa's Surface Texture from Remote Sensing Photopolarimetry // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P11C-1870.

492. Nelson R.M., Buratti B.J., Wallis B.D., et al. Voyager 2 photopolarimeter observations of the uranian satellites // J.Geophys.Res.– 1987.– V. A92, No 13. – P.14905–14919.

493. Nelson R.M., Hapke B.W. Spectral reflectivity of the Galilean satellites and Titan, 0.32 to 0.86 micrometers // Icarus. – 1978.– V. 36, No 3. – P. 304–329.

494. Nelson R.M., Lane A.L., Matson D.L., Veeder G.J., et al. Spectral geometric albedos of the Galilean satellites from 0.24 to 0.34 micrometers: Observations with the International Ultraviolet Explorer // Icarus. – 1987. – V. 72, No 2. – P. 358–380.

495. Nénon Q., Sicard A., Bourdarie S. A new physical model of the electron radiation belts of Jupiter inside Europa's orbit // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2017, Vol. 122, Issue 5, pp. 5148–5167.

496. Nénon Q., Sicard-Piet A., Girard J.N., Zarka P. Modeling the effects of the dust rings and plasma waves on the electron radiation belts of Jupiter // EGU General Assembly 2016, held 17-22 April 2016 in Vienna Austria, p. 3783.

497. Nénon Quentin, Sicard-Piet Angélica. A new physical model of the electron radiation belts of Jupiter: on the importance of the wave-particle interaction between Io and Europa // 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April 2017 in Vienna, Austria., p.661.

498. Nerney E. G., Bagenal F., Pryor W. R., Steffl A. J. Galileo Observations of the Io Plasma Torus // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #P21A-3903.

499. Nerney Edward G., Bagenal Fran, Steffl Andrew J. Io plasma torus ion composition: Voyager, Galileo, and Cassini // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2017, Vol. 122, Issue 1, p. 727–744.

500. Neugebauer M., Lazarus A.J., Altwegg K., et al., The pick– up of cometary protons by the solar wind // Astron. Astrophys. – 1987.– V. 187, No 1– 2. – P. 21– 24.

501. Newman S.F., Buratti B. J., et al. Photometric and spectral analysis of the distribution of crystalline and amorphous ices on Enceladus as seen by Cassini // *Icarus*. –2008.– V. 193, No 2.– P. 397– 406.

502. Nicholson P.D., Matthews K. Near– infrared observations of the jovian ring and small satellites // *Icarus*. –1991.– V. 93, No 2. – P. 331– 346.

503. Nimmo F., Pappalardo R.T. Diapir–induced reorientation of Saturn's moon Enceladus // *Nature*. – 2006.– V. 441, No 7093. – P. 614– 616.

504. Nimmo F., Spencer J.R., Pappalardo R.T., Mullen M.E. Heating as the origin of the plumes and heat flux on Enceladus // *Nature*. –2007.– V. 447, No 7142. – P. 289–291.

505. Noland M., Veverka J., Morrison D., et al. Six– color photometry of Iapetus, Titan, Rhea, Dione and Tethys // *Icarus*. –1974.– V. 23, – No 3. – P.334– 354.

506. Noll, K.S., Roush, T.L., Cruikshank, D.P., et al. Detection of ozone on Saturn's Satellites Rhea and Dione // *Nature*. – 1997.– V. 388, No 6637. – P. 45– 47.

507. Noviello J. L., Rhoden A. R. Order from Chaos: A Quantitative Approach to Identifying Small Chaos Features on Europa // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2579.

508. Nowling Michelle, Moullet Arielle. Direct Wind Measurements in Io's Atmosphere // American Astronomical Society. 2015, AAS Meeting #225, id.137.11.

509. Nowling Michelle, Moullet Arielle. Direct Wind Measurements in Io's Atmosphere // American Astronomical Society. 2014, DPS meeting #46, id.422.16.

510. Ockert M.E., Nelson R.M., Lane A.L., Matson D.L. Europe's ultraviolet absorption band (260 to 320 nm): temporal and spatial evidence from IUE // *Icarus*. – 1987.– V. 70, No 3. – P. 499– 505.

511. Olkin C.B., Elliot J.L., Hammel H.B., et al. The thermal structure of Triton's atmosphere: Results from the 1993 and 1995 occultations // *Icarus*. – 1997.– V. 129, No 1. – P. 178– 201.

512. Ordóñez-Etxeberria I., Sánchez-Lavega A., del Río-Gaztelurrutia T. Introducing gravitational resonances from simple observations of Jupiter's Galilean satellites // *European Journal of Physics*. 2016, Vol. 37, Issue 6, p. 065601.

513. O'Reilly T.C., Davies G.F. Magma transport of heat on Io – A mechanism allowing a thick lithosphere // *Geophys. Res. Lett.* – 1981. – V.8. – No 3. – P. 313– 316.

514. Orlando T., McCord T.B., Grieves G.A. The chemical nature of Europa surface material and the relation to a subsurface ocean // *Icarus*. – 2005. – V. 177, No 2. – P. 528– 533.

515. Ostro S.J., Campbell D.B., Pettengill G.H., Shapiro I.I., Radar observations of the icy Galilean satellites // *Icarus*. – 1980. – V44, No 2. – P.431– 440.

516. Ostro S.J., West R.D., Janssen M.A., et al. Cassini RADAR observations of Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Iapetus, Hyperion, and Phoebe // *Icarus*. – 2006. – V. 183, No 2. – P.479– 490.

517. Owen F.N., Lazor F.J., Surface color variations of the Galilean satellites // *Icarus*. – 1973. – V. 19, No 1. – P. 30– 33.

518. Owen T., Bolton S. J. A Plan for Searching for Life at Mars and Europa // Planetary Science Vision 2050 Workshop held 27-28 February and 1 March, 2017 in Washington, DC. LPI Contribution No. 1989, id.8107.

519. Owen T.C., Cruikshank D.P., Dalle Ore C.M., et al. Detection of water ice on Saturn's satellite Phoebe // *Icarus*. – 1999. – V140, No 2. – P.379–382.

520. Owen, T.C., Cruikshank, D.P., Dalle Ore, C.M., et al. Decoding the domino: The dark side of Iapetus // *Icarus*. – 2001. – V. 149, No 1. – P. 160–172.

521. Oza Apurva V., Leblanc Francois, Schmidt Carl, Johnson Robert E. Origin and Evolution of Europa's Oxygen Exosphere // American Astronomical Society. 2016, DPS meeting #48, id.517.05.

522. Ozgurel O., Pauzat F., Ellinger Y., Markovits A., Mousis O., LCT, LAM. On the origin of alkali metals in Europa exosphere // American Astronomical Society. 2016, DPS meeting #48, id.517.04.

523. Paganini L., Mumma M.J., Hurford T., et al. "Sniffing" Jupiter's moon Europa through ground-based IR observations // American Astronomical Society. 2016, DPS meeting #48, id.517.03.

524. Panning M. P., Stähler S. C., Huang H. H., Vance S., Kedar S., Lorenz R. D., Pike W. T. What will Europa sound like? Modeling seismic background noise due to tidal cracking events // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P31A-2083.

525. Pappalardo R. T., Senske D., Prockter L., et al. Science Objectives for the Europa Clipper Mission Concept: Investigating the Potential Habitability of Europa // European Planetary Science Congress 2015, held 27 September - 2 October 2015 in Nantes, France, Online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, id. EPSC 2015-156.

526. Pappalardo R.T., Belton M.J.S., Breneman H.H., et al. Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence // *J. Geophys. Res.*–1999.– V. 104, No E10. – P. 24015– 24055.

527. Pappalardo R.T., Head J.W., Collins G.C., et al. Grooved Terrain on Ganymede: First Results from Galileo High– Resolution Imaging // *Icarus.* – 1998.– V. 135, No 2. – P. 276– 302.

528. Pappalardo R.T., Head J.W., Greeley R., et al., Geological evidence for solid– state convection in Europa’s ice shell // *Nature.* – 1998.– V. 391, No 6665. – P. 365– 368.

529. Pappalardo Robert T., Senske David A., Prockter Louise, et al. Science of the Europa Multiple Flyby Mission // *American Astronomical Society.* 2016, DPS meeting #48, id.123.26.

530. Parro Laura M., Ruiz Javier, Pappalardo Robert T. Timing of chaotic terrain formation in Argadnel Regio, Europa, and implications for geological history // *Planetary and Space Science.* 2016, Vol. 130, p. 24-29.

531. Pascu D., Storrs A.D., Wells E.N., et al., HST BVI photometry of Triton and Proteus // *Icarus.* – 2006. – V185, No 2. – P487–491.

532. Patthoff D. A., Davies A. G. Tidal Stresses and Volcanism on Io // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.1748.

533. Pauliny– Toth I.I.K., Witzel A., Gorgolewski S. The brightness temperatures of Ganymede and Callisto at 2.8 cm wavelength // *Astron. Astrophys.* – 1974. – V. 34, No 1. – P.129–132.

534. Pauliny–Toth I.I.K., Witzel A., Gorgolewski S. Observations of Ganymede and Kallisto at 1.3 cm wavelength // *Astron. Astrophys.*– 1977. – V. 58, No 3. – P. L27– L28.

535. Payan A. P., Rajendar A., Paty C. S., Crary F. Effect of plasma torus density variations on the morphology and brightness of the Io footprint // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2014, Vol. 119, Issue 5, pp. 3641-3649.

536. Perkins R. P., Patterson G. W., Prockter L. M., et al. An Analysis of Plate Motions on Europa Associated with the Formation of Astypalaea and Libya Lineae // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2576.

537. Peterson Ch. An explanation for Iapetus’ asymmetric reflectance // *Icarus.* – 1975.– V. 24, No 4. – P.499–502.

538. Pettinelli E., Cosciotti B., Di Paolo F., et al. Dielectric properties of Jovian satellite ice analogs for subsurface radar exploration: A review // *Reviews of Geophysics.* 2015, Vol., Issue 3, p. 593-641.

539. Phipps P. H., Withers P. Feasibility of Juno radio occultations of the Io plasma torus // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P33C-2150.

540. Phipps Phillip H., Withers Paul. Radio occultations of the Io plasma torus by Juno are feasible // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017, Vol. 122, Issue 2, p. 1731-1750.

541. Pike W.T., Standley I.M., Calcutt S. B., et al. The Europa Seismic Package (ESP) 1. Selecting a Broadband Microseismometer for Ocean Worlds // 3rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Mission, held 24-27 October 2016 in Pasadena, California. LPI Contribution No.1980, id.4133.

542. Pilcher C.B., Fertel J.H., Morgan J.S. Forbidden S II images of the Io torus // *Astrophys. J.* –1985.– V. 291, No 1, Pt. 1. – P. 377– 393.

543. Pilcher C.B., Morgan J.S. Magnetic longitude variations in the IO torus // *Advances in Space Research.* – 1985.– V. 5, No 4. – P. 337– 345.

544. Pilcher C.B., Morgan J.S. The distribution of S II forbidden line emission around Jupiter // *Astrophys. J.* – 1980.– V. 238, No 1, Pt. 1. – P. 375– 380.

545. Pilcher C.B., Ridgway S.T., McCord Th.B. Galilean satellites: identification of water frost // *Science.* – 1972.– V. 178, No 4065. – P. 1097– 1089.

546. Piscitelli J.R., Cruikshank D.P., Bell J.F. Laboratory studies of infrared nitrogen– methane mixtures: applications to Triton // *Icarus.* – 1988.– V. 76, No 1. – P.118–124.

547. Plainaki Ch., Milillo A., Grassi D., et al. Icy moon exospheres: the interface between Jovian environment and satellite surfaces as a key scientific target for JUICE // EGU General Assembly 2016, held 17-22 April 2016. Vienna Austria, p. 8441.

548. Plescia J.B. Cratering history of the uranian satellites: Umbriel, Titaniya, and Oberon // *J. Gophys. Res.* – 1989. – V. 92, No 14. – P. 14918–14932.

549. Plescia J.B. Geological terrains and crater frequencies on Ariel // *Nature.* – 1987. – V. 327, No 6119. – P. 201– 204.

550. Pollack J.B., Witteborn F.C., Erickson E.F., et al. Near-Infrared spectra of the Galilean satellites: Observations and compositional implications // *Icarus.* – 1978. – V. 36, No 3. – P.271–303.

551. Porco C.C., Helfenstein P., Thomas P.C., et al. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus // *Science.* – 2006.– V. 311, No 5766. – P. 1393– 1401.

552. Pradhan O., Gasiewski A. J. An Autonomous Cryobot Synthetic Aperture Radar for Subsurface Exploration of Europa // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P11B-2072.

553. Prinn R.G., Fegley B., Jr. Kinetic inhibition of CO and N₂ reduction in circumplanetary nebulae – Implications for satellite composition // *Astrophys. J.* – 1981. – V. 249, No 2, Pt. 1. – P. 308–317.

554. Prockter Louise M., Shirley James H., Dalton James B., Kamp L. Surface composition of pull-apart bands in Argadnel Regio, Europa: Evidence of localized cryovolcanic resurfacing during basin formation // *Icarus*. 2017, Vol. 285, p. 27-42.

555. Quick L. C., Fagents S. A., Glaze L. S., Hurford T. A., Prockter L. M. A Volume Flux Approach to Cryolava Dome Emplacement on Europa // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2539.

556. Quick Lynnae C., Glaze Lori S., Baloga Stephen M. Cryovolcanic emplacement of domes on Europa // *Icarus*. 2017, Vol. 284, p. 477-488.

557. Quick Lynnae C., Marsh Bruce D. Constraining the thickness of Europa's water-ice shell: Insights from tidal dissipation and conductive cooling // *Icarus*. 2015, Vol. 253, p. 16-24.

558. Quick Lynnae C., Marsh Bruce D. Heat transfer of ascending cryomagma on Europa // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2016, Vol. 319, p. 66-77.

559. Quirico E., Schmitt B. Near– Infrared Spectroscopy of Simple Hydrocarbons and Carbon Oxides Diluted in Solid N₂ and as Pure Ices: Implications for Triton and Pluto // *Icarus* – 1977.– V. 127, No 2. – P. 354–378.

560. Quirico E., Schmitt B.A. Spectroscopic Study of CO Diluted in N₂ Ice: Applications for Triton and Pluto // *Icarus*. – 1997.– V. 128, No 1. – P. 181– 188.

561. Radebaugh Jani, Lopes Rosaly M., Howell Robert R., Lorenz, Ralph D., Turtle Elizabeth P. Eruptive behavior of the Marum/Mbwelesu lava lake, Vanuatu and comparisons with lava lakes on Earth and Io // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 322, p. 105-118.

562. Rajendar A., Paty C. S., Dufek J., Roberts J. H. Tidal Heating and Melt Segregation and Migration within Io // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #P43C-3995.

563. Rathbun J. A., Spencer J. R. Observations of Io's Active Volcanoes from IRTF: Imaging and Occultation Lightcurves // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #P13E-01.

564. Rathbun J. A., Spencer J. R., Lopes R. M., Howell R. R. Io's active volcanoes during the New Horizons era: Insights from New Horizons imaging // *Icarus*. 2014, Vol. 231, p. 261-272.

565. Rathbun J.A., Spencer J.R., Howell R.R., et al. Io: A periodic volcano // *Geophys. Res. Lett.*— 2002.— V. 10. — P. 84– 91.

566. Rathbun Julie A., Spencer John R., Howell Robert, Lopes Rosaly. Insights into Io's volcanoes by combining ground-based and spacecraft data // *American Astron. Society*. 2015, DPS meeting #47, id.405.05.

567. Raymond C. A., Jia X., Joy S. P., Khurana K. K., Murphy N., Russell C. T., Strangeway R. J., Weiss B. P. Interior Characterization of Europa using Magnetometry (ICEMAG): Probing the European Ocean and Exosphere // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #P13E-08.

568. Reitsema H.J., Smith B.A., Westrop D.E., Visual and infrared photometry of uranian satellites // *Bull.Amer.Astron.Soc.*— 1978.— V10. — P.585.

569. Reynolds R.T., Squyres S.W., Colburn D.S., McKay Ch.P., On the habitability of Europa // *Icarus*. — 1983. — V. 56, No 2.— P.246– 254.

570. Rhoden A., Hurford T. Jr., Roth L., Retherford K. D. Plumes and Tides on Europa - Implications from the 2015 HST Campaign // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #P23D-03.

571. Rhoden Alyssa Rose, Hurford Terry A., Roth Lorenz, Retherford Kurt. Linking Europa's plume activity to tides, tectonics, and liquid water // *Icarus*. 2015, Vol. 253, p. 169-178.

572. Rieke G.H. The temperature of Amalthea // *Icarus*. — 1975.— V. 25, No 2. — P.333–334.

573. Rieke G.H., Lebofsky L.A., Lebofsky M.J. A search for nitrogen on Titan // *Icarus*. — 1985.— V. 64, No 1. — P.153–155.

574. Roe H.G., de Pater I., McKay C.P. Seasonal variation of Titan's stratospheric ethylene (C₂H₄) observed // *Icarus*. —2004.— V. 169, No 2.— P. 440– 461.

575. Roelling T.L., Ennis D.L., Houck J.R. The 1– mm brightness temperature of Titan // *Icarus*. — 1981.— V. 45, No 3. — P. 618–623.

576. Roesler F.L., Scherb F., Oliverson R., et al. Observations of the plasma torus of Jupiter with a Fabry– Perot/Charge– coupled device (CCD) imaging spectrometer // *Proc.Soc.Photo– Opt. Instrum.Eng.*— 1981.— V. 290. — P. 180– 185.

577. Roesler F.L., Scherb F., Oliverson R.J. Periodic intensity variation in (SIII) 9531 Å emission from the Jupiter plasma torus // *Geophys.Res. Lett.* — 1984.— V. 11. — No 2.— P. 128– 130.

578. Rojas J.F., Sanchez-Lavega A. Jupiter's Galilean satellites mutual events as a teaching tool // European Planetary Science Congress 2015, held 27 September - 2 October 2015 in Nantes, France, Online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, id. EPSC 2015-619.

579. Romero-Wolf Andrew, Schroeder Dustin M., Ries Paul, Bills Bruce G., Naudet Charles, Scott Bryan R., Treuhaft Robert, Vance Steve. Prospects of passive radio detection of a subsurface ocean on Europa with a lander // Planetary and Space Science/ 2016, Vol. 129, p. 118-121.

580. Rosen M.D.A., Pipkin F.M. Reflectance spectra for sodium and potassium doped ammonia frosts: comparison for Io's surface // Icarus. – 1978. – V. 35, No 2. – P. 252– 262.

581. Ross M. N., Schubert G. Viscoelastic models of tidal heating in Encedalus // Icarus. – 1989. – V. 78, No 1. – P. 90–101.

582. Roth L., Retherford K.D., Ivchenko N., et al. Detection of a Hydrogen Corona in HST Ly α Images of Europa in Transit of Jupiter//The Astronomical Journal. 2017, V. 153, No 2, article id. 67, 10 p.

583. Roth L., Saur J., Retherford K.D., et al. Europa's far ultraviolet oxygen aurora from a comprehensive set of HST observations // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2016, Vol. 121, Issue 3, p. 2143-2170.

584. Roth L., Saur J., Retherford K.D., Feldman Paul D., Strobel Darrell F. A phenomenological model of Io's UV aurora based on HST/STIS observations // Icarus. 2014, Vol. 228, p. 386-406.

585. Roth Lorenz, Saur Joachim, Retherford Kurt D., Blöcker Aljona, Strobel Darrell F., Feldman Paul D. Constraints on Io's interior from auroral spot oscillations // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2017, Vol. 122, Issue 2, p. 1903-1927.

586. Roush T.L., Cruikshank D.P., Owen T.C. Surface ices in the outer Solar System. In: Farley, K.A. (Ed.), Volatiles in the Earth and Solar System. In: Am. Inst. Phys. Conf. Proc., vol. 341. Am. Inst. Phys., Melville, NY, – 1995. – P. 143–153.

587. Rummel J. D., Race M. S. Exploration of Icy Moons in the Outer Solar System: Updated Planetary Protection Requirements for Missions to Enceladus and Europa // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P33A-2127.

588. Russell H. The stellar magnitudes of the Sun, planets and their satellites // Astrophys. J. – 1916. – V. 43, No 1. – P. 103– 129.

589. Sandel B.R., Shemansky D.E., Broadfoot A.L., et al. Extreme ultraviolet observations from Voyager 2 Encounter with Jupiter // Science. – 1979. – V. 206, No 4421. – P. 962–966.

590. Sandford S.A., Geballe T.R., Salama F., Goorvitch D. New narrow infrared absorption features in the spectrum of Io between 3600 and 3100 cm^{-1} (2.8–3.2 μm) // *Icarus*. – 1994. – V. 110, No 2. – P.292–302.

591. Sarson G.R., Jones C.A., Zhang K., Schubert G. Magnetoconvection dynamos and the magnetic fields of Io and Ganymede // *Science*. – 1997. – V. 276, No 5315. – P. 1106–1108.

592. Sasaki S. Phobos and Deimos as Sources of Martian Dust Ring/Torus // *Lunar and Planet. Sci.* – 1996. – V. 27. – P. 1127.

593. Saur J., Strobel D.F. Atmospheres and plasma interactions at Saturn's largest inner icy satellites // *Astrophys. J.* – 2005. – V. 620, No 2, Pt. 2. – P. L115–L118.

594. Schaefer, B. E., Tourtellotte, S. W., Photometric Light Curve for Nereid in 1998: A Prominent Opposition Surge // *Icarus*. – 2001. – V. 151, No 1. – P.112–117.

595. Schenk P., Buratti B., Helfenstein P., Kempf S., Schmidt J. Colors of Enceladus: Plume Redeposition and Lessons for Europa // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2601.

596. Schmidt B. E., Gooch B. T., Patterson G., Blankenship D. Near Surface Water on Europa? // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P31A-2088.

597. Schmidt C., Johnson R. E., Mendillo M., Baumgardner J. L. Velocity-Resolved Multi-Scale Imaging of Na Escape from Io // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #P21A-3901.

598. Schmidt J., Brilliantov N., Spahn F., Kempf S. Slow dust in Enceladus' plume from condensation and wall collisions in tiger stripe fractures // *Nature*. – 2008. – V. 451, No 7179. – P. 685–688.

599. Schroeder D.M., Romero-Wolf A., Carrer L., et al. Assessing the potential for passive radio sounding of Europa and Ganymede with RIME and REASON // *Planetary and Space Science*. 2017, Vol. 134, p. 52-60.

600. Schubert G., Zhang K.K., Margaret G., Anderson J.D. The magnetic field and internal structure of Ganymede // *Nature*. – 1996. – V. 384, No 6609. – P. 544–545.

601. Seeger C. H., Cox R. Geomorphology of Mountains on Io Provides Insight into Mountain-Patera Relationships // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.1675.

602. Seeliger H.H. Theorie der Beleuchtung der grossen Planeten, insbesondere des Saturn // *Abhandl. Bayer. Akad. Wiss.* – 1887. – V. 16. – P.581

603. Shaefer M.W., Shaefer B.E. Large-amplitude photometric variations of Nereid // *Nature*. – 1987. – V. 333, No 6172. – P.436–438.

604. Shaposhnikov V. E., Rucker H. O., Zaitsev V. V., Litvinenko G. V. Effect of Jovian magnetic field on Io's spot emission // *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts*, Vol. 9, id. EPSC2014-42.

605. Shemansky D. E., Yung Y. L., Liu X., Yoshii J., Hansen C. J., Hendrix A. R., Esposito L. W. A New Understanding of the Europa Atmosphere and Limits on Geophysical Activity // *The Astrophysical Journal*. 2014, Vol. 797, Issue 2, article id. 84, 13 p.

606. Sheppard S.S., Jewitt D.C. An abundant population of small irregular satellites around Jupiter // *Nature*. – 2003. – V. 423, No 6937. – P. 261–263.

607. Shirley James H., Jamieson Corey S., Dalton J. Bradley. Europa's surface composition from near-infrared observations: A comparison of results from linear mixture modeling and radiative transfer modeling // *Earth and Space Science*. 2016, Vol. 3, Issue 8, pp. 326-344.

608. Showalter M.R., Cuzzi J.N. Seeng Ghosts: Photometry of Saturn's G ring // *Icarus*. – 1993. – V. 103, No 1. – P.124–143.

609. Showalter M.R., Lissauer J.J. The Second Ring– Moon System of Uranus: Discovery and Dynamics // *Science*. – 2006. – V. 311, No 5763. – P. 973– 977.

610. Simonelli D.P. Amalthea: implications of the temperature observed of the Voyager // *Icarus*. – 1983. – V. 54, No 3. – P.524– 538.

611. Simonelli D.P., Veverka J. Disk-resolved photometry of Io. II. Opposition surges and normal reflectances // *Icarus*. – 1986. – V. 66, No 3. – P. 428–454.

612. Simonelli D.P., Veverka J. Voyager disk-integrated photometry of Io // *Icarus*. – 1984. – V. 59, No 3. – P. 406–425.

613. Sinton W.M. Io: are vapor explosions responsible for the 5– μm outbursts? // *Icarus*. – 1980. – V.43, No 1. – P. 56– 64.

614. Sinton W.M. The thermal emission spectrum of Io and determination of the heat flux from its spots // *J. Geophys. Res.* – 1981. – V. B86, No 4. – P. 3122–3128.

615. Sinton W.M., Goguen J.D., Nagata T., et al. Infrared polarization measurements of Io in 1986 // *Astron.J.* – 1988. – V. 96, No 3. – P. 1095– 1105.

616. Sinton W.M., Good J., Orton J.S. Infrared scans of Saturn // *Icarus*. – 1980. – V. 452, No 2. – P.251– 256.

617. Skrutskie Michael F., Wilson John, Nelson Matthew, Hinz Philip, Skemer Andrew, Leisenring Jarron. Large Binocular Telescope Adaptive Optics Mid-infrared Spectroscopy of Thermal Radiation from an Eruption

near Io's Gish Bar Patera // American Astronomical Society. 2014, DPS meeting #46, id.418.15.

618. Skyepeck A., Veverka J., Helfenstein P., Baker L. The photometric roughness of Ariel is not unusual // *Icarus*. – 1991. – V. 90, No 1. – P. 181–183.

619. Slezak T. J., Davies A. G., Keszthelyi L. P., et al. Slope Stability Analysis of Scarps on Io's Surface: Implications for Upper Lithospheric Composition // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.2528.

620. Slezak T. J., Radebaugh J., Christiansen E. H. Eigenshape Analysis of Planetary Craterforms: Implications for the Formation of Paterae on Io // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017, at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2871.

621. Slezak T., Keszthelyi L. P., Okubo C., Williams D. A. Paterae on Io: Compositional Constraints from Slope Stability Analysis // 45th Lunar and Planetary Science Conference, held 17-21 March 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p. 1552.

622. Smith B.A., Soderblom L.A., Banfield D., et al. Voyager 2 at Neptune: Imaging Science Results // *Science*. –1989.– V. 246, No 4936. – P. 1422–1449

623. Smith B.A., Soderblom L.A., Johnson T.V. The Jupiter system through the eyes of Voyager 1 // *Science*. –1979.– V. 204, No 4396. – P. 960– 972.

624. Smyth W.H. Io's sodium cloud: explanation of the east– west asymmetries.II. // *Astrophys.J.* – 1983. – V. 264, No 2, Pt. 1. – P.708–725.

625. Smyth W.H., McElroy M.B. Io's sodium cloud: comparison of models and two–dimensional images // *Astrophys. J.* – 1978. – V. 226, No 1, Pt. 1. – P. 336–346.

626. Smythe W.D., Lopes–Gautier R., Ocampo A., et al. Galilean satellite observation plans for the near– infrared mapping spectrometer experiment on the Galileo spacecraft // *J. Geophys. Res.* – 1995. – V. 100, No E9. – P. 18957–18972.

627. Smythe W.D., Nelson R.M., Nash D.B. Spectral evidence for SO₂ frost or absordate on Io's surface // *Nature*. – 1979. – V. 280, No 5725. – P. 766.

628. Soderlund Krista M., Schmidt Britney E., Wicht Johannes, Blankenship Donald D. Thermal Coupling Between the Ocean and Mantle of Europa: Implications for Ocean Convection // American Astronomical Society. 2015, DPS meeting #47, id.405.08.

629. Soifer B.T., Neugebauer G., Matthews K. Near– infrared spectrophotometry of the satellites and rings of Uranus // *Icarus*. – 1981.– V. 45, No 3. – P. 612–617.

630. Solomon S.C., Head J.W., Kaula W.M., et al. Venus tectonics: Initial analysis from Magellan // *Science*. – 1991. – V. 252, No 5003. – P. 297– 312.

631. Soter S. Brightness of Iapetus // *IAU Colloq.* 28. Cornell University, August 1974. – P. 45–46.

632. Southworth B. S., Kempf S., Schmidt J. Modeling Europa's dust plumes // *Geophysical Research Letters*. 2016, Vol. 42, Issue 24, p. 10,541–10,548.

633. Southworth B., Kempf S., Schmidt J. Modeling Europa's Dust Plumes // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #P11C-2113.

634. Sparks W. B., Hand K. P., McGrath M. A., et al. Probing for Evidence of Plumes on Europa with HST/STIS // *The Astrophysical Journal*. 2016, Vol. 829, Issue 2, article id. 121, 21 p.

635. Sparks W. B., Schmidt B. E., McGrath M. A., et al. Active Cryovolcanism on Europa? // *The Astrophysical Journal Letters*. 2017, Vol. 839, Issue 2, article id. L18, 5 p.

636. Spencer J.R. Thermal segregation of water ice on the Galilean satellites // *Icarus*. – 1987.– V. 69, No 2. – P. 297– 313.

637. Spencer J.R., Calvin, Wendy M.; et al. CCD Spectra of the Galilean Satellites: Molecular Oxygen on Ganymede // *J. Geophys. Res.* – 1995. – V. 100, No E9. – P. 19049–19056

638. Spencer J.R., Moore J.M. The influence of thermal inertia on temperatures and frost stability on Triton // *Icarus*. – 1992.– V99, No 1. – P. 261– 272.

639. Spitale J., Porco C.C. Association of the jets of Enceladus with the warmest regions on its south–polar fractures // *Nature*. – 2007. – V. 449, No 7163. – P. 695– 697.

640. Spitale J.N., Jacobson R.A., Porco C.C., Owen W.M., Jr. The Orbits of Saturn's Small Satellites Derived from Combined Historic and Cassini Imaging Observations // *Astron. J.* – 2006.– V. 132, No 2. – P. 692–710.

641. Squires S.W., Buratti B., Veverka J., Sagan C. Voyager photometry of Iapetus // *Icarus*. – 1984. – V. 59, No 3. – P. 426– 435.

642. Squyres S.W., Reynolds R.T., Cassen P.M. The evolution of Enceladus // *Icarus*. – 1983. – V.53, No 2. – P. 319–331.

643. Squyres S.W., Sagan C. Albedo asymmetry of Iapetus // *Nature*. – 1983. – V.303, No 5920. – P. 782– 785.

644. Stebbins J. The light-variations of the satellites of Jupiter and their application to the solar constant // *Lick Obs. Bull.* – 1927.– V.13, No 1. – P. 1– 11.

645. Steffl A.J., Bagenal F., Stewart A., Ian F. Cassini UVIS observations of the Io plasma torus. II. Radial variations // *Icarus.* – 2004.– V. 172, No 1. – P. 78– 90.

646. Steinke Teresa, van der Wal Wouter, Hu Haiyang, Vermeersen Bert. Tidal Dissipation Within the Jupiter Moon Io - A Numerical Approach // 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April 2017 in Vienna, Austria., p.9341.

647. Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Miniaylo D. N. (2019) Methods of heating areas where a person lives below the surface of the Moon // 6-th Gamow International Conference in Odessa “New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow” and 19-th Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, Ukraine, Odessa, August 11-18, 2019, p. 57-58.

648. Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Miniaylo D. N. (2019) Ways of human survival on the Moon // 6-th Gamow International Conference in Odessa “New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow” and 19-th Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, Ukraine, Odessa, August 11-18, 2019, p. 57.

649. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. Miniaylo D.N. Kolotilov N.N. (2022) The Moon Should Become the Main Testing Ground for the Development and Testing of Thermal and Gravitational Adaptation Systems for Terraforming of Planets and Planetoids // 53rd Lunar and Planetary Science Conference, held 7-11 March 2022 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2678, 2022, id.1054.

650. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2018) Europe as a goal for colonization // 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. The program and abstracts. Uman, Ukraine, p. 56-57.

651. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2018) Possibility of accommodation in a satellite Europe // 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. The program and abstracts. Uman, Ukraine, p. 61-63.

652. Steklov A.F., Vidmachenko A.P. (2020) Ways to colonize the Moon // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 84-85.

653. Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Dashiev G.N. (2019) On the creation of technology for a comfortable human life on the Moon // *Lunar*

ISRU 2019. Developing a New Space Economy Through Lunar Resources and Their Utilization, July 15-17, 2019, Columbia, Maryland, id. 5033

654. Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Miniaylo D.M. (2019) Methods of heating areas for human living under the surface of the Moon // Lunar ISRU 2019. Developing a New Space Economy Through Lunar Resources and Their Utilization, July 15-17, 2019, Columbia, Maryland, LPI Contribution No 2152, id. 5107.

655. Steklov E.A., Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2019) The water resource of the Moon is sufficient for its colonization // 6-th Gamow International Conference in Odessa “New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow” and 19-th Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, Ukraine, Odessa, August 11-18, 2019, p. 43.

656. Stern S.A., Festou M.C., Santvoort J. Van, Buratti B.J. (1990) The first Uv spectrum of a uranian satellites: IUE observations of Oberon from 2650– 3200Å // *Astron. J.* V. 100, No 5. – P. 1676– 1679.

657. Stillman D. E., Grimm R. E., MacGregor J. A., Sander-Olhoeft M., Brown J. Constraints on the Geophysical Detection of Brine within the Europa Ice Shell From a Synthesis of Dielectric Spectroscopy Measurements // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P54B-08.

658. Stockton A. M., Kim J., Schmidt B. E., Putman P., Duca Z. A., Cantrell T., Cato M., Russell M. J. An Ice Shell Impact Penetrator (IceShIP) for Organic Analysis on Europa // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #P11C-2106.

659. Stone E.C., Miner E.D. Voyager 1 encounter with Saturnian system // *Science*. – 1981. – V. 212, No 4491. – P. 159– 163.

660. Stone E.C., Miner E.D., The Voyager 2 Encounter with the Uranian system // *Science*. – 1986. – V. 233, No 4759. – P. 39– 43.

661. Stooke P.J., The shapes and surface features of Prometheus and Pandora // *Earth, Moon, and Planets*. – 1993. – V. 62, No 3. – P. 199– 221.

662. Stooke P.J., The surfaces of Larissa and Proteus // *Earth, Moon, and Planets*. – 1994. – V. 65, No 1 – P. 31–54.

663. Strazzulla G., Organic material from Phoebe to Japetus // *Icarus*. – 1986. – V. 66, No 2. – P. 397–400.

664. Strobel D.F., Davis J. Properties of the Io plasma torus inferred from Voyager EUV data // *Astrophys. J.* – 1980. – V. 238, No 1, Pt. 2. – P. L49–L52.

665. Sullivan R., Greeley R., Homan K., et al. Episodic plate separation and fracture infill on the surface of Europa // *Nature*. – 1998. – V. 391, No 6665. – P. 371– 373.

666. Svitek T. Azimuthal brightness variation and albedo measurements of the uranian rings // *J. Geophys. Res.* – 1987. – V. A92, No 13. – P. 14979–14986.

667. Thilen D.J., Zellner B. Eight– color photometry of Hyperion, Iapetus, and Phoebe // *Icarus* – 1983. – V. 53, No 2. – P. 341– 347.

668. Tholen D.J., Zellner B. Multicolor photometry of outer jovian satellites // *Icarus*. – 1984.– V. 58, No 2. – P. 246– 253.

669. Thomas P., Veverka J. Hyperion: analysis of Voyager observations // *Icarus*. – 1985.– V.64, No 3. – P. 414–424.

670. Thomas P., Veverka J., Morrison D., et al. Saturn's small satellites – Voyager imaging results // *J. Geophys. Res.* – 1983.– V. 88, No 11. – P. 8736–8742.

671. Thomas P., Weitz C., Veverka J. Small satellites of Uranus: Disk– integrated photometry and estimated radii // *Icarus*. – 1989.– V. 81, No 1. – P. 92–101.

672. Thomas P.C. Shapes of small satellites // *Icarus*. –1988. – V. 77, No 2. – P. 248– 274.

673. Thomas P.C., Veverka J., Helfenstein P., et al. Titania opposition effect: analysis of Voyager observations // *J. Geophys. Res.* – 1987.– V. A92, No 13. – P. 14884– 14894.

674. Thompson D.T., Lockwood G.W., Photoelectric photometry of Europa and Callisto 1976– 1991 // *J. Geophys. Res.* – 1992.– V. 97, No E9. – P. 14761– 14772.

675. Throop H. B., Showalter M. R., Dones H. C. L., Hamilton D. P., Weaver H. A., Cheng, A. F., Stern S. A., Young L., Olkin C. B., New Horizons Science Team. New Horizons Imaging of Jupiter's Main Ring // *American Astronomical Society*. 2016, DPS meeting #48, id.203.01.

676. Tian F., Stewart A.I.F., Toon O.B., et al. Monte Carlo simulations of the water vapor plumes on Enceladus // *Icarus*. – 2007.– V. 188, No 1. – P. 154– 161.

677. Tishkovets V.P. Incoherent and coherent backscattering of light by a layer of densely packed random medium // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. –2007.– V108, No 3. – P.454– 463.

678. Tokano T., Neubauer F.M., Laube M., McKay C.P. Three– Dimensional Modeling of the Tropospheric Methane Cycle on Titan // *Icarus*. – 2001.– V. 153, No 1. – P. 130– 147.

679. Tokunaga A.T., Caldwell J., Nolt I.G., The 20– μm brightness temperature of the unilluminated side of Saturn's rings // *Nature*. – 1980.– V. 287, No 5779. – P. 212– 214.

680. Tomasko M.G., Smith P.H., Photometry and polarimetry of Titan: Pioneer 11 observations and their implications for aerosol properties // *Icarus*. –1982.– V. 51, No 1. – P. 65– 95.

681. Trafton L. The Jovian SII torus: its longitudinal asymmetry // *Icarus*. – 1980.– V. 42, No 1. – P. 111– 124.

682. Trafton L. Detection of a potassium cloud near Io // *Nature*. – 1975.– V. 258, No 5537. – P. 690– 692.

683. Trafton L. Periodic variations in Io's sodium and potassium clouds // *Astrophys. J.*– 1977.– V. 215, No 3, Pt. 1. – P. 960– 970.

684. Trafton L., Macy W., Jr. On the distribution of sodium in the vicinity of Io // *Icarus*. – 1978.– V. 33, No 2. – P. 322– 325.

685. Trafton L., Macy W., Jr. Sodium emission profiles: variations due to Io's phase and magnetic latitude // *Astrophys. J.* –1977.– V. 215, No 3, Pt. 1. – P. 971– 976.

686. Trafton L., Parkinson T., Macy W., Jr. The spatial extent of sodium emission around Io // *Astrophys. J.* – 1974.– V, No 2., Pt. 2. – P. L85– L89.

687. Trauger J.T., Muench G., Roesler F.L. A study of the Jovian forbidden line S II nebula at high spectral resolution // *Astrophys. J.* – 1980. – V. 236, No 2, Pt. 1. – P. 1035– 1042.

688. Trumbo Samantha K., Brown Michael E., Fischer Patrick D., Hand Kevin P. A New Spectral Feature on the Trailing Hemisphere of Europa at 3.78 μm // *The Astronomical Journal*. 2017, Vol. 153, Issue 6, article id. 250, 5 p.

689. Tryka K.A., Brown R.H., Anicich V., et al. Spectroscopic determination of the phase composition and temperature of nitrogen ice on Triton // *Science*. –1993.– V. 261, No 5122. – P. 751– 754.

690. Tsang C. C. C., Spencer J. R., Lellouch E., Valverde M. L., Richter M., Lacy J. Io's Atmosphere in Jupiter Eclipse: Modeling Surface Temperatures and Atmospheric Densities to Elucidate Atmospheric Support // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16–20, 2015, in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.2043.

691. Tsang C., Spencer J.R., Lellouch E., Lopez-Valverde M.A., Richter M. The Nature of Io's Primary Atmosphere: Collapse in Jupiter Eclipse // *American Astronomical Society*. 2016, DPS meeting #48, id.517.10.

692. Tsang C.C.C., Spencer J.R., Jessup K.L. Non-detection of post-eclipse changes in Io's Jupiter-facing atmosphere: Evidence for volcanic support? // *Icarus*.2015, Volume 248, p. 243–253.

693. Tsang Constantine C. C., Rathbun Julie A., Spencer John R., Hesman Brigitte E., Abramov Oleg. Io's hot spots in the near-infrared detected by LEISA during the New Horizons flyby // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2014, Vol. 119, Issue 10, p. 2222–2238.

694. Tsang Constantine C. C., Spencer John R., Lellouch Emmanuel, Lopez-Valverde Miguel A., Richter Matthew J. The collapse of Io's primary atmosphere in Jupiter eclipse // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2016, Vol. 121, Issue 8, p. 1400-1410.

695. Tsang Constantine, Spencer John, Richter Matthew, Lellouch Emmanuel, Lopez-Valverde Miguel. Io's Primary Atmosphere In Eclipse: First Observations from Gemini-TEXES // *American Astronomical Society*. 2014, DPS meeting #46, id.411.02.

696. Tsuji Daisuke, Teanby Nicholas A. Europa's small impactor flux and seismic detection predictions // *Icarus*. 2016, Vol. 277, p. 39-55.

697. Tsuji Daisuke, Teanby Nicholas. Seismic detectability of meteorite impacts on Europa // *EGU General Assembly 2016*, held 17-22 April 2016 in Vienna Austria, p.1352.

698. Turtle E. P., McEwen A. S., Osterman S. N., Boldt J. D., Strohbehn K., EIS Science Team The Europa Imaging System (EIS), a Camera Suite to investigate Europa's Geology, Ice Shell, and Potential for Current Activity // *3rd International Workshop on Instrumentation for Planetary Mission*, held 24-27 October, 2016 in Pasadena, California. LPI Contribution No. 1980, id.4091.

699. Turtle E.P., Perry J.E., McEwen A.S., et al. Cassini imaging of Titan's high- latitude lakes, clouds, and south- polar surface changes // *Geophys. Res. Lett.* –2009.– V. 36, No 2. – P. 1– 6.

700. Tyler G.L., Sweetnam D.N., Anderson J.D., et al. Voyager radio science observations of Neptune and Triton // *Science*. –1989.– V. 246, No 4936. – P. 1466–1473.

701. Tyler R.H., Henning W.G., Hamilton Ch.W. Tidal Heating in a Magma Ocean within Jupiter's Moon Io // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2015, Vol. 218, Issue 2, article id. 22, 17 p.

702. Ulich B.L. Absolute brightness temperature measurements at 2.1 mm wavelength // *Icarus*. – 1974. – V.21, No 3.– P. 254– 261.

703. Ulich B.L., Conclin E.K. Observations of Ganimede,. Callisto, Ceres, Uranus, and Neptune at 3.33 mm wavelength // *Icarus*. – 1976.– V. 27, No 2.– P. 183– 189.

704. Vance S. D., Hand K. P., Pappalardo R. T. Geophysical controls of chemical disequilibria in Europa // *Geophysical Research Letters*. 2016, Vol. 43, Issue 10, p. 4871-4879.

705. Veeder G. J., Davies A. G., Matson D. L., Johnson T. V. Faint Thermal Sources on Io // *45th Lunar and Planetary Science Conference*, held 17-21 March, 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p. 1255.

706. Veeder G. J., Davies A. G., Matson D. L., Johnson T. V. Infrared Thermal Emission Lightcurve for Hot Spots on Io // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.1361.

707. Veeder G.J., Davies Ashley Gerard, Matson Dennis L., Johnson Torrence V., Williams David A., Radebaugh Jani. Io: Heat flow from small volcanic features // *Icarus*. 2015, Vol. 245, p. 379-410.

708. Verbiscer A., Veverka J., Detection of Albedo Markings on Enceladus // *Bull. Am. Astron. Soc.* – 1991.– V. 23, No 3. – P. 1168.

709. Verbiscer A.J., French R.G., McGhee C.A. The opposition surge of Enceladus: HST observations 338– 1022 nm // *Icarus*. – 2005.– V173, No 1.– P.66– 83.

710. Verbiscer A.J., Veverka J. A photometric study of Enceladus // *Icarus*. – 1994.– V. 110, No1. – P. 155– 164.

711. Verbiscer, A.J., Peterson, D.E., Skrutskie M.F., et al., Near-infrared spectra of the leading and trailing hemispheres of Encelad // *Icarus*. – 2006. – V. 182, No 1. – P. 211–223.

712. Veverka J. Polarization measurements of the Galilean satellites of Jupiter // *Icarus*. – 1971.– V.14, No3. – P. 355– 359.

713. Veverka J. Titan: Polarimetric evidence for optically thick atmosphere // *Icarus*. – 1973. – V. 19, No 4. – P. 657– 660.

714. Veverka J., Helfenstein P., Skyeck A., Rhomas P. Minnaert photometric parameters for the satellites of Uranus // *Icarus*. – 1989.– V78, No 1.– P.14– 26.

715. Veverka J., Thomas P., Helfenstein P. Satellites of Uranus: Disk-integrated photometry from Voyager imaging observations // *J. Geophys. Res.* – 1987. – V. A92, No13. – P. 14895–14904.

716. Vidmachenko A. P. (2018) Features of volcanoes on different Solar system bodies // *Astronomical School's Report*, vol. 14, no. 1, p. 1-14.

716a. Vidmachenko A.P. (2020) Possible life in the ocean on the satellite Enceladus // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 9-11.

716b. Vidmachenko A.P. (2020) At another satellite of Saturn – Dione – may be the global ocean // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 7-8.

717. Vidmachenko A. P. (2022) Features of seasonal changes on Pluto. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. Science, innovations and education: problems and prospects. (March 9-11, 2022). Chapter 17. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. P. 108-116.

718. Vidmachenko A. P. Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies // Astronomical School's Report. 2016, Vol. 12, No. 1, p. 14-26

719. Vidmachenko A. P. Brightness variations of celestial objects in astronomical observations at the Maidanak mountain // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 1994, vol. 10, no. 5, p. 62-68.

720. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. Physical characteristics of the surface of satellites and rings of giant planets // Kyiv: Editorial and publishing department of NUBiP of Ukraine. 2017. -412 p.

721. Vidmachenko A. P., Morozhenko O. V. (2019) Physical parameters of terrestrial planets and their satellites. Kyiv, Editorial and Publishing Department of NULES of Ukraine. -468 p. ISBN: 978-617-7630-87-5.

722. Vidmachenko A. P., Morozhenko O. V. The study of the satellite's surfaces and the rings of the giant planets // Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine Press, Kyiv, Ltd. Dia. 2012. - 255 p.

722a. Vidmachenko A., Mozgovyi A., Steklov O. (2021) The Moon and its water resources. Astronomy and the present: materials of the 10th All-Ukrainian scientific conference, April 12, 2021, Vinnytsia / ed.: V.F. Zabolotny, O.V. Mozgovyi. - Vinnytsia: LLC "TVORY", p. 58-59.

722b. Vidmachenko A., Mozgovyi A., Steklov O., Minyailo D. (2021) Thermal adaptation of long-term bases on the Moon for human residence. Astronomy and the present: materials of the 10th All-Ukrainian scientific conference, April 12, 2021, Vinnytsia / ed.: V.F. Zabolotny, O.V. Mozgovyi. - Vinnytsia: LLC "TVORY", p. 59-60

723. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Active volcanism shows changes on the surface of Jupiter's Moon Io. Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. (March 29-31, 2022). Chapter 17. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. P. 104-113.

724. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Activity of volcanic processes on Jupiter's Moon Io. Proceedings of IX International Scientific and Practical Conference. International scientific innovations in human life. (March 16-18, 2022). Chapter 12. Cognum Publishing House, Manchester, United Kingdom. P. 80-89.

724a. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Active volcanism shows changes on the surface of Jupiter's Moon Io. Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference. (March 29-31, 2022). Chapter 17. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. P. 104-113.

725. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Features of lunar volcanism // International scientific innovations in human life. Proceedings

of the 8th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. 16-18.02.2022. P. 180-188.

726. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Features of the atmosphere of Saturn's moon Titan. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. Science, innovations and education: problems and prospects. (4-6 May 2022). Chapter 44. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. P. 265-275.

727. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Features of volcanic structures on Venus. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research development. BoScience Publisher. Chicago, USA. 23-25.02.2022. P. 195-204.

728. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Geological activity on Titan and possible volcanoes. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. International scientific innovations in human life (11-13 May 2022). Chapter 55. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. P. 318-327.

729. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Life in Europa and on the Earth. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. International scientific innovations in human life. (April 13-15, 2022). Chapter 39. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. P. 264-273.

730. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Manifestations of seasonal changes on Saturn's moon Titan. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Innovations and prospects of world science. (April 28-30, 2022). Chapter 59. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. 2022. P. 354-364.

731. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Modern volcanism on Venus. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. Innovations and prospects of world science. (March 2-4, 2022). Chapter 19. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. P. 119-129.

732. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Sulfur on Jupiter's Moons of Io and Europa. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Science, innovations and education: problems and prospects. (April 6-8, 2022). Chapter 33. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. P. 208-218.

733. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) Volcanoes on Triton among the kingdom of ice. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research development. Chapter 19. BoScience Publisher. Chicago, USA. P. 141-150.

734. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2022) What's new "Huygens" learned about Saturn's moon Titan. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research development (18-20 May 2022). Chapter 54. BoScience Publisher. Chicago, USA. P. 347-356.

735. Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2017) Where else might be life in the Solar system? // 19 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 24–25 2017. The program and abstracts. – Bila Tserkva, Ukraine. P. 21-23.

736. Vidmachenko A., Morozhenko A., Klyanchin A. (2011) Features of morphology and geology of surface of Jupiter satellite Europe // Astronomical School's Report, vol. 7, no. 1, p. 117-132.

737. Vidmachenko A., Morozhenko A., Klyanchin A., Shavlovskiy V., Ivanov Yu.; Kostogryz N. (2011) Asymmetry of reflective properties of the hemispheres of Jupiter satellite Europa // Astronomical School's Report, vol. 7, no. 1, p. 133-144.

738. Vidmachenko A., Mozgovyi A., Steklov O. (2021) The Moon and its water resources. Astronomy and the present: materials of the 10th All-Ukrainian scientific conference, April 12, 2021, Vinnytsia / ed.: V.F. Zabolotny, O.V. Mozgovyi. - Vinnytsia: LLC "TVORY", p. 58-59.

739. Vidmachenko A., Mozgovyi A., Steklov O., Minyailo D. (2021) Thermal adaptation of long-term bases on the Moon for human residence. Astronomy and the present: materials of the 10th All-Ukrainian scientific conference, April 12, 2021, Vinnytsia / ed.: V.F. Zabolotny, O.V. Mozgovyi. - Vinnytsia: LLC "TVORY", p. 59-60.

740. Vidmachenko A.P. (2020) At another satellite of Saturn – Dione – may be the global ocean // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 7-8.

741. Vidmachenko A.P. (2018) Comparative features of volcanoes on Solar system bodies // 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. The program and abstracts. Uman, Ukraine, p. 9-12.

742. Vidmachenko A.P. (2018) Modern volcanic activity on the Moon // 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. The program and abstracts. Uman, Ukraine, p. 5-7.

743. Vidmachenko A.P. (2018) On possible life on Jupiter's satellite Io // 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. The program and abstracts. Uman, Ukraine, p. 17-18.

744. Vidmachenko A.P. (2018) Water in Solar system // 20 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. May 23–24 2018. The program and abstracts. Uman, Ukraine, p. 91-93.

745. Vidmachenko A.P. (2019) Pluto (to the 90th anniversary of the discovery of the planet) // Astronomical almanac, vol. 66, p. 217-229.

746. Vidmachenko A.P. (2020) Possible life in the ocean on the satellite Enceladus // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 9-11.

747. Vid'Machenko A.P. (1981) Absolute electrophotometry of the B ring of Saturn // Physics of planetary atmospheres, p. 132-138.

748. Vidmachenko A.P. (2018) Features of volcanic activity on various bodies of the Solar system // Materials of the International Scientific and Practical Conference "The Objectives of the Sustainable Development of the Third Millennium: Challenges for Universities of Life Sciences", vol. 5, May 23-25, 2018, Kyiv, p.41-42.

749. Vidmachenko A.P. (2018) Small bodies of the solar system. Encyclopedia of Modern Ukraine. Vol. 19: "Malysh-Medicine" / Editor: I.M. Dziuba, M.G. Zheleznyak and others; Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Shevchenko Scientific Society. Kyiv, 688 p. ISBN 978-966-02-8345-9.

750. Vidmachenko A.P. (2018) The Moon. Encyclopedia of Modern Ukraine. Vol. 20: "Medical-Mikoyan" / Editor: I.M. Dziuba, M.G. Zheleznyak and others; Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Shevchenko Scientific Society. Kyiv, 688 p. ISBN 978-966-02-8345-9.

751. Vidmachenko A.P., Delets O.S., Dlugach J.M., et al. (2015) Investigations on physics of planetary atmospheres and small bodies of the Solar system, extrasolar planets and disk structures around the stars // Main Astronomical Observatory of Ukrainian National Academy of Sciences. Kyiv. -92 p.

752. Vidmachenko A.P., Klimenko V.M., Morozhenko A.V. (1979) The transparence of the earth atmosphere on Maidanak mountain during the autumn and winter of 1977-1978 // Astrometriia i Astrofizika, vol. 39, p. 84-87.

753. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2017) Physical characteristics of the surface of satellites and rings of giant planets // Kyiv: Editorial and publishing department of NUBiP of Ukraine. -412 p.

754. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2006) Space investigations and physics of the Solar system bodies // Research Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" (Naukovi visti)6 no. 6, p. 71-81.

755. Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V. (2014) The physical characteristics of surface Earth-like planets, dwarf and small (asteroids) planets, and their companions, according to distance studies // Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, Publishing House "Profi". - 388 p.

755a. Vidmachenko A. P., Morozhenko O. V. (2019) Physical parameters of terrestrial planets and their satellites. (In Ukrainian). Kyiv, Editorial and Publishing Department of NULES of Ukraine. -468 p.

756. Vidmachenko A.P., Nevodovskiy E.P., Ivanov Yu.S. The unified optics-mechanical block for surface astronomical devices // Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series Instrument Making. 2007, vol. 33, p. 41-48.

757. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2020) Tectonic activity on the Europa satellite // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 15-17.

758. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Geysers in the southern polar region of Saturn's moon Enceladus. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. Innovations and prospects of world science (22-24 June 2022). Chapter 43. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. P. 286-292.

759. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Huge catastrophes on the Miranda – smallest of Uranus' five largest moons. Proceedings of the 13th International scientific and practical conference. International scientific innovations in human life (06-08 July 2022). Chapter 54. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. P. 365-375.

760. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Methane circulation on Saturn's moon Titan. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference. Science, innovations and education: problems and prospects (01-03 June, 2022). Chapter 62. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. P. 425-434.

761. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Temperature anomalies in the southern polar region of Enceladus. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. Science, innovations and education: problems and prospects (June 28-30, 2022). Chapter 50. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. P. 345-354.

761a. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) Features of the 13 closest moons and rings of Uranus. Proceedings of the 14th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research

development (13-15 July 2022). Chapter 31. BoScience Publisher. Chicago, USA. P. 188-196.

762. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) The relationship between Enceladus geysers and Saturn's rings and magnetosphere. Proceedings of the 13th International scientific and practical conference. Modern directions of scientific research development (15-17 June 2022). Chapter 68. BoScience Publisher. Chicago, USA. P. 424-432.

763. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. (2022) The surface of Saturn's moon Titan. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. Innovations and prospects of world science (25-27 May, 2022). Chapter 65. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. P. 376-385.

764. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. Mineral resources can be mined on different bodies of the Solar System // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 89-92.

765. Vidmachenko A.P., Steklov A.F. Minerals will be mined on the Moon // 22 International scientific conference Astronomical School of Young Scientists. December 11–12 2020. Kyiv, Ukraine, p. 94-95.

766. Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Hrudynin B.O. (2022) Seasonal activity of "tiger" stripes on Enceladus. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. International scientific innovations in human life (08-10 June 2022). Chapter 60. Cognum Publishing House. Manchester, United Kingdom. P. 365-375.

766a. Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Miniaylo D.N., Kolotilov N.N. (2022) The Moon Should Become the Main Testing Ground for the Development and Testing of Thermal and Gravitational Adaptation Systems for Terraforming of Planets and Planetoids // 53rd Lunar and Planetary Science Conference, held 7-11 March, 2022 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2678, 2022, id.1054.

767. Vilas F., Jarvis K.S., Barker E.S., et al. Iapetus dark and bright material: Giving compositional interpretation some latitude // *Icarus*. – 2004. – V170, No 1. – P.125–130.

768. Vu Tuan H., Hodyss Robert, Choukroun Mathieu, Johnson Paul V. Chemistry of Frozen Sodium-Magnesium-Sulfate-Chloride Brines: Implications for Surface Expression of Europa's Ocean Composition // *The Astrophysical Journal Letters*. 2016, Vol. 816, Issue 2, article id. L26, 6 p.

769. Wagner R.J., Schmedemann N., Neukum G., Werner S.C., Ivanov B.A., Stephan K., Jaumann R., Palumbo P. Crater Size Distributions on the Jovian Satellites Ganymede and Callisto: Reassessment of Galileo and Voyager Images, and an Outlook to ESA's JUICE Mission // *European*

Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts, Vol. 9, id. EPSC2014-551.

770. Waite J.H., Combi M.R., Ip W.– H., et al. Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus Plume Composition and Structure // *Science*. – 2006. – V. 311, No 5766. – P. 1419–1422.

771. Walker C. C., Schmidt B. E. Active Chaos Regions as the Source of Water Vapor Plumes on Europa // 48th Lunar and Planetary Science Conference, held 20-24 March 2017. The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1964, id.2824.

772. Walker C. C., Schmidt B. E. From Order to Disorder: Characterizing the Transition from Cracked to Collapse on Europa // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p.2839.

773. Walker C. C., Schmidt B. E. Ice collapse over trapped water bodies on Enceladus and Europa // *Geophysical Research Letters*. 2015, Vol. 42, Issue 3, p. 712-719.

774. Walker Matthew, Mitchell Jonathan L., Bills Bruce. Exploring A Thermal-Orbital Feedback Mechanism At Europa // American Astronomical Society. 2016, DPS meeting #48, id.429.14.

775. Wamsteker W. Narrowband photometry of the Galilean satellites // *Comm.Lunar Planet.Lab.*– 1972.– V. 9, No 167.– P166– 177.

776. Wannawichian Suwicha, Promfu Tatphicha. Temporal Variations of Io's Magnetic Footprint Brightness // *Publications of The Korean Astronomical Society*. 2015, vol. 30, issue 2, p. 61-64.

777. Wehinger P.A., Wyskoff S., Frohlich A. Mapping of the sodium emission associated with Io and Jupiter // *Icarus*. – 1976.– V. 27, No 3. – P. 425– 428.

778. Whalen Kelly, Lunine Jonathan I., Blaney Diana L. MISE: A Search for Organics on Europa // American Astronomical Society. 2017, AAS Meeting #229, id.138.04.

779. White O.L., Schenk P. M. Topographic Mapping of Paterae and Layered Plains on Io Using Photoclinometry // 45th Lunar and Planetary Science Conference, held 17-21 March, 2014 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1777, p. 1540.

780. White Oliver L., Schenk Paul M. Topographic mapping of paterae and layered plains on Io using photoclinometry // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2015, Vol. 120, Issue 1, pp. 51-61.

781. White Oliver L., Schenk Paul M., Nimmo Francis, Hoogenboom Trudi. A new stereo topographic map of Io: Implications for geology from global to local scales // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2014, Vol. 119, Issue 6, p. 1276-1301.

782. Wienbruch U., Spohn T. A self-sustained magnetic field on Io? // *Planet. Space Sci.* – 1995.– V. 43, No 9. – P. 1045–1057.

783. Williams D.A., Keszthelyi L.P., Schenk P.M., et al. The Zamama – Thor region of Io: Insights from a synthesis of mapping, topography, and Galileo spacecraft data // *Icarus.* – 2005. – V. 177, No 1. – P. 69– 88.

784. Williams D.J., Mauk B., McEntire R.W. Trapped electrons in Ganymede's magnetic field // *Geophys. Res. Lett.* – 1997.– V. 24, No 23. – P. 2953–2956

785. Wilson P.D., Sagan C. Spectrophotometry and organic matter on Japet. Models of interhemispheric asymmetry // *Icarus.* – 1996.– V.122, No 1. – P. 92–106.

786. Wilson, L., Head J. W. Explosive Volcanism on Atmosphere-Less Bodies — A Comparison of the Moon, Mercury and Io // 46th Lunar and Planetary Science Conference, held March 16-20, 2015 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1832, p.1154.

787. Winebrenner D. P., Elam W. T., Kintner P. M. S., Tyler S., Selker J. S. Clean, Logistically Light Access to Explore the Closest Places on Earth to Europa and Enceladus // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #C51E-08.

788. Wood C.A., Lorenz R., Kirk R., et al. The Cassini RADAR Team. Impact craters on Titan // *Icarus.* –2010.– V. 206, No 1. – P. 334– 344.

789. Wu F.–M., Tudke D.L., Carlson R.W. Europa: ultraviolet emissions and the possibility of atomic oxygen and hydrogen clouds // *Astrophys. J.*– 1978. – V. 225, No 1, Pt.1. – P. 325– 343.

790. Wyrick D. Y., Teolis B. D., Bouquet A., Magee B., Waite J. H. The Effects of Plumes and Other Geologic Activity on Europa's Exospheric Structure and Composition // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p. 2258.

791. Yoneda M. Io's volcanic enhancement seen in Jupiter's sodium nebula // American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #SM31B-2488.

792. Yoneda M., Tsuchiya F., de Kleer K., Kagitani M., Sakanoi T., Koga R., De Pater I. Variations in Io's volcanism seen in Jupiter's sodium nebula, Io plasma torus and thermal infrared emissions // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract #P23C-2180.

793. Yoshikawa I. Summary of Io Plasma Torus activities observed by EXCEED/Hisaki for 3 years // American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract # P21E-01.

794. Zahnle K., Schenk P., Levison H., Dones L. Cratering rates in the outer Solar System // *Icarus.* –2003. – V. 163, No 2. – P. 263– 289.

795. Zellner B. On the nature of Iapets // *Astrophys.J.* – 1972.– V. 174, No 2, Pt. 2. – P. 107–109.

796. Zellner B. The polarization of Titan // *Icarus.* – 1973. – V. 18, No 4. – P. 661– 664.

797. Zolotov M. Yu. Formation of Sulfates on Parent Bodies of Carbonaceous Chondrites, Ceres, Europa, and Other Icy Bodies // 47th Lunar and Planetary Science Conference, held March 21-25, 2016 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903, p. 1778.

Наукове видання

ВІДЬМАЧЕНКО Анатолій Петрович, СТЕКЛОВ Олексій Федорович

Фізичні характеристики природних супутників планет

Міністерство освіти і науки України

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Національна академія наук України, Головна астрономічна обсерваторія

Vidmachenko A.P., Steklov O.F. – Physical characteristics of natural satellites of planets. The monograph presents the main observational results of studying the physical characteristics of the natural satellites of the planets. The data of their research during ground observations and the results obtained with the help of space vehicles are presented. When preparing illustrative material, data from specialized Internet sites were used (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery; <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>; <http://www2.jpl.nasa.gov/>, among others) and from original publications. The list of used publications is given at the end of the publication.

The monograph will be useful for teachers of higher education institutions, students, graduate students, specialists who specialize in experimental astrophysics and the physics of Solar system bodies.