## Відьмаченко А.П. Мороженко О.В.

# Національна академія наук України Головна астрономічна обсерваторія

Відьмаченко А.П. Мороженко О.В.

Дослідження поверхні супутників і кілець планет-гігантів

Київ 2012

#### УДК 523.4

Відьмаченко А.П., Мороженко О.В. Дослідження поверхні супутників і кілець планет-гігантів // Київ: 2012. – 255 с.

У книзі наведено основні результати вивчення оптичних характеристик поля дифузно відбитого випромінювання і фізичних характеристик поверхні супутників планет-гігантів та їхніх кілець.

Видання розраховане для викладачів вищих закладів освіти, студентів, аспірантів і фахівців, які спеціалізуються з експериментальної астрофізики і фізики поверхні тіл Сонячної системи.

### Рецензенти: академік НАН України В.М. Шульга доктор фізико-математичних наук О.К. Черемних

#### Затверджено до друку вченою радою Головної астрономічної обсерваторії НАН України

ISBN 978-966-02-6520-2 © А.П. Відьмаченко, О.В. Мороженко, 2012

<b>3MICT</b>	

Вступ	5
Розділ 1. Супутники Юпітера	13
1.1. Io	15
1.2. Європа	29
1.3. Ганімед	35
1.4. Каллісто	40
1.5. Фазова залежність блиску і ступеня лінійної	
поляризації галілеєвих супутників	42
1.6. Спектрофотометрія та природа поверхневого шару	
галілеєвих супутників	49
1.7. Теплові властивості галілеєвих супутників Юпітера.	55
1.8. Радіолокаційні спостереження галілеєвих супутників	58
1.9. Спектрофотометричні властивості менших	
супутників Юпітера	59
1.10. Життя в надрах Європи?	60
Розділ 2. Супутники Сатурна	62
2.1. Структура поверхневого шару супутників Сатурна	65
2.2. Фазова залежність блиску і ступеня поляризації	77
2.3. Спектрофотометрія крижаних супутників	80
2.4. Титан.	86
2.5. Енцелад	100
Розділ 3. Супутники Урана.	111
3.1. Загальні характеристики супутників Урана.	111
3.2. Зміни блиску супутників Урана з сонячним фазовим	
кутом	119
3.3. Спектрофотометрія супутників і природа їх поверхні	122
Розділ 4. Супутники Нептуна	127
4.1. Загальні характеристики	127
4.2. Спектрофотометрія супутників Нептуна	131
Розділ 5. Кільця Сатурна	136
5.1. Відкриття, номенклатура і структура кілець Сатурна	136
5.2. Спиці в кільцях Сатурна.	145
5.3. Походження кілець Сатурна.	151
5.4. Оптичні властивості кілець Сатурна	154
5.5. Теплові властивості кілець	163
5.6. Радіолокаційні спостереження	165
5.7. Оптична товщина кілець і розмір частинок	168
Розділ 6. Кільця Юпітера	173

Розділ 7. Кільця Урана	179			
Розділ 8. Кільця Нептуна	189			
Розділ 9. Зв'язок деяких кілець і супутників				
Післямова	204			
Список використаної літератури	207-			
	231			

#### Вступ

Утворення супутників навколо певного тіла можливе лише в зоні до 0,4 радіуса так званої **сфери Хілла.** В ній мала дисперсія швидкостей і тому при зіткненні частинок відбувається їх злипання, а не руйнування. Тому будь-яке тіло має навколо себе контрольовану зону стабільного існування супутників.

Перші 4 супутники навколо Юпітера відкрив у січні 1610 р. італійський астроном Галілео Галілей. Лаври їх першовідкривача оспорював німецький астроном Симон Марій, але Г. Галілей перший опублікував свої результати тому й пріоритет залишився за ним і їх прийнято називати **галілеєві супутники**. Та саме С. Марій запропонував кожного з них назвати іменем улюбленців Бога Зевса (Юпітера) в грекоримській міфології – Іо, Європа, Ганімед і Каллісто. Окрім імен супутники планет-гігантів у літературі позначаються ще й номером (відповідно J1, J2, J3 та J4).

Наземними спостереженнями кількість супутників планет-гігантів була доведена до 32 (13 у Юпітера, 11 у Сатурна, 6 в Урана та 2 у Нептуна. Надалі цей список значно розширили завдяки зображенням, переданим на Землю такими космічними апаратами (КА). Піонер-10 досяг Юпітера 4 грудня 1973 р. (мінімальна відстань 200 тис. км). Піонер-11 досяг Юпітера 3 грудня 1974 р. (мінімальна відстань 110 тис. км) і Сатурна 1 вересня 1979 р (мінімальна відстань 21 тис. км). Вояджер-1 досяг Юпітера 5 березня 1979 р. (мінімальна відстань 348 890 км), Сатурна – 22 серпня 1980 р. (мінімальна відстань 126 тис. км). Вояджер-2 досяг Юпітера 2 серпня 1980 р. (мінімальна відстань 721 670 км), Сатурна – 5 червня 1981 р. (мінімальна відстань 100 800 км), Урана – 24 січня 1986 р. (мінімальна відстань 107 млн. км) та околиць Нептуна – 5 червня 1989 р. (мінімальна відстань становила 29 240 км 25 серпня 1989 р.); протягом 6 місяців цей КА передав більше 9 тисяч зображень планети, його супутників та кілець. Галілео досяг Юпітера 7 грудня 1995 р. і вперше став його штучним супутником. Кассіні пролетів мимо Юпітера і 30 червня 2004 р. досяг Сатурна та став його штучним супутником. Станом на 15 лютого 2012 р. було виявлено 168 супутників (Юпітер – 66, Сатурн – 62, Уран – 27, Нептун – 13), основні дані про деякі з них наведені в табл. 1.

Нововідкритим супутникам спочатку дають тимчасові позначення, а після уточнення елементів орбіти вони отримують порядковий номер і назву. Всі супутники Юпітера названі іменами з греко-римської міфології і пов'язані з Юпітером (Зевсом). Відповідно до прийнятих Міжнародним астрономічним союзом (МАС) правил, супутники з прямим рухом отримують переважно латинські імена що закінчуються на літери -*a* або -*o*, назви супутників зі зворотним рухом (переважно грецькі) мають закінчення на літеру -*e*. 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 -*e*: Тайгете, Іокасте, Каліке, Еріноме тощо.

Розмір супутників знаходиться в межах від тисяч до кількох кілометрів, їх форма змінюється від майже сферичної до гантелоподібної чи навіть є уламками. Чотири супутники (Іо, Ганімед, Каллісто в Юпітера та Титан у Сатурна) розміром перевищують Місяць. Зараз детально вивчено обмежена кількість супутників, які за спектральною відбивною здатністю поділені на 5 класів [187]: А – Іо, поверхневий шар якого переважно утворюють солі; В – Каллісто та ведуча сторона Япета з кам'яними поверхнями; С – Гіперіон, Титанія, Оберон і Тритон, поверхневі шари яких переважно складаються з водяного льоду чи інею з добавкою нейтральних мінералів; D – Ганімед, Енцелад, Тефія, Діона, Рея, ведена сторона Япета; Е – Європа, поверхневий шар якої є практично чистим водяним льодом чи інеєм.

За розташуванням у планетній системі супутники ділять на три основні групи: головні, внутрішні та зовнішні.

Внутрішні супутники – це малі тіла неправильної форми з розміром у кілька кілометрів, які могли утворитися в результаті зіткнень або при бомбардуванні астероїдами великих супутників і розташовані у внутрішній частині планетної системи. До них належать 4 супутники Юпітера (Метіда, Адрастея, Амальтея і Теба), 9 – Сатурна (Пан, Атлас, Прометей, Пандора, Епіметей, Янус, Телесто, Каліпсо і Єлена), 13 – Урана (Корделія, Офелія, Біанка, Крессіда, Дездемона, Джульєтта, Портія, Розалінда, Белінда, Пак та S/2003 U1, S/2003 U2 і S/1986 U10) та 6 – Нептуна (Наяда, Таласа, Деспіна, Галатея, Ларісса і Протей).

Супутник	Рік	Автор	Країна	Форма	R, км	М 10 <sup>20</sup> кг	$A_{g}$
			Юпітер				
Io (J1)	1610	Галілей Марій ?	Італія Німеч- чина	Сферична	1815	894	0,6
Європа (J2)	1610	Галілей Марій ?	Італія Німеч- чина	Сферична	1569	480	0,6
Ганімед (J3)	1610	Галілей Марій ?	Італія Німеч- чина	Сферична	2631	1482	0,4

Таблиця 1. Супутники планет-гігантів

Супутник	Рік	Автор	Країна	Форма	R, км	М 10 <sup>20</sup> кг	Ag
Каллісто (J4)	1690	Галілей	Італія	Сферична	2400	1077	0,2
		Марій?	Німеч-				
			чина				
Амальтея (J5)	1892	Бернард	CIIIA	Тривісний	135±10	?	0,06
				еліпсоїд	82±8		
					75±5		
Гімалія (J6)	1904/5	Перріне	CIIIA	Сферична	90±10	?	0,03
Елара (J7)	1904/5	Перріне	CIIIA	Сферична	40±5	?	0,03
Пасифе (J8)	1908	Мелотт	Англія	Сферична	≈35	?	?
Синопе (Ј9)	1914	Ніколсон	CIIIA	Сферична	≈20	?	?
Ліситея (J10)	1938	Ніколсон	CIIIA	Сферична	≈20	?	?
Карме (J11)	1938	Ніколсон	США	Сферична	≈22	?	?
Ананке (J12)	1951	Ніколсон	США	Сферична	≈15	?	?
Леда (J13)	1974	Коваль	CIIIA	Сферична	≈8	?	?
Адрастея(J14)	1979	Джун	США	Тривісний	12,5	?	?
		Даніель-		еліпсоїд	10,7		
		сон			7,5		
Фіва (J15)	1979/	Синнотт	США	Тривісний	?	?	?
	80			еліпсоїд	55±8		
		~			45±8	-	
Метис,(J15)	1970	Синнотт	CIIIA	Тривісний	?	?	?
				елипсоїд	20±2		
			0		20±2		
T (0()	1.655	<b>F</b> ~	Сатурн	01	0575	1246	0.0
Титан (86)	1655	1 юигенс	Нідер-	Сферична	2575	1346	0,2
(S0)	1671	Vaaaini	Ланди	Chamurua	710+0	10.0+1.0	0.5
Miler (58)	10/1	Kaccini	Франція	Сферична	/18±8	18,8±1,2	0,3-
Рея (S5)	1672	Кассіні	Фпанція	Сферична	800+125	24 9+1 5	0,65
Тефія (S3)	1684	Кассіні	Фпанція	Сферична	524+5	7 6±0 9	0.80
Ліона (S4)	1684	Кассіні	Фпанція	Сферична	559+5	$10.5\pm0.3$	0.55
Miмac (S1)	1789	Гершель	Велика	Сферична	197+3	$0.38\pm0.01$	0.77
(51)	1705	repiliens	Британія	e qepii ina	177±3	0,50±0,01	0,
Енцелад (S2)	1789	Гершель	Велика	Сферична	251±5	0.8±0.3	1,04
		1	Британія	1 1		- , ,-	
Гіперон (S7)	1848	У. Д. Бонд	США,	Тривісний	175±15	?	0,25
		Лассел	Англія	еліпсоїд	120±10		
					100±10		
Феба (S9)	1848	Пікерінг	США,	Тривісний	115±10	?	0,06
			Перу	еліпсоїд	110±10		
					105±10		
Янус (S10)	1966/	Дольфюс	Франція	Тривісний	110±5	?	0,5
	80			еліпсоїд	95±5		
					80±5		
Епіметей(S11)	1966/	Фаунтін	CIIIA	Тривісний	70±8	?	0,5
	80	Ларсен		еліпсоїд	58±8		
		Уолкер			50±5		

Супутник	Рік	Автор	Країна	Форма	R, км	М 10 <sup>20</sup> кг	$A_{g}$
Єлена (S12)	1980	Лекаше,	Франція	Тривісний	18±3	?	0,6
		Лаке		еліпсоїд	?		
					<15		
Телесто (S13)	1980	Рейтима,	США	Тривісний	?	?	0,6
		Сміт,		еліпсоїд	12±3		
		Ларсен,			11±3		
(C14)	1000	Фаунтін	CILLA	T	15.0	0	0.0
калпісо (514)	1980	Паско,	CIIIA	тривісний	15±3	2	0,9
		зеидель-		елисогд	13±5		
		Баум			8±3		
		Кюрі					
Прометей (S16)	1980	Колінс та	CIIIA	Тривісний	70+5	9	0.5
inpoliteren (BTO)	1700	ін	chin	еліпсоїл	50±7		0,0
					37+8		
Панлора (S17)	1980	Колінс та	CIIIA	Тривісний	35+8	9	0.5
iningopu (017)	1700	ін	01111	еліпсоїл	43+5		0,0
		- 2			33+5		
Атлас (S15)	1980	Колінс та	CIIIA	Тривісний	19+4	?	0.5
(510)	1700	ін	01111	еліпсоїл	?		0,0
					14+4		
Пааляк					1		
Сіарнак							
Ків'юк							
Іджірак							
Тарвос							
Ер'япо							
Альбіорікс							
Імір							
Фрім							
Скаді							
Мундільфарі							
Суттунг							
2003 (S1)							
		_	Уран				
Титанія (U3)	1787	Гершель	Англія	Сферична	800±5	34,4	0,23
Обертон (U4)	1787	Гершель	Англія	Сферична	775±10	28,7	0,20
Apieль (U1)	1851	Лассел	Англія	Сферична	580±5	124,4	0,38
Умбріель (U2)	1851	Лассел	Англія	Сферична	595±10	11,8	0,16
Міранда (U5)	1948	Койпер	США	Сферична	242±5	0,71	0,22
(1985U1)	1985	«Вояджер- 2»	США	Сферична	≈40	?	≈0,09
(1986U1)	1986	«Вояджер- 2»	США	Сферична	≈40	?	≈0,06
(1986U2)	1986	«Вояджер- 2»	США	Сферична	≈30	?	≈0,04
(1986U3)	1986	«Вояджер- 2»	США	Сферична	≈30	?	≈0,05

Супутник	Рік	Автор	Країна	Форма	R, км	М 10 <sup>20</sup> кг	$A_{g}$
(1986U4)	1986	«Вояджер-	США	Сферична	≈30	?	≈0,05
		2»					
(1986U5)	1986	«Вояджер-	США	Сферична	≈30	?	≈0,05
		2»					
(1986U6)	1986	«Вояджер-	США	Сферична	≈30	?	≈0,04
		2»					
(1986U7)	1986	«Вояджер-	США	Сферична	≈25	?	≈0,05
		2»					
(1986U8)	1986	«Вояджер-	США	Сферична	≈25	?	≈0,05
		2»					
(1986U9)	1986	«Вояджер-	США	Сферична	≈25	?	≈0,05
		2»					
Калібан							
Сікоракс							
Просперо							
Сетебос							
Стефано							
Трінкуло							
2001 (U2)							
2001 (U3)							
2003(U1)							
2003 (U2)							
			Нептун				
Тритон (N1)	1846	Лассел	Англія	Сферична	1355±7	214	0,78
Нереїда (N2)	1949	Койпер	CIIIA	Сферична	170±25	?	0,14
(1989N1)	1989	«Вояджер-	США	Сферична	200±10	?	0,06
· · · ·		2»		1 1			, i
(1989N2)	1989	«Вояджер-	США	Сферична	95+10	?	0,05
		2»					6
(1989N3)	1989	«Вояджер-	CIIIA	Сферична	75±15	?	0,05
		2»					4
(1989N4)	1989	«Вояджер-	CIIIA	Сферична	90±10	?	?
		2»					
(1989N5)	1989	«Вояджер-	CIIIA	Сферична	40±8	?	?
		2»					
(1989N6)	1989	«Вояджер-	CIIIA	Сферична	27±8	?	?
		2»					
2002 (N1)							
2002 (N2)							
2002 (N3)							
2002 (N4)							
2003 (N1)							

**Головні супутники** діаметром 500-5000 км розташовані на відстані від 20 000 до 2 млн. км над рівнем хмар. Допускають, що вони утворилися одночасно з планетою у протопланетній хмарі і мають пряме обертання з регулярною майже коловою орбітою в площині екватора планети. В системі Юпітера – це 4 галілеєвих супутники (Іо, Європа, Ганімед і Каллісто), у Сатурна – 8 (Мімас, Енцелад, Тефія, Діона, Рея, Титан, Гіперіон і Япет), в Урана – 5 (Міранда, Аріель, Умбріель, Титанія та Оберон) та 1 (Тритон) у Нептуна. Винятком є Тритон, який обертається у зворотному напрямку.

Зовнішні супутники знаходяться на відстані від 2 до 50 млн. км і мають діаметр у кілька кілометрів і, скоріше всього, є прибульцями з міжпланетного простору. Для них характерна неправильна форма і нерегулярна витягнута орбіта по різному нахилена до площини екватора; багато з них обертається у зворотному напрямку. За час існування Сонячної системи (4,5 млрд. років) вони не зазнали істотної зміни і зберегли інформацію про ранню стадію свого утворення, тому їх вивчення може наблизити нас до розуміння сценарію походження Сонячної системи. Межа існування супутників визначається областю гравітаційного тяжіння конкретної планети – сферою Хілла; її радіус для Юпітера становить ~ 740 радіусів Юпітера (майже 50 млн. км), Нептуна 86,8 млн. км. З 1995 р. в системі Юпітера кількість далеких нерегулярних супутників зросла до 53, великі півосі найвіддаленіших із них доходять до 0,8 радіуса сфери Хілла. Більшість з них обертається синхронно з орбітальним рухом, коли період обертання навколо осі рівний періоду обертання навколо планети, тому він завжди обернений до планети одним і тим же боком, а вісь обертання майже завжди перпендикулярна площині орбіти. Винятком є Гіперіон з дуже хаотичним обертанням.

Зараз мало що відомо про обертання далеких зовнішніх нерегулярних супутників планет, які рухаються по так званій петлеподібній орбіті що є однією із найскладніших у Сонячній системі. Через віддаленість від планети, на них майже однаковою мірою діє сила тяжіння планети і Сонця, викликаючи швидку прецесію орбіти, внаслідок чого загальна ситуація стає непередбачуваною. Якщо, наприклад, частота прецесії відповідає частоті обертання планети навколо Сонця, то супутник потрапляє в резонанс, який називається **свекція**; при цьому наслідки впливу сонячної гравітації поступово накопичуються і дестабілізують орбіту, витягуючи її еліпс настільки, що супутник або падає на планету (чи на один з її великих супутників), або виходить за межі сфери Хілла і потрапляє в гравітаційні «обійми» Сонця.

Виявилось, що прямі орбіти є уразливішими від зворотних, тому навіть якщо нерегулярні супутники спочатку рівноймовірно знаходились на прямих і зворотних орбітах, то поява вказаного резонансу приводить до того, що на такій відстані збережуться лише супутники зі зворотними орбітами. Супутники захоплені на дуже витягнуті орбіти зі значним нахилом внаслідок ефекту, відомого як **резонанс Козаї**, можуть бути викинуті з орбіти, чи навіть зруйновані. Можливо саме тому поки що не знайдені супутники з нахилом орбіти від 50° до 130°.

Серед супутників Юпітера є 17 осколків, які, скоріше всього, колись утворилися з великого супутника і зараз продовжують рухатися його орбітою. Якщо це так, то більшість нерегулярних супутників мають належати до вторинного покоління. Зараз відомо кілька об'єктів, що повернулися на навколосонячну орбіту після тимчасового захоплення Юпітером. Для захоплення тіла з геліоцентричної на стаціонарну орбіту навколо планети, воно має втратити певну частину початкової енергії і загальмуватися. Оскільки зараз у Сонячній системі практично немає ефективних механізмів дисипації енергії, то захоплення мало б відбутися дуже давно, коли Сонячна система мала дещо інші властивості. В 1970-х рр. запропонували три сценарії захоплення супутників [24], які могли діяти під час або відразу після формування планет.

1. Супутники можуть втрачати енергію через тертя при прольоті крізь протяжні атмосфери зародків Юпітера і Сатурна, коли малі тіла згорали, великі безперешкодно проходили і продовжували рух по орбіті навколо Сонця, а проміжного розміру були захоплені. Однак така модель не пояснює присутність нерегулярних супутників біля Нептуна й Урана, тому що через велику віддаленість від Сонця і малу густину речовини в зовнішніх областях навколосонячного диска ядрам цих планет потрібно було дуже багато часу для досягнення критичної маси, яка необхідна для захоплення суттєвої кількості газу, тому там газове гальмування практично не діяло.

2. Другий механізм припускає активність планети на стадії збільшення її розміру, коли акреція газу на ядро майбутнього гіганта приводила до лавинного збільшення маси, що викликало значне розширення сфери Хілла і через раптове збільшення гравітації ставало потужною пасткою для тіл, які опинилися поблизу планети. Але й цей сценарій не пояснює присутності супутників біля Нептуна й Урана через значно триваліший час збільшення маси. Тому було запропоновано альтернативну модель формування Урана й Нептуна, згідно якій спочатку вони були такими ж масивними, як і Юпітер та Сатурн, потім, під впливом іонізуючого випромінювання сусідніх масивних зірок, втратили значну частину маси. Однак, така планета швидше втрачатиме супутники, ніж захоплюватиме їх.

3. Механізм потрійного зіткнення, згідно якого зіткнення двох тіл у сфері Хілла третього може розсіяти достатньо енергії для захоплення хоча б одного з них. При цьому зіткнення є не обов'язковим, тому що при обміні енергією трьома тілами одне з них може збільшувати свою енергію за рахунок двох інших. При потрійному захопленні можливий варіант, коли тісний подвійний об'єкт розривається гравітацією планети і один з

компонентів викидається на навколосонячну орбіту а інший виходить на супутникову орбіту навколо планети.

Але залишається питання, звідки вони спочатку взялися? Розглядали два варіанти відповіді: на стадії формування Сонячної системи більшість планетезималей або акреціювали в тіло планети чи в основні супутники, або ж були викинуті за межі Сонячної системи, незначна їх частина стала нерегулярними супутниками.

Зараз росте переконання, що такі утворення як кільця притаманні не лише планетам-гігантам. Так, за останніми даними, навколо Землі на відстані  $\approx 300$  км також знаходиться пиловий пояс з дуже дрібних частинок, який проявляється так званим зодіакальним світінням а частинки приписують місячному походженню. Позбавлений атмосфери Місяць безперешкодно бомбардується метеоритами, в результаті чого викидаються фонтани частинок різних розмірів; великі частинки практично зразу ж осідають назад, а дрібніші виносяться в космічний простір і, потрапляючи в сферу тяжіння Землі, скупчуються на певній відстані від неї. Найкраще вивчені кільця у планет-гігантів, а тому саме їм приділимо основну увагу.

#### Розділ І. Супутники Юпітера

Наземні спостереження супутників протягом майже 400 років переважно стосувались галілеєвих супутників Юпітера (рис. 1.1). Це дозволило встановити їх сферичну форму, малорельєфну структуру поверхні та виявити деякі закономірності руху.

Так, приблизно кожні 6 років Земля знаходиться в площині орбіти супутників і протягом кількох місяців відбувається їх взаємне покриття тривалістю від кількох секунд до кількох годин, завдяки чому вдалося досить точно визначити розміри галілеєвих супутників.



Рис. 1.1. Порівняльні зображення галілеєвих супутників. Зліва направо: Іо, Європа, Ганімед і Каллісто. (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Супутники Іо, Європа та Ганімед перебувають в орбітальному резонансі 4:2:1 (за час одного обороту Ганімеда навколо Юпітера, Європа робить два, Іо – чотири), що зумовлює сильне збурення їх орбіт і зміну амплітуди постійних великомасштабних припливів під дією сили тяжіння Юпітера. Розсіювання припливної енергії розігріває надра супутників і зумовлює їх вулканічну (Іо) і тектонічну (Європа, Ганімед) активність. За оцінками, потужність розсіювання припливної енергії оцінюється в 60- $80 \cdot 10^{12}$  Вт для Іо та 6- $8 \cdot 10^{12}$  Вт – для Європи. Отримані з КА «Галілео» дані про гравітаційне і магнітне поле дозволили побудувати модель імовірної внутрішньої будови цих супутників [427]. Вважають, що всі вони мають металеві ядра (з нікелю й заліза) оточені скельною оболонкою. В Іо ця оболонка ймовірно доходить до самої поверхні, Ганімед та Європа мають потужну водяну оболонку у вигляді льоду і рідини, Каллісто є унікальним поєднанням скельної породи та льоду.

Обертання галілеєвих супутників синхронне, тому вони завжди одним і тим же боком повернені до Юпітера, що могло привести до наступного. Із

модельних розрахунків слідує, що на ранній стадії еволюції випромінювання Юпітера могло сягати 10% сучасного сонячного, цього було достатньо для плавлення криги на поверхні ближніх супутників, а можливо й Ганімеда; така ситуація створила спостережні відмінності веденої і ведучої сторін галілеєвих супутників. У Каллісто енергії для плавлення льоду не вистачило, тому його поверхневий шар більше кратерований. Зазначимо, що бік супутника у напрямку його руху по орбіті називають «лідируючий», «ведучий», «передній», а протилежний до нього - «ведений», «задній». Інші супутники Юпітера - повна протилежність до внутрішніх супутників є темними галілеєвих. Так, 10 брилами неправильної форми малого розміру (рис. 1.2), які обертаються навколо Юпітера по майже колових орбітах у площині його екватора. Вони покриті численними кратерами, найбільший з яких на Амальтеї має діаметр понад 90 км; карту Амальтеї з сіткою широт і довгот та назвами окремих деталей можна знайти в [664].



Рис. 1.2. Зображення супутників (зліва направо) Метіс, Адрастея, Амальтея і Теба з КА «Галілео» (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Зовнішні супутники (найбільший Гамалія має розмір 160-180 км, інші – по кілька кілометрів) рухаються переважно ретроградно по сильно витягнутих нерегулярних орбітах зі значними нахилами до площини екватора, відстань від планети може мінятися в 1,5-2 рази. Вони згруповані в підкласи за назвою найбільшого тіла [663]. Ближче до галілеєвих супутників розташовані супутники з прямим рухом, які поділені на три підгрупи: 1) група Фемісто містить лише цей супутник, що рухається на середній відстані 7 млн. км від Юпітера з нахилом орбіти 45°; 2) група Гімалії з п'ятьма супутниками (Гімалія, Леда, Ліситея, Елара та S2000/J11) із середньою відстанню  $\approx 11$  млн. км і нахилом орбіти  $\sim 30^\circ$  до площини екватора планети; 3) група з одним супутником S/2003 J20 з великою піввіссю 17 млн. км і нахилом орбіти 55°.

Супутники зі зворотним рухом поєднують у 4 самостійні групи (розмір батьківських супутників трохи більше 14 км, решти – менше 4 км): 1) група Ананке з великою піввіссю 18-21 млн. км і нахилом орбіти 145-150° (Евпоріе, Іокасте, Еванте, Гарпаліке, Праксідіке, Ортозіе, Герміппе, Ананке. Тіоне й S2003/J3, J12, J21, J18, J6, J16, J15 та J4); 2) група Карме (Ісоное, Кале, Еврідоме, Еріноме, Тайгете, Халдене, Карме, Етне, Каліке, а також S2002/J1, S/2003 J17, J11, J9, J19, J10, J1 та J5) з великою піввіссю 22-24 млн. км і нахилом орбіти 162-165°; 3) Пасіфе (Пасіфе, Спонде, Мегакліте, Синопе, Каллірое, Автоное, S2003/J2, J8, J14) з середньою відстанню 23-28 млн. км і нахилом орбіти 147-152°; 4) група супутника Синопе, до якого з часом долучатимуться інші супутники. Дисперсія швидкості членів однієї групи близька до швидкості відриву від батьківського тіла, яка для супутників зі зворотним рухом складає ~30 м/с, розходження у швидкості між батьківськими тілами в різних групах сягає 200 м/с. Відсутність супутників з нахилом орбіти  $55^{\circ} < i < 130^{\circ}$  відповідає теоретичному висновку, згідно якого такі тіла мусять мігрувати в область галілеєвих супутників.

Ще кілька супутників не належать до жодної з названих груп. Найвіддаленіший з відомих на лютий 2012 р. супутник обертається навколо Юпітера на відстані 30,291 млн. км (0,21 а. о.) і здійснює один оборот за 982,5 діб.

Поки що не існує єдиної думки про походження нерегулярних супутників, хоча вважають, що вони сформувалися з навколопланетного газопилового диска в результаті злипання багатьох дрібних частинок, не виключається і їх гравітаційне захоплення. Так, комп'ютерне моделювання показало, що група Пасифе може бути результатом систематичного захоплення планетою дрібних частинок і астероїдів на зворотні орбіти у зовнішній області диска протоюпітера.

Нижче зупинимося на описі найхарактерніших супутників Юпітера.

#### 1.1. Io

Цей супутник є одним із найунікальніших тіл Сонячної системи тому що на ньому має місце активна вулканічна діяльність, яка приводить до утворення своєрідної атмосфери і плазмового тора (фото 1.1). Про можливу атмосферу Іо запідозрили в 1962 р., коли при спостереженні взаємного затемнення супутників після виходу Іо з тіні виявили збільшення блиску на 10%, яке зберігалося протягом 15 хв. [94]. Це спонукало цілеспрямовані спектроскопічні спостереження Іо, які в 1970-х рр. увінчалися відкриттям емісійних деталей кількох хімічних елементів.



Фото 1.1.

Особливо вагому інформацію отримали за допомого КА «Галілео» та «Кассіні», спектральні дані суттєво поповнились завдяки роботі таких приладів як «Visual and Infrared Mapping Spectrometer» (VIMS) та «Near Infrared Mapping Spectrometer» (NIMS).

Натрій. За спостереженнями протягом 4 ночей з 6 липня по 7 жовтня 1973 р. за допомогою ешеле спектрографа на 150-см телескопі обсерваторії Маунт Гопкінс [108] на 4-х спектрограмах виявлено емісію дуплету натрію (D<sub>1</sub> та D<sub>2</sub>, при  $\lambda$  = 588,9973 і 589,5940 нм), інтенсивність якої змінювалася в часі. Це було підтверджено спостереженнями 20-22 жовтня 1973 р. [1990]. Подальші активні дослідження емісії натрію [90, 91, 408, 411, 439, 490, 689, 691, 721] показали, що вона належить хмарі навколо супутника із східнозахідною асиметрію інтенсивності, яка залежить від положення супутника на орбіті, тобто показує довготну залежність. Протяжність хмари від Іо по орбіті перевищує 23 радіуси Юпітера, у перпендикулярній площині доходить до полярних районів Юпітера і її інтенсивність сягає 10 кРелей. Структура хмари міняється в часі та зв'язана з положенням супутника на орбіті [285], не виключена й північно-південна аномалія в інтенсивності світіння хмари [490].

Це світіння пов'язують з ударною іонізацію, зумовленою потоками електронів (з концентрацією 10 см<sup>-2</sup>c<sup>-1</sup> та енергією 15 еВ) або протонів (з концентрацією 10<sup>10</sup> см<sup>-2</sup>c<sup>-1</sup> та енергією 8 кеВ). Для поповнення хмари атомами натрію необхідне значення їх швидкості складає 10 км/с [689]. Це узгоджується з аналізом даних про профілі ліній, згідно якого витік натрію з Іо відбувається переважно в напрямку його руху по орбіті з швидкістю до 18 км/с [140]. Числове моделювання світіння натрію в моделі руху атомів в оптично однорідному середовищі та його порівняння з двомірним зображенням хмари натрію довкола Іо показало [637-639], що за різних допущень про розподіл швидкості та напрямок вильоту атомів з екзобази супутника, потужність джерела натрію становить 2·10<sup>25</sup> с<sup>-1</sup> (з точністю до множника 2), вилітають атоми переважно із внутрішньої півкулі Іо із середньою швидкість 2,6 км/с, час життя в іонізованому стані становить 15-20 год.

Врахування ефекту тиску сонячної радіації протягом 20 год. на атоми натрію у хмарі, які вилетіли з поверхні Іо з швидкістю 2,6 км/с, показало, що збурююча дія сонячної радіації може пояснити форму хмари як у західній, так і в східній елонгації супутника. В рамках колової обмеженої задачі 3-х тіл вдалось побудувати модель форми натрієвої хмари із врахуванням тиску світла, розрахувати її яскравість у лініях  $D_1$  і  $D_2$  і пояснити спостережну східно-західну асиметрію форми та яскравості хмари.

За спостережними даними високодисперсної спектроскопії зі спектральною роздільною здатністю 50 мА емісійна лінія  $D_2$  крім центрального піку має широку підкладку, інтенсивність якої змінюється в часі. Причому інтенсивність фіолетової частини підкладки була найбільшою тоді, коли Іо перетинав площину магнітного екватора Юпітера, зміщення емісійного піку добре корелює з орбітальним фазовим кутом [691].

В лабораторних експериментах при бомбардуванні порошку силікатів і кам'яної солі протонами з енергією 3-5 кеВ також було виявлено емісію натрію [503].

Сірка. У вересні та жовтні 1975 р. на спектрограмах довкілля Юпітера [402] було виявлено емісійні лінії при  $\lambda = 671,7$  та 673,0 нм, ототожнені з забороненим дуплетом сірки SII та які проявлялись у сплюснутій частині хмари, або в так званій тороїдній хмарі за рухом супутника по орбіті в межах довготи 90°  $\leq L \leq 180^{\circ}$ . Їх інтенсивністю сягала 300 Релей. Подальші

наземні спостереження [413, 482, 550, 582, 690, 694] виявили емісії і при інших  $\lambda$  (SII при  $\lambda$  = 406,9, 407,6 нм; SIII при  $\lambda$  = 372,2 нм, 953,1 нм; S IV при  $\lambda = 10.51$  мкм та SO при  $\lambda = 1.707$  мкм). Спектрофотометрія з KA «Вояджер-1» і «Вояджер-2» у діапазоні λ 50-150 нм [106, 594] виявила ділянку високотемпературної плазми у формі тора з радіусом 1,0 ± 0,3 радіусів Юпітера, який близький до радіуса орбіти Іо та показує ранкововечірню асиметрію з амплітудою до 30%. Ці спектри [594] містили яскраві емісійні смуги, приписані блендам емісійних ліній які з'являються в оптично тонкій плазмі. Було зроблено висновок, що іонізаційна рівновага цих іонів підтримується зіткненнями з електронами при  $T = 10^5$  К. В моделі однорідного тора густина іонів була оцінена в смузі SIII в  $500 \pm 100$  см<sup>-3</sup> і SIV в  $160 \pm 30$  см<sup>-3</sup>, оптична товщина плазми в центрі смуг має сягати кількох одиниць [655]. Проведені з борту ШСЗ «IUE» дослідження емісійного спектра в далекій УФ ділянці спектру (115 ≤  $\lambda$  ≤ 195 нм) зі спектральною роздільною здатністю ≈ 1 нм [79, 477, 488] також виявили емісію іонів сірки, інтенсивність якої у різні роки була різною.

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). Якщо період дрейфу іонів щодо системи III знаходиться між величиною середнього часу іонізації SII та SIII, то довготний дрейф відносно довгоживучих двічі та більше іонізованих атомів призводить до розмиття, а то й до повного щезнення асиметрії їх розподілу [334]. В роботі [345] зроблено припущення, що зміна об'єму силової трубки протягом доби, зумовлена її конвективним рухом у магнітосфері, спричиняє адіабатичний нагрів і охолодження захоплених енергійних електронів і спричиняє спостережну асиметрію.

Кальцій. З аналізу спектроскопічних спостережень за червень-липень 1974 р. автори роботи [457] допустили можливість існування світіння молекул кальцію при  $\lambda = 422,7$  нм, що було підтверджено подальшими дослідженнями. Так, Л. Трефтон [688] у спектрі довкілля Іо на відстані 7,5" східніше супутника зареєстрував дві емісійні лінії, які співпадають з резонансними лініями кальцію при  $\lambda = 766,5$  та 769,9 нм. Їх інтенсивність на відстані 15" на схід від супутника зменшилась у два рази, а на 1° північніше від Іо – емісійних ліній взагалі не було. Хмара кальцію має форму півдиску і простягається на відстань до 6 радіусів Юпітера від його центру і має товщину у 2 радіуси Юпітера [457]. Кисень. Світіння іонів кисню було відкрито за спостереженнями з КА «Вояджер-1» і «Вояджер-2» [106, 594] та ШСЗ «ІUЕ» [79, 477, 478]. Так, емісія при  $\lambda = 83,4$  нм спершу була приписана бленді емісійної лінії ОІІІ, яка з'являється в оптично тонкій плазмі та іонізаційна рівновага якої підтримується зіткненнями з електронами при T = 10<sup>5</sup> К. Точні розрахунки коефіцієнтів ударного збудження показали, що цю особливість можна приписати ще й лініям ОІІ, спостережні інтенсивності яких відповідають моделі електронного газу із двох складових: холодні електрони (з температурою 3,5-4 еВ та густиною 2000 см<sup>-3</sup>) і гарячі електрони (T ≈ 100 еВ, густина 50-100 см<sup>-3</sup>). В моделі однорідного тору густина іонів становить 300 (+200, -80) см<sup>-3</sup> для ОІІ і 110 ± 60 см<sup>-3</sup> для ОІІІ, оптична товщина плазми оцінена за даними для центральних частин ліній сягає кількох одиниць [667].

На дещо більших довжинах хвиль [79] виявили ще й емісію в лініях OI, інтенсивність яких у різні роки була різною (аж до повної відсутності); при  $\lambda = 372,6$  та 372,9 мкм було виявлено емісію іонів кисню OII [482].

Калій. Емісія 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, найбільше випромінювання в резонансній лінії  $\lambda = 766,5$  нм сягало  $\approx 7$  кРелей на відстані 7,5" на схід від Іо.

Детальні дослідження показали, що калієва хмара простягається вперед від ведучої сторони супутника та утворює кут 10-30° з орбітою Іо, що 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.

Емісії інших елементів. При прольоті КА «Піонер-10» та «Піонер-11» в 1973 р. мимо Юпітера вимірювалось світіння довкілля планети в двох каналах далекої УФ ділянки спектра. Один ( $\lambda_s$ ) був чутливим лише для  $\lambda \leq 8$  0 нм та міг реєструвати резонансну лінію гелію при  $\lambda = 58,4$  нм, а другий ( $\lambda_L$ ) – при  $\lambda \leq 140$  нм, тому включав ще й резонансну лінію водню при  $\lambda = 121,6$  нм. Поле зору фотометра (40°) обмежувалось механічним коліматором, оптична вісь якого була нахилена на 20° до осі обертання КА та знаходилась приблизно в площині орбіти супутників Юпітера. Коли в

його поле зору попали околиці орбіти Іо, то було зареєстровано незначне збільшення потужності сигналу в  $\lambda_S$  каналі, а коли попав сам супутник, то сигнал збільшився практично вдвічі. В подальшому виявилось, що це зумовлено не світінням гелію, а радіативним висвічуванням збуджених іонів, деякий внесок може давати рентгенівське випромінювання, що виникає внаслідок бомбардування поверхневого шару супутника електронами.

Спостерігались також сліди емісії, яку в короткохвильовому каналі пов'язували з супутником Амальтея і в довгохвильовому каналі з супутником Європа; збільшення сигналу в довгохвильовому каналі приписали емісії в лінії атомарного водню  $L_{\alpha}$ . На можливу наявність емісій іонів атомарного водню вказують і експерименти з борту ШСЗ «IUE» [79, 477, 478]. Не виключені й емісії FeI та MgI [3].

Дослідження закономірності зміни інтенсивності ліній різних хімічних елементів з рухом по орбіті були неоднозначними, що зумовлене різною протяжністю в часі отриманих рядів спостережень. Тривалий час найкраще погоджуються 3 вважалося. шо зміни визначеним за радіоспостереженнями періодом обертання Юпітера в системі Ш (9<sup>h</sup>55<sup>m</sup>29,37<sup>s</sup>), хоча ще першовідкривач тору [402] звернув увагу на те, що реальний період триваліший від системи III; це ж підтвердили і подальші дослідження [75, 382, 549, 551, 583]. Так, згідно експериментів на КА «Галілео» і «Ulysses», швидкість обертання плазмового тора відстає від швидкості в системі III на 2-10 км/с (з середньою величиною відхилення 2-3 км/с) [259, 260]. Частково це пояснюється тим, що початково визначений період в системі III у подальшому підлягав корекції: згідно [576] період складав 9<sup>h</sup>55<sup>m</sup>29,71<sup>s</sup>, тоді як в роботі [372] приводиться на 3,3-3,5% більший період обертання, в [331] – менший (9<sup>h</sup>55<sup>m</sup>29,6854<sup>s</sup>). Така відмінність приводить до переміщення по довготі на 1° протягом чотирьох років щодо системи III 1965 р. Для зняття протиріччя в роботі [593] запропоновано ввести нову координатну систему (система IV), яка обертається на 3,1% повільніше віл системи III.

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 м/с<sup>2</sup>) випадає на поверхню Іо. Оцінки показують, що швидкість цих процесів значно більша швидкості руйнування молекул газу ультрафіолетовим випромінюванням Сонця (фотодисоціацію). На Іо присутні сліди атмосфери з концентрацією молекул ~10<sup>17</sup> м<sup>-3</sup>. Розрахунки показують, що за таких умов викидання газу на висоту в кілька сотень кілометрів вимагає швидкості вильоту газу з жерла вулкану понад 1 км/с. Орбіта Іо розташована в тій частині магнітосфери Юпітера, де потоки заряджених частинок особливо значні (майже в центрі радіаційного поясу), та яка нагадує 100-кратно збільшену за розмірами магнітосферу Землі. Плазма тут зосереджена в об'ємі, що наближено має форму диска, який жорстко зв'язаний з магнітним полем планети, яке обертається. Оскільки магнітосфера обертається дуже швидко, то певна доля заряджених частинок викидається з неї ще й відцентровими силами, які надалі рухаються в міжпланетному середовищі у вигляді додаткового повільного компонента космічних променів, який пульсує з періодом обертання магнітосфери Юпітера. Тобто, на орбіті Іо знаходиться тор гарячої плазми з температурою до 50000 К.

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 5·10<sup>6</sup> ампер, механізм продукування якого імовірно пов'язаний зі своєрідною структурою струмових оболонок в плазмосфері Юпітера, які були передбачені Х. Альфвеном для протопланетної туманності.

Недавно було висловлено припущення, що сильні електричні струми біля поверхні Іо можуть завдяки самофокусуванню зарядів (так званому пінч-ефекту) концентруватися на малій площі і в результаті наявності такого тривалого пропалюючого електричного розряду можуть відбуватися вулканічні виверження з Іо. При цьому Іо, мабуть, «працює» як одна з частин гігантського природного прискорювача заряджених частинок високих енергій. Іо активно взаємодіє з магнітосферою Юпітера і з самим тором, перемішуючи частинки середніх і низьких енергій та поглинаючи їх.

Електричні процеси в магнітосфері на рівні орбіти Іо пов'язані з радіовипромінюванням, що спостерігається на Землі від Юпітера в декаметровому діапазоні. Ще в 1964 р. було доведено, що його інтенсивність залежить від положення Іо на орбіті, адже вірогідність реєстрації радіовипромінювання із Землі була найбільшою тоді, коли Іо знаходився на максимальній кутовій відстані від Юпітера. У меншій мірі таку ж залежність показують ще два супутники – Європа і Ганімед.

Аналіз спостережних даних з КА «Кассіні» привів до наступних висновків:

1. Тор показав істотну зміну хімічного складу протягом часу спостережень, яка узгоджується з моделлю, що передбачає зростання у кілька разів кількості нейтрального матеріалу, який доставлявся в тор вулканами на початку вересня 2000 р. [217].

2. В іонному торі спостерігаються азимутальні зміни, які впливають на електронну температуру і електронну концентрацію на промені зору в екваторіальній області. Азимутальні варіації емісії SII, SIII і електронної концентрації відбуваються приблизно в однаковій фазі. Зміна відношення емісії ліній SIV і ОІІ та електронної температури в екваторіальній області також проходять майже в однаковій фазі і знаходяться в протифазі з варіаціями емісії ліній SII, SIII і електронної концентрації відбуваються приблизно в однаковій фазі з варіаціями емісії ліній SII, SIII і електронної концентрації на промені зору в екваторіальній області.

3. Фази спостережуваних азимутальних варіацій у плазмовому торі дрейфують із швидкістю 12,2°/добу щодо системи III, що дає період обертання тору 10,07 годин (на 1,5% більше періоду в системі III). Можливо, що у вересні 2000 р. у кілька разів зросла кількість постачання в тор нейтральних складових з поверхні Іо [214], що привело до зміни механізму відповідального за утворення періодичності в системі IV. Такі події відбуваються відносно рідко. Наприклад, за даними роботи [399] протягом 6,5 років спостережень була виявлена тільки одна така подія.

4. Відносна амплітуда азимутальних варіацій елементного складу тору більша для емісійних ліній SII і SIV і їх відносна амплітуда змінюється в межах 5-25% за час спостережень. Відносна амплітуда емісії ліній іонів SIII і ОІІ мають значення в межах 2-5%.

5. Зміна азимутальних варіацій амплітуди хімічного складу модулюється положенням щодо системи III так, що коли пік емісії SII при зміщенні співпадає з довготою 210  $\pm$  15° у системі III, амплітуда є максимальною; коли пік емісії SII відповідає довготі 30  $\pm$  15° у системі III – амплітуда виявляється найменшою.

Вулканічна діяльність. На переданих КА «Вояджер» зображеннях поверхні Іо було виявлено 8 діючих вулканів [634], реальність яких підтвердили зображення КА «Галілео» (рис. 1.3-1.5).

Оскільки розмір Іо явно недостатній для того, щоб радіоактивний розпад елементів у його надрах міг викликати сильний розігрів кори чи

мантії (як це має місце на Землі), то припустили, що розігрів супутника зумовлено гравітаційною взаємодією в системі Юпітера, завдяки чому протягом одного оберту Іо навколо Юпітера (тобто, кожні 1,7 доби) супутник міняє своє положення на середній орбіті приблизно на ± 10 км.



Рис. 1.3. Мозаїка зображень поверхні Іо. На вставці ліворуч – вулканічний плюмаж висотою ~ 100 км. На вставці праворуч – зміни біля вулкана Ра Патера (Ra Patera): зверху – дані з КА «Вояджер», внизу – дані з КА «Галілео» (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Розрахунки показали, що за синхронного обертання навколо Юпітера навіть при ексцентриситеті орбіти 0,004 на Іо має з'явитися припливний виступ у бік Юпітера, а при його русі по орбіті – різкі коливання (лібрація, похитування), яке зумовлює помітне прогинання літосфери та її нагрівання (переважно приповерхневих шарів), енергія якого може сягати 60-80 трильйонів ват.

Спостереження в тепловій ділянці спектра підтвердили велику потужність теплового випромінювання Іо ( $\approx 2 \text{ Bt/m}^2$ , або  $\approx 83$  трильйони ват), а згадані 8 активних вивержень були ототожнені з гарячими плямами на поверхні супутника. Через 4 місяці згас лише один найбільший вулкан

(названо на честь гавайського бога вулканів – Пеле), температура поверхні навколо якого становила близько 600 К. Еліпс його вулканічних вивержень мав розміри 950×1400 км (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Зображення вулканічного виверження вулкану Пеле. Білі і чорні обширні області складаються з суміші солі, сірки та інших викидів вулканічного походження. Чорні невеликі плями пов'язують з кратерами можливого вулканічного походження (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Дослідження вулканів на Іо вказує що тривалість існування вулканічної кальдери тим більша, чим з глибших резервуарів відбувається виверження. Незвично високу температуру інколи реєстрували наземні спостереження в радіодіапазоні: T = 190 К при  $\lambda$  = 2,08 і T = 600 К при  $\lambda$  = 3,9 см [53-55], сплески випромінювання тривалістю в кілька годин при  $\lambda$  = 4,7 і 5,3 см, яке відповідало випромінюванню абсолютно чорного тіла з T = 600 К; це вважали виливам рідкої сірки [626]. Вважають [627], що 99,6% площі поверхні Іо має T  $\approx$  126 К, яка формується сонячним випромінюванням, решта – зайнята гарячими плямами з температурою від 300 до 600 К.

Вулкани на Іо розділені на типи. До першого відноситься більшість вулканів, яким притаманні T = 350-400 К, швидкість виверження газових продуктів ~ 500 м/с та висота газових султанів до 100 км. Другому типу притаманні вищі температури, швидкість виверження ~ 1000 м/с, висота до 300 км. Характерною їх відмінністю є темна кільцева окантовка на відстані кілька сотень кілометрів від кальдери (вулкани Пеле, Сурт, Атен) та, можливо, більша глибина, з якої відбувається виверження. В центрі виверження звичайно розташовано кілька великих плоскогір'їв з обривистими краями і широкою долиною, що їх розділяє.

Вся їх поверхня має темні відтінки оранжевого й коричневого кольорів і лише саме плоскогір'я виділяється світлішим забарвленням (фото 1.2.). Існує гіпотеза, що виверження другого типу мають гейзерний характер, під час якого відбувається раптовий фазовий перехід летких речовин (рідина – газ), що характерно й для деяких земних вулканів. На Іо для сірчистого газу перехід повинен відбуватися при T  $\approx$  400 K, для сірки при T  $\approx$  700 K. За цієї гіпотези малі султани відповідають викидам з невеликої глибини, великі султани – з глибоких резервуарів.



Фото 1.2.

Розрахунки показують [526], що розподіл температури і структура літосфери Іо, можливо, дуже складні. За таких умов у ній може існувати багато ізольованих «лінз» рідкої сірки на малих глибинах. У результаті теплового обміну в силікатну кору супутника можливе вторгнення колонок глибинної 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, тому сірка є дуже мобільною рідиною в корі Іо.

При набагато нижчій температурі (трохи вищій від 130 К) SO<sub>2</sub> стає малов'язкою рідиною. Саме цими 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 г/см<sup>3</sup>), то тиск там був би достатнім для того, щоб базальтова розплавлена лава піднімалася і зі значно більших глибин. Особливо багато уваги приділялось вулкану Прометей [143, 198, 201, 203, 362, 384, 385, 388, 428, 451, 452, 461, 462, 572, 639, 715, 724], який знаходиться в точці з координатами 154° W, 1° S на зворотній від Юпітера півкулі (рис. 1.5). Інфрачервона (ІЧ) спектрометрія з КА «Галілео» в 1996-2002 роках виявила епізодичні (але не періодичні) варіації теплової емісії, що вказує на епізодичність вулканічної діяльності. Згідно зображень в 1979 і 1996 роках, картини активного поля лавових потоків були подібними та мали площу понад 7530 км<sup>2</sup>. Температура активних полів інколи сягала 1400 К, що є ознакою силікатного вулканізму.

Для пояснення плюмажів над активним фронтом лавових потоків запропоновано відносно просту модель того, як потужний потік лави може розтопити і випарувати великий об'єм багатої на SO<sub>2</sub> кори, яка пізніше зможе вибухнути вулканом. За оцінками, об'єм викинутого матеріалу з 6 листопада 1996 р. до 7 травня 1997 р. становив 0,8 км<sup>3</sup> з миттєвим виверженням у піку  $\sim 140 \text{ м}^3/\text{с}$  і середньою нормою виверження близько 49 м<sup>3</sup>/с. Спочатку уявлялось, що весь SO<sub>2</sub> на західному краї поля потоку Прометея викидається через єдиний 10-20 метровий отвір (вставка на рис. 1.5), але зображення з високою просторовою роздільною здатністю вказали на кілька отворів уздовж фронту потоку яким притаманна різна температура. Так, ділянка площею 0,052 км<sup>2</sup> мала T = 1263 К, а площею 50,9 км<sup>2</sup> – 437 К [203], що інтерпретувалось як великий активний потік лави з холодною поверхнею (холодний компонент) і гарячою яскравою лавою яка виходить через тріщини при близьких до рідини температурах (гарячий компонент) і розтікається в різні боки; це погоджується з передісторією багатьох ділянок поверхні, які відповідають давно застиглій лаві при Т≈95 К.



Рис. 1.5. Вулкан Прометей на Іо з КА «Галілео» 29 березня 1998 р.: праворуч – плюмаж висотою 100 км [203]

Теплове моделювання лави за ультрамафічного складу [198] вказало на її високу температуру (~ 1900 К), тому відпадала потреба в залученні інших екзотичних речовин у магмі для пояснення інфрачервоних спостережень Іо. За певних умов лава могла бути чисто мафічною або базальтового складу. Моделювання підповерхневої структури вулканів, умов формування в них магми і вірогідної глибини її залягання показали, що вулкан забезпечується магмою від невеликої «лінзи», верхня частина якої знаходиться на глибині 2-3 км, а нижня ~14 км.

Щодо товщини лавового виливу аналіз IЧ спектрів показав, що за потужності виверження лави 21 м<sup>3</sup>/с для новоутворених її потоків з Прометея вона становить всього  $\approx 0,6$  м [198]. Така лава твердне досить швидко – менше ніж за 4 доби – при умовах, що існують на поверхні Іо. При товщині лавового потоку близько 1 м температура його поверхні знижується до 220 К приблизно за 70 діб. При такій товщині повторні виверження за кілька років утворять багатошаровий «бутерброд» товщиною близько 10 м і загальним об'ємом ~ 70 км<sup>3</sup>; за товщини 30 м

об'єм вивержень збільшиться до 200 км<sup>3</sup>. Повний об'єм матеріалу кожного виверження, що досягає поверхні, накладає обмеження на механізм його накопичення, підняття й виверження. Порівняння цих оцінок зі спостережними даними КА «Галілео» показують, що магма вулкану Прометей поставляється з глибокого джерела і транспортується ближче до поверхні спочатку до «лінзи», де певний час може зберігатися, супроводжуючись її поступовою дегазацією. І тільки значно пізніше магма зможе прорватися на поверхню, яка при тепловій взаємодії з твердими тілами й рідиною зумовлює випаровування останніх.

Схоже, що подібні виверження притаманні й іншим вулканам [201, 385]. Так вулкани Замама (Zamama), Кулан (Culann) і Тупан (Tupan) також показують епізодичну діяльність, а чіткий пік теплової емісії вулкана Замама співпав з наявністю плюмажу такої ж форми, як і для Прометея. Схожа картина спостерігалася і для вулкана Амірані (Amirani) [385].

Кора Іо є сумішшю сірчаних компонентів і силікатних уламків і може мати відносно низьку середню густину близько її поверхні, тому її тепловий градієнт буде практично нульовим майже до літосфери. Наявність такого екстремального температурного градієнта приводить до того, що сірка є твердою в більшій частини літосфери аж до глибини в 25 км, тоді як рідкий SO<sub>2</sub> присутній у більшій частині літосфери [384].

Структура поверхневого шару. Практична відсутність помітних метеоритних кратерів вказує на те, що поверхня Іо дуже молода (до 1 млн. років) та складається переважно з продуктів вулканічних вивержень товщиною в 3-30 км; ними є конденсати сірки, сірчаного ангідриду, силікатної магми, інших елементів. Вулканічні кратери займають ~ 2% загальної площі поверхні супутника, а їх вигляд суттєво різниться (рис. 1.3-1.5). Так, вулкан Ра Патера вирізняється тим, що радіально від нього відходять змієподібні потоки на відстань до 300 км; вони змінюють свої відтінки від коричневого до світло-оранжевого і навіть сніжно-білого тонів; однак їх природа поки що мало зрозуміла. В той же час, у темному жерлі кратера вулкана Локі знаходиться світла пляма, а його довкілля є досить однорідним. На в основному рівнинному поверхневому шарі виявлено ряд гірських масивів з висотою аж до 9 км [203] та ям і куполів розміром від десятків до сотень метрів, які є складними у розумінні їх природи. Так, за однією з версій, вони утворюються при взаємодії розжареної лави з поверхнею Іо, що має місце й на Землі, коли потік лави наштовхується на водяну або крижану перешкоду далеко від джерела виверження. Як видно з рис. 1.6, гори піддаються процесам руйнування, про що свідчать скупчення біля підніжжя величезної кількості уламків скель і породи від обвалів.



Рис. 1.6. Зображення поверхні Іо з КА «Галілео», 25.11.1999. Гори посередині мають висоту  $\approx 4$  км; гострі вершини в лівому нижньому куті  $\approx$  1,6 км (http://www2. jpl.nasa.gov/)

#### 1.2. Європа

Згідно грецькій міфології, Європа – фінікійська принцеса, викрадена Зевсом, який прийнявши зовнішність білого бика, спокусив її і зробив своєю коханкою.

На зображеннях Європи не було виявлено ознак вулканічних вивержень, хоча й з'являлися публікації, в яких відмічалась поява над лімбом диска супутника слабких «султанів» газового складу, які якщо й існують, то є надзвичайно рідкісним явищем. Допускають, що її поверхневий шар є льодовою оболонкою, вкритою тріщинами й торосами (рис. 1.7-1.9).

Судячи з деяких морфологічних утворень, товщина верхньої літосфери оцінюється в кілька кілометрів, а виділеного за рахунок припливного механізму тепла недостатньо для сильного розігріву існуючої маси льоду. Не виключається наявність в надрах Європи рідкої води, об'єм якої має бути близьким до земного якщо його глибина складає 50-60 км. При прискоренні вільного падіння на поверхні 1,314 м/с<sup>2</sup> тиск на його дні буде таким же, як і на 4-кілометровій глибині земного океану.



Рис. 1.7. Два хребти що взаємно перетинаються на Європі [541]

Нерідко на поверхні Європи спостерігаються подвійні і навіть потрійні льодові хребти (рис. 1.7) та смуги з темними краями, що пояснюється специфічним явищем кріовулканізму (виверження води з-під льоду в центрі тріщин). У правому нижньому куті рис. 1.7 знаходиться темна й досить гладка місцевість, яка може бути місцем, в якому з глибин на поверхню поступав талий лід, в центрі якої видно відносно яскравий горбок. 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.

На деяких зображеннях видно шматки крижин, вморожених в молодший лід (рис. 1.8), які раніше могли утворювати єдину структуру, але потім роз'їжджалися і знову поверталися назад, що можливо лише за руху шматків льоду в рідині. Багато ділянок виявилися ніби складеними з окремих блоків, розділених розломами у вигляді борозен. Наведена на рис. 1.8 мозаїка поверхні з хаотичним рельєфом, названа Конамара (Conamara), показує відносно недавнє переформовування поверхні супутника, блоки різних форм – це шматки потрощеної поверхневої кори. Видно, що вони зрушені зі своїх місць, повернені, деякі навіть перевернуті і потім частково занурені в суміш рідкої води і розплавленого брудного льоду. Тріщини, які перетинають цю поверхню поверх хаотичної структури, говорять про те,

що вся ця поверхня пізніше знову замерзла в суцільну поверхневу кору. Розмір видимої області 35×50 км<sup>2</sup>. Найдрібніші елементи на фото мають розмір близько 20 м.



Рис. 1.8. Зображення поверхні з хаотичним рельєфом Конамара показує її тектонічне переформовування [292]

Виявлені темні плями й опуклі утворення могли сформуватися в результаті процесів, аналогічних лавовим виливам (під дією внутрішніх сил теплий, розплавлений лід рухається від нижньої частини поверхневої кори вгору, холодний лід осідає, занурюючись вниз; це ще один з доказів присутності рідкого, теплого океану під поверхнею). Так, темні червонуваті плями на рис. 1.10 знаходяться у північній півкулі супутника і мають практично однаковий розмір (≈ 10 км) та розташовані майже на однаковій відстані одна від одної. Їх назвали лентикули (lenticulae, у перекладі з латинської – ластовиння).

На багатьох фотографіях видно хребти з долиною посередині, які розрізають стару область поверхні, безліч розломів і ліній поруч з ними свідчать, що тут відбувався складний рух кори з розламуванням і викиданням із надр супутника темного матеріалу, який заповнював утворені тріщини. Світлі утворення на поверхні показують, що велика частина поверхні Європи покрита памороззю. На зображеннях також видно, що світлі ділянки чистого водяного льоду в основному знаходяться на вершині та крутих схилах хребтів. Темний матеріал, який можливо складається з силікатних сумішей і гідратованих солей, може відколюватися та накопичуватися біля підніжжя в долинах між хребтами у вигляді осадових порід.



Рис. 1.9. Мозаїка оберненої до Юпітера поверхні Європи з просторовою роздільною здатністю 1-13км/піксель. Дуже яскраві білі утворення – це викиди від молодих ударних подій. (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Рис. 1.10. Червонуваті плями на поверхні Європи. Зображення отримане КА «Галілео» під час зближення 31 травня 1998 р. (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Поки що відсутні прямі свідчення активності на Європі і геологічна історія її поверхні не має нічого спільного з історією сусідніх супутників. Її крижана кора досить рухома і неодноразово розколювалася від внутрішньої напруги і великомасштабних тектонічних процесів. На її поверхні виявлено тільки 43 крупні ударні кратери діаметрами 2-80 км[539]. Особливо незвичайним є кратер Тайр (у перекладі – колесо), концентричні кільця якого вказують на достатньо молодий рельєф (рис. 1.11). Кратери менших розмірів навколо нього сформувалися з великих осколків породи, вибитої при основному ударі під час утворення кратера Тайр. По одній з гіпотез тіло, що сформувало цю поверхню, могло взагалі пройти крізь кору в менш крихкі глибші шари, де й відбувся основний підрив, від епіцентру якого розповсюдилася ударна хвиля. В той же час довкілля структури Пвілл, Цилікс і Маннаннан скоріше нагадують об'єкти таких же розмірів на супутниках Каллісто й Ганімед, коли, ймовірно, тіло ударник неглибоко проникло у кору через свій малий розмір, або було менш щільне порівняно з породою поверхні в області Тайр, або ж кора там виявилася набагато тонша, ніж в інших областях.



Рис. 1.11. Зображення 4 найбільших ударних кратерів Європи з назвами (за годинниковою стрілкою від верхнього лівого кута): Пвілл (Pwill), Цилікс (Cilix), Тайр (Туге) і Маннаннан (Mannann'an) [539]

Ландшафт Європи класифікують на такі основні типи: рівнини, хаотичні ділянки (хаоси), ділянки ліній і смуг, хребти й кратери.

Мабуть, глобальна мережа ліній – це тріщини в товстій крижаній корі, зумовлені тектонічними процесами. Ці розломи не супроводжуються помітним рухом кори, але заповнюються оранжевим розчином, який при характерних для Європи температурах швидко твердіє. Ширина розломів складає від одиниць до сотень кілометрів, протяжність – інколи понад 3000 км. Вода, що виливається, миттєво закипає й відразу ж замерзає; деяка її частина, що випарувалася, випадає на поверхню у вигляді снігу й інею в радіусі кількох сотень кілометрів від джерела. В умовах Європи шар такого покрову товщиною у півметра утворюється лише за кілька хвилин. Така схема «омолодження» поверхні Європи підтверджується її високою яскравістю (адже маємо чистий свіжий іній та лід) і спектральними вимірюваннями, які практично завжди вказують на дуже чистий водяний лід майже без домішок.

Високе альбедо поверхні Європи свідчить що лід досить чистий і, отже, досить молодий, утворений порівняно недавно. Кількість великих кратерів на поверхні Європи незначна, що також свідчить про порівняну молодість поверхні супутника. Так, з підрахунку кількості кратерів з розмірами більше 10 км Шумейкер оцінив її вік в ~1,5 млн. років, а дрібніших кратерів – у 30 млн. років.

Порівняння знімків КА «Вояджер» і «Галілео» не виявило якихось помітних змін на поверхні. Оскільки поверхневий шар дуже згладжений, перепад висоти дуже рідко перевищує 50 м, це також трактується або як дуже молодий рельєф, або як існуванням якогось постійного механізму його згладження. На користь другого говорить висока температура (рідкий океан з води) і здатність льоду за таких умов до пластичних переміщень (льодовики).

Для отримання однозначнішої відповіді було зроблено спробу визначити наскільки поверхня Європи може забруднюватись сіркою за рахунок її викиду з Іо. Виявилося, що насправді сірчаних покладів на поверхні Європи набагато менше від очікуваної її кількості, яка при середній швидкості її випадання повинна була б складати не менше 10 см за 1 млн. років. Звідси відразу ж слідує факт, що через тріщини, окрім прямого випаровування, зі всієї поверхні супутника в цілому викидається не менше 100 кг води щосекунди.

Дно підлідного океану Європи переважно має складатися із силікатних порід основної речовини, а якщо є місця підвищеного тепловиділення (підводні вулкани), то в результаті термохімічного синтезу там можуть виникати досить складні хімічні сполуки. Проте існування таких вогнищ вулканізму поки не виявлено і воно досить сумнівне, оскільки маса Європи поступається навіть масі спокійного у вулканічному відношенні Місяця.

#### 1.3. Ганімед

Ганімед характеризується значно більшим різноманіттям структури поверхневого шару, ніж Європа (рис. 1.12-1.15), а його зовнішній вигляд (фото 1.3) нагадує Місяць. За аналогію одна його півкуля – є «морська», інша — «материкова», хоча найтемніша деталь Ганімеда майже в 4-5 разів світліша від темних районів Місяця.



Фото 1.3.

Темні області суцільно вкриті кратерами, світлі – кратерами й розломами, серед яких виділяються дуже яскраві молоді ударні кратери,
альбедо яких близьке до 100%. Кратери, як правило, оточені світлим ореолом променів з викинутого матеріалу. Існують і явні сліди тектонічних процесів. За кількістю ударних кратерів вік поверхні оцінюється в 3-4 млрд. років. Світліші області значно молодші і їх вік оцінюється в 0,5-1 млрд. років.

Дві найкрупніші темні області на поверхні Ганімеда отримали імена Галілей» і Симон Маріус.



Рис. 1.12. Зображення Ганімеда з центром на 19° пд. ш., 356° зх. д. (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Рис. 1.13. Область Галілея (Galileo Regio) на Ганімеді; найменші деталі  $\approx 80$  м (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Крижана поверхня супутника безперервно бомбардується високоенергійними зарядженими частинками магнітосфери Юпітера, тому з неї вибиваються молекули водяної пари, фотодисоціація яких сонячним УФ випромінюванням приводить до появи дуже слабкої атмосфери супутника, яка складається в основному з молекул кисню з інтегральною густиною – 10<sup>14</sup>-10<sup>15</sup> молекул/см<sup>2</sup>.

Сюрпризом було відкриття у Ганімеда магнітного поля [302, 391-394, 725] і власної магнітосфери, яка повністю занурена в магнітосферу Юпітера. Величина цього поля невелика і складає всього 750 нТ на екваторі; але все ж воно майже в 6 разів більше напруженості магнітного поля Юпітера на орбіті Ганімеда (107-118 нТ). Вісь магнітного диполя супутника нахилена на 10° до осі обертання. Протяжність магнітосфери Ганімеда становить ~ 2 його радіуси, тому в магнітосфері Юпітера утворюється своєрідна каверна діаметром ~ 4 радіусів Ганімеда.



Рис. 1.14. Кальдера на Ганімеді. Територія 162×119 км (43 м/піксель) (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Одна з гіпотез походження магнітного поля допускає, що воно наводиться динамо-механізмом при обертанні розплавленого залізного (або в суміші з сульфідом заліза) ядра Ганімеда (нагадаємо, що саме цей механізм відповідає за магнітне поле Землі); підтвердженням цього може бути його дипольний характер.

Оскільки безрозмірний момент інерції Ганімеда вказує на високу концентрацію маси до його центра ( $C/MR^2 = 0.3115$ , де C – осьовий момент інерції, *M* і *R* – маса й радіус супутника [71]) – то саме дія динамо в межах металевого ядра може згенерувати таке магнітне поле [599, 604]. В той же час у [99], виходячи з одномірної тришарової теплової моделі, було запропоновано, що така концентрація може бути й тоді, коли масова доля сірки в ядрі Ганімеда або дуже низька (≤ 3 %), або ж дуже висока (≥ 21%); за таких умов силікатна мантія зможе охолонути досить швидко (тобто, така суміш матиме в'язкість подібну, наприклад, до вологого олівіну). Проте зрозуміло, шо такі вимоги важко пояснити існуючими космохімічними й фізичними супутника. Тому було моделями

запропоновано ще й альтернативний сценарій можливої наявності рідкого ядра, згідно якого під дією припливно-відпливних сил температура силікатного ядра періодично підвищується і це запобігає його швидкому охолодженню.

Відомо, що для створення магнітного поля завдяки механізму динамо необхідно, щоб рідина в ядрі рухалася в межах електрично провідного контуру, яким може бути, наприклад, рідке металічне ядро. Звичайно, в планетному динамо такий рух забезпечує керована плавучістю конвекція. Однак, за відсутності внутрішнього твердого ядра в Ганімеді керувати конвекцією може теплова плавучість, а тому для підтримання механізму динамо необхідно (але не достатньо) постійно підтримувати рух рідини в ядрі. Згідно іншій гіпотезі, магнітне поле Ганімеда наводиться в провідному шарі солоного океану під товстою (130-150 км) крижаною корою. Оцінки показують, що для створення динамо в товщі електрично провідного океану потрібна нереально висока швидкість перемішування рідини ( $\approx 1$  м/с), що робить цей механізм майже нездійсненним [604]. До того ж, існуюче магнітне поле вказує на існування залишкового намагнічення скелястої мантії та вимагає, щоб сильне динамо працювало й у більш ранній історії супутника [172].

Оскільки існуючі спостережні дані не дозволяють повністю виключити й такий механізм, то не виключено, що на Ганімеді одночасно діють обидва механізми.

Крім того, на Ганімеді виявлено магнітосферу і мініатюрний радіаційний пояс, для пояснення існування якого допускається, що в минулому Ганімед відчував незначні зміни своєї орбіти, які були достатніми для виникнення припливних деформацій супутника і привели до наступного розплавлення його надр. В утвореному розплаві потім сталася диференціація речовини, що супроводжувалось виокремленням рідкого металевого ядра, яке, очевидно, й згенерувало свого часу магнітне поле. Середня густина Ганімеда (близько 1,94 г/см<sup>3</sup>) вказує на більшу частку крижаної складової навіть у порівнянні з Європою, середня густина якої 3,04 г/см<sup>3</sup>. Хоча в порізаній тріщинами й хребтами поверхні Ганімеда можна знайти деяку подібність з морфологією Європи (рис. 1.15), але звертає на себе увагу й головна відмінність між цими двома супутниками: масштаб окремих морфологічних структур. Якщо на Європі торосистий ландшафт формувався відносно невеликими блоками, то структура льоду Ганімеда явно утворена великими тектонічними зсувами.



Рис. 1.15. Порівняльна характеристика в однаковому масштабі території Арбела Сулкус (Arbela Sulcus) на Ганімеді і неназваною стрічкою на Європі. Область 258×116 км (133 м/піксель) [292]

Перебуваючи в межах дії сильного магнітного поля Юпітера всі чотири галілеєві супутники в різній мірі відчувають його вплив. І на їх поверхні можуть виникати вторинні магнітні поля, індуковані полем цієї планети-гіганта. Іншим наслідком такої еволюції Ганімеда стали глибинні тектонічні процеси, що породили спостережувані сьогодні форми рельєфу поверхні. За таких умов середній вік поверхні в окремих районах супутника може бути дуже древнім і сягати мільярдів років.

За віком ударні кратери розрізняють згідно зовнішнього вигляду. Наприклад, кратери, які утворилися недавно, мають, в основному, світле дно і яскраві промені навколо нього, що оголюють чисту крижану поверхню. Виходячи з кількості метеоритних кратерів, вік найстаріших ділянок поверхні Ганімеда оцінюється в 3-3,5 млрд. років. Дуже великі розміри і порівняно невисока середня поверхнева густина кратерів вказує на значну товщину його крижаної кори і на те, що на водяний лід там приходиться майже 50% загальної маси.

На зображеннях Ганімеда з високою просторовою роздільною здатністю добре видно дивні зламані, ні на що не схожі, ряди численних паралельних долин і хребтів, які утворюють химерну структуру поверхні, концентруючись головним чином у світлих областях супутника. Ширина таких долин і хребтів складає від кількох одиниць до кількох десятків кілометрів; а висота цих хребтів – не перевищує кілька сотень метрів при протяжності часто в багато тисяч кілометрів. Іноді вони перетинаються і часто змінюють свій напрям в точках перетину; інколи вони навіть перетинають ударні кратери. На таких хребтах і долинах ударних кратерів значно менше, що вказує на їх молодший вік. Було висловлено припущення, що ці смуги виникли під дією розтягувань крижаної кори Ганімеда, які можна вважати проявами локальної тектоніки. У темних районах у південній півкулі виявлено незвичайні кратери-фантоми, які виділяються тільки відтінком, але зовсім не мають вираженого рельєфу.

Передані КА зображення не лише показують структуру поверхневого шару, але й прогнозують розподіл запасів води й мінералів. Оскільки мікроструктура поверхневих шарів формується завдяки метеоритному бомбардуванню, то для оцінки концентрації метеороїдів на КА встановлюються датчики, які реєструють їх зіткнення з частинками. Так, при польоті КА «Піонер-11» до Сатурна постійно реєструвалося число таких зіткнень, яке виявило, що, відносно довкілля Землі, з наближенням до поясу астероїдів число зіткнень зросло в 5-6 разів, а в довкіллі Сатурна – майже в 30.

## 1.4. Каллісто

Досить подібним до Ганімеда, але ще більше кратерованим виявився поверхневий шар Каллісто (рис. 1.16-1.18), який досить рівномірно кратерований, не показує помітних слідів тектонічної активності та має неоднорідний розподіл кольору, його вік оцінюється в 4 млрд. років. Вважають, що яскраві ділянки – це лід, а темні – сильно еродована стародавня поверхня з малим вмістом крижаних порід [292]. У підсонячній точці температура піднімається до 150 К, але із заходом Сонця швидко падає.

Каллісто, через віддаленість від Юпітера, не приймає участь в орбітальних резонансах і тому майже не розсіює припливної енергії. Скільки у його надрах запаси радіоактивних елементів практично вичерпалися, то він, напевно, є найбільш інертним не тільки серед галілеєвих супутників Юпітера, але й зі всіх крупних супутників у Сонячній системі. На ньому відкрита малопотужна атмосфера (переважно з вуглекислого газу з парціальним тиском  $\approx 7,5 \cdot 10^{-12}$  бар біля поверхні при температурі близько 150 К), але є підстави вважати, що повний атмосферний тиск може бути в 20-100 разів вищий і до складу такої атмосфери можуть входити ще й водяна пара і молекулярний кисень.



Рис. 1.16. Зображення Каллісто (http://www2.jpl.nasa.gov/) Рис. 1.17. Ділянка поверхні Каллісто розміром 74х75 км. Темний осадовий матеріал на дні кратерів і світлі вершини по їх периметру на зображенні з центром 17.5° N і 142.1° W (87 м/піксель) (http://www2.jpl.nasa.gov/)

Вимірювання варіацій наведеного магнітного поля поблизу Каллісто вказують на наявність електропровідного тонкого шару, що має лежати на глибині приблизно в 200 км від поверхні супутника. Найімовірніше, цим шаром може бути солоний океан з глибиною близько 20 км. Нижче рідини тягнеться потужна мантія з суміші льоду і кам'яних порід. Вважається, що Каллісто активно реагує на магнітне поле Юпітера, про що може свідчити виявлення факту, що електричні струми в магнітному полі Каллісто іноді протікали в протилежних напрямках. Подальше вивчення цього явища показало строгу синхронізацію ефектів у магнітному полі Каллісто з обертанням магнітосфери Юпітера.

Численні кратери та хребти характеризуються відносно невеликим перепадом висоти на поверхні Каллісто, розмір більшості кратерів складає десятки кілометрів. Найбільші з них оточені серіями концентричних валів, які нагадують величезні тріщини, згладжені повільним рухом льоду. Найпомітнішими є три величезні багатокільцеві ударні басейни: Валхалл, Асгард (рис. 1.18) і Адлінда, які, як вважається, є результатом зіткнення Каллісто з порівняно крупними астероїдами розміром в 10-20 км. Судячи з великої кількості кратерів вік цих басейнів оцінюється в > 3 млрд. років.



Рис. 1.18. Ударна структура Асгард [292]

## 1.5. Фазова залежність блиску і ступеня лінійної поляризації галілеєвих супутників

Фотометричні властивості. У роботах [225, 293, 495] представлені дані наземних спостережень в обсерваторіях з високою якістю зображення за якими вперше виявили оптичну неоднорідність диску галілеєвих супутників. Так, за візуальними і фотографічними спостереженнями на обсерваторії Пік-дю-Міді [225] знайшли деталі з різним фотометричним контрастом, які відповідають зміні альбедо в межах 0,09-0,19 для Каллісто, 0,52-0,73 для Європи та 0,15-0,50 для Ганімеда. Альбедо поверхні в екваторіальній області Іо сягало 0,83, в полярних районах – 0,46. Дещо менший перепад контрасту при значенні фазового кута  $\alpha = 5^{\circ}$  приведено в [495]: для Іо – 0,28-0,67, Європи – 0,45-0,67, Ганімеда – 0,22-0,47.

Проведені 12 липня 1973 р. спектрофотометричні спостереження явища покриття Європи супутником Іо в діапазоні λ320-1100 нм дозволили виявити зміну спектральної відбивної здатності семи екваторіальних областей диска Європи і підтвердили, що екваторіальна область цього супутника вкрита темнішою і червонішою речовиною ніж полярна [289].

Щодо фазових залежностей блиску галілеєвих супутників фотоелектричні спостереження в 1926-1927 рр. в інтегральному світлі показали таке. 1. Залежність зоряної величини від  $\alpha$  була лінійною тільки при  $\alpha \ge 6^{\circ}$ що дозволило вперше виявити ефект опозиції.

2. При фіксованому значенні α зоряна величина змінювалась з орбітальним фазовим кутом L; характер цих змін для перших трьох супутників не залежить від α, амплітуда змін була найбільшою для Європи. Для Каллісто спостерігається відмінність форми m(L) при різному фазовому куті α. Для перших трьох супутників яскравішою є ведуча сторона, для Каллісто – ведена.

В середині 1950-х рр. Д. Гаріс за власними нечисленними спостереженнями в системі фільтрів UBV і перерахованими в систему V даними спостережень за 1926-1927 рр. виявив зміну кольору зі зміною орбітального фазового кута L для Іо та Європи [17]. Подальші активні дослідження блиску супутників розпочалися в 1970-х рр., коли до наземних спостережень долучились позаатмосферні дані [1, 98, 216, 363, 364, 424, 425, 450, 466, 488, 534, 608, 609, 646, 677, 720], які розширили спектральний діапазон [507] та інтервал зміни фазових кутів  $\alpha$  [127, 623, 624]. Результати більшості цих досліджень можна знайти в оглядових статтях [25, 49], а нижче відмітимо ті з них, які доповнюють вказані вище властивості.

1. Амплітуда зміни блиску залежить від довжини хвилі, характер якої практично однаковий для перших трьох супутників і сильно різниться для Каллісто [49, 507].

2. Спостереження в IЧ ділянці спектра при  $\lambda = 1,57, 2,27, 3,80$  і 4,71 мкм показали, що амплітуда довготної залежності блиску тут менша ніж у видимому діапазоні довжин хвиль [317].

3. Ведений і ведучий бік супутників характеризується різною залежністю блиску від фазового кута α в області опозиційного ефекту і на ділянці з лінійною зміною блиску [227]. Для Каллісто ефект опозиції посилюється зі зменшенням довжини хвилі [1].

4. Іо показує значну варіацію блиску з часом [424].

Поляриметричні властивості. Поляризаційні спостереження супутників Юпітера були започатковані в кінці 1960-х рр. спочатку без фільтра [290, 708] та у фільтрі V [221], в кінці 1970-х років – багатофільтрові [10-12, 60, 61, 221, 290], за якими дослідили зміну ступеня поляризації Р від орбітального (рис. 1.19) та сонячного (рис. 1.20) фазового кута. У залежності Р( $\alpha$ ), подібно до всіх безатмосферних тіл, спостерігається гілка від'ємної поляризації, на якій точка інверсії для Іо, Європи і Ганімеда припадає на кут  $\alpha < 12^\circ$ , для Каллісто на більше значення фазового кута. Для перших трьох супутників не було виявлено

відмінності фазової залежності для ведучого та веденого боку, тоді як для Каллісто – вона чітко виражена. Подібно до багатьох безатмосферних тіл, в інтервалі довжини хвиль  $390 \le \lambda \le 685$  нм не виявлено спектральну залежність від'ємної поляризації, яка перевищувала похибку спостережних даних: 0,05-0,06% [10].



Рис. 1.19. Залежність ступеня поляризації у візуальних променях від орбітального фазового кута для Каллісто (J4). Чорні кружки – дані [290] при  $10^{\circ} \leq \alpha \leq 11,3^{\circ}$ , світлі кружки – дані при  $\alpha = 11^{\circ}$ , трикутники – екстрапольовані дані на  $\alpha = 11^{\circ}$ 

Несподіванку принесли спостереження протягом 8 годин 9 вересня 1986 р. при  $\alpha \approx 0.5^{\circ}$  в UBVR системі фільтрів [44, 47], метою яких було виявити можливий внесок дифузно розсіяного атмосферою Юпітера світла на поляризаційні властивості галілеєвих супутників. Виявилось, що на противагу показаним на рис. 1.20 даним, коли відповідно до проведеної апроксимації при цьому значенні фазового кута доцільно було очікувати майже нульове значення ступеня поляризації, для всіх чотирьох галілеєвих супутників у всіх довжинах хвиль було виявлено досить велике значення ступеня поляризації Р при положенні площини поляризації у межах 126-138° [44] (табл. 1.2). Для перевірки факту чи дійсно це є проявом ефекту освітлення Юпітером було проведено 25 спостережень супутника Іо в системі V протягом 3-х годин, коли значення орбітального фазового кута змінилося щонайменше на 30°. Відомо [78], що в межах значення фазового кута  $82^{\circ} \le \alpha \le 103^{\circ}$  при  $\lambda = 440$  нм дифузно відбите світло у центрі диска характеризується додатною поляризацією, ступінь Юпітера якої змінювалась у межах 8-11%. Але у спостережних даних не було виявлено зміни значення Р і у, які перевищували б похибки спостережень. Це дало підставу стверджувати, що виявлена поляризація не зумовлена освітленням Юпітера.



Рис. 1.20. Залежність ступеня поляризації у візуальних променях від сонячного фазового кута для Іо (J1), Європи (J2), Ганімеда (J3) і Каллісто (J4, праворуч внизу). Чорні кружки – [290] при  $10 \le \alpha \le 11,3^{\circ}$ , світлі кружки – [221], трикутники – [708]

Таблиця 1.2. Значення ступеня Р (%) та положення площини  $\psi^{\circ}$  поляризації галілеєвих супутників Юпітера при близьких до нуля значеннях фазового кута

$\alpha^{\circ}$	Дата	U		В		V		R		Дже-
				430 нм		550 нм		640 нм		рело
		P%	$\Psi^{j}$	P%	Ψ°	P%	Ψ°	P%	Ψ°	
Io										
0,21	22,11,88	-	-	0,19	102	0,16	98	0,11	97	[61]
0,26	22,11,88	-	-	0,10	100	0,07	94	0,12	95	[61]
0,26	28,11,00	-	-	0,11	-	-	-	-	-	[588]
0,29	11,11,88	-	-	0,15	102	0,08	93	0,10	93	[61]
0,30	27,11,00	-	-	0,16	-	0,16	-	-	-	[588]
0,3	17,10,88	-	-	0,37	105	0,35	103	0,31	102	[61]
0,32	26,11,00	-	-	-	-	0,16	-	0,15	-	[587]
0,5	09,09,86	0,40	132	0,39	129	0,30	135	0,26	133	[44]
0,5	19,10,87	-	-	0,35	134	0,34	130	0,29	126	[61]
0,58	25,11,88	0,29	180	0,13	180	0,25	180	0,06	180	[587]
0,70	20,10,87	-	-	0,20	177	0,15	174	0,13	181	[61]
Свропа										
0,20	27,11,00	-	-	-	-	0,35	-	-	-	[588]
0,23	28,11,00	-	-	0,26	-	0,26	-	0,28	-	[588]
0,23	23,11,88	-	-	0,21	130	0,15	131	0,11	133	[61]
0,24	23,11,88	-	-	0,17	116	0,18	127	0,15	125	[61]
0,25	23,11,88	-	-	0,15	120	0,15	124	0,12	120	[61]
0,26	22,11,88	-	-	0,18	120	0,11	115	0,10	111	[61]
0,27	29,11,00	-	-	-	-	0,23	-	-	-	[588]
0,28	23,11,88	-	-	0,23	135	0,25	136	0,20	138	[61]
0,29	22,11,88	-	-	0,15	98	0,16	100	0,14	100	[61]
0,30	22,11,88	-	-	0,25	92	0,20	95	0,18	98	[61]
0,3	16,10,87	-	-	0,39	92	0,30	93	0,25	97	[61]
0,36	26,11,00	-	-	0,35	-	0,28	-	0,25	-	[588]
0,5	09,09,86	-	-	-	-	0,20	133	-	-	[44]
0,5	19,10,87	-	-	0,15	97	0,14	100	0,12	101	[61]
0,53	21,11,88	0,16	180	-	-	-	-	-	-	[587]
0,54	25,11,00	-	-	-	-	0,28	-	-	-	[588]
0,59	25,11,88	0,24	180	0,24	180	0,21	180	0,37	180	[587]
0,66	25,11,88	-	-	0,18	152	0,14	150	0,11	148	[61]
0,7	07,08,85	-	-	0,19	189	0,18	103	0,21	101	[61]
0.7	20,10,87	-	-	0,05	119	0,12	124	0,11	120	[61]
Ганімед										
0,19	27,11,00	-	-	0,35	-	0,37	-	0,29	-	[588]

α°	Дата	U		В		V		R		Дже-	
				430 нм		550 нм		640 нм		рело	
0,23	23,10,88	-	-	0,31	91	0,25	95	0,07	97	[61]	
0,25	23,11,88	-	-	0,27	94	0,20	95	0,16	93	[61]	
0,26	22,10,88	-	-	0,25	93	0,18	91	0,14	94	[61]	
0,26	28,11,00	0,40	-	-	-	-	-	0,33	-	[588]	
0,28	23,10,88	-	-	0,26	95	0,22	96	0,20	98	[61]	
0,28	22,10,88	-	-	0,30	102	0,23	103	0,20	93	[61]	
0,3	16,10,87	-	-	0,37	99	0,35	100	0,31	98	[61]	
0,33	26,11,00	0,43	-	0,38	-	0,32	-	0,33	-	[588]	
0,5	09,09,86	0,13	169	0,25	116	0,21	123	0,24	123	[44]	
0,5	19,10,87	-	-	0,15	132	0,18	125	0,15	119	[61]	
0,54	21,11,88	0,05	180	0,37	180	0,38	180	0,30	180	[587]	
0,59	25,11,88	0,19	180	0,25	180	0,26	180	0,25	180	[587]	
0,7	07,08,85	-	-	0,21	179	0,25	184	0,17	186	[61]	
0,7	20,10,87	-	-	0,15	176	0,13	181	0,10	109	[61]	
	Каллісто										
0,23	23,11,88	-	-	0,30	126	0,20	100	-	-	[61]	
0,25	22,11,88	-	-	0,15	130	0,15	130	0,08	125	[343]	
0,26	22,11,88	-	-	0,22	95	0,15	115	0,18	97	[61]	
0,28	22,11,88	-	-	0,15	91	0,10	127	0,12	113	[61]	
0,28	29,11,00	-	-	0,26	-	-	-	-	-	[588]	
0,3	16,10,87	-	-	0,40	99	0,46	100	0,40	101	[61]	
0,5	09,09,86	0,34	116	0,44	126	0,30	125	0,23	127	[44]	
0,5	19,10,87	-	-	0,38	135	0,25	125	-	-	[61]	
0,54	21,11,88	0,72	180	0,52	180	0,26	180	0,13	180	[587]	
0,59	25,11,88	0,38	180	0,31	180	0,15	180	0,33	180	[587]	
0,7	07,08,85	-	-	0,25	196	0,36	179	0,33	177	[61]	
0,7	20,10,87	-	-	0,40	176	0,30	164	0,28	268	[61]	

Спостереження в 1987 р. [61] і в 1988 р. [61, 587] не лише підтвердили реальність цього ефекту, але й виявили його зміну з сонячним фазовим кутом  $\alpha$ . Хоча Р. Чигладзе вів систематичні дослідження супутників у 1981-1988 рр. у 4-х ділянках спектра, але лише в останні два роки йому вдалося спостерігати при фазових кутах  $\alpha < 0,7^{\circ}$ . Він виявив, що незначна зміна фазового кута поблизу значення  $\alpha = 0,5^{\circ}$  зумовлює велику зміну як ступеня поляризації Р, так і площини поляризації  $\psi$  (табл. 1.2, рис. 1.21). Оскільки в роботі [61] прив'язка площини поляризації проводилась не до площини розсіяння, а до площини перпендикулярної до неї, то оригінальні значення  $\psi$  при представлені на вказаному рисунку і в таблиці були збільшені на 90°. В той же час, автори роботи [587] за результатами спостережень галілеєвих супутників у 1988 р. стверджують, що поляризація в межах  $\alpha = 0,55^{\circ} \in$  від'ємною, тобто значення  $\psi = 0^\circ$ , або 180° (рис. 1.22). При побудові цього рисунка використовувались спостережні дані [44, 61], але чомусь їм також було приписане значення або  $\psi = 0^\circ$ , або  $\psi = 180^\circ$ .



Рис. 1.21. Залежність положення площини поляризації (по осі ординат) для Іо (1), Європи (2), Ганімеда (3) та Каллісто (4) від сонячного фазового кута [61]

Не виключено, що цьому сприяли результати робіт [469, 470], згідно яких при  $\alpha = 0,5^{\circ}$  може з'явитися так званий опозиційний ефект у ході залежності Р( $\alpha$ ), зумовлений когерентним розсіянням на дрібних частинках якому притаманна від'ємна поляризація. Не принесли однозначності й результати пізніших спостережень [588], але в представлених там результатах відсутні дані при  $\alpha = 0,5^{\circ}$ , а дані про положення площини поляризації віднесені до площини Всесвітнього меридіану і лише вказується, що поляризація від'ємна, хоча зовсім не зрозуміла причина такого висновку.



Рис. 1.22. Фазові залежності відносного блиску (ліворуч) і ступеня поляризації (праворуч) Іо (J1), Європи (J2) та Ганімеда (J3) [474]

Якщо в подальшому виявиться, що в межах опозиційного піку поляризації значення кута повороту площини поляризації дійсно знаходиться в межах  $0^{\circ} < \psi < 90^{\circ}$ , то виникає питання про механізм його формування. Щодо цього в [46] висловлено думку про можливість його формування розсіянням на частково орієнтованих мікроскопічних тріщинах на поверхні цих тіл.

**1.6.** Спектрофотометрія та природа поверхневого шару галілеєвих супутників. Із спектрофотометричних спостережень в 1963 і 1964 рр. в діапазоні  $\lambda 0,8-2,5$  мкм зі спектральною роздільною здатністю  $\lambda/\Delta\lambda = 20$  при  $\lambda = 1,6$  мкм і 80 при  $\lambda = 3,4$  мкм [47] виявили численні депресії, найпотужніші з яких припадали на  $\lambda = 1,2, 1,4$  та 1,9 мкм і були приписані спектру снігів.

Пізніші наземні спостереження [115, 157, 177, 253, 317, 415, 419, 454, 506, 557] та з КА дозволили порівняти їх відносні спектри (рис. 1.23, 1.24) та визначити спектральні значення геометричного альбедо (рис. 1.25, 1.26).



Рис. 1.23. Відносна спектральна відбивна здатність Іо (1), Європи (2), Ганімеда (3), Каллісто (4) нормована до 1,0 на дані при  $\lambda = 563$  нм; для кожного наступного супутника спектри зсунуті вниз на 0,2. Середнє значення їх геометричного альбедо при  $\lambda = 563$  нм відповідно рівне:  $A_g =$ 0,61, 0,69, 0,42, 0,18; похибки становлять 6% у синій і 3% у червоній ділянці спектра [444]

Геометричне альбедо Іо та Європи в червоній ділянці спектра (рис. 1.23-1.26) надзвичайно високе і різко зменшується при  $\lambda < 500$  нм, у далекому ультрафіолеті воно  $\approx 0,013$  для Іо та 0,07 для Європи, для Ганімеда і Каллісто воно ще менше. У далекій ІЧ ділянці присутні численні смуги поглинання, положення яких для Європи, Ганімеда й Каллісто практично ідентичне, але суттєво відрізняються для Іо.

Так, у спектрі Іо (0,3  $\leq \lambda \leq 2,5$  мкм) найпомітнішою є смуга при  $\lambda =$  1,15 мкм (глибина ~ 5%), у короткохвильовій ділянці спектра присутні значно слабкіші смуги; при  $\lambda > 1,5$  мкм спектр практично не має деталей і повільно ослаблюється при збільшенні довжини хвилі, при  $\lambda \approx 2,5$  і 4,1 мкм знову появляються смуги поглинання.



Рис. 1.24. Відносний спектр передньої (П) і задньої (З) півкулі галілеєвих супутників Європи (J2), Ганімеда (J3) і Каллісто (J4), нормовані на середнє значення в діапазоні 1,2-1,3мкм [296]



Рис. 1.25. Спектральна відбивна здатність (*I/F*) для Каллісто (J4), Ганімеда (J3), Європи (J2) та Іо (J1). Розриви зумовлені перекриттям фільтрів порядку [444]

Спостереження з більшою спектральною роздільною здатністю [177, 340] виявили малопотужні смуги поглинання ще й при  $\lambda = 3,85$  та 3,91 мкм, які у вигляді єдиної депресії чітко проявляється на рис. 1.25 і 1.26. Порівняння спектра передньої півкулі Європи (рис. 1.26) з модельними розрахунками вказує на присутність практично чистого льоду H<sub>2</sub>O з розміром зерна близько ~ 30 мкм та суміші з криги H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub>. При  $\lambda = 3,1$  мкм знаходиться так званий пік Френеля, характерний для дуже твердого водяного льоду, який веде себе подібно до металу. Присутня також смуга поглинання при  $\lambda = 2,85$  мкм, яка зазвичай характерна для аморфного льоду і більше виражена на поверхні передньої півкулі.

Смуга при  $\lambda = 1,65$  мкм характерна для граткової структури кристалічного льоду на субміліметрових глибинах. Спектр веденої півкулі Європи вказує на присутність асиметричних смуг поглинання водяного

льоду в гідратованих матеріалах і сильнішого «шуму», ніж для ведучої півкулі. Це, можливо, викликано тим, що наведений на рис. 1.26 спектр отримано з відстані, яка знаходиться за межею інтенсивних радіаційних поясів планети [142].



Рис. 1.26. Спектри передньої (чорна лінія) і задньої (сіра лінія) півкулі Європи:  $v_1$  і  $v_3$  – симетрична і асиметрична моди смуг поглинання;  $v_2$  – фундаментальна мода [142]

В далекій УФ ділянці спектра [93, 134, 523] Іо та Європи є смуга поглинання при  $\lambda = 280-290$  нм [408], яка положенням і формою нагадує смугу А-Х молекули SO<sub>2</sub> та яка, можливо, виникає внаслідок розсіяння УФ випромінювання в кристалічній решітці водяного льоду шляхом утворення зв'язку S-O при забрудненні атомом сірки. Пізніше було показано [523], що в спектрі Європи ця смуга найчіткіше проявляється в межах довготи 223-333° і на довготі 90°, а найглибшою вона є при L = 277 ± 3°, тоді як її глибина (у межах похибки спостереження 20%) залишалася сталою протягом 5 років спостережень (1978-1982 рр.)

З порівняння лабораторних і спостережних спектрів зроблено висновок [244, 498-502, 640] про можливе існування на Іо сильно збагаченого сіркою поверхневого шару. Зокрема, дослідження спектральної відбивної здатності порошку чистої сірки з різним ступенем подрібнення і великою кількістю різних хімічних добавок мінерального і штучного походження в інтервалі довжини хвиль 0,3-2,5 мкм, які бомбардувались протонами з енергією 5 кеВ [500], показали що найкраще погодження зі спектром Іо спостерігалось для суміші 55% сірки, 30% Na<sub>2</sub>Mg(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O і 15% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Крім того виявилось, що вигляд спектра Іо відчутно залежить ще й від орбітального фазового кута [506].

Спектри інших трьох супутників досить подібні, але інтенсивність смуг поглинання для кожного з них суттєво відрізняється. Так, у спектрі Європи найсильніші смуги з усіх супутників припадають на  $\lambda = 1,53, 1,65$  та 2,0 мкм. Дуже подібний спектр і в Ганімеда. У спектрі Каллісто також помітні смуги при  $\lambda = 1,53$  та 2,0 мкм, але там вони значно слабкіші. Крім того, в їх спектрах спостерігаються й інші смуги, які раніше не ототожнювались. Порівняння даних різних авторів показує що для Європи і Ганімеда має місце добре погодження спектральної залежності, тоді як для ю і Каллісто результати досить суперечливі; це може бути зумовлено як реальною зміною з часом, так і, наприклад, похибками калібрування.

Виявлено також, що ведуча півкуля Іо порівняно із веденою має меншу концентрацію сірки і більшу різних сильно подрібнених солей [596, 640]. У першій роботі з порівняння низькодисперсних спектрів Іо та двоокису сірки в інтервалі  $\lambda$ 1-4,5 мкм були ототожнені смуги поглинання SO<sub>2</sub> при  $\lambda = 1,35, 2,55, 2,80, 3,80, 3,95$  і 4,08 мкм; у другій (де спектральна роздільна здатність становила  $\approx$  3 нм) таке ототожнення було зроблено для смуг при  $\lambda = 2,815, 2,845, 2,909, 2,921$  і 2,931 мкм. Вважається, що лише 20% його поверхні вкрито інеєм SO<sub>2</sub> [501]. В [584] досліджено спектр збагаченого натрієм аміачного інею і також знайдено певну відповідність зі спектром Іо.

Основною складовою поверхневих шарів Європи і Ганімеда є водяний лід при Т  $\approx$  150 К з можливим розміром зерна  $\approx$  100 мкм, а вкриті ним ділянки займають площу від 50 до 100% для Європи, від 20 до 65% – для Ганімеда і від 5 до 25% – для Каллісто [150, 157, 341, 414, 552]. Відмінність видимого альбедо для двох сторін Ганімеда пояснюють тим, що його ведуча сторона має на 20% більше льодового покрову від веденої. Допускають, що матеріал під льодовим покровом за своїми відбивними властивостями подібний силікатам. Поверхневі шари Ганімеда і Каллісто повинні мати ще й гідратовані мінерали типу монтморіоллоніту і темну речовину, подібну вуглистим хондритам.

Спектрофотометрія з КА «Галілео» в діапазоні  $\lambda 0,7-5,2$  мкм із спектральною роздільною здатністю ~ 0,0243 мкм і просторовою

роздільною здатністю 5-100 км [141] виявила, що смуги поглинання льоду  $H_2O$  при  $\lambda \approx 1.5$  і 2,0 мкм, які реєструються по всій поверхні Європи, стають надзвичайно асиметричними у темних регіонах. Це може свідчити про те, що вода там знаходиться не у формі чистого льоду [443, 445]. Існує два пояснення таких особливостей.

1. Наявність гідратованої солі на основі натрію й магнію (MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·10H<sub>2</sub>O), більшість різновидів яких у кристалічній формі в лабораторних умовах при низьких температурах показують ще й добре розвинену структуру смуг в області 1,5-1,8 мкм, яких не було видно в спектрі Ганімеда [446], а інтенсивність ліній зменшується при заморожуванні соляного розчину до температури, характерної для поверхні Європи [197].

2. Наявність гідратованої сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ · $8H_2O$ ), яка могла сформуватися при залученні ендогенної чи екзогенної сірки або  $SO_2$ . Присутність цих складових цілком імовірна на поверхні Європи [141]. Сірка могла бути фарбувальним агентом, який приводить до появи червонуватого кольору не крижаних компонентів у видимій довжині хвиль [139, 141, 527, 646].

Можливо, істина знаходиться десь між цими крайніми випадками, адже суміші різної концентрації замерзлих у воді гідратованих солей MgSO<sub>4</sub> і Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> і сірчаної кислоти в лабораторних умовах дають добре співпадіння спектральних особливостей за формою позицією i спектральних смуг поглинання груп H<sub>2</sub>O в діапазоні λ1,5-2,0 мкм у спектрі тих частин поверхні Європи, яким притаманний не крижаний склад [527]. Порівняння спектру не льодяного регіону з лабораторним спектром кристалічної солі типу MgSO4·6H2O і MgSO4·7H2O з подібною, або нижчою гідратацією [139] не показує повного співпадіння; це, можливо, тим, що лабораторні спектри не зумовлено відкалібровані по геометричному альбедо, на відміну від згаданого раніше спектру Європи. Оскільки деякі спектри цих кристалічних солей показують тонку структуру, якої не видно в не крижаному компоненті поверхні Європи, то це може свідчити про те, що вони на супутнику знаходяться не в чистому вигляді [446].

**1.7. Теплові властивості галілеєвих супутників.** Б. Муррей з колегами [493] 12 грудня 1963 р. першими дослідили зміну теплового випромінювання Ганімеда при  $\lambda = 8-14$  мкм під час його входження в тінь Юпітера і при виході з тіні і виявили різку зміну інтенсивності в ці моменти. Аналогічні дослідження всіх 4-х галілеєвих супутників були проведені в 1971-1972 рр. кількома групами спостерігачів [315, 483, 485] в

інтервалі  $\lambda$ 8-14 мкм і при  $\lambda$  = 20 мкм (рис. 1.27). Подальші дослідження в тепловому і радіодіапазоні [5, 38, 89, 205, 211, 258, 280, 365, 485, 489, 543, 544, 627, 702] виявили ще й зміну теплового випромінювання з орбітальним фазовим кутом (рис. 1.28).

Не виключена можливість незначної зміни температури поверхні супутників з довжиною хвилі. Так, наприклад, при  $\lambda = 8,4$  і 21 мкм вона, відповідно, становила: 149 ± 3 K, 128 ± 5 K (Іо); 134 ± 3 K, 121 ± 5 K (Європа); 145 ± 3 K, 138 ± 5 K (Ганімед) та 160 ± 3 K, 151 ± 7 K (Каллісто).



Рис. 1.27. Зміна інтенсивності теплового випромінювання Каллісто на  $\lambda = 10$  і 20 мкм під час затемнення 11.08.1972. Внизу – розрахунки в двошаровій моделі зі значенням теплової інерції 14000 та густиною 0,15 г·см<sup>-2</sup>; зверху – одношарова однорідна модель з тепловою інерцією 20000 [483]

За тепловим скануванням була побудована теплова карта Ганімеда, на якій спостерігаються помітні температурні контрасти від 90 до 160 К. У приекваторіальних широтах опівдні температура піднімається до 160 К, знижується до 120 К перед заходом і падає до 85-90 К після заходу Сонця. На полюсах навіть денні температури ніколи не перевищують 120 К.



Рис. 1.28. Зміна інтенсивності теплового випромінювання з орбітальним фазовим кутом L при λ = 20 мкм [49]

Аналіз спостережних даних під час затемнень проводився в рамках моделі з одним і двома однорідними шарами (результати найкращого погодження показані суцільними лініями на рис. 1.27) і дозволив визначити значення теплової інерції (3900 ± 120 для Іо, 5200 ± 60 для Ганімеда, 330 ± 30 для Каллісто в кал<sup>-1</sup>·см<sup>2</sup>·c<sup>1/2</sup>·K<sup>-1</sup>) і густину речовини біля поверхні (0,10 ± 0,04 Іо, 0,15 ± 0,03 Ганімеда, 0,11 ± 0,02 Каллісто, в г·см<sup>-2</sup>) [483]. В роботі [315] при  $\lambda = 10$  мкм для теплової інерції отримано дещо інші значення: 1100 ± 100 для Іо, 3000 ± 1000 для Європи та 3400 ± 700 для Ганімеда.

Низьку теплопровідність Ганімеда пояснюють великою шершавістю поверхневого шару супутника [484].

Поляризаційні спостереження Іо при  $\lambda = 3,8$  та 4,76 мкм виявили лінійну поляризацію зі значенням ступеня поляризації Р  $\approx 1,6\%$  та зміну ступеня і положення площини поляризації з орбітальним фазовим кутом; це могло б мати місце тоді, коли б це випромінювання виходило з невеликої кількості гарячих плям на значній частині поверхні. Найбільша з них знаходиться на північному сході від патери Локі, друга пляма знайдена на веденій півкулі біля патери Ра, а третя гаряча пляма на ведучій півкулі не відповідає ні одній з відомих деталей карти супутника. Показник заломлення поверхневого шару виявився приблизно таким же, як для земних базальтів та дещо менший ніж для сірки [284, 628].

1.8. Раліолокаційні спостереження галілеєвих супутників. Радіолокаційні спостереження не численні та в основному виконані за допомогою радіолокаційної системи обсерваторії Аресібо при  $\lambda = 12,6$  см в 1975 і в 1976 рр. [137, 138], в 1977-1979 рр. [530] та в Голдстоуні при λ = 3,5 см [286]. За цими даними було оцінено РЛ геометричне альбедо Ag і ступінь деполяризації колової µ<sub>с</sub> і лінійної µ<sub>L</sub> поляризації (див. в [45]); вона відрізняється в різні роки і показала зміну геометричного альбедо зі зміною орбітального фазового кута (рис. 1.29) і зміну ступеня деполяризації – з альбедо [530]. Так, в 1976 р. А<sub>g</sub> = 0,04 ± 0,01 (Io), 0,69 ± 0,17 (Європа), 0,37 ± 0,09 (Ганімед) і 0,15 ± 0,04 (Каллісто), а  $\mu_c = 1,61 \pm$ 0,19 (Європа), 1,48 ± 0,19 (Ганімед) і 1,24 ± 0,19 (Іо); в 1975 р.– А<sub>д</sub> = 0,65 ± 0,16 (Європа), 0,38 ± 0,10 (Ганімед) і 0,16 ± 0,04 (Каллісто); µ<sub>c</sub> = 1,56 ± 0,11 (Європа), 1,55 ± 0,06 (Ганімед) і 1,19 ± 0,06 (Каллісто); µ<sub>L</sub> = 0,47 ± 0,07 (Європа),  $0,47 \pm 0,08$  (Ганімед) і  $0,55 \pm 0,10$  (Каллісто). РЛ при  $\lambda = 3,5$  см у грудні 1977 р. показала, що орієнтація колової поляризації відбитого випромінювання практично співпадала з орієнтацією падаючого [286].

Згідно аналізу в роботі [303] відбиті від Каллісто, Ганімеда та Європи радіопромені мають аномальні характеристики: 1) відбита поляризована по колу хвиля має той же знак, що й послана; 2) у лінійно поляризованому сигналі 50% енергії у відбитому сигналі має ортогональну поляризацію; 3) поперечний перетин відбивання при довжині хвилі 12,6 см для Європи, Ганімеда і Каллісто становить 2,6, 1,5 і 0,6; 4) квазідзеркальна складова радіовипромінювання відсутня.

Було запропоновано модель рефракційного розсіяння на поверхні [303], згідно якій речовина середовища характеризується малим значенням коефіцієнта відбивання і поглинання та різним показником заломлення, що призводить до рефракції з поворотом радіопроменя на 180°. Через малий

градієнт показника заломлення на поверхні не виникає явище повного внутрішнього відбивання. Такі характеристики добре відповідають моделі льодяної поверхні з пористою або рихлою поверхнею із квазісферичними вкрапленням.



Рис. 1.29. Зміна РЛ геометричного альбедо Ag в довжині хвилі 12,6 см зі зміною орбітального фазового кута L [530]

**1.9.** Спектрофотометричні властивості менших супутників Юпітера. Серед інших супутників найкраще вивчена Амальтея. UBV фотометрія поблизу максимальної західної елонгації показала, що вона дуже червона з показником кольору +1,5<sup>m</sup> і має значно меншу від

галілеєвих супутників відбивну здатність [465]; за спектральними властивостями в діапазоні λ0,887-2,4 мкм її поверхня нагадує кам'яне тіло [508], але існуючих спостережних даних поки що недостатньо для однозначного висновку про природу поверхневого шару [291]. Температура поверхні супутника в [577] оцінена як T = 155 ± 15 К, розрахунок в моделі тривісного еліпсоїда з урахуванням притоку сонячного і юпітеріанського опромінення та ефекту бомбардування зарядженими частинками привело до значення T ≈ 166 K, а за даними KA «Вояджер» було отримано значення  $T = 164 \pm 5 \text{ K}$  [622].

Ретельні дослідження фазової залежності блиску внутрішніх супутників Юпітера в 1998-2002 рр. [401] виявили наявність опозиційного ефекту (рис. 1.30). За даними багатоколірної фотометрії зовнішні супутники Гамалія, Елара, Лиситея (з прямим обертанням) та Пасифея і Синкопа (зі зворотним обертанням) виявилися подібними до астероїдів Стипу, а супутник Карма є дуже яскравим в УФ променях [671].



Рис. 1.30. Фазова залежність блиску внутрішніх супутників Юпітера: зірки – ведуча сторона, трикутники – ведена [401]

**1.10. Життя в надрах Європи?** В 1971 р. Дж. Левіс [420] 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 протяжними оболонками зі збагаченою аміаком рідкою водою і відносно тонкою оболонкою з водяного льоду.

Детальніший розгляд проблеми [35] показав, що: Каллісто є тілом з корою із суміші силікатів і льоду товщиною  $\approx 200$  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. Виходячи з цих моделей і базуючись на аналогії з арктичними організмами автори роботи [575] 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 слабке, 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 життя пов'язують з поглинанням світла мікроорганізмами в короткий період існування новоутворених тріщин у крижаному панцирі, існування яких в поверхневому шарі Європи не викликає сумніву.

## Розділ 2. Супутники Сатурна

У системі Сатурна унікальними за своїми властивостями є супутник Титан з його потужною атмосферою та Енцелад зі своєрідною вулканічною активністю. Супутники великих розмірів (Титан, Япет, Рея, Тефія, Діона, Мімас та Енцелад) практично сферичні (рис. 2.1, 2.2, 2.5 праворуч), форму малих можна описати (інколи досить умовно) тривісним еліпсоїдом або ж вони взагалі є уламками неправильної форми (рис. 2.3-2.5 ліворуч).



Рис. 2.1. Дві протилежні півкулі супутника Мімас (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Система супутників Сатурна досить складна і назва «крижані», мабуть, найкраще їм відповідає тому що їх середня густина (за винятком Титана) становить (або дещо більша)  $\approx 1,0$  г/см<sup>3</sup>. Присутність значної кількості водяного льоду в складі супутників Сатурна – це пряма вказівка на їх утворення в зоні низьких температур, які й нині характерні для зовнішньої частини Сонячної системи. Згідно існуючим теоріям у період формування планет на периферії протопланетної хмари температура була дуже низькою і тому легкі леткі речовини (такі, наприклад, як водяна пара) конденсувалися переважно на периферії.



Рис. 2.2. Ліворуч – Діона, праворуч Рея (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)



Рис. 2.3. Ліворуч – Феба, праворуч Атлас у двох ракурсах (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Всі недавно відкриті супутники мають малий розмір, високе геометричне альбедо (0,3-0,5) і неправильну (за одним виключенням) форму. Серед них вперше було виявлено так звані супутники «пастухи» (або «сторожові собаки»), про що детальніше буде мова при розгляді кілець Сатурна.

Своєрідним є рух так званих коорбітальних супутників радіуси орбіт яких відрізняються на кілька кілометрів; наприклад, орбіти Януса (рис. 2.4, ліворуч) та Епіметея (рис. 2.5 ліворуч) змінюються в межах 151 422 - 151 472 км і при русі по орбіті періодично міняються місцями; тому допускають, що вони, можливо, є фрагментами одного, колись зруйнованого в результаті ударної дії, тіла.



Рис. 2.4. Ліворуч – два зображення Януса, праворуч – зображення Телесто з КА Кассіні в жовтні 2005 р. (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Нагадаємо, що римський бог Янус зображується з двома обличчями. У грецькій міфології, Епіметей (у перекладі – «непередбачуваний») та його брат Прометей («передбачуваний») були Титанами та синами Япета. Епіметей був батьком Атласа. Якщо Прометей характеризувався як винахідливий і розумний, то Епіметей вважався дурником, для якого Зевс спеціально створив Пандору.

В точці Лагранжа L4 на орбіті Діони (рис. 2.2, ліворуч) знаходиться супутник Єлена. Супутник Тефія (рис. 2.5 праворуч) ніби «пасе» два інші, на порядок менші супутники: Каліпсо і Телесто (рис. 2.4, праворуч), які розташовані на 60° спереду й позаду Тефії при її русі по орбіті навколо Сатурна.



Рис. 2.5. Ліворуч – південна полярна область Епіметея; праворуч – Тефія (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

По цій причині їх спочатку назвали Троянські Тефії за аналогією з астероїдами Троянцями, що рухаються навколо Сонця по орбіті Юпітера. У грецькій міфології Телесто – дочка Океануса й Тефії, а Каліпсо – морська німфа, яка затримала Одіссея на своєму острові протягом семи років.

Найкраще вивчені так звані класичні супутники: Мімас, Енцелад, Тефія, Діона, Рея, Титан, Гіперіон, Япет і Феба (рис. 2.3, ліворуч), які практично всі (окрім Феби) знаходяться у синхронному обертанні, тобто, постійно обернені до Сатурна однією стороною.

## 2.1. Структура поверхневого шару супутників Сатурна

**Мімас** названо на честь одного з Титанів, якого вбив у поєдинку Геркулес.

Він обертається навколо Сатурна на відстані 185 404 км від його центра і здійснює один оберт за 0.942422 доби. Його густина ( $\approx 1.17 \text{ г/см}^3$ ) вказує на переважно крижаний склад з невеликою домішкою силікатного матеріалу, а поверхневий шар (рис. 2.1) густо вкритий ударними кратерами різної форми. Нові кратери стирають старіші і це говорить про те, що супутник зараз навряд чи проявляє активну внутрішню тектонічну діяльність. Діаметр найбільшого кратера Гершель (рис. 2.1 ліворуч) сягає 130 км і складає майже 1/3 діаметра супутника та знаходиться посередині оберненої до Сатурна півкулі; діаметр тільки центральної гори кратера становить близько 30 км, по периметру на 5 км піднімається стіна, а переважна частина самого кратера лежить на 10 км нижче середнього рівня поверхні супутника; висота центрального піку над підошвою кратера перевищує 6 км. Розломи й тріщини на діаметрально протилежній до кратера стороні Мімаса (в лівій частині півкулі на рис. 2.1 праворуч), можливо зумовлені зіткненням з метеороїдом, або викликані припливним ефектом від Сатурна, тому що Мімас – найближчий до планети великий супутник.

Супутник **Тефія** названо на честь морської богині у грецькій міфології, яка була сестрою а пізніше – дружиною Океануса.

Його сидеричний період – 1 доба 2 год. 19 хв., середня температура Т = 87 К, середнє значення густини 1 г/см<sup>3</sup> – роблять супутник схожим на шматок чистого льоду. Як видно з фотографій Тефії (рис. 2.6), на поверхні супутника практично відсутні контрастні альбедні деталі, а сама поверхня усіяна ударними кратерами, серед яких найпоширенішими є кільцеві кратери. Великі кратери (наприклад, Пенелопа) вкриті численними молодшими утвореннями. Три значно менші кратери, розташовані в лінію нижче кратера Пенелопа – Аякс (Ajax), Поліфемус (Polyphemus) і Феміус

(Phemius) – можуть бути результатом падіння на поверхню Тефії уламків розірваної гравітацією Сатурна комети (по аналогії з кометою Шумейкера-Леві 9 навколо Юпітера). Найбільшим (з діаметром 450 км) є старий кратер Одіссей (рис. 2.6 ліворуч), розташований на ведучій стороні Тефії. У його середині міститься багато менших кратерів, у деяких напрямках від центра він показує кілька концентричних хвиль підвищень (так званих «цирків») з основним кільцевим валом. Кратер достатньо плоский, без дуже високих гір на кільцевій структурі і значного центрального піку, які зазвичай спостерігаються на Місяці й Меркурії.

На Тефії є гігантська долина Ітака (Ithaca Chasma) довжиною більше 1000 км, шириною ~ 100 км і глибиною від 3 до 5 км (рис. 2.6 праворуч), розташована з протилежного до кратера Одіссея боку та є мережею тріщин і засипаних численними обвалами розломів що простягнулися по диску з півночі на південь.



Рис. 2.6. Величезна ударна структура Одіссей і вкриті кратерами крижані кручі гігантської долина Ітака на Тефії (http://photojournal. jpl.nasa.gov/)

У північній частині цього каньйону знаходиться великий ударний кратер Телемахус (Telemachus) та багато кратерів невеликого розміру що свідчить про його великий вік. Молоді кратери є дуже світлі. Існування таких потужних ударних структур може говорити про те, що в околиці Сатурна колись було чимало планетезималей великого розміру. Те, що великі старі кратери сильніше вкриті молодшими утвореннями, означає, що вони утворилися ще на ранній стадії існування Сонячної системи.

Існує й інша гіпотеза щодо долини Ітака, згідно якій Тефія не завжди була повністю замерзлою, а в деякий момент у минулому частина її поверхні ймовірно була рідкою і тому ударні кратери набували згладженої форми. Оскільки через деякий час поверхня охолоджувалась і тверднула, то розширення що супроводжувалось розтріскуванням відбувалось ïï поверхні. При цьому загальна площа поверхні супутника могла збільшитися майже на 10%. Ділянки зі значно меншою щільністю кратерів можуть вказувати на можливу геологічну активність у минулому, що й привело до згладжування поверхневого шару. Як видно з рис. 2.6 (праворуч), на дні багатьох кратерів Тефії присутня дуже світла речовина, що відрізняє їх від кратерів наприклад на Япеті, на дні яких знаходиться темна речовина. Не виключено що Тефія й зараз викидає у навколишній простір речовину, проявляючи певну вулканічну або гейзерну активність, на що вказало вивчення зворотних траєкторій потоків частинок, які рухаються поряд з орбітою Тефії.

Супутник Діона названо на честь героїні грецької міфології Діони, мами Афродіти (Венери) що народила її від Зевса (Юпітера).

Її орбітальний період складає 2 доби 17 год. 41 хв., відстань від центра Сатурна 377 000 км, густина 1,4 г/см<sup>3</sup>, поверхня дуже світла (відбивна здатність деяких ділянок близька до 100%). Як видно з рис. 2.2, поверхня носить сліди викиду матеріалу при ударі крупних метеоритів у вигляді системи променів, добре відомих зі спостережень Місяця та які на Діоні, можливо, є водяним інеєм. Діаметр найбільшого кратера на Діоні складає близько 100 км, є там і звивиста долина, утворена тріщинами в корі. Діона завжди обернена до Сатурна одним боком, тому ведуча сторона мусила б мати більшу насиченість кратерами, але в дійсності більш кратерованою є ведена сторона, що може бути наслідком потужних зіткнень, внаслідок яких супутник розвернувся так, що півкулі помінялись місцями.

Зараз лідируюча півкуля однорідно яскрава, ведена містить мережу яскравих смужок на темнішому фоні з дуже світлими кратерами і порівняно небагато крупних кратерів. Появу смужок спочатку пояснили тим, що незабаром після утворення Діона була досить активною з крижаним вулканізмом, в результаті чого значна частина поверхні заново вкрилась рідкою субстанцією, а деяка частина залишилась у вигляді світлих смужок.

Зображення з високою просторовою роздільною здатністю показують, що смужки це не замерзлі потоки рідини, а складна сітка значно молодших за більшість кратерів тектонічних розломів. Як видно з рис. 2.7, південна область поверхні Діони містить дуже світлі жолоби і розломи, які відрізняються від темніших розломів у північній полярній області, що часто приписують їх різному віку. Окрім розломів є численні кратери, значна кількість яких має світлі вали й стінки, їх дно часто дуже темне, що зумовлено зсувами і обвалами, які оголюють чистий лід.

Отримані зображення показують, що ландшафт супутника не складається з товстих крижаних відкладень, а основний внесок в альбедо швидше за все дають яскраві розломи й стінки кратерів. Розломи іноді перетинають дно кратерів, що незалежно може вказувати на їх відносну молодість.



Рис. 2.7. Ліворуч – південна полярна область Діони зі складною сіткою тектонічних розломів, праворуч – ландшафт середини кратера Падуя (Padua Linea) діаметром 60 км (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Навколо Діони виявлено викинутий матеріал, що, можливо, вказує на сучасну вулканічну активність супутника, яка поставляє матеріал до кільця Е Сатурна [154].

**Рея** також названа на честь героїні грецької міфології Реї, яка була сестрою, а потім і дружиною Кроноса (Сатурна) і матір'ю Деметри, Гадеса (Плутона), Гери, Гестії, Посейдона (Нептуна) і Зевса (Юпітера).

Її поверхня дуже світла і навіть найтемніші області поверхні Реї мають альбедо більше 50%. Орбітальний період 4,518212 діб, середня відстань від центра планети 527 108 км, супутник постійно обернений до Сатурна одним і тим же боком. Його поверхня густо вкрита стародавніми кратерами з розміром до 300 км і там чітко вирізняється величезна біла пляма з молодим ударним кратером. Значне число кратерів має виразний центральний пік. Лідируюча півкуля Реї сильно кратерована й досить однорідно яскрава. Задня півкуля вкрита мережею яскравих смуг у вигляді валів на темному фоні, які, можливо є льодом, що заповнює розломи, і має зовсім небагато кратерів.

Поверхня супутника Гіперіон (у грецькій міфології Гіперіон був Титаном, сином Геї та Геліоса) є темною (альбедо 0,2-0,3) і він має дуже неправильну форму (рис. 2.8, табл. 1), що пов'язують з руйнуванням великого первинного тіла. Період обертання по орбіті ~ 21 доба, сидеричний період 21 доба 6 годин 39 хвилин при радіусі орбіти близько 1 481 010 км.



Рис. 2.8. Гіперіон (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Характер обертання супутника навколо осі дуже хаотичний і підпорядкований суттєвому гравітаційному впливу Сатурна і його найбільших супутників. Його поверхня носить сліди інтенсивного метеоритного бомбардування, причому найбільший кратер за розміром такий же, як і сам супутник. Завдяки зумовленим Титаном збуренням у русі, зазвичай синхронне обертання Гіперіона може порушуватися на десятки відсотків протягом кількох тижнів; це пов'язують з резонансом 4:3 з Титаном (на 4 оберти Титана навколо Сатурна припадає 3 оберти Гіперіона). Відзначимо, що в Сонячній системі лише астероїду 4179 Тутатіс притаманний настільки хаотичний характер обертання.

Структурою поверхневого шару Гіперіон виділяється серед усіх тіл Сонячної системи тому що він представляє собою своєрідну гігантську «губку»; його виняткова пористість дозволяє без особливої шкоди поглинати дрібне й крупне космічне сміття: метеорити практично провалюються в глибини супутника, залишаючи за собою нові глибокі отвори. Згідно останнім оцінкам Гіперіон на 42% складається з порожнин, а на відсотки що залишилися – припадає головним чином водяний лід. Внаслідок такої структури, його середня густина складає  $\approx 0,544$  г/см<sup>3</sup>. Передані КА «Кассіні» з відстані  $\sim 500$  км зображення (рис. 2.9) показали, що поверхневий шар Гіперіона не лише насичений різнокаліберними кратерами, але й те, що вони дуже глибокі і добре збереглися. На дні деяких кратерів видно темний матеріал, з якого, можливо, складаються внутрішні пласти Гіперіона.



Рис. 2.9. Мозаїка Гіперіона, яка також показує темну речовину на дні багатьох кратерів (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Було виявлено і яскраві деталі, що вказує на товщину темної речовини всього у кілька десятків метрів. Схили практично всіх кратерів дуже гладкі. Найяскравіші в ультрафіолеті деталі поверхні Гіперіона також свідчать про присутність водяного льоду, який найкраще помітний на найкрутіших схилах кратерів супутника.

Япет. Якщо зазвичай орбіта з параметрами подібними до орбіти супутника Япет (площина орбіти нахилена до площини екватора Сатурна

під кутом 15,5° і прецесує з амплітудою 7,5°) є сильно витягнутою (оскільки в більшості випадків вони відповідають захопленим тяжінням масивного центрального тіла астероїдам), то у Япета вона практично колова. Сидеричний період 79 діб 7 год. 56,6 хв., радіус орбіти 3 560 820 км, середня густина 1,16  $\pm$  0,09 г/см<sup>3</sup>; альбедо двох його півкуль різниться в 10 разів (від 0,05 до 0,5). Темну півкулю називають Область Кассіні (Cassini Regio), світла – Земля Ронсевальдська (Roncevaux Terra) на згадку про знамениту битву, в якій відзначився герой французької «Пісні про Роланда». Поверхневий шар Япета характеризується дуже високою щільністю метеоритних кратерів і наявністю специфічних деталей (рис. 2.10-2.12). На рис. 2.10 біля стіни висотою до 15 км видно гігантський обвал у величезному кратері діаметром близько 600 км, уламки якого розкидані на відстань до 120 км.



Рис. 2.10. Знімок поверхні Япета (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Кілька світлих ділянок вказують на новоутворення дно і стінки яких вкриті льодом. Вважається, що природа відмінності відбивної здатності поверхні Япета якимось чином пов'язана з його рухом по орбіті навколо Сатурна. Передбачалось, наприклад, що викидання водяної пари і подальша конденсація інею відбувалися в однаковій кількості на обох боках супутника, але внаслідок взаємодії з плазмосферою Сатурна цей іній
поступово видалився з його передньої півкулі. Могло бути й навпаки: темна передня сторона постійно збирала заряджені частинки, які при взаємодії з поверхнею супутника викликали поступове потемніння матеріалу на його поверхні. Останнім часом популярною стала гіпотеза про те, що передня півкуля Япета забруднена пилом, який викидається з іншого супутника Сатурна – Феби. При численних зіткненнях легший світлий матеріал випарувався, а темний важчий залишився на поверхні.

На зображеннях Япета виявлено гігантські гірські хребти, висота яких інколи сягає 20 км (рис. 2.11). Так, гігантський хребет шириною ~ 20 км, середньою висотою ~ 13 км і довжиною понад 1500 км на рис. 2.11 (праворуч) проявляється у вигляді виступів на лімбі. За однією з версій, хребет міг утворитися в результаті швидкого обертання супутника в епоху його зародження і поступового охолодження, що може підтвердити і його велика сплюснутість. За іншою версією хребет утворився з матеріалу стародавніх кілець Сатурна, зібраного супутником ще в епоху, коли його орбіта проходила в площині кілець, та яку пізніше щось змусило змінитися. Крім того, на дуже світлій частині поверхні Япета присутні загадкові темні плями. Зображення на рис. 2.12 розміром ~  $35 \times 35$  км<sup>2</sup> показує плямистість поверхні на вкритій кратерами проміжній зоні між яскравим і темним районами. Допускають, що яскрава речовина це водяний лід, а темна – кам'янистий пил.



Рис. 2.11. Ліворуч – знімок Япета з екваторіальним «виступом». У центрі зображення видно широкий ударний басейн діаметром близько 400 км. З правого краю диска за горизонт іде ударний кратер діаметром близько 600 км. Його краї окреслені глибоким прямовисним обривами глибиною до 15 км. Праворуч – гірський екваторіальний хребет зблизька, деякі вершини якого сягають у висоту до 20 км над середньою поверхнею Япета (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

Зараз вважають, що джерелом цих нашарувань служать інші супутники (наприклад, Феба), які обертаються навколо Сатурна в протилежному до Япета напрямку. Таке твердження ґрунтується на тому, що темний бік супутника є ведучим і саме на ньому може осідати чорна сажа з околиць Сатурна. Згідно першій версії екзогенної моделі [643], частинки від Феби по спіралі йдуть у напрямку до Сатурна і в зворотному напрямку до Япета і завдяки відомому ефекту Пойтінга-Робертсона, стикаються з лідируючою стороною останнього.

Відповідь на питання про бідність поверхневого шару кольором (рис. 2.11 праворуч) пов'язують зокрема з тим, що температура темних ділянок становить ~ 127 К, якої вистачає для повільного випаровування льоду з поверхні, тоді як конденсована вода дуже швидко осідає в довкіллі; тобто темні області втрачають лід і стають ще темнішими, а світлі його накопичують і стають ще світлішими. Очевидно, цей процес відбувається дуже поступово і супроводжує всю еволюцію Япета.



Рис. 2.12. Темний матеріал на стінах кратерів і в долинах Япета (http://photojournal.jpl. nasa.gov/)

Супутник Феба обертається навколо планети у зворотному напрямку з періодом 1,5 роки і він не є синхронним, що зумовило припущення про те,

що супутник є захопленим Сатурном астероїдом [556]. Феба дуже темний об'єкт із середнім альбедо 0,07 і на її поверхні на високих північних і південних широтах присутні ізольовані світліші плями з альбедо близько 0,11 [675]. Спектрофотометрія Феби вказала на можливість ідентифікувати цей супутник з астероїдами С- і D- типу, подібних до астероїдів-Троянців, або Кентаврів [180, 190]. Його період осьового обертання (9,2735<sup>h</sup> ± 0,0006<sup>h</sup>) також подібний до значення періоду, характерного багатьом астероїдам [81]. Середня густина супутника 1,63 ± 0,0033 г/см<sup>3</sup> і це значно менше, ніж у більшості скельних порід, але більше, ніж у чистого водяного льоду (~ 0,93 г/см<sup>3</sup>) та у більшості регулярних супутників Сатурна, що незалежно підтримує гіпотезу захоплення [361]. Температура знаходиться в межах 70-112 К.

Зображення Феби (рис. 2.13) вказали на її нерегулярну форму і значну насиченість ударними кратерами з розміром до 1 км, які часто перекриваються; це може бути наслідком її інтенсивного бомбардування в минулому порівняно невеликими (до 100 м у поперечнику) астероїдами протягом досить короткого відрізку часу, а також на те, що багата льодом поверхня вкрита шаром темного матеріалу, товщина якого змінюється від області до області (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Ліворуч – шарувата структура на стінках кратерів Феби. Праворуч – крупномасштабний знімок кратера на Фебі. (http://photojournal.jpl. nasa.gov/)

Свідченням останнього є стінки деяких кратерів, на яких темніший матеріал рухаючись донизу залишає на поверхні світліший матеріал, а також обвали з внутрішнього боку стінок, що оголюють світліший матеріал. Виявлена і незвична шарувата структура, що проявляється у чергуванні світлих і темних смуг, яка особливо добре виражена в розташованому вгорі на рис. 2.13 (ліворуч) кратері. Кратерам надані імена міфічних героїв-аргонавтів: найбільший з них знаходиться вгорі на рис. 2.3 – Ясон (Jason), зліва від нього – Ергінус (Erginus), а внизу, на межі з тінню – Ойлеус (Oileus). Супутник Пан (SXVIII) має діаметр 26 км і названий на честь бога полів у древлян, який мав людський торс і голову з ногами кози, ріжками й вухами та який доглядав отару. Супутник знаходиться в межах поділу Енке в кільцях Сатурна.

Зображення деяких малих супутників Сатурна показані на рис. 2.3-2.5, 2.14.



Рис. 2.14. Ліворуч – супутник Дафнія (Daphnis) у проміжку Кіллера; праворуч – супутник Єлена (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo \_gallery)

Супутник **SXVIII** має діаметр 26 км; його названо на честь бога полів у древлян, який мав людський торс і голову з ногами кози, ріжками й вухами, який доглядав отари. Він знаходиться в межах поділу Енке в кільцях Сатурна.

Супутник Атлас названо на честь однойменного героя, який був Титаном і якого Зевс поставив для того, щоб він підтримував небеса на своїх плечах; він є сином Япета і німфи Клименти і братом Прометея та Епіметея. Ці два супутники за рахунок екваторіальних гірських наростів мають оригінальну сплюснуту форму.

Супутник Пандора (рис. 2.3 ліворуч) розміром 110×88×62 км, «пасе» вузьке кільце F, надає йому кільцеподібну форму та динамічно стримує його. Її поверхневий шар відносно мало насичений кратерами, що може говорити про досить швидке його оновлення, але він вкритий жолобами і складками. На рис. 2.14 ліворуч показано супутник Дафнія (діаметр 6-8 км), який знаходиться в проміжку Кіллера кілець Сатурна і створює гравітаційні хвилі, що проявляються найбільш яскраво в місці підвищеної концентрації крижаних частинок кілець.

Супутник 1980 S6 (Єлена) розміром 36×32×30 км (рис. 2.14 праворуч) знаходиться в гравітаційній пастці і в 2006 р. рухалась на 72° попереду Діони і за деякими даними ще й гойдається навколо точки Лагранжа L4, наближаючись і віддаляючись від Діони. Тривалий час позаду Діони, в іншій лагранжевій точці не знаходили близького за масою до Єлени об'єкта і лише на зображеннях КА «Кассіні» було виявлено дуже маленький супутник Полідевк (Polydeuces – S/2004 S5) з середнім значенням діаметра ~ 3,5 км. У грецькій міфології Єлена була дочкою Тітируса (Tityrus), однією з амазонок і подругою богині Венери.

Зображення на рис. 2.5 (праворуч) і рис. 2.3 (праворуч) показують поверхню супутника **Телесто** ( $\approx 29 \times 22 \times 20$  км) і **Каліпсо** ( $\approx 30 \times 23 \times 14$  км). Гладка поверхня Телесто вказує на те, що вона може бути вкрита крижаним пилом (як і Пандора).

Супутник **Прометей** (145×85×62 км) рухається по орбіті радіусом близько 139 800 км і кожні 14,7 годин суттєво впливає на кільце F внаслідок періодичного наближення і віддалення від кільця F при своєму русі по ексцентричній орбіті (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Гравітаційний вплив Прометея на кільце F Статурна. (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

На його поверхні видно гірські хребти й долини і декілька кратерів діаметром понад 20 км на веденій півкулі і понад 50 км на передній півкулі. Із грецької міфології відомо, що Прометей був Титаном, сином Япета, який викрав вогонь з Олімпу і передав людям, за що Зевс його жахливо покарав. Через низьку густину й відносно високе альбедо здається ймовірним, що Прометей, Пандора, Янус і Епіметей – це дуже пористі крижані тіла.

## 2.2. Фазова залежність блиску і ступеня поляризації

Кассіні в 1671 р. відзначив для Япета аномально велику амплітуду зміни блиску з рухом по орбіті, повні дані про що було отримано завдяки проведеним Гарісом Д. [17] спостереженням в UBV системі фільтрів протягом 17 ночей в період з 1951 по 1953 рр. Регулярну фотометрію Тефії, Діони, Реї, Гіперіона, Феби й Титана було започатковано в 1968-1969 рр. з вузькосмуговими інтерференційними світлофільтрами у діапазоні довжини хвиль 300-1100 нм [97, 448], а пізніше продовжені й іншими дослідниками [26, 96, 98, 118, 216, 263, 265, 366, 400, 517, 670, 703]. За переданими КА «Вояджер-2» і «Кассіні» зображеннями [116, 128, 252, 650, 673, 675] було отримано відбивну здатність диска супутників при великих значеннях сонячного фазового кута α. За цими даними було досліджено зміну блиску супутників з довжиною хвилі (рис. 2.16), орбітальним (рис. 2.17) і сонячним фазовим кутом (рис. 2.18) та розподіл відбивної здатності по диску супутників.



Рис. 2.16. Спектральні геометричні альбедо супутників Сатурна [128]

Основні результати зводяться до наступного.

1. Для практично всіх досліджених супутників спостерігається потужний опозиційний ефект блиску при  $\alpha < 2^\circ$ , який нагадує відповідний пік для астероїдів С-типу [400] і, найімовірніше, зумовлений когерентним механізмом. Винятком є супутник Титан, у якого практично відсутній ефект опозиції, що найімовірніше зумовлено впливом його атмосфери.



Рис. 2.18. Фазові криві супутників Рея, Япет, Енцелад і Феба [216]

Також виділяється Япет, фазовий коефіцієнт лінійної частини залежності блиску і амплітуда ефекту опозиції значно більші для його ведучого боку. Крім того, показник кольору В-V ведучої сторони Япета з 1972 по 1976 pp. збільшувався, для веденої – залишався практично незмінним.

2. Залежність від орбітального фазового кута для різних супутників – різна; особливо тут вирізняється Япет [666, 726], у якого амплітуда зміни блиску сягає майже двох зоряних величин. Карти відбивної здатності Япета при сонячному фазовому куті в межах 8-90° показали що для окремих частин його поверхні вона міняється в 10-20 разів. Найменше альбедо (0,02-0,03) припадає на центр ведучої півкулі, найбільше (0,6) – на полярні райони. Зміна альбедо на світлішій веденій півкулі менш регулярні ніж на ведучій [650].

Для супутника Феба при  $\lambda = 470$  нм відбивна здатність міняється з довготою центрального меридіана і широтою в межах 0,046-0,060. Найхарактернішими для нього є розкидані окремі світлі плями у високих північних і південних широтах, які на 50% яскравіші від розпливчастих темних місць, але не утворюють неперервні полярні шапки [675].

3. Диски Реї і Діона не показують потемніння краю, тоді як у Мімаса, Тефії та Енцелада воно добре помітне [116].



Рис. 2.19. Фазова залежність ступеня поляризації світлої сторони Япета [589]

Значно менше уваги приділялось дослідженню поляризаційних властивостей супутників. Так, за спостереженнями Б. Зельнера [736] ступінь поляризації Япета в інтегральному світлі протягом трьох ночей становила:  $P = -0.19 \pm 0.08\%$ ,  $P = -1.15 \pm 0.14\%$  та  $P = -1.26 \pm 0.21\%$  відповідно при  $\alpha = 5.32^{\circ}$ ,  $6.23^{\circ}$  і  $6.22^{\circ}$ , а відмінність даних була приписана зміні відбивної здатності на різній довготі диска. Для світлої сторони Япета чітко проявляється опозиційний пік (рис. 2.19).

## 2.3. Спектрофотометрія крижаних супутників

Багатофільтрова фотометрія в 1968-1969 рр. у спектральному інтервалі 0,3-1,0 мкм показала [448], що спектральна залежність відбивної здатності ведучого і веденого боку Реї, Діони й Тефії мало відрізняються між собою, а для Япета вони суттєво відрізняється. Це ж підтвердили і подальші фільтрові [178, 188, 367, 415, 486] і спектрофотометричні наземні [86, 109, 118, 121, 152-155, 159, 180, 182, 185, 186, 254, 255, 353, 416, 536, 586, 655, 713, 714] і позаатмосферні [170, 252] спостереження; основні результати цих спостережень показані на рис. 2.20-2.22.

Як слідує з дослідження спектрів супутників Сатурна, отриманих КА «Кассіні» [252], спектральна залежність відбивної здатності Діони (рис. 2.21), Мімаса і Тефії практично однакова, хоча їх альбедо різниться в рази. Досить близька до них за спектральними властивостями і Рея (рис 2.20).



Рис. 2.20. Порівняння спектрів Реї (вертикальні лінії) та водяного інею (суцільна лінія) [159]



Рис. 2.21. Спектральні коефіцієнти відбивання повного диска Діони за різні траєкторії КА «Кассіні» [252]

Для всіх них характерне різке збільшення відбивної здатності зі збільшенням  $\lambda$  від 0,35 до 0,55 мкм, практично однакове її значення в неперервному спектрі в інтервалі 0,55  $\leq \lambda \leq 2,2$  мкм, наявність потужних і відносно вузьких смуг поглинання при  $\lambda = 1,52$  і 2,02 мкм та надзвичайно потужних смуг при  $\lambda = 3,0$  та 4,5 мкм. Дещо подібний до них і спектр Енцелада (рис. 2.22), але в нього менше почервоніння в діапазоні  $\lambda \leq 0,55$  мкм і спостерігається зменшення відбивної здатності при більших  $\lambda$ . Епіметей і Гіперіон (рис. 2.23) відрізняються від інших супутників поступовим збільшенням відбивної здатності від синіх довжин хвиль до  $\lambda = 1,0$  та при  $\lambda = 1,9$  мкм.

Оригінально виглядає спектр Феби (рис. 2.24), у якої після незначного збільшення відбивної здатності до  $\lambda = 0,55$  мкм, з'являється широка депресія, на яку припадають смуги поглинання при  $\lambda = 1,52$  та 2,02 мкм, та які (як і смуги при  $\lambda = 3,0$  та 4,5 мкм) значно слабкіші; чинником цього може бути викликане Fe<sub>2</sub><sup>+</sup> поглинання, яке проявляється у діапазоні  $\lambda = 0,85-1,2$  мкм і притаманне так званим філлосилікатам [647]. Спектральна відбивна здатність яскравої півкулі Япета нагадує Гіперіон, тоді як темної – ні один зі згаданих супутників. Так, відбивна здатність темної півкулі майже лінійно зростає від 0,4 до 3,7% від синьої частини спектру до  $\lambda \approx 2,5$  мкм, а зі смуг поглинання досить потужною є лише при  $\lambda = 3,0$  мкм, тоді як при  $\lambda = 2,02$  та 4,5 мкм вони ледь помітні.



Рис. 2.22. Спектральні коефіцієнти відбивання повного диска Енцелада за різні траєкторії КА «Кассіні» [252]



Рис. 2.23. Спектральні коефіцієнти відбивання повного диска Гіперіона за різні траєкторії КА «Кассіні» [252]



Рис. 2.24. Спектральні коефіцієнти відбивання повного диска Феби за різні траєкторії КА «Кассіні» [876]

Нагадаємо, що смуги при  $\lambda = 1,52, 2,02$  і 3,0 мкм притаманні водяному льоду [152, 297] (рис. 2.20), а при  $\lambda = 4,26$  мкм – льоду CO<sub>2</sub>. Пік у спектрі деяких яскравих супутників при  $\lambda = 3,1$  мкм вважають френелівським відбиванням на кристалах водяного льоду. В роботі [535] запропоновано, що особливості спектру Феби, Япета і Гіперіона зумовлені меншою кількістю водяного льоду і відчутною присутністю «забруднювачів», подібних до CO<sub>2</sub>, толіну та органічних матеріалів [353, 475].

Було також відмічено кілька спектральних вказівок на те, що Феба є захопленим об'єктом [361] і склад його поверхні близький до так званого первинного складу ранньої протопланетної хмари [152]. У спектрі Феби превалюють смуги, що відносяться до води чи гідратованих мінералів (наприклад, при  $\lambda = 1,04, 1,25, 1,50, 1,95, 2,02$  і 3,0 мкм [535]). Смуга при  $\lambda = 1,69$  мкм, ймовірно, відноситься до обертону CH, смуги при  $\lambda = 2,15$  і 2,42 мкм [170] (дещо завуальовані смугами водяного льоду) можуть відноситись до гідроксильної групи, при  $\lambda = 2,33$  мкм – до обертону CN чи до філлосилікатів [152]; смуга при  $\lambda = 2,42$  мкм присутня в спектрах багатьох супутників та інколи приписується суміші ціанідів [152]. В інтервалі довжини хвиль 2,70-3,50 мкм превалює значне поглинання при  $\lambda = 3$  мкм,

яке характерне для темної сторони Япета [118, 185, 191] і практично відсутнє у яскравого Енцелада [113], тому можна допустити, що воно існує лише в супутників з дуже низьким середнім альбедо.

Для видимої структури поверхневого шару Феби та її мінералогічного складу знайдено помітну кореляцію з деякими деталями на поверхні. Наприклад, малі (розміром до 100 м) кратери, оточуючий їх матеріал і темні деталі з низьким альбедо – виявилися збагаченими ціанідними сумішами та органікою. На поверхні з меншою насиченістю кратерами в спектрі поряд з деталями органіки присутні смуги замерзлого СО<sub>2</sub>, підвищена кількість якого спостерігається на затіненій частині стінок старих пологих кратерів, стінках кратерів з незвичайною шаруватою структурою, яка проявляється у чергуванні світлих і темних смуг, і на дні відносно свіжих кратерів [170]. У кратері Ергінус (Erginus) було знайдено водяний лід, який тільки частково припорошений темним матеріалом. Крім того, у цьому і подібних йому місцях на поверхні поглинання замерзлим СО<sub>2</sub> і ароматичними вуглеводнями значно сильніше, ніж на решті поверхні; це дозволяє вважати, що ці суміші тісно пов'язуються з водяним льодом. З іншого боку, в місцях, де поглинання СО<sub>2</sub> практично відсутнє, спостерігається підвищена концентрація ціанідних сумішей, і навпаки; але така антикореляція не досить чітка, оскільки деякі області поверхні супутника показують проміжні ситуації. Крім того, в діапазоні  $0.35 \le \lambda \le$ 1,0 мкм очікується прояв поглинання, зумовленого залізовмісними забруднювачами й емісією О2-О3 [518], які були змодельовані при температурі поверхні кожного із супутників [601].

Вважається, що в приведених на рис. 2.20-2.24 спектрах наявні ознаки присутності порфіринів, ярозитів, філлосилікатів і деяких залізовмісних мінералів [353]. Відзначимо, що цей діапазон надзвичайно чутливий до присутності невеликих домішок (пилу, толіну, органіки) у водяному льоді. Тому в чистого льоду коефіцієнт відбивання у видимих променях дуже великий і майже не залежить від довжини хвилі, а поява забруднюючих домішок може спричинити значне зменшення відбивної здатності. Ще сильніше це проявляється у короткохвильовій ділянці спектра [153, 155, 186].

Таким чином, присутність вуглекислоти, зв'язаних вуглеводнів, чистого водяного льоду і ціанідних сумішей накладає обмеження на склад поверхневого шару Феби і первинних тіл зовнішньої Сонячної системи. Слабка смуга поглинання при  $\lambda = 1,78$  мкм майже завжди видима у спектрі крижаних супутників [155, 186], що, можливо, зумовлене обертоном CH, на глибину якої впливає склад поверхні супутника і розмір частинок домішок [237]. Така поведінка спектральної залежності типова для толіну, з його високим коефіцієнтом відбивання при  $\lambda > 3,0$  мкм і сильним потемнінням при  $\lambda < 0,5$  мкм [186]. Додаткові макроскопічні ефекти можуть бути викликані взаємодією матеріалу поверхні супутників з частинками кілець Сатурна і частинками високих енергій в магнітосфері планети.

Наявність темної речовини може зумовити відмінність відбивної здатності ведучої і веденої півкуль (для Тефії на 10-15%, Реї на 20%, Япета – в рази) [124]. Пошук джерела темного матеріалу, що покриває лідируючу сторону Япета, зумовив появу багатьох гіпотез.

1. Постачання матеріалу від Феби [6] або Гіперіона [442], деякі дослідники [252] схильні поєднати обидва джерела.

2. Постійне забруднення органічним матеріалом (наприклад, пилом толіну) і сильне опромінення космічними частинками ведучої сторони, тоді як збагачена льодом ведена сторона залишається майже незабрудненою [121, 123, 536, 714, 726].

3. А. Кук і Ф. Франклін [169] допустили, що свого часу Япет був вкритий шаром льоду (чи снігу) товщиною ≈ 1 м, а метеоритне бомбардування ведучої півкулі його руйнувало та оголяло темнішу підкладку, тоді як поверхневий шар веденої сторони залишався незмінним. Ч. Петерсон [545] висловив думку, що в довкіллі Сатурна серед метеоритних тіл, які випадають на супутник, льодяних брил було значно більше, ніж кам'яних; при зіткненні льодяне тіло з більшою від 2,4 км/с відносною швидкістю випаровувалося і практично не впливало на відбивну здатність поверхневого шару, а з меншою відносною швидкістю (що характерно для веденої півкулі, яку метеоритні тіла при русі по орбіті доганяють) залишались на поверхні і збільшували відбивну здатність.

4. С. Сквайрес і К. Саган [652] запропонували модель потемніння ведучої півкулі, яка враховує наступні два фактори: абляцію поверхневого шару внаслідок ударної переробки з одночасним перенесенням ударних осколків на протилежну півкулю (так звану балістичну дифузію); фотохімічні перетворення поверхневого шару ведучої півкулі, яка складається із суміші H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO і на якій під дією УФ випромінювання Сонця, утворюються деякі органічні з'єднання речовинхромофор з дуже темним і червонуватим кольором.

Внутрішні супутники Сатурна рухаються в межах кільця Е, яке складається з дуже малих і чистих крижаних частинок, що викидаються внаслідок кріовулканічної діяльності на супутнику Енцелад [372]. Частинки від кільця Е можуть попадати на зворотній бік поверхні Мімаса та Енцелада і на ведучий бік Тефії, Діони і Реї [308], що може спричинити значне накопичення чистого льоду на поверхні внутрішніх супутників і в значній мірі пояснити їх фотометричні характеристики [129]. Потемніння і почервоніння поверхні супутників може викликатися ще й магнітосферними частинками, які мають відчутно бомбардувати зворотні півкулі оскільки ці частинки розганяються магнітним полем Сатурна, яке коротаційно обертається разом із планетою з набагато більшою швидкістю ніж супутники рухаються по своїй орбіті. Наявність гідратованих силікатів на поверхні крижаних супутників відчутно збільшили б поглинання в найсильніших водяних крижаних поглинальних смугах у спектрі Енцелада, Мімаса, Реї і Тефії, тоді як на Фебі це привело б до ослаблення поглинання в смузі 3 мкм.

**Теплові і радіофізичні дослідження супутників.** Спостереження Япета в інтервалі  $\lambda$ 35-150 мкм вказали на значення температури T = 96 ± 9 К для світлого боку і 114 ± 10 К для темного [1333]; для Реї при  $\lambda$  = 20 мкм T = 96 ± 6 К [1519]. За РЛ експериментами з КА «Кассіні» було визначене радарне альбедо в лінійно поляризованій компоненті A<sub>SL</sub> і в поляризованій по колу A<sub>C</sub> = A<sub>SC</sub> + A<sub>OC</sub>, та відношення  $\mu_C$  (див. в [45]) для супутників Феба, Япет, Діона, Рея, Тефія, Енцелад [533]. Крім того, значення цього відношення було визначено і за наземними спостереженнями при  $\lambda$  = 13 см: 1,17 ± 0,09 (Рея), 0,81 ± 0,21 (Діона), 1,22 ± 0,21 (Тефія), 1,28 ± 0,41 (Енцелад, ведуча півкуля) і ≤ 0,56 (Енцелад, ведений бік) [95]. Виявилося, що для Феби і лідируючого боку Япета геометричне і сферичне альбедо в оптичному діапазоні практично співпадають [533].

## 2.4. Титан

Загальні характеристики і атмосфера. Титан було відкрито в 1655 р. Х. Гюйгенсом і характеризується параметрами приведеними в табл. 2.1.

Tuomigi 2.11 ourundina napantophorinna Tintana Tidigenaga	
Титан	Енцелад
1221870	238020
0,0288	0,00452
0,33°	0,02°
15,94542	1,370217855
15,94542	1,370217855
2576	252,5
1350	0,7
1,88	1,24-1,61
1,352	0,742
2,639	0,212
	Титан 1221870 0,0288 0,33° 15,94542 15,94542 2576 1350 1,88 1,352 2,639

Таблиця 2.1. Загальна характеристика Титана і Енцелада

Цей супутник оповитий потужною атмосферою і дані про його оптичні властивості повно наведені в [45], тут нагадаємо основні з них.

1. Чітко проявляється зміна блиску з орбітальним і сонячним фазовим кутом, вигляд яких дещо міняється з довжиною хвилі.

2. Оригінальною є спектральна залежність параметра Міннарта k [BM, (2.49)]: починаючи з  $\lambda$  = 300 нм він збільшується від 0,65 до 0,9 при 600 нм, після чого спостерігається зміна залежності і при  $\lambda$  = 900 нм k = 0,35.

3. Має місце короткоперіодична зміна блиску Титана.

4. Геометричне альбедо спочатку збільшується з довжиною хвилі: ~0,02 при  $\lambda = 240$  нм, ~ 0,05 при  $\lambda = 400$  нм і 0,15-0,25 (за різними оцінками) при  $\lambda = 700$  нм; після останнього значення настає різке його зменшення.

5. Відбивна здатність північного і південного полярного району по різному міняються з довжиною хвилі: при  $\lambda = 350$  нм яскравішим є північний, при  $\lambda = 900$  нм – південний полюс, у межах 600-700 нм обидва вони мають приблизно однакову відбивну здатність.

6. На фазовій залежності ступеня поляризації практично відсутня гілка від'ємної поляризації, максимальне значення припадає приблизно на  $\alpha =$ 90° і становить  $\approx 60\%$  при  $\lambda = 264$  нм, 56% при  $\lambda = 440$  нм, 47% при  $\lambda = 640$ нм і 42% при  $\lambda = 750$  нм.

7. В IЧ спектрі виявлено смуги ототожнені з С<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, HCN та (можливо) з С<sub>3</sub>H<sub>4</sub> і С<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. З аналізу спостережень покриття Сонця з допомогою УФ спектрометра КА «Вояджер-1» було зроблено висновок, що основною складовою атмосфери Титана є молекулярний азот а концентрація метану може сягати 10%.

8. Більшість спостережень у тепловій ділянці спектра вказують на температуру в межах 73-125 К; за експериментами з радіозатемнення отримали вертикальний профіль температури, згідно якого температура на поверхні становить ~ 90 К, знижується до ~ 70 К на висоті 45 км, після чого починається спочатку повільне її збільшення (до ~ 140 К на висоті ~ 90 км) і вище 90 км – різке збільшення. При цьому у верхніх шарах атмосфери температура вечірнього лімба складає 176 ± 20 К, а вранішнього – 196 ± 20К.

8. Атмосферний тиск біля поверхні становить  $\approx$  1,5 бари.

9. Аналіз поляризаційних спостережень у моделі сферичних частинок виявився досить неоднозначним: дійсна частина показника заломлення знаходиться в межах 1,5-2,0, ефективного радіуса – 0,20-0,35 мкм. Не виключалась наявність верхнього шару хмар з ефективним радіусом частинок близько 0,05 мкм. Уявна частина показника заломлення

збільшується зі збільшенням довжини хвилі від 0,001 при  $\lambda = 250$  нм до 0,01 при  $\lambda = 635$  нм.

Після виходу у світ монографії [45] великий обсяг експериментів протягом 2004-2008 рр. провів КА «Кассіні». 14 січня 2005 р. було здійснено посадку модуля «Гюйгенс» (рис. 2.25) на поверхню Титана. На рис. 2.26 видно хмари в атмосфері, які біля південного полюса знаходяться на висотах понад 15 км [76] і вкривають лише окремі регіони супутника. Наприклад над північним полярним районом хмара простягалася до 60° пн. ш. і мала діаметр ≈ 2400 км.



Рис. 2.25. Прилади посадкового модуля «Гюйгенс». 1. HASI – вимірював фізичні і електричні характеристики атмосфери; 2. GCMS – визначав хімічний склад атмосфери; 3. ACP – засмоктував і аналізував аерозольні частинки; 4. DISR – здійснював знімки при спуску і вимірював рівень освітленості; 5. DWE – вивчав напрям і силу вітру; 6. SSP – визначав фізичні характеристики поверхні (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Зонд «Гюйгенс» протягом 2,5 годин на парашутах опускався з висоти 1270 км на поверхню і проводив експерименти по вивченню атмосфери і структури поверхневого шару. Було встановлено, що у верхніх шарах азот становить 98,4%, метан – 1,6%; його концентрація біля поверхні

збільшилась до 5%. У незначній кількості виявлено й інші, головним чином вуглеводневі гази: етан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, ацетилен C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> тощо.



Рис. 2.26. IЧ зображення Титана (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

На стадії спуску зареєстрували потужний шар аерозольних частинок на висоті від 23 до 25 км, вище якого допускається існування смогу з продуктів фотодисоціації метану на висотах 50, 60-80, 200, 375 і навіть 500 км над поверхнею. Про це свідчить те, що при спуску з висоти 30-25 км спочатку було погано видно поверхню і лише з висоти менше 18 км видимість стала доброю. Температура атмосфери на початку спуску становила 70,5 К, на поверхні 93,65 ± 0,25 К; значення тиску біля поверхні склало 1,467 ± 0,001 бар. Було визначено ізотопний склад атмосфери, згідно якого відношення  $^{15}N/^{14}N$  трикратно перевищує земне і в 6 разів юпітеріанське. Нагадаємо, що саме в Юпітера, як вважається, ізотопи збереглися в майже первинному стані. Менший ізотопний склад для Землі пов'язують з еволюційними втратами, а в Титана – з якимось катастрофічним процесом. Несподіванкою було виявлення ізотопу аргон-40, що трактується як свідчення можливої вулканічної діяльності з викидом водяного льоду й аміаку.

Виникає питання, чому на Титані збереглась така потужна атмосфера, при масі практично такій же, як і в супутника Юпітера Ганімеда, на якому сліди атмосфери відсутні. Відповідь може бути в його низькій температурі, яка сприяє утриманню атмосфери через те, що кінетична енергія і швидкість молекул газу настільки мала, що Титан не залишають навіть порівняно легкі гази. Але розрахунки показують, що навіть за цих умов знайдені запаси метану в атмосфері мали б зруйнуватися протягом  $\approx 10$  млн. років. Оскільки цього не відбулося, то запаси метану мусять постійного поповнюватися, наприклад, завдяки біологічним процесам. Іншим чинником може бути так званий процес серпентизації [420], за якого метан виникає без участі бактерій. Але для цього необхідна наявність глибокого холодного водяного океану під 300 кілометровою крижаною корою. Згідно комп'ютерного моделювання, океан має містити до 15% розчиненого аміаку й багато органічних сполук, серед яких є й необхідні для виникнення примітивних форм життя.

Якщо при температурі Титана можуть співіснувати рідкий і газоподібний метан, то вода й аміак мусять потрапляти в атмосферу тільки як вулканічні викиди, а водно-аміачний розчин скоріше всього є основою лави таких холодних вулканів.

Існує думка, що хімічним складом теперішня атмосфера Титана нагадує земну в далекому минулому [504], згідно якої 3,5 млрд. років тому атмосфера Землі також складалася з метану й аміаку і практично не містила кисню. Це в 1953 р. дозволило змоделювати процес виникнення амінокислот, які з часом привела до появи на Землі перших біологічних молекул [504].

Для пояснення червоно-оранжевого забарвлення атмосфери Титана було проведено спеціальний лабораторний експеримент, в якому суміш азоту й метану активували електричними розрядами, після чого на стінках посудини з'явилася червона плівка з такими ж відбивними властивостями що й поверхня Титана та яка складається зі складного ланцюга карбонатгідратів. Вона була названа «толін» (у перекладі з грецької «грязь») та яка на Титані може утворюватися в результаті фотосинтезу.

Моделі метанообігу на Титані передбачали наявність показаної на рис. 2.26 системи хмар, які можуть бути ключем до формування різної органіки на поверхні супутника [386]. Еволюція складових поверхні, яка простежувалась протягом 16 зближень КА «Кассіні» з Титаном, змусила переглянути раніше висловлені гіпотези, в яких мовилося про те, що дощі створюють озера й крупніші водойми, випаровування яких знову утворюють хмари. Ще наземні спостереження показали, що ці хмари з'являються на Титані при зміні сезонів, тривалість кожного з яких близько 7 років. Грунтуючись на побудованих моделях циркуляції атмосфери Титана, можна припустити, що хмарова активність продовжується близько 25 років, потім практично повністю припиняється на 4-5 років і далі знову поновлюється на наступні 25 років. У зв'язку з цим очікується, що показана система хмар спостерігатиметься ще кілька років а потім сезони на Титані зміняться і хмарна структура та озера з'являться вже в південній півкулі супутника. Ці моделі допомогли зрозуміти, що зараз атмосфера перебуває у постійній циркуляції: величезні маси теплішого газу рухаються з південної півкулі до північного полюса й назад; температура знижується з півдня на північ, де в момент висадки зонда була зима.

Відмічалась також сильна відмінність тиску між півкулями через відмінності в умовах нагрівання поверхні, що зумовлено тим, що саме південна півкуля в той момент була повернена до Сонця.

Вимірювання швидкості вітру при спуску зонда показали, що на висоті ~ 120 км його швидкість була ~ 120 м/с, на 60 км – різко впала і в межах останніх 7 км польоту не перевищувала кількох метрів за секунду, що дозволило модулю опускатися практично прямолінійно. На поверхні Титана реєструвався легкий бриз у межах 0,3 м/с. Напрям вітру біля поверхні співпадав із напрямком обертання Титана, тобто з заходу на схід. При спуску напрямок вітру двічі мінявся: спочатку на висоті 6 км, і вдруге - приблизно на 700 м, що вважається дуже важливими для розуміння циркуляційних процесів. Так, за моделлю роботи [685] зміна напрямку вітру зверху зумовлена різницею температури між північною й південною півкулями, а внизу вона відбувається на межі потужних циркуляційних потоків поясу Хендлі. В момент спостереження південна півкуля була обернена до Сонця і там було літо, яке продовжувалось приблизно до 2010 р. Тепле повітря піднімалось і спрямовувалося до північної півкулі, де охолоджувалось і опустившись поверталося назад до південної півкулі, що і є суттю поясу Хендлі. Згідно цій моделі, в час посадки КА «Гюйгенс» на півдні Титана мало бути тепліше на 10 К, ніж на екваторі. Такий величезний пояс Хендлі може бути тільки на тілі з малою швидкістю обертання. Нагадаємо, що на Титані доба триває близько 16 земних діб, тому система потоків повітря там досить суттєво відрізняються від земної, хоча вони й керуються однаковим механізмом.

Температурний мінімум (тропопауза) атмосфері в Титана розташований на висоті ~ 44 км при T = 70 К і тиску 0,11 бар. Нижче в тропосфері температура починає рости й досягає біля поверхні ~ 94 К. А вище лежить стратосфера, тобто область атмосфери, де температура росте з висотою: на висоті 250 км температура сягає 186 К і далі з висотою знову починає падати; на висоті між 500 і 1000 км розташовано шість інверсійних шарів з різницею температури між ними близько 20-30 К; на висоті 1500 км над поверхнею температура складає ~ 140 К [98, 273]. Сонячний вітер, заряджені частинки магнітосфери Сатурна і космічні промені іонізують атмосферу Титана, утворюючи іоносферу. За даними зонда «Гюйгенс» максимум електронної концентрації припадає на висоту 60 км.

Метанові хмари в тропосфері Титана дуже динамічні: вони виникають буквально за півгодини внаслідок підйому повітряної маси з середньої тропосфери до тропопаузи, де вони проливаються дощем і потім розсіюються протягом наступної години. В атмосфері іноді з'являються хмари з етанового снігу, наприклад, одна така хмара спостерігалась взимку в північній півкулі на широтах 51-68° на всіх спостережуваних довготах. Його конденсація на полюсах взимку може пояснити відсутність рідких етанових водоймищ в низьких і в середніх широтах супутника.

В оптичному діапазоні протяжний хмарний серпанок пропускає до поверхні тільки близько 10% падаючого світла. З отриманих спускним зондом спектрів випливає, що на різній висоті максимум випромінювання припадає на діапазони довжин хвиль  $\lambda$ 550-600 нм і 620-720 нм, що й надає поверхні Титану характерний оранжевий колір. При зменшені висоти максимум випромінювання зсувається в сторону  $\lambda$ 640-680 нм. Освітленість поверхні опівдні відповідає раннім сутінкам на Землі і становить приблизно 0,001 освітленості в сонячний полудень на Землі.

Із отриманих КА «Кассіні» даних було також виявлено взаємодію між магнітосферою Сатурна й атмосферою Титана, що проявляється у вигляді газової хмари шириною до 80 000 км, яка слідує за супутником по його орбіті навколо Сатурна. Її наявність засвідчує те, що верхній шар атмосфери безперервно руйнується і Титан поступово втрачає свою речовину; цей матеріал тягнеться за ним шлейфом, закручуючись навколо Сатурна.

**Поверхня Титана.** У 1994 р. дослідження з КТХ вперше виявили на передній півкулі Титана величезний континент і велику кількість темних

деталей, які були названі морями. Згідно модельних розрахунків ці моря можуть складатися на 70% з етану, 25% з метану і на 5% з розчиненого в них азоту. В 2003 р. ІЧ зображення з деталями на поверхні Титана були отримані за допомогою наземних телескопів (КЕК на Гавайях та Дуже Великий Телескоп (ДВТ) в Чилі) [580]. Але найкраще структура поверхневого шару була вивчена за зображеннями, які передав орбітальний модуль КА «Кассіні», на яких можна було розгледіти й деякі подробиці будови хмар, та при спуску модуля «Гюйгенс» (рис. 2.27). Крім того, радаром КА «Кассіні» сканували майже 60% північного полярного регіону на північ від 60° по широті [731] і значну ділянку навколо південного полюса. Найхарактерніші видимі і радарні зображення поверхні супутника показані на рис. 2.27-2.32.



Рис. 2.27. Поверхня Титана з висоти 8 км; світліша частина – суша (http://www.beugungsbild.de/huygens/titan\_shoreline.html)

На зображеннях Титана чітко проявляються кратерні утворення, гірські хребти, тектонічні розломи, безліч дивних темних (моря, озера) і яскравих плям, руслоподібні утворення з численними розгалуженими притоками, окремі брили тощо. Велика яскрава область північної півкулі отримала назву Ксанаду (Xanadu) (рис. 2.29), яку вважають не гірським хребтом, а чимось плоским, можливо навіть морем, що складається з метану [697].

Малу насиченість ударними кратерами пов'язують з ерозією поверхні, перенесенням речовини вітрами з формуванням дюн тощо. Оскільки в умовах теплового режиму Титана не може бути й мови про рідку воду, то в якості можливого кандидата частіше всього пропонується метан, дощі якого можуть випадати й утворювати відповідні потоки.



Рис. 2.28. Зміщення на поверхні Титана (показано стрілками) на двох послідовних знімках з різницею в часі всього кілька секунд. (http://nssdc.gsfc. nasa.gov/photo\_gallery)

Так, наприклад, світлі зони радарного зображення вважають височинами, які порізані руслами річок, що збігають до темніших низин з обох боків до крупніших з яких підходять основні притоки, а до них, у свою чергу, ще дрібніші (рис. 2.27). Тому висловлено думку, що світліша ділянка є берегом моря чи озера, від яких сушу відокремлює характерна берегова лінія. На поверхні суші видно ерозію, можливо, льоду, а на тлі моря світлі острівці (рис. 2.30).



Рис. 2.29. Радарне зображення області Ксанаду (http:// nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)



Рис. 2.30. Знімки поверхні з КА «Кассіні» у видимому й інфрачервоному діапазонах підтвердили присутність фрагментарних морів навколо північного полюса Титана. (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Цю гіпотезу правдоподібною роблять фізичні умови на поверхні супутника, які близькі до потрійної точки фазового стану метану, а суперечать їй малі запаси газоподібного метану в атмосфері. Останнє може бути знівельоване, якщо дійсно має місце вихід з надр газоподібного метану завдяки вулканічним і тектонічним процесам. Під впливом сонячного випромінювання в атмосфері метан частково перетворюється на інші вуглеводневі а частково конденсується в хмари, з яких випадає дощем на поверхню, стікає в низинні регіони і утворює там озера й моря, одне з яких показане на рис. 2.28.

Утворені водойми сильно різняться розміром (від 1 до 100 000 км<sup>2</sup>): зі знайдених 700 озер на більше 70% обстеженої території більшість має розмір понад 26 000 км<sup>2</sup>. Найбільшу водойму назвали Море Кракена (за ім'ям гігантського морського чудовиська з норвезьких міфів), яке досягає в поперечнику 1200 км а площа складає  $\approx 400\ 000\ \text{кm}^2$ . Деякі з них виявилися підсушеними або такими, що ніколи не заповнювалися рідиною повністю, або ж рідина з яких уже давно випарувалася; всі вони мають чіткі краї. Приблизно 15 темних областей не виявляють чітких слідів ерозії і нагадують земні кальдери або ударні басейни, обмеження їх розміру і форма можуть свідчити про вулканічне походження.

Береги й краї кількох озер досить круті і вирізняються підвищеною радіояскравістю. Яскраві плями в темних озерах є островами а не чимось на зразок айсбергів оскільки більшість можливих там хімічних матеріалів не зможуть плавати на поверхні рідких вуглеводнів; деякі темні плями можуть бути матеріалом меншої щільності, скупченим у западинах.

Більшість дослідників вважає що знайдені у північній півкулі озера є доказом існування циклу круговороту рідини на Титані, зумовленого зміною сезонів з 29,5-річним періодом обертання Сатурна навколо Сонця. Зміна сезонів дозволяє допустити, що під час роботи КА «Кассіні» в північній півкулі йшли сильні дощі та утворили велику кількість озер, а в південній – водойми були практично висушені.

Вважають також, що фізичні процеси внаслідок яких сформувався рельєф Титана дуже схожі на земні [380].

Радарні дослідження з КА «Кассіні» вказали, що озера можуть бути зв'язані між собою і є частиною одного великого моря, світліші плями на них – це підняття дна. Прикладом цього може бути радарне зображення яскравої області Ксанаду (рис. 2.29), одна з темних круглих деталей (зверху праворуч діаметром ~ 70 км) якої є ударною структурою з яскравим центральним піком, а інша (внизу ліворуч) – без піку. Допускають, що світлі острівці зумовлені підвищеною прозорістю рідини в цих областях, завдяки чому радіохвилі відбиваються від дна, а темні ділянки озер і морів

зумовлені тим, що їх складові сильно поглинають радіохвилі, що є характерним для рідини. Доказом цього є типовий для водойми контур берегової лінії і світлі острови з порізаним рельєфом. Біля берега ці ділянки світліші, що вказує на меншу глибину. В центральній частині, де зображення дуже чорне, глибину оцінюють у кілька десятків метрів. Звивиста форма річок, що впадають у море, також вказує на те, що це сліди потоку рідини.

На стан речовини у водоймах вказав аналіз піврічних спостережень з ІЧ спектрометром, згідно яких в одному з озер виявлено смуги поглинання які характерні суміші рідкого етану (≈ 10% об'єму) і метану, хоча впевненому ототожненню останнього заважає метановий туман.

Відмітимо, що під впливом сонячного ультрафіолету у верхній атмосфері після серії хімічних перетворень з метану та інших вуглеводневих сполук і азоту можуть сформуватися крупні молекули, які в концентрованому вигляді схожі на темну смолу чи дьоготь і можуть осідати на поверхню у вигляді аерозольної мряки. В результаті таких процесів за тисячу років могло накопичитись відкладення міліметрової товщини, за мільйон років — близько 1 метра. Такий шар повинен розташуватися нерівномірно по поверхні оскільки існують атмосферні опади у вигляді метанового дощу, який змиватиме накопичену чорну органіку з підвищення, залишаючи крижаний масив світлішим. За таких процесів у низині буде утворюватися шар органічної грязі зі всього що осіло туди в аерозольному вигляді та було принесене потоком з підвищених ділянок. Тому місцевість там темніша а постійні вітри формують довгі гряди майже чорних дюн, витягнутих за напрямком постійного вітру із заходу на схід.

Якщо в 2008 р. в північних широтах вище 60° поверхня Титана була буквально поцяткована численними озерами розміром від одиниць до сотень кілометрів, то у південній полярній області було знайдено тільки одне велике (протяжністю близько 230 км) і три малі озера та багато сухих округлих западин, схожих формою на північні озера. Імовірна причина цього криється у відмінності кліматичних умов у зимовий і літній сезон. Передбачається, що в 2023 р., коли у південній півкулі буде кінець зими а в північній кінець літа, карта озер і морів знову зазнає кардинальних змін. Нагрів північної полярної області зумовить випаровування і перенесення газоподібного метану до південного полюса та його випадання там у вигляді дощу, який знову заповнять висохлі улоговини. А поблизу північного полюса збережуться лише залишки найкрупнішого моря у вигляді кількох невеликих озер. Не виключена і тектонічна активність на Титані. Наприклад, наведена на рис. 2.31 структура могла виникнути при зіткненні різних областей кори. На рис. 2.26 видно дві яскраві плями в середніх широтах, більша з яких на південь від екватора є найяскравішою при  $\lambda = 5$  мкм і, ймовірно, має вулканічне походження водяної чи вуглекислотної природи. Дослідження цієї особливості показали, що її західний край за три місяці змінив свою форму завдяки свіжому виверженню.



Рис. 2.31. Радарне зображення трьох паралельних гірських хребтів на Титані (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Більшість вершин у гірських районах мають висоту ≈ 120 м, найвища – 1930 м. Ряд кратерних структур за морфологією подібні до ударних кратерів на скелястих планетах з яскравим зубчатим обідком, а їх мала кількість вказує на молодість поверхні Титана. Згідно [394] кратери з діаметром менше 35 км повинні бути молодшими 200 млн. років, більші кратери дещо старіші та розповсюджені по поверхні неоднорідно. Так, на області Ксанаду їх щільність у 2-9 разів більша ніж на решті поверхні, а в екваторіальній області на дюнах – набагато нижча. Передня півкуля більше

насичена кратерами [731]. До ударних відносять кратери Ксе (рис. 2.32, діаметр ~ 29 км, висота валу 300-500 м, плоске дно з центральним піком і радіально викинутою речовиною), Сінлап (діаметр 80 км, внутрішній вал розташований по колу діаметром близько 40 км) і Менрва (діаметр 444 км, східний вал піднімається майже на 300 м, його дно знаходиться на 500 м нижче оточуючої поверхні а центральна область піднімається на 450 м вище за дно).



Рис. 2.32. Кратер Ксе на Титані. Північ знаходиться вгорі [731]

Панорама з посадкового модуля «Гюйгенс» на рис. 2.28 демонструє мікрорельєф у вигляді розкиданих округлих каменів, поперечник найбільшого з них сягав 15 см. Зазвичай такі згладжені контури набуваються при тривалому перекочуванні в потоці рідини. Вважається, що вони складаються з водяного льоду, який при сильному холоді набуває кам'яної твердості. Рідиною що насичує грунт може бути зріджений метан, а поверхня Титана нагадує губку, вкриту тонкою плівкою поки що не ідентифікованої речовини, яка своїми фізичними властивостями нагадує глину чи вологий пісок.

Цікавим виявився факт швидких змін на поверхні. Так, на багатьох зображеннях за 2008 р. було виявлено, що зафіксовані у 2005 р. морфологічні деталі поверхні змінили своє розташування майже на 30 км і це не відповідає прогнозу стандартної моделі обертання, але можна пояснити існуванням океану з води й аміаку глибоко під крижаним поверхневим шаром.

## 2.5. Енцелад

Цей супутник названо на честь гіганта Енцелада, якого згідно старогрецькій міфології поховано під вулканом Етна на середземноморському острові Сицилія. Основні характеристики Енцелада приведені в табл. 2.1, його орбіта знаходиться в кільці Е Сатурна (рис. 2.33).



Рис. 2.33. Зв'язок супутника Енцелад і кільця Е Сатурна (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Вже перші передані КА «Вояжер-2» зображення вказали на його незвично гладку та яскраву поверхню, нерівномірно вкриту ударними кратерами, жолобами і гірськими хребтами. Найповніша інформація щодо Енцелада була отримана з допомогою апаратури КА «Кассіні» і передані зображення (рис. 2.34) виявили там ще й міжгір'я, рівнини, зморщену місцевість та інші деформації, які можуть свідчити про наявність у його середині речовини в рідкому стані.



http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Крім того, була виявлена досить динамічна атмосфера, основними складовими якої є 65% водяної пари, 20%  $H_2$  і решта 15% складають CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> і CO. Характер розподілу густини водяної пари з висотою вказує, що вона може виділятися з якогось геотермального джерела. Особливо значна

її кількість виявлена в районі південного полюса [562, 649, 651, 716], який є свого роду оазою в крижаній пустелі зі значно вищою температурою (93 К замість очікуваних 72 К). Південна полярна область виявилася осередком відчутної геологічної активності (рис. 2.35).



Рис. 2.35. Зареєстрований викид замерзлої води з Енцелада [649]

Вона покреслена паралельними тріщинами (тигровими смугами) завдовжки близько 130 км, віддаленими одна від одної на  $\approx$  40 км (рис. 2.36). Ці смуги представляють собою 4 западини, названі Олександрія, Каїр, Багдад і Дамаск на честь міст що згадуються в арабських «Казках тисячі й однієї ночі».



Рис. 2.36. Південна полярна область Енцелада. Римські цифри передбачувані місця виверження, чотирикутники – ділянки підвищеної температури, обведені кружками точки – окремі фонтани [649]

Показане на рис. 2.35 зображення було зроблено тоді, коли Енцелад знаходився перед Сонцем і таких фонтанів було зареєстровано кілька десятків. Вони мають різний розмір і їх видима середня висота близько 100 км. Побудовані за ІЧ спостереженнями при  $\lambda = 7-9$ , 9-16 і 16-1000 мкм теплові карти з просторовою роздільною здатністю 0,6-20 км [256] підтвердили локалізацію нагрітого матеріалу уздовж тигрових смуг і саме через них викидається пара й крихітні крапельки води, які потім кристалізуються на поверхні Енцелада. Виявилося, що середній спектр

поверхні південніше 65° пд. ш. може бути представлений спектром абсолютно чорного тіла з температурою T =  $133 \pm 12$  K на площі  $\approx 345$  км<sup>2</sup>. Більше значення реальної температури від рівноважної відповідає надлишку теплової енергії у цій області, ретельні вимірювання якого показали, що в листопаді 2006 р. тепловий потік від внутрішнього джерела становив 5,4 ± 1,5 ГВт і потім він практично не змінювався протягом наступних 18 місяців.

Температура біля смуг виявилася на кілька десятків градусів вища ніж у навколишній рівнині. Особливо виділяються деякі гарячі точки (рис. 2.36) подібні земним гейзерам. Найвища температура була зареєстрована уздовж розлому Дамаск (Damascus Sulcus), у якому вона інколи сягала 93 К (проти 72 К у довкіллі). Було знайдено кілька гейзерних потоків які не пов'язані ні з однією з високотемпературних ділянок. Наприклад, в області Багдад не фіксувалось підвищення температури але там були знайдені діючі гейзери. Зі згаданих 4-х розломів принаймні три є активними (хоча і в різній мірі) практично по всій своїй довжині, а четвертий – лише частково; найтепліші ж їх частини є джерелом гейзерів. Поблизу екватора Енцелада температура становить Т  $\approx$  70-75 К [510] що відповідає ефективній температурі тіла на такій відстані від Сонця.

Зміну температури поверхні навколо тигрових смуг моделювали двомірною моделлю, яка включала передачу тепла в нижніх горизонтах (чистий водяний лід) внаслідок теплопровідності від вертикального розлому з постійною температурою і зовнішнім нагріванням при альбедо  $\approx$  0,8 та подальшим випромінюванням. При моделюванні розглядалося нагрівання стінок розломів водною парою [516] і рідкою водою [562], а розрахований спектр випромінювання поверхні у діапазоні 9-16 мкм порівнювався зі спостережними даними (температура отвору гейзера змінювалася від 175 до 273 К). Порівняння модельного і спостережного теплових спектрів навколо тигрової смуги Каїр (гаряче джерело «В» на рис. 2.36) показало, що температура в розломі повинна бути близько 223 К у квадраті V і 195 К у квадраті VI [649] при відсутності гейзерної активності (тобто коли діаметр вихідного отвору рівний нулю). При відкритті розлому у квадраті «V» температура буде ~ 130 К при ширині розлому 180 м, у квадраті «VI» T ~ 155 К при ширині розлому близько 22 м.

Порівняння розрахунку з даними щодо фізичних умов води в різному агрегатному стані також дозволило оцінити можливі параметри тигрових смуг. Так, для чотирьох довгих розломів по 130 км кожен [562] при T = 225 К вимагається, щоб середня ширина тріщин у смугах становила  $\approx$  8 см для того, щоб забезпечити вихід водяної пари через такі розломи у кількості 150 кг/с. Саме таку оцінку викинутої гейзерами пари H<sub>2</sub>O було отримано із

спостереження покриття зірок Енцеладом [682] за припущення, що пара викидається з його поверхні з тепловою швидкістю. Отримані в моделі що поверхня Енцелада переважно складається з водяного льоду оцінки вказали на необхідність враховувати сублімацію водяного льоду на краю розломів тигрових смуг [649]. При вказаних вище фізичних умовах на поверхні супутника сублімація повинна відбуватися із швидкістю 500 кг/с що в декілька разів перевищує спостережну гейзерну діяльність. За таких умов повний потік тепла що виходить через тигрові смуги у південній полярній області Енцелада становитиме  $5,8 \pm 1,9$  ГВт.

Для пояснення спостережного підняття температури і появи гейзерної активності було запропоновано кілька гіпотез: вихід тепла з резервуару рідкої води що лежить під поверхнею [562, 603], сублімація льоду на зовнішній поверхні супутника, декомпресія і дисоціація клатрату [389] та потік направленого нагрівання поверхні [504]. Кожна з цих гіпотез передбачає таку температуру в щілинах: ~ 140 К для клатратної декомпресії [389], > 180 К для сублімації H<sub>2</sub>O і до 273 К для невеликого резервуару рідкої води під корою Енцелада [562]. Підвищена температура в отворі має нагрівати ще й сусідні області поверхні, пояснюючи деякі теплові ефекти, які спостерігалися з КА «Кассіні». Так, вважається, що саме з цього місця під дією внутрішнього тепла відбувається випаровування поверхневого льоду та утворення хмар. Але якщо нагрівання надр зумовлене припливним ефектом, то не зрозуміло, чому розігрівається тільки область навколо південного полюса де розташовані загадкові смуги.

Зображення з відстані 175 км з роздільною здатністю 4 м показали, що поверхня Енцелада суцільно вкрита гігантськими валунами діаметром по 10-20 м, чого поки що не спостерігалось ні на одному іншому тілі Сонячної системи. Оскільки валуни відсутні поруч із згаданими вище тріщинами, то можна запідозрити що останні виникли вже після того, як остаточно сформувалися валуни.

10 жовтня 2008 р. КА «Кассіні» пролетів за 25 км від поверхні Енцелада і здійснив наступні експерименти: радіосканування виявили міліметрові нерівності, які розсіювали радіохвилі інакше ніж крупні валуни; спостереження зі спектрометром CIRS в інтервалі довжини хвиль від  $\lambda = 7$  мкм до  $\approx 1$  мм і панорамним спектрометром UVIS 56  $\leq \lambda \leq 190$  нм виявили атмосферу і встановили її склад; за спостереженнями з інструментами CDA і INMS було визначено склад, густину, швидкість та інші характеристики частинок в околиці Енцелада.

При наступному прольоті 31 жовтня 2008 р. за 200 км від поверхні супутника пріоритет віддавався спостереженням із оптичними інструментами. Виявилося, що тонкі струмені яскравого крижаного

матеріалу віддаляються від активного південного полюса на десятки тисяч кілометрів від поверхні Енцелада, поповнюючи кільце Е (рис. 2.33), причому струмені гейзерів, що вириваються з поверхні при русі супутника по орбіті залишають хвіст за Енцеладом, а частинки, які вилітають по ходу руху супутника – випереджають його [83]. Вважають, що магнітосфера Сатурна також впливає на рух частинок у цих струменях, змінюючи їх напрямок і потужність. Цікавою структурою є порожня область яка залишається в кільці після проходу Енцелада (рис. 2.33); її приписують підмітаючому ефекту Енцелада, розміщеного в центрі кільця Е. Крім того сам Енцелад діє на магнітне поле Сатурна, роблячи його обертання трохи повільнішим від обертання планети. Вважають, що це зумовлено взаємодією магнітного поля Сатурна з електрично зарядженими частинками, які викидаються гейзерами Енцелада. Викинуті гейзерами нейтральні молекули формують своєрідний тор навколо Сатурна, а після іонізації під впливом магнітного поля планети – плазмове кільце в області екватора. Взаємодія частинок плазми з магнітним полем зумовлює поступове уповільнення швидкості обертання плазмового диска і з часом його період обертання стає тривалішим за добу на Сатурні. Так, за даними КА «Кассіні» доба виявилася майже на 6 хвилин довшою (на 1%)від обчисленої за даними КА «Вояджер» на початку 1980-х.

У роботі [245] зроблено висновок, що викиди з Енцелада поповнюють не тільки кільце Е, а ще й кільце А. Магнітосферне оточення Сатурна сповільнюється викинутим Енцеладом матеріалом, який у результаті перетворюється на електрично заряджені частинки, що мігрують в магнітосфері планети. Утворена таким способом плазма в торі Сатурна далі захоплюється ще й кільцем А. Деякі ділянки внутрішнього боку плазмового тора, які взаємодіють з кільцем А, випромінюють радіосигнали (типу маяка), частота яких зменшувалася при зближенні з кільцем А і збільшувалася при прольоті космічного апарату над щілиною між кільцями, а тому було ще й зроблено висновок, що їх характеристики можуть бути індикатором щільності плазми [245]. Вважають, що гейзерна активність Енцелада зумовлена в основному викидами води у різному стані, хоча не виключена наявність в надрах супутника й інших газів. Це підтверджує, наприклад, реєстрація азоту за допомогою мас-спектрометра КА «Кассіні». На думку авторів роботи [113] нагрівання такої суміші за довгі роки (~ 4,5 млрд. років) могло навіть породити в надрах Енцелада (як і в супутнику Юпітера Європі) зачатки примітивного життя.

Деякі з модельних розрахунків вказують на необхідність того, щоб у тигрових смугах теплова інерція була більшою, ніж у кристалічного замерзлого водяного льоду їх довкілля [562]. Оскільки спектру Енцелада притаманні сильні смуги поглинання H<sub>2</sub>O при  $\lambda = 1,04, 1,25, 1,5, 1,65$  i 2 мкм [113, 354], то це можуть бути частинки грубо подрібненого кристалічного льоду, які утворилися в процесі конденсації гейзерних вивержень, частина яких повертається на поверхню у вигляді опадів. Зміни на поверхні Енцелада з липня 2005 р. по листопад 2006 р. вимагали постійного виходу тепла з під поверхні супутника, що добре узгоджується з реєстрацією при кожному черговому проходженні КА гейзерів на зображеннях протягом кількох років [649].

реєструються Оскільки Енцеладі виверження на то можна стверджувати, що його первинно сформована поверхня повністю змінилася під дією геологічних процесів протягом останніх кількох сотень мільйонів років [562, 632]. Навряд чи супутник містить достатньо радіоактивних елементів для розігріву а його орбіта має недостатній ексцентриситет для введення в дію зумовленого Сатурном припливного механізму тому була висунута ідея такої взаємодії з супутниками Мімас і Діона. Хоча зумовлений цим механізмом нагрів надр Енцелада не зможе розплавити весь супутник [651], але його достатньо для розплавлення багатошарових в'язких надр під товстою (до 100 км) корою з водяного льоду із домішкою значної кількості гідратованого аміаку, або ж під значно тоншою корою (до 25 км), якщо вона складається лише з гідратованого аміаку [374].

Нагадаємо, що гідрати аміаку у фазі моногідрату  $NH_3 \cdot H_2O$ , або в дигідратній фазі  $NH_3 \cdot 2H_2O$  були запропоновані як можливі агенти кріовулканізму у зовнішній частині Сонячної системи [166, 420, 568] бо їх присутність у водяному льоду суттєво знижує температуру танення такої суміші (176 К для дигідрату і 194 К для моногідрату) [174]. Хоча супутник порівняно малий і має невелику густину [562], але завдяки великому обсягу водяного льоду там все ж може генеруватись достатня для нагрівання кількість тепла з радіогенного джерела і від акреції [235, 651], яке змогло б розтопити як чистий водяний лід, так і гідрат аміаку.

Спектрофотометрія Енцелада. Найбільша серед тіл Сонячної системи відбивна здатність Енцелада (рис. 2.22-2.24) [703] може говорити про відсутність не крижаних домішок на його поверхні [151], що підтверджують і результати ІЧ спектрофотометрії [125, 156, 178, 182, 186, 237, 255, 704], а значна однорідність поверхні [116, 124, 707] може свідчити про те, що вона вкрита тонким шаром водяного інею. Спектр супутника містить глибокі смуги при  $\lambda = 1,52$  і 2,02 мкм і значно слабкіші при  $\lambda = 1,04$  і 1,25 мкм [125, 704], які є обертонами і комбінаційними частотами смуги водяного льоду при  $\lambda = 3,1$  (рис. 2.126), а також при  $\lambda = 1,65$  мкм і 1,31 мкм, інтенсивність яких збільшується зі зменшенням T [296].
Загалом в IЧ спектрах превалюють смуги поглинання водяного льоду, більшість з яких інтенсивніша на передній півкулі, для якої нахил континууму при  $\lambda \ge 1$  мкм також більший. До цього може привести наявність на веденій стороні частинок значно меншого розміру або значно складніша мікроструктура рельєфу поверхневого шару що узгоджується зі слабкою ерозією поверхні та деградацією структури частинок реголіту під дією магнітосфери на його задній стороні. Ведена ж півкуля піддається не тільки значному бомбардуванню частинками радіаційного поясу Сатурна внаслідок повільнішого обертання супутника щодо обертання магнітного поля планети, але й через потужне бомбардування поверхні Енцелада частинками кільця Е.

Обидва ці процеси в певній мірі дають можливість пояснити спостережувану спектральну відмінність передньої і задньої півкулі та так звану дихотомію їх альбедо, а саме: в діапазоні  $\lambda 0,8-2,5$  мкм ведуча сторона яскравіша в інтервалі  $\lambda 1,05-1,45$  мкм і темніша в інших  $\lambda$ , різниця яскравості півкуль у видимих [703] і ІЧ [1480] променях мала (0,06-0,12<sup>m</sup>) що може бути зумовлено різницею розміру частинок для ведучої і веденої півкулі (рис. 2.37).



Рис. 2.37. Модельні спектри: а – чистого водяного льоду при Т=70 К; b – при добавці 1% NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O при 77 К. Для кожного з графіків (зверху вниз) приймались, відповідно, такі розміри частинок: 50, 100, 250, 500 і 1000 мкм [704]

Цьому не суперечать і дані про інтенсивність смуг поглинання при λ = 1,5 і 2,0 мкм, які виявилися дуже глибокими на ведучій півкулі і мілкими на веденій [706]. Були виявлені смуги поглинання ще й інших газів, зокрема й гідратованого аміаку, що особливо важливо для геології супутника [186].

Моделювання спектрів діапазону  $\lambda 0,96-2,75$  мкм в рамках розглянутих модифікацій теорії Б. Хапке [322] найкраще погодження дало тоді, коли лідируюча півкуля вкрита сумішшю яка на 70% по вазі складається з частинок гідрату аміаку розміром 25 мкм і на 30% з водяного льоду розміром ~ 400 мкм при температурі T = 60 К та коли гідратом аміаку вкрито  $\approx 15\%$  спостережуваної поверхні. На задній півкулі суміш має складатися на 90% з частинок водяного льоду розміром  $\approx 60$  мкм і на 10% – з частинок гідрату аміаку розміром  $\approx 150$  мкм при температурі T = 60 К.

Підповерхневе море у південній полярній області. Нагадаємо, що південний полярний район Енцелада привернув особливу увагу наявністю помітної теплової аномалії та викиданням водяних гейзерів через тріщини в поверхні [562, 644, 716]. Це приписують або тонкій крижаній літосфері і наявності рідини близько біля поверхні, або ж локальному нагріванню яке призводить до танення криги на певній глибині під корою і до утворення внутрішнього полярного моря [161]. Якби Енцелад нагрівався тільки внутрішнім радіогенним джерелом тепла, то вихід енергії склав би ~ 300 МВт [373] чого явно недостатньо для танення товстої криги без залучення уявлень про незвичайний склад льоду і про додаткове ізолювання цього шару. Для отримання оцінки розумної товщини водяної лінзи (50-100 км) при радіогенному сценарії підвищення температури (відносно температури поверхні) має становити всього 10-30 К. Таке значення може забезпечити добавка внутрішньої теплової енергії яка зумовлена припливним механізмом внаслідок зміни ексцентриситету орбіти завдяки резонансній взаємодії з супутником Діона.

Наявність у спектрі пропану й ацетилену свідчить про те, що вода знаходиться в контакті з гарячим силікатним шаром ядра тому нагрівання і танення льоду є досить глибинним. Велика глибина локального полярного моря істотно впливає на форму Енцелада, яку наближено можна представити еліпсоїдом з однією віссю, зв'язаною припливом до Сатурна в 256,6 ± 0,5 км, іншою направленою по орбіті в 251,4 ± 0,2 км і полярною віссю в 248,3 ± 0,2 км [562]. Якби ж форма супутника відповідала гідростатичній рівновазі з ефективним радіусом 252,1 ± 0,2 км, то його внутрішня будова була б найкраще представлена гомогенним тілом суміші скельних порід і льоду. Спостережне відхилення від такого еліпсоїда на південному полюсі з більшим радіусом кривизни можна інтерпретувати як

свідчення своєрідного прогинання поверхні у південній полярній області в результаті утворення там внутрішнього південного полярного моря (рис. 2.38) і викиданням звідти значного об'єму води внаслідок активної гейзерної діяльності.



Рис. 2.38. Модель внутрішньої структури Енцелада [161]

Інший можливий сценарій [515] пов'язують з періодичною переорієнтацією осі обертання Енцелада внаслідок диференціації розплавленого скельного матеріалу невеликої густини і теплого льоду. Вважається що саме вона може зумовити зміну обертального моменту, яку в майбутньому можна спробувати зареєструвати за допомогою гравіметра при близьких прольотах космічного апарату від поверхні Енцелада.

### Розділ З. Супутники Урана

### 3.1. Загальна характеристика супутників Урана

Зараз відомо 27 супутників Урана. Інформацію про деякі з них можна почерпнути з рис. 3.1 і табл. 1, 3.1. У порушення традиції, син В. Гершеля – Дж. Гершель, запропонував замість імен із міфів різних народів називати супутники Урана іменем персонажів із творів Шекспіра і Попа.



Рис. 3.1. Монтаж системи Урана (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Орбіти супутників системи Урана лежать в екваторіальній площині планети майже перпендикулярно до площини її орбіти. Загальна картина системи Урана така: між кільцями й головними супутниками розташована внутрішня група з 12 малих супутників, далі знаходиться 5 головних супутників і зовнішня група з решти малих супутників.

(rigg) i quisobolo interpana q							
Супутник	A <sub>gV</sub> [119]	A <sub>gR</sub> [119]	q	q [129]	Q		
	0	Ũ	[129]		[328]		
Міранда		0,33±0,03	-	-	0,56±0,12		
Аріель	0,29±0,02	0,30±0,02	0,63±0,05	0,56±0,13	0,53±0,10		
Умбріель	0,13±0,01	0,13±0,01	0,52±0,08	0,45±0,03	0,56±0,12		
Титанія	0,27±0,02	0,26±0,02	0,59±0,02	0,58±0,10	0,52±0,12		
Оберон	0,23±0,02	0,23±0,02	-	-	-		

Таблиця 3.1. Значення геометричного альбедо у фільтрах V ( $A_{gV}$ ), R ( $A_{gR}$ ) і фазового інтеграла q

Всі малі супутники дуже темні і відбивають лише 3-7% падаючого на них світла. 17 найближчих до планети супутників (у тому числі й 5 найбільших) рухаються усередині магнітосфери Урана ніколи не виходячи за її межі. Це робить картину будови магнітосфери дуже складною тому що супутники здійснюють на неї зворотний вплив. Температура їхньої поверхні близько 60 К, ні в одного з них не виявлено помітної атмосфери оскільки всі вони надто малі для того щоб утримувати газову оболонку. Густина більших супутників близька до 1,54 г/см<sup>3</sup> тому вважають що по об'єму вони на 50% складаються з водяного льоду, на 30% з льоду метану й аміаку і на 20% зі звичайних гірських порід (силікатів тощо).

На зображеннях поверхні супутників Урана з КА «Вояджер-2» виявлено світлі викиди, які можуть бути водяним льодом (снігом чи інеєм), та ударні кратери значних розмірів, у центрі яких знайдено темну речовину. Наявність великих розломів, тріщин, зсувів кори свідчить про значні тектонічні процеси в недалекому минулому. Найцікавішими виявилися крупномасштабні зображення супутника Міранда (рис. 3.2, 3.3), на яких виявлено величезні борозни й тріщини глибиною до кількох кілометрів, тороси плит тощо.

Для пояснення такої структури запропонували, що первинне тіло супутника колись розкололось при гігантському зіткненні з крупною планетезималлю, але його частини не розійшлися а знову з'єдналися зі зсувом по відстані на кілька кілометрів. На зображеннях Міранди помітна майже правильна трапеція (назвали «шеврон») розміром 140×200 км, утворена темними і світлими смугами. Вона виділяється на фоні довкілля практично повною відсутністю ударних кратерів. Смуги мають вигляд паралельних гряд, які сходяться з іншою такою ж системою, утворюючи майже прямий кут. Дивним є продовження шеврона з глибоким (до 20 км) розломом, що знаходиться поблизу південного полюса, круті схили якого йдуть за межі освітленої частини супутника на рис. 3.2, 3.3.



Рис. 3.2. Зображення супутника Mipaнда (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ photo\_gallery)

Не менш загадкові утворення (можливо, тієї ж природи) знаходяться поблизу термінатора, який через положення полярної осі Урана на час спостережень постійно перебував поблизу екватора Міранди. Одне з них окантоване ширшими ніж у шеврона світлими й темними смугами (внизу ліворуч на рис. 3.2) із загальною площею не кратерованої поверхні разів у 5 більшою площі шеврона. Ці об'єкти названо Цирки Максими, як древні римляни називали великі стадіони.



Рис. 3.3. Крупномасштабний знімок глибокого розлому на Міранді (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

Ще одне таке ж утворення розташоване на діаметрально протилежному боці супутника і нагадує слід оранки та являє собою 15-20 паралельних гряд, розділених такими ж долинами що повторюються через кожні 5-7 км. Вся система розвертається майже під прямим кутом і далі йде за термінатор. Цей стадіон дуже нагадує систему паралельних борозен на супутнику Юпітера Ганімед. Маленька Міранда на своїй невеликій території зібрала колекцію практично всіх можливих геологічних форм, які зустрічаються в Сонячній системі.

Оскільки гіпотеза про об'єднання розколотого первинного тіла не пояснює, чому збереглися древні ударні кратери на інших частинах поверхні супутника, то запропонували гіпотезу яка допускає існування в минулому нерівномірного розігріву надр Міранди, внаслідок якого локальне плавлення кори оголило плити які вийшли з надр і які ми тепер бачимо на її поверхні.

На зображенні **Оберона** (рис. 3.4, ліворуч) видно світлі плями які є вінцем дуже світлих променів навколо ударних кратерів більшого розміру і контрастують з дуже темною древньою поверхнею цього досить великого небесного тіла. Несподіванкою виявилася наявність темного дна у великих значно молодших ударних кратерах, оточених світлими променями, що безсумнівно вказує на певну гейзерно-вулканічну активність у водяному варіанті, коли крізь розриви, що утворилися в крижаній корі, на поверхню супутника виливалася забруднена вода, яка при охолодженні утворила дуже темну поверхню.

Через всю південну півкулю Оберона проходить широка долина, яка свідчить про існування там у минулому тектонічних процесів. Поряд з багатьма великими кратерами видно темні потоки що частково заповнили їх дно і затверділи. Очевидно, що у попередній історії супутника діяли потужні внутрішні сили і потоки тепла, які руйнували крижану кору й викликали її переміщення. Саме розломи в корі Оберона і є теперішнім проявом цих рухів.



Рис. 3.4. Зображення супутників Оберон (ліворуч) і Титанія (праворуч) (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

**Титанія** (рис. 3.4, праворуч) дуже подібна на Оберон і її поверхня також вкрита старими ударними кратерами і сіткою тектонічних розломів з

ознаками древнього вулканізму. Відносно мала кількість древніх ударних кратерів (особливо великих) могла бути зумовлена якимось процесом, що призвів до їхнього руйнування. Поверхня супутника порізана системою рифтів і пересічених звивистих долин дуже схожих на русла річки, найдовше з яких сягає майже 1000 км. Всі такі русла оточені системою світлих відкладень на видимій поверхні. Стіни деяких каньйонів здаються світлими мабуть тому, що вони покриті льодом. Яскраві плями з радіальними променями також є відносно молодими ударними кратерами. Цікавими також є лінійні жолоби (ймовірно, каньйони розломів) і дрібні ударні кратери які є найчисельнішими і які утворилися при падінні залишків протопланетного матеріалу, його уламків та інших невеликих тіл що оберталися навколо Урана.

Що стосується древнього рельєфу супутника, то він, очевидно, був повністю зруйнований під дією значного виділення внутрішнього тепла в ранню епоху життя Титанії. У результаті розігріву поверхня плавилася, відбувалася внутрішня гравітаційна диференціація матеріалу, при якій важчі породи тонули, що у свою чергу приводило до виділення тепла у ще більшому масштабі. І вже після охолодження на знову створеній після багаторазової перебудови через тектонічні процеси поверхні утворилися ті дрібні кратери, про які говорилося вище. Такий процес глобальної переробки поверхні залишається поки недоведеним, але дуже ймовірним. Поверхня супутника **Умбріель** (рис. 3.5, ліворуч) скоріше всього

Поверхня супутника **Умбріель** (рис. 3.5, ліворуч) скоріше всього носить первинний характер великих ударних утворень з високим ступенем насичення, що проявляється в багаторазовому накладанні і перекриванні кратерів. Його поверхневий шар досить темний (середнє альбедо  $\approx 0,16$ ) 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 врізаються в поверхню. Ще одне пояснення полягає в тому що виділення тепла в надрах Умбріеля в епоху його утворення чомусь 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 екватор в даний час практично постійно перебуває на термінаторі супутника, на границі дня й ночі. Для пояснення існування білого дна тільки в деяких крупних одиничних кратерах припускають, 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. Можливо що товщина темного шару різна в різних місцях.

Поверхневий шар супутника **Аріель** (рис. 3.5, праворуч) також 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.



Рис. 3.5. Зображення супутника Умбріель і Apieль (http://nssdc.gsfc. nasa.gov/photo\_gallery)

Очевидно, що основним джерелом його енергії також могло бути припливне тертя, викликане резонансом з Умбріелем і Мірандою. Проблема, однак, у тому, що зараз такого резонансу у русі Аріеля вже немає, що не виключало їх наявність у минулому. Проте проведені розрахунки поки що спростовують таку можливість. Правда, слід сказати, що ця теорія відкидає можливість розігріву супутника Сатурна Енцелада, а в дійсності такий процес там діє й зараз.

Глибина тріщин (рифтів) на Аріелі сягає 10 км а самі вони простягаються на кілька сотень кілометрів. Відмічено, також, що навколо основного русла долин утворена ще й мережа їх приток. Ширина рифтів часто доходить до 25-30 км. Їхнє гладке дно вказує на те, що вони могли утворитися в результаті переміщення якихось мас, що нагадує древні утворення такого ж вигляду на Марсі. Найімовірніше, що вони утворилися в епоху інтенсивної перебудови крижаної кори Аріеля, яка супроводжувалася її розломом, стискуваннями й тектонікою. Проте на поверхні супутника дуже мало метеоритних кратерів, що знов-таки вказує на її молодість у геологічних масштабах. В якості матеріалу, що заповнює долини і знаходиться уздовж них пропонується лід з можливою домішкою аміаку й метану.

Є й інші припущення про можливу природу цього льоду при низькій температурі, наприклад водяний вулканізм у минулому.

Розмір **12 внутрішніх супутників** менше 150 км і обертаються вони в інтервалі відстаней від центру Урана 49 000-80 000 км (екваторіальний радіус Урана 25 559 км). Супутники Корделія та Офелія (діаметр 15-25 км) виявилися такою ж групою супутників пастухів кільця «Епсилон» Урана, 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.

Вважають також, що супутники можуть бути залишками більших тіл, які розпалися у так званій сфері Роша Урана і спричинили появу тієї чи іншої системи кілець і зараз вони «пасуть» створене ними ж кільце. Супутник Пак за розміром ( $150 \pm 10$  км.) займає проміжне місце між головними і нововідкритими супутниками, за формою є практично ідеальною сферою і є таким же дуже темним, як і кільця Урана (альбедо 0,02-0,03). Для пояснення останнього факту запропоновано наступну гіпотезу. Оскільки поверхня деяких супутників Урана і частинок його кілець у значній мірі складається з вуглецевовмісних молекул і самі ці об'єкти знаходяться в потужній плазмосфері Урана, то тривале бомбардування їх поверхні частинками приводить до розпаду метану та його похідних із вивільненням чистого вуглецю (сажі), тому через невеликий їх розмір і малу просторову роздільну здатність якихось помітних деталей на зображеннях не було знайдено.

Відмітимо, що супутники, які рухаються в потужній магнітосфері Урана, досить оригінально взаємодіють з нею. Оскільки магнітна вісь диполя Урана нахилена до її осі обертання під кутом  $\approx 59^{\circ}$ , то за половину оберту планети навколо власної осі (8,62 години) полярність тієї частини магнітосфери, в якій знаходиться супутник, змінюється на протилежну, що приводить до періодичної зміни опромінення радіацією на поверхні супутника і до того, що вся їх поверхня протягом тривалого часу взаємодії з плазмосферою стала дуже темною. Подібно до астероїдів, значна кількість яких була виявлена при повторному перегляді раніше отриманих знімків, таке трапилося і з деякими супутниками Урана. Так, супутники **Меб** і **Купідон** (діаметр 24 і 10 км) були відкриті в 2003 р. на зображеннях КТХ а пізніше Меб виявили й на зображеннях КА «Вояджер-2» і на інших старих знімках [618]. Спочатку Меб (XXVI) отримав тимчасове позначення S/2003 U1 а потім його назвали іменем феї з англійського фольклору, згадуваної в п'єсі Шекспіра «Ромео і Джульєтта». Виявилось, що його орбіта проявляє сильні збурення, джерелом яких можуть бути сусідні супутники. Ці два супутники рухаються по траєкторії, що перетинається з кільцями Урана. Супутник Меб складається з не дуже щільної речовини, яка легко розсіюється при метеоритному бомбардуванні, тому було запропоновано, що він є джерелом пилу для кілець. У свою чергу, при проходженні крізь кільця на супутник осідає той же пил. Пов'язаної з цим випадковим і хаотичним обмінним процесом маси достатньо, щоб орбіта стала нестійкою.

## 3.2. Зміни блиску супутників Урана з сонячним фазовим кутом

Незважаючи на те, що при наземних спостереженнях системи Урана сонячний фазовий кут α ≤ 3°, але практично вже перші спектрофотометричні спостереження в 1982 р. Аріеля, Умбріеля, Титанії та Оберона в діапазоні довжини хвиль  $\lambda 1,43-2,57$  мкм (зі спектральною роздільною здатністю 5%) вказали на існування у більшості з них ефекту опозиції [114]. Це ж підтвердили й фільтрові спостереження в 1983 рр. [283] та в 1985-1990 рр. на КТХ [119]. Для Титанії й Оберона не було виявлено вираженої залежності блиску від орбітального фазового кута [283]. Фазова залежність блиску в широкому інтервалі сонячних фазових кутів і значення фазового інтеграла q було знайдено за переданими КА «Вояджер-1» і «Вояджер-2» зображеннями [129, 505, 633, 674, 711] (рис. 3.6-3.8, табл. 3.1).

Як видно, Аріель і Титанія мають приблизно однаковий вигляд фазової залежності при великих значеннях фазового кута, ефект опозиції найбільш виражений в Оберона, дещо менший в Аріеля і Титанії і найменший в Умбріеля (рис. 3.7- 3.9). Деталі диска супутників малоконтрастні (особливо для Умбріеля), їх розмір знаходиться в межах від десятків до сотень кілометрів [327]. Довготна зміна блиску поверхні супутників Урана в довжині хвилі 1,5 мкм, поглинання в якій пов'язують з льодом H<sub>2</sub>O [296], варіює від 0,5% для Умбріеля, Титанії та Оберона до 2,5% для Аріеля.



Рис. 3.6. Зміна відбивної залежності з сонячним фазовим кутом для Оберона, Нереїди, Аріеля, Титанії і групи супутників Порції з α [215]



Рис. 3.7. Зміна відносної відбивної здатності супутників Урана Аріеля (Титанії, Оберона) та Умбріеля від а в двох фільтрах [119]



Рис. 3.8. Зміна альбедо (шкала ліворуч) і зоряної величини (шкала праворуч) з сонячним фазовим кутом α. Лінії – функції Хапке з врахуванням зворотного розсіянням (верхні криві), без його врахування (середні криві) і без врахування тіньового ефекту (нижні криві) [379]



Рис. 3.9. Зміна відносної (по відношенні до Титанії) відбивної здатності від а для Оберона (трикутники), Аріеля (незаповнені кружки) й Умбріеля (заповнені кружки) у фільтрах «V» (0,55 мкм – зверху) і «R» (0,65 мкм – внизу) [119]

Значення коефіцієнта Міннарта для Міранди, Аріеля, Умбріеля, Титанії та Оберона в інтервалі  $0.8 \le \alpha \le 70^{\circ}$  в діапазоні  $350 \le \lambda \le 590$  нм не залежить від  $\lambda$ , але лінійно змінюється з сонячним фазовим кутом [710]. Аналіз в рамках моделі Хапке показав, що найбільша розбіжність має місце для альбедо однократного розсіяння  $\omega$ , яке міняється від 0,3 для Умбріеля до 0,7 для Аріеля; за шершавістю поверхневі шари Умбріеля, Оберона й Титанії приблизно такі ж, як і в Місяця, а в Аріеля поверхневий шар значно шершавіший [328]. Окрему групу становлять супутники **Порція**, **Б'янка**, **Крессіда**, **Дездемона**, **Джульста**, **Розалінда**, **Купідон**, **Белінда** і **Пердіда** [378], які мають схожі орбіти і фотометричні властивості.

#### 3.3. Спектрофотометрія супутників і природа їх поверхні

Незважаючи на обмеженість спектрофотометричних даних, було визначено характер зміни спектральної відбивної здатності супутників (наприклад, альбедо Оберона зменшується від 0,26 при  $\lambda$  = 265 нм до 0,18 нм при  $\lambda$  = 320 нм [358, 658]) (рис. 3.10) і виявлено смуги поглинання в ІЧ ділянці спектру [109, 114, 178, 181, 418, 641] (рис. 3.11).



Рис. 3.10. Спектральна залежність відносної відбивної здатності (1,0 відповідає  $\lambda = 560$  нм) для (зверху вниз) Умбріеля, Тритона (супутник Нептуна), Аріеля, Титанії та Оберона [358]

Рис. 3.11. Відносні ІЧ спектри (зверху вниз) Аріеля, Титанії, Оберона та Умбріеля; лінія – спектр суміші з 70% води і 30% вулканічного матеріалу [114]

Висловлено припущення про присутність на поверхні супутників забрудненого водяного льоду. За даними КА «Вояджер-2» температура у підсонячній точці була оцінена для Міранди в T =  $86 \pm 1$  та Аріеля в T =  $84 \pm 1$  К [311]. Дані на рис. 3.11 і 3.13 показують, що спектри супутників дуже подібні і більшість смуг поглинання в діапазоні  $\lambda 0.8-2.5$  мкм притаманні замерзлій воді.



Рис. 3.12. Спектральне альбедо дисків (Ас) Міранди (заповнені і незаповнені кружки), Аріеля (кружки), Титанії (трикутники) і системи кілець (Ак) Урана в діапазоні довжини хвиль 0,34-2,2 мкм при  $1 \le \alpha \le 2,4^{\circ}$  [77]

Найменша інтенсивність смуг поглинання характерна для спектра Умбріеля, якому притаманне найнижче альбедо [375], що зазвичай характерно для дуже темного матеріалу (наприклад, чистий вуглець – сажа). У Титанії, Аріеля й Міранди максимальна відбивна здатність спостерігається в тій частині спектра, де знаходиться смуга поглинання групи ліній С-Н при  $\lambda = 1,73$  мкм, при  $\lambda = 1,63$  мкм вони значно темніші ніж при  $\lambda = 1,27$  і 1,73 мкм, які зв'язані з поглинальними властивостями замерзлої води на їх поверхні, що може вказувати на те, що вуглеводні не є домінуючою складовою їх поверхні [77]. Поглинальні депресії спектрів у довжині хвиль 1,50, 1,57, 1,65 і 2,0 мкм викликані поглинанням водяним льодом [296, 297, 314].



Рис. 3.13. Нормований на одиницю спектр (зверху вниз) Аріеля, Умбріеля, Титанії й Оберона [296]

Лабораторне і числове моделювання не суперечить моделі, в якій льодом може бути вкрита поверхня від 0 до 20%. За певних обставин енергійні заряджені частинки і УФ фотони можуть зруйнувати кристалічну структуру льоду [359, 360, 396, 476], але глибина такої переробки поверхні навряд чи може перевищувати кілька міліметрів. Причиною цього може бути сублімація, метеороїдне бомбардування, радіолітичні хімічні перетворення поверхні тощо.

Виявилось, що смуги поглинання інтенсивніші на ведучій півкулі практично для всіх супутників [300], можливо, за виключенням Оберона, для якого поки що недостатньо спостережних даних. Максимальне поглинання співпадає з лідируючою півкулею (довгота L = 90°) Аріеля, Умбріеля і Титанії, мінімальне при L = 270° (ведена півкуля). За таких позначень значення L = 0° відповідає меридіану що «дивиться» на Уран, а L = 180° – зворотному боку поверхні супутників. Найімовірніше, це слід пов'язувати із взаємодією з магнітосферною плазмою Урана оскільки варіації поглинання зменшуються з віддаленням від планети. Так, для Аріеля, Умбріеля і Титанії амплітуда зміни складає 93,4%, 69,47% і 34,13%. Хоча звичайно можуть бути й інші причини варіацій: магнітосферне постачання вуглистих частинок пилу з кілець на льодяну поверхню; постачання темних частинок прямо з кілець Урана, які стають електрично зарядженими під дією сили Лоренца в магнітному полі планети; посилене кратероутворення на лідируючій півкулі через підвищене метеороїдне бомбардування внутрішніх супутників з вищою середньою ударною швидкістю. Відкриття ж льоду CO<sub>2</sub> (рис. 3.14,) підняло ряд питань щодо його походження й відносної долі присутності цього льоду [300], віку метеороїдним поверхні, переробленої бомбардуванням або бомбардуванням енергійними частинками в потужній магнітосфері, щодо можливих джерел і механізмів поповнення льодом СО<sub>2</sub> на поверхні супутника, а також співставлення механізмів сублімації і метеороїдного бомбардування, радіолітичної хімії складових поверхні тощо [218, 219].



Рис. 3.14. Прояв смуг поглинання льоду  $CO_2$  (відносні інтенсивності) Тритона і різних півкуль Аріеля, шкали альбедо якого зміщені на  $\pm 0,1$  [300]

Виявлено, що ці поглинальні особливості зменшуються з віддаленням супутників від Урана, що й демонструє рис. 3.15. Вважають [277, 570, 571], що виділення газу CO<sub>2</sub> з надр супутників може бути джерелом його поповнення. Спектр веденої півкулі Аріеля показує досить глибокі смуги поглинання льоду CO<sub>2</sub>, що є явним свідченням минулої геологічної діяльності [554], тоді як Умбріель, у спектрі якого також є сильні смуги поглинання CO<sub>2</sub>, не показує ніяких ознак недавньої геологічної активності. Ще древнішою є поверхня Титанії і, можливо, Оберона, тоді як в спектрі ведучої півкулі Аріеля смуги CO<sub>2</sub> практично відсутні [570, 571].



Рис. 3.16. Смуги поглинання льоду CO<sub>2</sub> при  $\lambda$  = 1,5 і 2,2 мкм у Оберона, Титанії, Умбріеля й Аріеля [300]

Таким чином результати спектральних спостережень чітко показали існування довготної залежності розповсюдження льоду CO<sub>2</sub> й H<sub>2</sub>O. Значно більші поглинальні особливості що відносяться до водяного льоду, зареєстровані в спектрі лідируючої півкулі супутників Урана. Це добре пояснюється видаленням водяного льоду внаслідок магнітосферного бомбардування веденої півкулі Аріеля, Умбріеля і Титанії. Відмічено, також, що асиметрія довготних особливостей поступово зменшуються зі збільшенням відстані до планети.

### Розділ 4. Супутники Нептуна

#### 4.1. Загальні характеристики

Зараз у Нептуна відкрито 13 супутників (табл. 4.1, рис. 4.1).

**Тритон** є одним з найбільших супутників у Сонячній системі (маса 2,14·10<sup>22</sup> кг, розміром поступається лише Місяцю, Титану і галілеєвим супутникам Юпітера). Він має практично сферичну форму і дуже швидко (період обертання – 5,88 діб) обертається по коловій орбіті навколо Нептуна, площина орбіти нахилена на 23° до екваторіальної площини планети.

λ,	Ag	Джерело	λ,	Ag	Джерело
HM			МКМ		
410	0,65±0,04	[335]	2,16	0,59±0,03	[647]
480	0,67±0,05	[335]	2,94	0,26±0,02	[647]
560	0,73±0,03	[335]	3,12	0,15±0,02	[647]
			3,24	0,16±0,04	[647]
			3,77	0,33±0,04	[647]

Таблиця 4.1. Спектральне значення геометричного альбедо Тритона

Через досить велику густину (2,07 г/см<sup>3</sup>) допускають, що в нього є потужне ядро з твердих порід (можливо, навіть металеве), яке складає до двох третин маси супутника, температура поверхні становить 38 К. Своїми розміром, структурою та іншими властивостями він дуже схожий на Плутон. Він постійно обернений до Нептуна одним і тим же боком, є єдиним у Сонячній системі, у якого при такому великому розмірі та порівняно близькій відстані до планети (до Нептуна він ближчий ніж Місяць до Землі) має місце зворотне обертання. В його екваторіальній області, яка, як вважається. складається із замерзлого метану, спостерігається різний тип поверхні, у тому числі величезні крижані скелі, темні смуги, тріщини шириною ≈ 30 км і довжиною до 1000 км, що приписують вулканічній і гейзерній активності (рис. 4.2). Вважається, що дві третини поверхні супутника покриті льодом та яка є досить молодою. Оскільки виявлені при прольоті КА 10 гейзерів знаходились у південній полярній області, над якою Сонце в цей період перебувало близько зеніта, то причину – приписують нагріванню Сонцем, внаслідок якого азотний лід на деякій глибині під поверхнею (де є також і водяний лід, і метанові з'єднання) починає плавитись.



Рис. 4.1. Система супутників Нептуна (http://voyager.jpl.nasa.gov /image/)



Рис. 4.2. Ліворуч – зображення південної приполярної області Тритона; праворуч – водяні гейзери на Тритоні (http://voyager.jpl.nasa. gov/image/)

Тиск газу, що виникає в глибинному шарі при температурі всього +4°С, буде цілком достатнім для того, щоб викинути газовий фонтан. Про відносну молодість південної полярної шапки говорить ще й те, що в ній практично немає ударних кратерів, а темні плями на рис. 4.2 є маленькими вулканами. 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 різна: виверження на Землі й Венері (і на Марсі в минулому) складаються з гірського матеріалу, на Іо – з сірки і сірчаних сполук, на Енцеладі і Тритоні – своєрідні гейзери. Зараз прийнята наступна модель Тритона. В час, коли супутник ще був досить теплим, над його кам'янистим ядром з діаметром біля 2000 км знаходився величезний глибокий океан з води, який при охолодженні поступово замерз (рис. 4.3), а тому утворена там льодова оболонка зараз має товщину понад 180 км і лежить вище водяного океану глибиною  $\approx 150$  км; вода в океані насичена аміаком, метаном і різними солями.



Рис. 4.3. Можливе замерзле озеро на Тритоні (http://voyager.jpl. nasa.gov/image/)

Льодяна кора такого океану знаходиться під впливом істотних механічних напруг, через що в корі супутника часто виникають тріщини великого розміру, сліди від яких перетинаються на поверхні під різним кутом. На поверхні має лежати сніг, в основному з азоту, товщина якого за деякими оцінками може перевищувати 6 м.

За даними КА «Вояджер-2» південний полюс Тритона, який був повернений до Сонця, оточувала яскрава полярна шапка з дуже високою яскравістю (альбедо 95%), яка займала майже половину поверхні супутника. На її дуже світлій поверхні було відмічено велику кількість темних вкраплень, з яких угору тягнуться струмені темної речовини, що виявились 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 понад 150 км. Такий дивний різкий злам гейзерних викидів може говорити про те, що на висоті ~ 8 км знаходиться тропопауза в атмосфері супутника, вище котрої дме сильний вітер. Завдяки особливостям орбіти Нептуна й Тритона ця область до моменту спостереження постійно освітлювалася Сонцем протягом майже 100 років. Спостережні дані також показали, що в цій області супутника зовсім немає ударних кратерів.

**Нереїда** (рис. 4.4) рухається по орбіті з ексцентриситетом 0,75, яка є найбільш витягнутою з усіх супутників.



Рис. 4.4. Реконструкція поверхні супутника Нереїда (http://voyager.jpl. nasa.gov/image/)

Внаслідок цього її відстань до Нептуна міняється від 1,4 до 9,7 млн. км. Період обертання навколо Сонця – 360,16 доби. Після прольоту КА «Вояджер-2» було визначено її діаметр (340 км) і відбивну здатність (≈ 12 %).

## 4.2. Спектрофотометрія супутників Нептуна

Практично вся увага при проведенні спектрофотометрії супутників Нептуна приділялась Тритону. Завдяки цьому було визначено фазову залежність блиску (рис. 4.5, 4.6), оцінено геометричне альбедо  $A_g$  (табл. 4.1) і фазовий інтеграл: 1,26 ± 0,03, 1,21 ± 0,05, 1,16 ± 0,02 при  $\lambda$ =410, 480 і 560 нм [335].



Рис. 4.5. Фазова залежність відбивної здатності Тритона за даними космічних [122] і наземних спостережень [216]

Як видно з результатів спостережень, блиск Тритона показує потужний опозиційний пік при α ≤ 1° (який, найімовірніше, притаманний когерентному механізму) і надзвичайно велике значення фазового інтеграла q. За спостереженнями в 1982-1983 pp. у фільтрі V не було виявлено ефекту опозиції, а існуючі варіації приписали зміні його блиску з орбітальним фазовим кутом [283]. Відзначимо, що О. Франц [264] за даними UBV фотометрії протягом 11 ночей у серпні-вересні 1977 р. встановив, що ведуча сторона Тритона яскравіша веденої приблизно на  $0,06^{m}$ , а показники кольору становлять B-V =  $0,74^{m}$  та U-B =  $0,30^{m}$ . За наземними спостереженнями в 1950-1990 рр. в діапазоні  $350 \le \lambda \le 600$  нм [120] довготна залежність не виключалась, фотометрія у фільтрах BVI не показала спектральної залежності відбивної здатності Тритона [542], в УФ в інтервалі довжин хвиль  $\lambda 260-320$  нм спостерігалось практично лінійне зменшення альбедо супутника від 0,33 до 0,27 при зменшенні довжини хвилі, але довготна залежність була чітко зареєстрована за результатами обробки зображень з КА «Вояджер-2» [409] (рис. 4.7).



Рис. 4.6. Фазова залежність блиску Тритона при  $\lambda = 410$  (суцільна лінія), 480 (штрихована лінія) і 560 нм (лінія з точок) [335]



Рис. 4.7. Довготна залежність альбедо Тритона при λ = 750 нм (ромби) і 260 нм (квадратики) [409]

Якщо спектрофотометрія в діапазоні  $\lambda$ 680-900 нм із спектральною роздільною здатністю 0,6 нм вказала на можливу наявність смуги поглинання метану при  $\lambda = 887$  нм (рис. 4.8) [87], то в інтервалі довжини хвиль до 2,5 мкм [179, 183, 184, 189] було виявлено смугу метану при  $\lambda$ =2,3 мкм та індуковану тиском смугу 2-0 молекулярного азоту при  $\lambda$ =2,16 мкм (рис. 4.9).



Рис. 4.8. Спектр Тритона, Плутона і метану (в різній кількості) в діапазоні λ680-900 нм [87]

Щодо метану, то він може бути або в газоподібному стані у підсонячній точці [189] з атмосферним тиском ( $1 \pm 0.5$ )· $10^{-4}$  бар, або у твердому стані [179]. Наявність цих смуг поглинання було погоджено з моделлю поверхневого шару, який є сумішшю рідкого азоту і рідкого

метану [184] в умовах, коли концентрація метану не більша 3% від значення концентрації його насичення. За більшої концентрації метану смуга азоту перекрилася б смугою метану при  $\lambda = 2,3$  мкм [553], чого не спостерігається.



Рис. 4.9. Порівняння IЧ спостережного (зверху) і модельних спектрів Тритона, модель I (N<sub>2</sub> 99,75% (NL=8 мм), CO 0,10% (NL=1 мм), CO<sub>2</sub> 0,10% (NL=0,8 мм), CH<sub>4</sub> – 0,05%), модель S (твердий стан, коли лід N<sub>2</sub>, CO і CH<sub>4</sub> в моделі I займають 90% поверхневого шару і CO<sub>2</sub> 10%) [188]

Спектрофотометрія зі значно більшою роздільною здатністю ( $\Delta\lambda\lambda$ ) = 250-350 (рис. 4.10) вказала на існування не лише смуг поглинання метану (1,663, 1,719, 1,790, 2,200, 2,316, 2,371 мкм) і азоту (2,148 мкм), але й СО (1,578, 2,352), <sup>13</sup>CO (2,404 мкм) та CO<sub>2</sub> (1,577, 1,610, 1,966, 2,012 і 2,070 мкм) [188]. Порівняння контура смуги поглинання рідкого азоту при  $\lambda$  = 2,148 мкм при різній температурі зі спостережними даними (рис. 4.10) показало, що найкраще погодження має місце при температурі T = 38 ± 4 K (яка була оцінена за спостереженнями в діапазоні 200-320 см<sup>-1</sup> [165]) і при кількості газоподібного метану NL = 0,2 мм.



Рис. 4.10. Порівняння контурів смуг поглинання в спектрі Тритона (квадратики) і замерзлого азоту при різній температурі [695]

Якщо в діапазоні  $260 \le \lambda \le 320$  нм не було виявлено емісію газів [658], то при значно коротших  $\lambda$  виявили емісії  $N_2 c'_4 \, {}^{1}\Sigma_{u}^{+} \rightarrow {}^{1}\Sigma_{g}^{+}(0,1)$  при  $\lambda =$ 98,1 нм з інтенсивністю 3-5 Релей; NII ( ${}^{3}P \leftarrow {}^{3}D^{0}$ ) при  $\lambda =$  108,5 нм (2-8 Релей) і HI ( ${}^{2}S \leftarrow {}^{2}P^{0}$ ) при  $\lambda =$  121,6 нм (110 Релей вдень і менше 90 Релей вночі) [105].

Експерименти з радіозатемнення КА «Вояджер-2» при  $\lambda = 3,6$  і 13 см виявили на висоті  $\approx 340$  км навколо Тритона іоносферу з концентрацією  $46\cdot10^9$  електронів/м<sup>3</sup> і дозволили оцінити атмосферний тиск біля поверхні (1,6 ± 0,3 паскалів), еквівалентну ізотермічну температуру атмосфери (48 ± 5К), яка трактується на користь азотного складу атмосфери. Відносна концентрація метану була оцінена в 10<sup>-4</sup> [710]. Приблизно такі ж результати (T = 47 ±1K, p = 1,4 ± 0,1 паскалів) були отримані з аналізу спостережень явища затемнення зір в 1993-1995 рр.

Фотометричні спостереження Нереїди в UBVRI системі фільтрів вказали на незвичний її спектр і на коливання блиску з амплітудою  $\approx 1,5^m$  [607].

## Розділ 5. Кільця Сатурна

Зараз все більше росте переконання, що кільця є не лише навколо планет-гігантам. Так, за останніми даними, навколо Землі на відстані  $\approx 300$  км також знаходиться пиловий пояс із дуже дрібних частинок, який проявляється так званим зодіакальним світінням. Це пилове кільце інколи приписують місячному походженню.

Справа в тому, що позбавлений атмосфери Місяць безперешкодно бомбардується метеоритами, в результаті чого викидаються фонтани частинок різного розміру. Крупні частинки практично зразу ж осідають назад, дрібніші виносяться в космічний простір і потрапляючи в сферу тяжіння Землі скупчуються на певній відстані від неї. Найкраще вивчені кільця планет-гігантів, тому далі саме їм приділимо основну увагу.

# 5.1. Відкриття, номенклатура і структура кілець Сатурна

У червні 1610 р. Г. Галілей на боках Сатурна в екваторіальній площині виявив дві тьмяні плями, які не змінювали свого місцеположення. Згідно його образного вислову вони нагадували «двох слуг, які підтримують старого бога часу (у стародавніх римлян Сатурна) в його утомливому шляху по небу». Повторні спостереження у 1612 р. спантеличили дослідника бо в полі зору був лише круглий диск планети, тому він написав: «Чи можливо, що якийсь демон-насмішник обдурив мене?», але згодом Сатурн знову з'явився з «супроводом». Галілей так і не розгадав цю загадку, бо втрата зору в 1626 р. обірвала його спостереження.

Лише через 50 років Х. Гюйгенс підтвердив, що Сатурн оточений тонким кільцем, яке сильно нахилене до площини його орбіти; саме цей факт і допоміг йому розгадати причину згаданого зникнення придатків: при орбітальному русі Сатурна площина кільця переміщується паралельно в меридіональному напрямку, завдяки чому змінюється міра розкриття кільця і протягом одного оберту навколо Сонця кільце двічі поверталось до Землі ребром, а тому через малу товщину ставало невидимим (рис. 5.1.)

В 1675 р. Д. Кассіні в середині кільця виявив темну лінію (цілину Кассіні), зовнішній і внутрішній сегменти якого назвав кільцями А й В, відповідно; а тому стали говорити про кільця. В подальшому спочатку Дж. Максвел виявив, що кільце В також розділене щілиною (щілина Максвела), внутрішня частина якого отримала назву С, а пізніше Й. Енке (25 квітня

1837 р.) та Дж. Кілер (7 січня 1888 р.) такі ж щілини виявили біля зовнішнього краю кільця А (щілина Енке і Кілера на рис. 5.2, 2.14) [529].



Рис. 5.1. Зміна видимості кілець Сатурна (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ photo\_gallery)

В 20-му ст. число кілець було доведено до семи. Хоча тут не обійшлося без курйозів, коли деякі кільця відкривались повторно, а інколи з однаковими назвами існували різні кільця. Так, в 1933 р. Н. Барабашов і Б. Сємєйкін [4] виявили, що між Сатурном і кільцем С існує розріджена дисперсна матерія. Повторно це зробив П. Гуерен [301]: на фотографіях з просторовою роздільною здатністю 0,25" за 28 жовтня 1969 р. між Сатурном і кільцем С виявив ще одне кільце, поверхнева яскравість якого приблизно в 20 разів менша, ніж у найяскравішій частині кільця В; його назвали кільцем D (рис. 5.3).

Після цього І. Ферін [248] це ж кільце виявив на отриманих В. Слайфером ще в 1943 і 1945 рр. зображеннях. Реальність його існування в подальшому підтвердили наземні спостереження [412, 496] і зображення з КА «Вояджер-1» і «Кассіні» [324, 615]. Тим не менше, пріоритет відкриття внутрішнього кільця приписується П. Гуерену.

Аналогічна ситуація мала місце і з віддаленішим від кільця А довкіллям. Так, в 1953 р. було виявлено кільце (також назване кільцем D [597]), яке за дослідженнями В. Фейбельмана [246] між 27 жовтня 1966 р. і 16 січня 1967 р. простягається на відстань приблизно в 2 радіуси зовнішнього краю кільця А.



Рис. 5.2. Щілина Енке з КА «Kacciнi» (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ photo\_gallery)

Таким чином, під однією назвою D певний час існувало два різних кільця. Розглядаючи цю ситуацію, М. Бобров [9] запропонував периферійне кільце називати кільцем Е (від англійського слова exterior – зовнішній). Зображення з КА «Піонер-11» вказали, що в дійсності тут існує аж два кільця (Е та F) [276]. Подібно до кільця D, тут також честь відкриття матерії за межами кільця A приписується KA «Піонер-11», а не першовідкривачу В. Фейбельману.

Дещо пізніше між цими кільцями було помічено ще одне вузьке кільце G, яке знаходиться поблизу орбіт так званих коорбітальних супутників S-10

і S-11. В межах кілець знаходяться орбіти ще й інших супутників (рис. 2.14).



Рис. 5.3. Кільце D (http://nssdc.gsfc.nasa. gov/photo\_gallery)

УФ експерименти на відстані 8-25 радіусів Сатурна (483-1508 тис. км) виявили світіння лінії  $L_{\alpha}$  атомарного водню ( $\lambda = 58,4$  нм) з концентрацією ~ 600 атомів/см<sup>3</sup> [107], що приписали можливому наслідку зіткнення швидкісних метеоритів з кільцями [479]. У 2009 р. космічний телескоп «Spitzer» в IЧ променях виявив найвіддаленіше і найпротяжніше кільце (рис. 5.4), яке починається за 6 млн. км від Сатурна і простягається на відстань до 12 млн. км та має товщину близько 1,2 млн. км (нагадаємо, що товщина кільця В становить всього 5-15 м), якому приписують пилову природу. В його центрі розташовується орбіта супутника Сатурна Феби, яка може бути основним джерелом матеріалу для нього.

Загальна структура системи кілець наведена в табл. 5.1 [660, 661].

Крім згаданих широких щілин в 1953 р. Б. Ліо [438] на зображеннях з просторовою роздільною здатністю 0,23" виявив тонку структуру кілець (до 10 щілин), що підтвердили зображення КА «Вояджер-1», «Вояджер-2», «Кассіні» (рис. 5.5) та КТХ, а також дані реєстрації явищ покриття кільцями зірок [324, 406, 480, 520, 617, 632, 635, 680]. Так, кожне з кілець F та D складаються щонайменше з трьох рознесених на досить велику відстань вузьких кілечок (рис. 5.6) [615]. Для кільця D це настільки чітко виражено, що кожну його складову, в залежності від відстані, було названо D68, D72 і D73 кільцями; хоча останньому – також притаманна надтонка структура у якій окремі фрагменти розташовані через ≈ 30 км [324].



Рис. 5.4. Схематичне зображення нового кільця Сатурна і трьох супутників (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ photo\_gallery)

В середині щілини Максвела виявлено ексцентричне вузьке кільце, ширина якого міняється від 30 до 100 км (рис. 5.6) [163, 193, 228, 241]. Три складові кільця F виявились азимутально ексцентричними, які відхиляються від середнього радіуса (140 000 км) на ≈ 200 км [635], тому в деяких межах орбітального фазового кута вони є паралельними, в інших – скручуються і перехрещуються, тому інколи воно виглядає одинарним. Це було підтверджено й спостереженнями ефектів затемнення зір з КА [406] та КТХ [493]. Лише кільце G в межах просторової роздільної здатності тонкої структури не показує [422, 615]. Площина кілець практично співпадає з площиною екватора Сатурна та нахилена до площини орбіти на 26,7°, а до площини орбіти Землі – на 28,1°. Тому при русі Сатурна по орбіті площини екватора планети і кілець зміщуються паралельно одна одній, внаслідок чого схилення Землі В і Сонця В' над площиною кілець також безперервно змінюються.

	Відстань від центра						
Кільце,	в радіусах	в км	∆Rши-	Товщина	Оптична	Maca,	Аль-
щілина	планети		рина,км	KM	глибина	КГ	бедо
D	1,11-1,24	67000-	7500	?	(0,01)	?	?
		74500					
С	1,24-1,52	74500-	17500	?	0,08-0,15	$1,1 \times 10^{18}$	0,25
		92000					
Щілина	1,45	87500	270				
Максвела							
В	1,52-1,95	92000-	25500	(0,1-1)	1,21-1,76	$2,8 \times 10^{19}$	0,65
		117500					
Щілина	1,95-2,02	117500-	4700	?	0,12	5,7×10 <sup>17</sup>	0,30
Кассіні		122200					
А	2,02-2,27	122200-	14600	(0,1-1)	0,70	$6-2 \times 10^{18}$	0,60
		136800					
Щілина	2,214	133570	325				
Енке							
Щілина	2,263	136530	35				
Кіллера							
F	2,324	140210	30-500	?	0,01-1	?	?
G	2,75-2,88	165800-	8000	100-1000	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-5</sup>	6÷23×10 <sup>6</sup>	?
		173800					
Е	3,0-8,0	180000-	300000	1000	$10^{-6} - 10^{-7}$	?	?
		480000					

Таблиця 5.1. Номенклатура кілець Сатурна.



Рис. 5.5. Структура та колір кілець Сатурна (http://nssdc.gsfc.nasa. gov/photo\_gallery)



Рис. 5.7. Скани відбивної здатності (I/F) та оптичної глибини (шкала праворуч) кілець при  $\lambda = 555$  нм (лінія з точок), 814 нм (короткі штрихи) і 1042 нм (суцільна лінія) при куті нахилу кілець В = 10° і  $\alpha = 0,5^{\circ}$ ; дві лінії посередині – фотометричні скани за іншої геометрії спостережень; нижня суцільна лінія – профіль оптичної товщі кілець [193, 228]

Протягом одного сидеричного періоду обертання Сатурна (29,46 земних років) мають місце два моменти максимального розкриття кілець (В  $\approx B' = 28,1^{\circ}$ ), в які до Землі звернена північний або південний бік кілець, і два моменти, коли Сонце світить в їх торець (при B' = 0°). Через деяку відмінність схилення Землі та Сонця при B' = 0° можна інколи спостерігати освітлений лише дифузно відбитим від Сатурна випромінюванням бік кілець. За даними фотометрії була визначена їх товщина під час проходження Землі через площину кілець в 1966 р. (0,92 ± 0,57 км [31], 2,8 ± 1,5 км [257]) і в 1980 р. (1,4 ± 0,3 км [72], 1,1(+0,9, -0.5) км [620]). В подальшому дані радіозатемнення КА «Вояджер-1» ці оцінки понизили до < 10 м (кільце С),  $\approx 20$  м (щілина Кассіні) і  $\approx 50$  м (кільце А) [734].

Вважається, що радіальна структура кілець пов'язана з різноманіттям динамічних процесів [194]. На деяких їх проявах зупинимось докладніше.

1. Поблизу зовнішнього краю щілини Кассіні радіальна структура проявляється як послідовність згладжених коливань яскравості в діапазоні відстаней 120 700-121 900 км від центра Сатурна. Просторова зміна яскравості відповідає умовам, які виникають при спіральній зміні густини, що може зумовлюватись резонансом між апсідальним рухом частинок кільця та середнім рухом супутника Япет.

2. В найвіддаленішому і найширшому (~ 300 тис. км) кільці Е знаходиться орбіта 4-х внутрішніх супутників (Мімаса, Енцелада, Тефії і Діони). Його яскравість помітно міняється з відстанню від Сатурна, досягаючи максимуму на орбіті Енцелада; на рис. 2.33 видно довгі (на десятки тисяч кілометрів) викиди речовини з Енцелада, які, можливо, і є постачальниками речовини для кільця.

3. Цікавою є структура кільця F (рис. 5.8), яке складається з кількох кілечок загальною шириною біля 60 км; причому 2 чи 3 них скручені у вигляді своєрідного канату. Згідно одній з гіпотез, частинки кільця можуть електризуватись сонячним випромінюванням, або частинками сонячного походження і набувати властивостей мініатюрних електромагнітів, взаємодія яких з магнітним полем Сатурна здатна привести до переплетення кілець. З іншого боку, панувала думка, що відповідальність за цю незвичну конфігурацію несуть два невеликі супутники-пастухи [406], виявлені поблизу зовнішнього і внутрішнього краю орбіти кільця F; саме їх тяжіння може збурювати крайні частинки кільця і не давати їм можливості відходити далеко від його середини. Моделювання показало, що збурюючий вплив цих супутників може викликати рух частинок кільця по хвилястій ліні і створити спостережуване переплетення компонентів кільця.


Рис. 5.8. Переплетення кільця F Сатурна (http://nssdc.gsfc.nasa. gov/photo\_gallery)

4. В кільці F при близькому проходженні супутника Прометей були виявлені різні хвильові структури, тунелі й переплетення, а також оригінальні видовжені згустки речовини з характерним розміром 100-200 км (рис. 2.15).

Оцінка кількості кілець як > 10<sup>4</sup> зумовила розробку механізму розбиття широких кілець на багато вузьких, що першочергово приписано гравітаційному впливу супутників-пастухів. Так С. Дермот [220] дослідив гравітаційне збурення в кільці F супутниками S13 (Телесто) і S14 (Каліпсо), які обмежують ширину цього кільця. Було показано, що більший з них (Каліпсо) може збуджувати в кільці лише один резонанс першого порядку, внаслідок чого по периметру кільця збуджується система хвиль у формі рівновіддалених петель. Роль супутників-пастухів у формуванні спостережних особливостей радіального розподілу густини в кільці розглядалась багатьма дослідниками [261, 336, 719]. Коротко суть цього механізму зводиться до наступного. Оскільки будь-яка система прагне прийняти конфігурацію, що відповідає мінімуму потенціальної енергії, то еволюція кілець під впливом невеликих збурень (від супутників та від удару метеоритів) і привела до поступового розбиття на вузькі кілечка. Частинки, що рухаються на одній орбіті, мають практично однакову швидкість. Відмінність швидкості в різних напрямках може складати близько 1-2 мм/с. Проте іноді вони зіштовхуються одна з одною, а проходячи поблизу супутників під їх дією кільце незначно вигинається, перестаючи бути плоским.

Оригінальну ідею щодо структури кільця F висунув B. Давидов [19], згідно якій один з дрібних супутників є потужним джерелом твердих мікрочастинок світлого кольору, швидкість віддалення яких від цього тіла надзвичайно мала порівняно з орбітальною швидкістю тіла. Внаслідок цього частинки не можуть розповсюджуватись у довільному напрямку, а тому сімейство орбіт всієї сукупності мікрочастинок обмежене вузьким тунелем, віссю якого є орбіта батьківського тіла. Автор не виключає справедливість цієї гіпотези й щодо всієї системи кілець. Саме резонансами можна пояснити і виникнення в кільцях спіральних хвиль стиснення і вигинання, які мають вигляд своєрідних гір і западин з перепадом висоти в ~ 1,4 км, що може пояснити знайдену за наземними спостереженнями різну ширину кілець.

Застосування теорії спіральних хвиль до кілець дозволило оцінити й масу речовини, що припадає на одиницю їх площі (~ 45-60 г/см<sup>2</sup>), а також сумарну масу всіх кілець (1,5-2,0)·10<sup>22</sup> г, яка відповідає приблизно половині маси Мімаса – найменшого з так званих класичних супутників Сатурна, хоча уточнені оцінки показали, що маса кілець приблизно рівна повній масі Мімаса.

# 5.2. Спиці в кільцях Сатурна

Найцікавішими деталями на переданих КА «Вояжер-1» зображеннях були так звані «спиці» (рис. 5.9), які є радіально направленими оптичними неоднорідностями з характерним розміром 2000×10 000 км у вигляді темних утворень часто клиновидної форми, які перетинали деякі ділянки яскравого кільця В поперек його ширини на відстані в межах 104-116 тис. км від центра Сатурна [160]. Цю назву вони отримали через зовнішню схожість зі спицями колеса.



Рис. 5.9. Спиці і темні плями на кільцях (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/ photo\_gallery)

Виявилось, що при підльоті до Сатурна, коли реєструвалось розсіяне в напрямку Сонця випромінювання, спиці були на 5-10% темнішими від кільця, а після зближення з планетою, коли реєструвалось розсіяне у зворотному напрямку випромінювання – вони стали світлішими, що було приписане індикатрисному ефекту дуже дрібних частинок. Було виділено 3 типи структури спиць.

1. Широкі спиці, які спостерігаються в інтервалі відстані 100-112 тис. км від центра Сатурна і мають дифузний край і клиновидну форму. Їх ширина у ближній до Сатурна основі складала майже 20 тис. км, а активний час життя, протягом якого спиця збільшувала свою ширину складав від 4000 до 12 000 секунд.

2. Вузькі спиці з різким краєм в інтервалі відстані 104-116 тис. км; найменша ширина яких відповідає відстані коротації частинок кільця у 112 тис. км. Їх типова ширина і радіальна протяжність становлять 3 і 6 тис. км, відповідно. 3. Спиці-волокна розташовуються звичайно на відстані більше 110 тис. км і у своїй більшості зв'язані зі згаданими вище широкими спицями. Їх типова довжина і ширина 3000 і 500 км, а активний час життя менший 1000 с.

Типовий час формування спиці довжиною 6 тис. км оцінюється в ≤ 5 хвилин, найбільша швидкість формування спостерігалась на вранішньому вушку поза тінню Сатурна, хоча інколи вони спостерігалися протягом кількох годин.

Слід відмітити, що внутрішній край кільця біля основи спиці обертається навколо планети з більшою швидкістю, ніж зовнішній край біля вершини спиці і тому ці утворення повинні були б швидко зруйнуватися. Область, де спостерігаються спиці, перекриває зону кільця, що обертається навколо Сатурна з такою ж швидкістю, що і його магнітне поле. Згідно деяких уявлень це може пояснити стійкість спиць, не дивлячись на різну швидкість руху частинок [287, 288].

За отриманими при проходженні КА через площину кільця даними оцінено верхню межу підняття матеріалу спиць над кільцем у 80 км. Виявилось також, що інтенсивність і розмір спиць періодично змінюються в часі, основний період становить 621 ± 22 хвилин, який в межах похибок співпадає з періодом обертання магнітного поля Сатурна (639,4 хвилини) [1685]. Спостереження за розвитком спиць протягом 34 годин неперервної зйомки (більше 3-х обертів Сатурна навколо осі) показало, що час існування спиць від початку появи радіальної структури до її розширення становить менше 10 000 с і їх рух не співпадає ні з кеплерівським, ні з коротаційним [294]. Крім того, активність (тобто, частота появи і збільшення ширини) утворення спиць приблизно в три рази вища над нічною стороною Сатурна. Наявність спиць і їх динаміка в часі була підтверджена й пізнішими спостереженнями на КТХ [455]. Цікаво, що спиці були виявлені на деяких старих замальовках Сатурна. Так, Д. Бізлі [85] стверджує, що їх спостерігали Ф. Тербі (у 1887 р.), Е. Антоніаді (у 1896 р.) та О'Міра (у 1977 р.).

Детальні зображення кілець з КА «Кассіні» показують, що речовина спиць ніби плаває на деякій висоті над площиною кільця. Допускають, що вона утримується силою електростатичного відштовхування, вплив якої на дрібні пилинки значно більший, ніж на великі. Допускають також, що завдяки гравітаційному притягуванню і електростатичній взаємодії між частинками останні можуть концентруватися в певних областях або підніматися над площиною кілець. Якщо кільце заряджене, то однаково заряджені частинки повинні відштовхуватися одна від одної, тоді як сила гравітації утримує їх у кільці. Для крупних частинок сила гравітації більша від сили відштовхування і тому вони залишаються в кільці; для дрібних – сила відштовхування більша і тому вони піднімаються над площиною кільця.

Ще одна гіпотеза пояснювала існування спиць хвилевими явищами навколо кільця, які здійснюють вплив на дрібні частинки, що знаходяться на шляху хвилі. Пропонувалися також гіпотези, які враховували вплив атмосфери Сатурна або високоенергетичного ультрафіолетового випромінювання Сонця. В останньому випадку відштовхування виникає внаслідок того, що дрібні й крупні частинки при опромінюванні УФ випромінюванням Сонця електризуються шляхом відриву електронів від молекул поверхневого шару, а їх заряди мають однаковий знак.

Оскільки виявилось, що спиці обертаються практично синхронно з магнітосферою Сатурна, то було висунуто припущення про їх зв'язок з електромагнітним полем [632, 635], що зумовлює необхідність при побудові моделі структури кілець крім гравітаційної взаємодії враховувати ще й електромагнітну. Зокрема, було запропоновано модель руху дрібних заряджених частинок у магнітному полі [332], в якому наявні магнітні аномалії відносно орієнтації магнітного поля [403]. Внаслідок руху дрібного електрично зарядженого пилу в кільці F в оточуючій кільце плазмі має текти струм, сила якого більша 10<sup>5</sup> А. Створюване ним магнітне поле сприяє утримуванню частинок поблизу площини кільця, а також його розбиттю на вузькі кільця [332]; це було поширено на кільця Е та G [481]. безпосередньому Оскільки останні знаходяться контакті в магнітосферною плазмою, то взаємодія частинок пилу з плазмою проявляється кількома ефектами. Плазма знаходиться в стані коротації з планетою, а тому орбітальний рух частинок пилу і коротаційний рух заряджених частинок плазми, строго кажучи, мають різну швидкість, на що значно впливає те, що пилові частинки самі несуть у собі електричний заряд. Тому внесок у гальмування дають ще й кулонівські зіткнення, які мають місце в межах дебаївської сфери. З оцінок випливає, що цей ефект мусить грати відповідну роль у формуванні кільця Е. Ці частинки пилу виникають на супутнику Енцелад, а зв'язані з цією взаємодією збурення їх орбіт призводить до виносу пилу назовні. Втрата маси і зменшення розміру частинок, які зумовлені викидом речовини з поверхні під дією бомбардування зарядженими частинками, визначають характер зменшення з віддаленням від планети густини речовини в кільці (~ R<sup>-3</sup>) та оптичної товшини ( $\sim R^{-2}$ ).

На великій відстані від Сатурна на структуру кілець значно впливають великі супутники (Тефія, Діона, Рея). Ефекти другого типу зумовлені тим, що в плазмі існують нестаціонарні електромагнітні збурення, які виникають, у тому числі й під дією нестаціонарних ефектів в сонячному вітрі. Деяка частина цих збурень знаходиться в резонансі з орбітальним рухом зарядженої частинки та зумовлює зміну орбіт. В результаті мусять виникати нестаціонарні неоднорідності речовини кільця (хвилі, складки), які дійсно спостерігаються у кільці F; накладання багаторазових ефектів збурень породжує дифузійний перенос частинок в ньому. Цей перенос формує кільця F і G при сумісній дії з ефектом від супутників-пастухів, що й спостерігалось при прольотах КА «Вояджер-1», «Вояджер -2».

Дещо інший механізм природи спиць було розглянуто в роботах [282, 480], згідно якого вони складаються із заряджених частинок мікронного розміру (так званої плазми), які утворюються при зіткненні метеоритних тіл з кільцем. Допускається, що ці зіткнення ведуть до випаровування та іонізації матеріалу як падаючої частинки, так і, в деякій мірі, мішені. В принципі, може бути два види плазми: первинна плазма, яка виникає безпосередньо в процесі удару і вторинна плазма, яка створюється за рахунок наступної фотоіонізації нейтральних молекул, які викидаються при зіткненні. Згідно розрахунків, первинна плазма є менш імовірним кандидатом для утворення спиць, ніж вторинна, яка набагато сильніше «насичена» магнітним полем планети. Спиці, які зв'язані з вторинною плазмою, утворюються на освітленій стороні кілець. В такій моделі початкові точки спиць розташовуються поблизу радіуса коротації (максимальної відстані від планети, на якій можлива твердотільна коротація плазми), а сам механізм пояснює виникнення спиць в інтервалі відстані 1,63 < R < 1,95. Основний спостережний ефект має бути зв'язаний з метеороїдами метрового розміру.

Дещо в модифікованому вигляді цей же механізм подано в [339], у якій висловлено думку, що пиловий диск в середині магнітосфери планети створює новий тип кільцевого струму – пиловий, в якому, в свою чергу може розвиватися так звана **тірінг-нестійкість**, як і в звичайному плазмовому струмовому шарі зі скінченною провідністю. Не виключалось, що спостережна тонка структура кілець у системі Сатурна є реліктом цього процесу, який мав місце після утворення протокільця і перетворив його в ансамбль вузьких кілечок. Допускається, що протокільце складалось із дрібних частинок, а великі – утворилися пізніше в процесі злипання. Було також показано, що в даному випадку тірінг-нестійкість розвивалась із швидкістю на багато порядків більшою, ніж у будь-якого іншого типу нестійкості, коли при сплющенні протокільця його товщина досягає величини порівняної із сучасною.

Відзначимо, що А. Фрідман і В. Поляченко [59] запропонували модель розвитку в гравітуючому диску (протокільці) трьох типів **нестійкості**:

вікової, модуляційної та джинсової. Оскільки цей механізм не дає можливості пояснити явище відновлення спиць і квазіперідичної структури кілець, то П. Бліох і В. Ярошенко [6] розглянули азимутальні збурення, які виникають на фоні складної радіальної структури кільця В. Вони допустили, що головним у розвитку хвилеподібних збурень є поздовжні (азимутальні) зміщення частинок, радіальні відхилення яких не виходять за межі поперечного перетину елементарних кілець. При цьому враховувалося, що характерний розміри збурень (1000-10 000 км) малий порівняно з радіусом синхронної орбіти (приблизно 120 тис. км); це дозволило знехтувати кривизною течії в обмеженій по азимуту області. При цьому частота досліджуваних азимутальних збурень, яка оцінюється за часом життя спиць, з одного боку настільки великі, що це дозволяє не враховувати вплив сили Коріоліса на рух частинок і нехтувати зіткненнями; а з другого – досить малі для того, щоб не враховувати запізнення при взаємодії між окремими пучками; тобто, розглядати лише електростатичні хвилі. Це дає модель у вигляді сукупності вузьких прямолінійних потоків на відповідних радіусах, які рознесені в площині на деяку відстань. У цій моделі можливий розв'язок у двох граничних випадках. Якщо відстань між кілечками дуже велика, то розв'язок описують хвилі в тонкому ізольованому кільці, а якщо кільця змикаються, то маємо справу з суцільним плазмовим шаром.

Вище перераховані механізми пізніше деталізувались і уточнювались багатьма дослідниками [69, 308, 309, 421, 521, 591]. Серед цього різноманіття робіт розглянемо ті, в яких представлений механізм утворення своєрідної атмосфери навколо кільця. Так, в [344] було досліджено спільну дію заряджених частинок в цій атмосфері (яку можна умовно назвати іоносферою), що обертається по кільцевих орбітах навколо Сатурна, та ударну іонізацію при метеоритному бомбардуванні речовини в площині кілець. Розрахунки в цій роботі вказали на досить значну швидкість утворення нейтрального газу при випаровуванні, яке супроводжує співударяння твердих частинок. Але при цьому утворюються й іони. Було отримано, що в усьому кільці утворюється з швидкістю утворення атомів водню, яка оцінюється за вмістом атомарного водню в цій атмосфері поблизу кілець. Оцінка швидкості іонізації цих частинок дає значення ~  $2 \cdot 10^{27} c^{-1}$ .

Обертанням планети пояснюється і наявність двох різних режимів руху плазми поблизу екватора. Так, на радіальній відстані більше 1,6252 радіусів Сатурна плазмова хмара утримується в екваторіальній області, а діючий уздовж дипольного магнітного поля компонент відцентрової сили перевищує поздовжній компонент сили тяжіння й концентрує таким чином частинки біля екватора планети. Для меншої відстані навпаки, плазма втікає від екватора вздовж силових ліній магнітного поля. Можливо, що цим ефектом визначається й спостережна різка зміна оптичної товщини на відстані більше 1,64 радіусів планети. В той же час, попадання важких іонів у верхню іоносферу Сатурна може зменшити там електронну концентрацію через скорочення ефективного часу рекомбінації.

# 5.3. Походження кілець Сатурна

Д. Кассіні висловив ідею що кільця можуть бути роєм дрібних супутників, які можуть утримуватися біля Сатурна завдяки обертанню навколо нього з швидкістю, величина якої залежить від відстані до центра планети. Приблизно в той же час незалежно І. Ньютон (1666 р.) і Х. Гюйгенс (1673 р.) теоретично розв'язали задачу колового руху супутника і показали, що для його здійснення центральне тіло мусить притягувати супутник з силою, яка обернено пропорційна квадрату відстані. По суті це були перші формулювання закону всесвітнього тяжіння і вони дали можливість розрахувати швидкості руху внутрішнього і зовнішнього краю кілець що неможливо було тоді спостережно перевірити, оскільки кільця виглядали однорідно яскравими.

Більшість тогочасних астрономів не поділяли цю гіпотезу і вважали кільця монолітними дисками. Лише у 1785 р. П. Лаплас показав, що широке монолітне кільце не буде стійким тому що відцентрова сила врівноважить силу тяжіння до Сатурна тільки в його середині, а відсутність такої рівноваги на внутрішньому і зовнішньому краях зумовлюватиме виникнення напруги, яка прагнутиме розламати кільце, яке внаслідок своєї малої товщини не змогло б протистояти цьому. Тому Лаплас вважав, що кільце має бути розділене на велике число вузьких концентричних кілець, кожне з яких має обертатися з швидкістю, яку мав би супутник на круговій орбіті кільця. Тобто, він був близький до створення моделі кілець як рою самостійних супутників, хоча цього останнього кроку він не зробив.

У 1885 р. С. Ковалевська показала, що перетин кільця має не еліптичну форму. Дж. Максвел з аналізу стійкості кількох моделей кілець знайшов, що для стабілізації обговорюваних Лапласом концентричних кілець необхідно додати в одній з їх точок супутник з масою в 4,5 маси кілець, а також показав що кільце з багатьох супутників, що рухаються незалежно, може бути стійким у випадку якщо припустити що середня густина речовини в його об'ємі менша 1/300 середньої густини Сатурна.

152

Вирішальним у виборі природи кілець став розроблений в 1859 р. метод спектроскопії, який дозволив за ефектом Доплера визначати швидкість їх руху. Вперше незалежно це зробили в 1895 р. А. Бєлопольський, Дж. Кілер та А. Деландр, які визначили, що швидкість руху зовнішнього краю кільця А, внутрішнього краю кільця В і проміжку між ними становили 20, 16 і 18 км/с, що практично співпало з швидкістю, яку мали б супутники Сатурна в даних точках при русі по коловій орбіті.

Тривалий час вважалося, що кільця є продуктом розриву припливною силою одного із супутників, який колись наблизився до Сатурна. Але зараз домінує уявлення про те, що кільця Сатурна (мабуть, як і інших планет) є залишками первинної протопланетної хмари протяжністю в мільйони кілометрів. Із зовнішніх її областей сформувалися супутники, а у внутрішній – утворення супутників не відбулося. Оскільки швидкість взаємних зіткнень збільшуються при наближенні до планетного тіла, то біля кожної планети є область, де частинки, досягнувши певного розміру починають розпадатися від взаємних зіткнень. Протягом мільярдів років зіткнень 10 метрові частинки дійшли до такого рихлого стану, що розсипаються від найменшого поштовху при швидкості в мм/с. За існуючих умов, у кільцях Сатурна будь-яка крупна частинка за декілька днів або тижнів проходить повний цикл від руйнування до наступного відновлення. Така взаємна конкуренція, яка не дає можливості утворитися крупним супутникам, слабшає у міру віддалення від планети. Тому на деякій відстані частина речовини перетворюється в супутники, а частина все ще перебуває в роздробленому стані у вигляді кілець.

До речі, час від часу на знімках КА «Кассіні» з високою просторовою роздільною здатністю спостерігались ефективні видовища – зіткнення глиб за відносної швидкості в  $\approx 1$  мм/с. При цьому дві глиби розміром у кілька метрів починають поступово насуватися одна на одну, зминаючи доволі рихлий поверхневий шар та не витримавши взаємного тиску при такому повільному ударі вони розвалюються на окремі частини. Два залишки первинних тіл продовжують рух, а скинуті з них снігові «намети», грудки і сніжний пил повільно розлітаються в різні боки. Через кілька днів «постраждалі» частинки знову виростають, поглинаючи при зіткненнях величезну кількість дрібніших сніжинок у кільцях.

Нагадаємо, що раніше відомий дослідник кілець Л. Еспозіто також вказував на те, що кільця не виглядають як рівномірні утворення з величезної кількості кам'яних і крижаних частинок. Замість цього частинки кілець регулярно скупчуються у великі грудки (або невеликі супутники), які через деякий час знову руйнуються для того щоб тут же надати будівельний матеріал новим мікросупутникам, і т. д. (рис. 5.10). Така модель була запропонована тоді, коли під час одного з покриття кільцями зірки Л. Еспозіто з колегами відкрили 13 доволі крупних об'єктів у кільці F розміром від 27 м до 10 км, майже всі з яких виявилися своєрідним конгломератом зі звичайних частинок кілець, які з якоїсь причини тримаються разом і які отримали імена відомих кішок (Mittens i Fluffy), оскільки вони «приходять і йдуть куди і коли хочуть та мають кілька життів».



Рис. 5.10. Комп'ютерна симуляція фінальної стадії утворення скупчення частинок у кільцях. В його основі — супутник діаметром 61 м, навколо якого конгломерат з частинок кільця діаметром від сантиметра до кількох метрів. По осях відкладені кілометри (http://nssdc.gsfc.nasa. gov/photo\_gallery)

Було також виявлено народження і щезнення цілих кілець, життєвий цикл яких обчислюється кількома роками [630]. Складним є питання віку кілець, тому що немає явних вказівок на те, що вони виникли разом з планетою. Так, у докосмічну еру їх вік оцінювався в ~ 100 млн. років, а після експериментів на КА «Кассіні» за даними УФ спектрофотометрії – в мільярди років [147].

### 5.4. Оптичні властивості кілець Сатурна

Зміна блиску зі зміною сонячного фазового кута. Численні спостереження блиску кілець в інтегральному світлі в першій половині 20го століття (підсумок яких можна знайти в [7]), показали досить різке збільшення їх відбивної здатності при підході до  $\alpha = 0^{\circ}$ , що підтвердили й пізніші спостереження [13, 30, 224, 262, 431, 433, 435, 878]. Так, спостереження в 1959 р. в системі фільтрів UBVR вказали, що в межах  $2 \le \alpha \le 5^{\circ}$  блиск лінійно (з коефіцієнтом 0,036<sup>т/</sup>градус) зменшується зі збільшенням  $\alpha$  а при менших – існує ефект опозиції (рис. 5.11), який імовірніше за все пояснюється оптико-когерентним механізмом.



Рис. 5.11. Фазова залежність блиску кілець А, В, С і Е за спостереженнями на КТХ і при наземних спостережень [262], який взято з [216]

Його амплітуда становила 0,28<sup>m</sup> у синіх променях і 0,23<sup>m</sup> в жовтих, а також збільшувалась зі збільшенням схилення Сонця В'. Спостереження на

КТХ і КА [70, 216, 228] уточнили ці дані та значно розширили інтервал  $\alpha$  (рис. 5.12). Доцільно зауважити, що дані для  $\alpha < 0,05^{\circ}$  фіктивні тому що на відстані Сатурна діаметр диску Сонця становить ~ 0,05°.

Для кільця D нестачу спостережних даних з космічних апаратів «Піонер», «Вояджер-1» і «Вояджер-2» в інтервалі 0,14  $\leq \alpha \leq 6,3^{\circ}$  було компенсовано наземними спостереженнями [412] через центрований на потужну смугу поглинання метану при  $\lambda = 887$  нм світлофільтр, що сильно зменшило інтенсивність фону неба навколо Сатурна. Оскільки блиск цього кільця становив всього 0,02-0,03 від максимального блиску кільця В, то через велику похибку вимірювань вдалося встановити лише наявність фазової залежності блиску, форма якої імовірніше за все нагадує інші кільця.

Тіньовий механізм формування опозиційного ефекту в зміні блиску Місяця став розроблятися в 1960-х роках [45], тоді як його аналог щодо кілець Сатурна відносить нас аж до 1887-1893 рр., коли Г. Зеєлігер побудував теорію явища взаємного затемнення частинок у кільцях [605], яка мала пояснити зменшення яскравості кілець при збільшенні α. Оскільки він вважав, що тінь частинок має циліндричну форму, то розрахунки не співпали зі спостережними даними. Пізніше, коли тіні надали форма конуса кінцевої довжини [7, 9, 262, 433], вдалося досягти хорошого співпадіння і визначати так звану об'ємну густину кілець

 $D = (4/3) \pi r^3 (N/R),$ 

де r – радіус частинок, N – загальна їх кількість, R – об'єм кільця. Розглядалися наближення «конус-циліндр» або без врахування дисперсії розміру частинок, або ж з її врахуванням у такому вигляді

 $d\mathbf{N} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{r}^{-\mathbf{n}} \cdot d\mathbf{r}, \quad \mathbf{r}_1 \le \mathbf{r} \le \mathbf{r}_2 \tag{5.1}$ 

в якому «а» та «п» – деякі параметри моделі.

Значення параметра «а» визначається із стандартної умови нормалізації: a· $\int N(r)dr = 1$  в межах розміру частинок від r<sub>1</sub> до r<sub>2</sub>. Вже в першій із своїх робіт М. Бобров [7] для об'ємної густини отримав оцінку ~ 0,001, дещо пізніше – 0,005 при n = 2, більші оцінки отримали Ф. Франклін та А. Кук [262] з аналізу власних спостережень у моделі великих сферичних частинок: модель 1 (частинки вкриті замерзлими крапельками розміром 7 мкм, об'ємна густини кільця А рівна 0,001 та кільця В рівна 0,0013) модель 2 (середній розмір частинок 300 мкм, об'ємна густини кільця А – 0,006, кільця В – 0,004, товщина кілець 3 і 5 см).



Рис. 5.12. Фазові криві блиску головних кілець і поділу Кассіні при малих α (ліворуч), повна фазова крива (праворуч) та їх порівняння з моделями [9] (ліворуч) і [431] (праворуч) [216]

порядок більше значення об'ємної Практично на густини D=0,020±0,004 для кільця В приведено в роботі [433], в якій також було оцінено альбедо одноразового розсіяння в червоних (0,7-0,92) і синіх (0,5-0,7) променях. Крім тіньового механізму свого часу було запропоновано механізм, в основу якого покладено дифракцію світла на індивідуальній частинці [613], а наприкінці 20-го століття – ще й механізм когерентного розсіяння (слабкої локалізації фотонів), який зараз є загальновизнаним, його досить детально викладено в [45]. Зрозуміло, що в дійсності опозиційний ефект є комбінацією і когерентного, і тіньового механізму; для їх сумісної дії було запропоновано деякі аналітичні моделі [612] але лабораторні вимірювання і їх аналіз показали практичну неможливість такого поєднання [613].

Зміна блиску кілець з орбітальним фазовим кутом (азимутальна залежність). На початку 20-го століття Е. Шенберг [613] за спостереженнями в 1913-1918 рр. виявив, що східне вушко кільця постійно яскравіше західного, пізніше це було підтверджено в роботах [250-252] і потім активно досліджувалось [13, 36, 136, 162, 397, 431, 432, 434, 435, 573]. Було виявлено, що азимутальна залежність зовсім слабо виражена для кільця В і найпомітніша – для кільця А [432] та є практично синусоїдальною [228]. Форма азимутальної залежності кільця А помітно міняється зі зміною нахилу кільця (рис. 5.13), тоді як її залежність від  $\lambda$  є проблематичною (рис. 5.14) [434]. Кільце А є голубішим від кільця В, хоча їх довготна залежність практично однакова [434].



Рис. 5.13. Азимутальні варіації інтенсивності в максимумі яскравості кільця А Сатурна у червоній ділянці спектра при різних значеннях сонячного фазового кута [434]



Рис. 5.14. Азимутальні варіації інтенсивності ділянки кільця А Сатурна з максимальною яскравістю при значені фазового кута  $\alpha = 2,5^{\circ}$  у трьох ділянках видимого спектрального діапазону: точки – червоний, кружки – зелений і трикутники – синій фільтри [434]

Величина максимальної амплітуди азимутальної залежності A = [I /  $F(L = 336^{\circ}) - I / F(L = 264^{\circ})$ ] / [I /  $F(L = 264^{\circ})$ ] міняється зі зміною відстані фрагмента кільця від центра диска Сатурна (рис. 5.15).



Рис. 5.15. Залежність максимальної амплітуди відбивної здатності кільця А з відстанню фрагмента (R в тисячах кілометрів) від центра диску Сатурна. Пунктирні вертикальні лінії показують місцеположення резонансу супутників: Пандора 5:4 – а, Прометей 6:5 – б, Янус 4:3 – с, Янус 5:4 – d, Мімас 5:3 – е та f, Янус 6:5 – g [228]

Детально зміна амплітуди довготної залежності з розкриттям кілець досліджувались за спостереженнями на КТХ з 1996 по 2004 рр. коли було отримано 378 зображень з просторовою роздільною здатністю приблизно 300 км/піксель (рис. 5.16), на якому по осі абсцис відкладено величину В<sub>еff</sub>



Рис. 5.16. Зміна амплітуди асиметрії кілець (шкали ліворуч) різних структурних елементів кілець А (верхні криві) та В (нижні криві) від нахилу кілець В<sub>eff</sub>, які позначені відстанню в тисячах км від центра Сатурна (наприклад, А128.0 – фрагмент на відстані 128 тис. км) [270]

Не виключено, що величина асиметрії кільця В для різних років є різною. Так, у [301] за опрацюванням всіх існуючих на той час спостережних даних для кільця В було виявлено, що найчастіше яскравішим було східне вушко (максимальне значення амплітуди приблизно в 20% спостерігалось в 1926 і 1969 рр.), в 1942-1958 рр. асиметрія практично була відсутня, в 1970 р. яскравішим стало західне вушко. Можливо зміною в часі пояснюється й те, що на противагу даним у роботі [429], отримані в жовтні-листопаді 1977 р. в інтервалі 5,89°  $\leq \alpha \leq$  6,29° у діапазоні  $\lambda$ 374-748 нм дані спектральної залежності асиметрії блиску західного й східного вушок практично не було виявлено в кільці В [36], тоді як у кільці А при  $\lambda = 374$  нм західне кільце було майже в два рази темнішим від його східної частини (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Спектральна залежність інтенсивності західного (+) і східного (о) вушок кілець А та В [36]

Для зовнішнього краю кілець А й В на відстані 2,27 та 1,95 радіуса Сатурна було виявлено асиметрію їх форми. Це можливо зумовлено тим що вони рухаються по орбітах, які близькі до орбіт тіл що знаходяться в так званому **ліндбландівському резонансі** низького порядку. Дані для кільця А вказують на семипелюсткову фігуру з амплітудою радіального відхилення від кола на  $6,7 \pm 1,5$  км та яка рухається із середньою кутовою швидкістю коорбітальної системи супутників. Край кільця В має практично двопелюсткову форму з радіальною амплітудою  $74 \pm 9$  км яка обертається з середньою кутовою швидкістю руху Мімаса. Для вертикальної товщини кільця В у незбуреному місці встановлено верхню межу в 10 м [561].

**Поляризаційні властивості.** Подібно до всіх тіл Сонячної системи, поляриметричні спостереження кілець (сумарно та окремо кілець А й В) в

інтегральному світлі вперше провів Б. Ліо [438] в 1923-1926 рр. (рис. 5.18). Як видно, максимальне значення ступеня від'ємної поляризації знаходиться в межах фазових кутів  $0,5^{\circ} \le \alpha \le 1,5^{\circ}$  що особливо чітко відслідковується для кільця В. Не виключено, що це пов'язано з тим що саме для цього кільця було отримано значно більше спостережних даних.



Рис. 5.18. Фазова залежність ступеня поляризації кілець В (ліворуч) та А (праворуч) Сатурна в інтегральному світлі [547]

Пізніші нечисленні спостереження кілець [11, 52, 222, 305, 357, 383], якщо не приймати до уваги розширення спектрального інтервалу, лише заплутали ситуацію з виглядом фазової залежності. Так, якщо спостереження кільця В в 1958-1960 р. при  $\lambda = 560$  нм не виключали наявності двох гілок від'ємної поляризації (відповідно при  $\alpha \approx 0,5^{\circ}$  і в межах 2-6°), то дані за 1972-1976 роки при  $\lambda = 359, 380, 435, 520$  і 580 нм чітко виявили лише стандартну гілку від'ємної поляризації (лінія на рис. 5.19) [222].



Рис. 5.19. Виправлена за вплив освітлення Сатурном фазова залежність ступеня поляризації кільця В Сатурна у візуальних променях [223]

В перший період площина поляризації подібно до галілеєвих супутників займала деяке проміжне значення між 0° та 90°, що сумісне з моделлю несферичних орієнтованих частинок, хоча на графічній залежності Р(а) в роботі [222] ступеню поляризації було приписано знак мінус. Повторне опрацювання спостережень за 1960 р. [223], в процесі якого неописаним методом А. Дольфюс виправив спостережні значення за зумовлений ефект. який освітленням кільця лифузно відбитим випромінюванням Сатурна,, значно зменшило розкид спостережних даних внаслідок чого добре виписались обидві гілки поляризації (точки на рис. 5.19). Зі зменшенням λ спостерігається суттєве збільшення Р [383]. Поляризаційні властивості східного вушка кільця A при  $\lambda = 553$  нм не змінюються з нахилом [357].

Спектрофотометричні властивості кілець. В 1940-х роках Д. Койпер [148] виявив, що при  $\lambda > 1,5$  мкм відбивна здатність кілець є низькою та зменшується зі збільшенням  $\lambda$ , в подальшому [32, 36, 39, 67, 150, 151, 158, 417, 460, 512, 530, 734] були виявлені смуги поглинання при різних  $\lambda$  (рис. 5.20). Порівняння даних на рис. 5.20 і 2.20 показує, що при  $\lambda \le 2,4$  мкм спектр добре узгоджується зі спектром водяного льоду (інею).



Рис. 5.20. Спектр кілець А, В, С і щілини Кассіні. Вкладка – спектр з кращою роздільною здатністю. Трикутниками внизу позначено границю між фільтрами порядків. Вертикальні лінії з точок показують так звані гарячі пікселі на ПЗЗ матриці спектрометра [512]

Згідно спектрофотометрії з КА «Кассіні» окремі фрагменти кільця D характеризуються різною спектральною відбивною здатністю, що може зумовлюватись різним розміром частинок; порівняння спостережень і модельних спектрів вказує на такий розмір частинок: 10-20 мкм на відстані 74 100 км (за межею кільця D), 2-10 мкм для деталі D73 і 1,7-2,5 мкм для деталі D72 [324].

Спектральна відбивна здатність кілець в УФ при  $\lambda = 116-175$  нм [722] і  $\lambda = 210-430$  нм добре відповідає моделі частинок із водяного льоду. В спектрах кілець А, В, С і щілини Кассіні (рис. 5.20) видно депресії поблизу фундаментальної смуги поглинання води при  $\lambda = 3,1$  мкм і 1,5, 2,0 і 4,5 мкм. У кільці А та на внутрішній частині кільця В є також смуги поглинання при λ = 1,04 і 1,28 мкм; тоді як у кільці С та в щілині Кассіні вони відсутні. Крім того, в щілині Кассіні і її зовнішній кромці смуги поглинання водяного льоду при λ = 1,5 i 2,0 мкм значно слабкіші. Помітний також червоний нахил континуума між  $\lambda = 0.85$  і 1.4 мкм, який відчутно відрізняється від лабораторних даних для чистого водяного льоду і від інших п'яти щілин, які більше схожі на спектр кільця в тій же області; це може бути пояснено присутністю на льодяній поверхні помітної кількості силікатних зерен. У спектрі всіх деталей ясно видно так званий пік Френеля при  $\lambda = 3,1$  мкм (хоча й невеликий) і незвичайно сильне підвищення яскравості в області щілини Кіллера, що наводить на думку про невеликий розмір реголітового зерна (менше 10 мкм) на льодяній поверхні частинок у щілинах.

З порівняння спостережного і лабораторного спектрів зроблено висновок, що поверхня кілець А й В як мінімум дуже чиста і мало запилена, розмір силікатних пилинок знаходиться в межах 5-20 мкм.

#### 5.5 Теплові властивості кілець

Вивчення теплових властивостей кілець у тепловому [69, 70, 272, 310, 437, 459, 419, 519, 520, 578, 629] і радіо [88, 103, 192, 229, 238, 239, 352] діапазонах виявили досить специфічну зміну температури від  $\lambda$  (рис. 5.21, 5.22) і кута нахилу кілець. Так, згідно [520] яскравісна температура кілець А та В при  $\lambda = 22,7$  мкм при збільшені кута нахилу кілець від 16,3° до 26° збільшилась на 3,4 ± 1,5 К та 4,4 ± 0,5 К, тоді як у кільця С вона зменшилась на 3,1 ±2,0 К. Так, спостереження в діапазоні  $60 \le \lambda \le 180$  мкм за допомогою розміщеного на літаку 90-см телескопа (обсерваторія Койпера) в березні 1980 р. під час проходження Землі через площину кілець показали суттєве зменшення температури зі збільшенням  $\lambda$  (на  $\lambda =$  180 мкм вона була на 20 К меншою, ніж при  $\lambda = 60$  мкм) [459]. Вважається, що в інтервалі  $\lambda$ (40-10000) мкм температура кілець А й В змінюється з  $\lambda$  згідно виразу



 $T(λ) = 87,5K (39 \text{ мкм/λ})^{0.45}.$ (5.3)

Рис. 5.21. Залежність температури кільця А від довжини хвилі [437]



Рис. 5.22. Зміна середньої яскравісної температури кільця В з (трикутники довжиною хвилі: спостережна й кружки), модельні випромінювання (штрихова суто теплового лінія) розрахунки iз врахуванням розсіяння сонячного світла на частинках кілець (неперервна лінія) [232]

Такий характер зміни Т підтвердили й проведені в жовтні 2002 і березні 2003 рр. спостереження при  $\lambda = 1,3$  і 3,0 мм [232] (рис. 5.22), коли кільця були максимально розкритими (B = 26°). Це дозволило побудувати карту просторового розподілу яскравості. В теплових властивостях кілець Сатурна також спостерігається азимутальна асиметрія. Так, згідно [272] в ділянці спектра 16-26 мкм західні вушка кілець В й А на 2 К а кільця С на 4 К виявилися теплішими. Спостереження неосвітленої сторони кілець дали нижчу температуру порівняно з освітленою Сонцем. Так, в діапазоні  $\lambda$ (4-56) мкм Т ~ (50-60) К для кільця А, більше 50 К для кільця В і 85 К для кільця С) [310]. Приблизно таке ж значення для кільця В (56 ± 1 К) отримане і при  $\lambda$  = 19,8 мкм [686].

Виявлено, що температура кілець змінюється з їх нахилом згідно залежності

$$T^4 = 56^4 + 1 / 52 \cdot 10^8 \cdot \sin B, \tag{5.4}$$

де перша складова враховує освітлення Сатурном, друга – Сонцем. У тепловій ділянці спектра також спостерігається тонка структура кілець [376].

#### 5.6. Радіолокаційні спостереження

Активна радіолокація кілець Сатурна вперше була здійснена в довжині хвилі 12,6 см в грудні 1972 - січні 1973 рр. за допомогою 64-м радіотелескопу в Голдстоуні коли було зареєстровано неочікувано велику потужність відбитого радіосигналу, який відповідав коефіцієнту відбивання 62 ± 6% [975]. Дещо пізніше РЛ при  $\lambda$  = 3,5 та 12,6 см не виявила суттєвої різниці в спектральних розсіювальних властивостях але вказала на суттєву деполяризацію відбитих променів [287]. Зa спостереженнями при  $\lambda = 12,6$  см в 1977-1979 рр. було визначено їх радіолокаційне альбедо:  $0.24 \pm 0.06$ ,  $0.27 \pm 0.07$  та  $\leq 0.27$  при куті нахилу кілець 18,2, 11,7 та 5,6°, для перших двох кутів було визначено ще й міру деполяризації:  $\mu_c = 0.57 \pm 0.12$  і  $0.40 \pm 0.05$  відповідно на перших двох кутах [531]. Що стосується окремих кілець, то при  $\lambda = 12,6$  см відносна відбивна здатність кільця А становить 0,9 від відбивної здатності кільця В, для кільця С – 0,5. Виявилось, що різні частини кільця В мають різну відбивну здатність, а найбільшу – його зовнішня частина; для зовнішньої частини кільця А взагалі не було зареєстровано відбитого сигналу. Спектр потужності відбитого сигналу залежить від нахилу кілець так, що внесок енергії його центральної частини зменшується зі зменшенням їх нахилу [1609]. РЛ дослідження при  $\lambda$  = 12,6 см в 1999-2003 рр. [511] встановили таке.

1. Розподіл відносної (по відношенню до найяскравішої в цій довжині хвилі частини кільця В) відбивної здатності кілець по їх радіус-вектору (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Відносна відбивна здатність OC+SC зображень (суцільні горизонтальні лінії вздовж кілець Сатурна) накладена на отриману за спостереженнями явища покриття зірок кільцями структуру останніх; R – в тисячах кілометрів [511]

2. Зміну з кутом нахилу величини поперечного перетину ортогональних складових поляризованого по колу променя ( $\sigma_{sc}$  та  $\sigma_{oc}$ ,), їх сумарного значення  $\sigma_{\tau}$  і ступеня деполяризації  $\mu_c$  (рис. 5.24).

3. Асиметрію відбивної здатності кільця A, амплітуда зміни якої  $A'=(I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$  зменшується зі збільшенням кута нахилу від 0,13 при B = -20° до 0,10 при B = -26° (рис. 5.25).



Рис. 5.24. Залежності поперечного перетину ортогональних складових поляризованого по колу променя та міри деполяризації від нахилу кілець. Точки – [511], світлі кружки – [287, 288, 531]; 3.5 см – [287]. Взято з [511]



Рис. 5.25. Зміна нормованої амплітуди асиметрії відбивної здатності кілець на довжині хвилі 12,6 см (зверху-вниз) в 2000, 2001 і 2003 роках [511]

### 5.7. Оптична товщина кілець і розмір частинок

Оцінка оптичної товщини кілець Сатурна велась як опосередкованими (аналіз відбивної здатності та інтенсивності теплового випромінювання), так і прямими (за ефектом ослаблення, наприклад, світіння зорі при її проходженні поза кільцями) методами. Відзначимо, що перші оцінки були неоднозначними тому що значною мірою пов'язані з питанням щодо характеристик частинок кілець (спектральним значенням фізичних показника заломлення та функцією розподілу частинок за розміром). Так, аналіз даних про блиск освітленого боку кілець привів до таких оцінок оптичної товщини: 0,38 ± 0,11 (A), 0,61 ± 0,11 (B) та 0,03 ± 0,01 (D) [246]; 0,45-0,57 (А) та 0,014-0,022 (щілина Кассіні) [435]; за даними для неосвітленого боку кільця А - 0,2 [307]. Приблизно такі ж оцінки були отримані за спостереженнями в радіодіапазоні. Так, в [196] стверджується, що теплове випромінювання кілець при  $\lambda = 0.83, 3.71, 6.0, 11.1$  та 21 см відповідає значенню  $\tau = 1.5 \pm 0.3$  у візуальних променях. В інтервалі  $\lambda =$ 1,3-6 см не було виявлено спектральної залежності т, хоча її величина в серпні 1981 р. і січні-лютому 1982 р. була різна (відповідно 0,28 ± 0,10 і 0,48 ± 0,10) [206]. Поряд з цими опосередкованими методами практично прямими є оцінки τ із спостережень ефекту затемнення зорі кільцями, коли ослаблення її блиску пропорційне множнику exp[-т / cosB]. Цю ідею запропонував Зеєлігер у 1880-х роках і до 1960 р. її було реалізовано 6 разів (1917, 1920, 1939, 1957, 1958 та 1960 р.); за цими даними було отримано значення т = 0,5-0,9 для кільця A і 0,3-0,7 для кільця B [8]. Такого типу спостереження активно проводились на КТХ та з КА [101, 228, 244, 270, 337, 406, 595] (рис. 5.26).

Як бачимо, реальне значення оптичної товщини т виявились у рази більшими а її максимальне значення припадає на інтервал довжини хвиль  $\lambda$ = 91,2-170 нм; крім того, для 40% поверхні кільця В в межах відстані від центру Сатурна 103-114 тис. км сигнал взагалі не реєструвався, що вказувало на значення  $\tau > 3,5$  [595]. В [796] показано, що для кільця А максимальне значення  $\tau$  припадає на  $\lambda = 490$  нм, тоді як для кільця F спектральне значення так званої **еквівалентної оптичної товщини** 

$$\mathbf{A} = \int \boldsymbol{\tau}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \tag{5.5}$$

в діапазоні  $\lambda = 270-740$  нм практично не показує відхилення від середнього значення A = 7,41 ± 0,15 км у всьому спектрі [101].



Рис. 5.26. Зверху – радіальні профілі альбедо *I/F* кілець при  $\lambda = 336$  і 814 нм. Заштриховані області показують відмінність яскравості між східною й західною частинами кілець при  $B = -10^{\circ}$ . Внизу – радіальний профіль оптичної товщини кілець С, В й А у візуальних променях. Основні частини кілець розмежовуються вертикальними лініями. R – в тисячах кілометрів [270]

Із експериментів по радіозатемненню на КА «Вояджер-1» і «Вояджер-2» було знайдено, що при  $\lambda = 3,6$  см  $\tau = 0,65-0,80$  для кільця А, більше 1 – для кільця В, 0,02-0,28 – для кільця С і 0,15-0,65 – для щілини Кассіні [699]. Крім того, було встановлено зміну оптичної товщини  $\tau$  вздовж радіусавектора кільця С, внутрішньої частини кільця В (приблизно 0,25 його протяжності), щілини Кассіні та кільця А [696]. Так, на відстані 0,75 зовнішньої протяжності кільця В при  $\lambda = 3,6$  см  $\tau \ge 1,2$ . В кільці F було виявлено 4 вузькі деталі протяжністю  $\leq 2$  км, які помітні лише при  $\lambda = 3,6$  см. Ще дві вузькі деталі було знайдено в кільці С на відстані 1,35 і 1,51 радіуса Сатурна, та ще по одній – в щілині Кассіні на відстані 2,01 і в кільці А на відстані 2,12 радіусів Сатурна.

Оскільки при  $\lambda = 21$  см значення т було меншим, ніж при  $\lambda = 3,7$  см, то було зроблено висновок, що більше 30% частинок у кільцях мають розмір більше 1 м а мінімальний розмір не може бути менше 1 мм. При  $\lambda = 3,6$  і 13 см в моделі кільця з малим значенням т і обмеженою кратністю розсіяння було отримано, що розмір частинок по закону (5.1) знаходиться в межах від 1 мм до 20 м, а параметр n = 3,1 для кільця C, 2,8 для щілини Кассіні, для кільця A значення параметра n збільшується зі збільшенням радіус-вектора від 2,7 до дещо більше 3 [733].

Розрахунки в моделі багатошарової однорідної будови кілець вказали на ймовірність розподілу кількості частинок, який характеризується різким спадом при радіусі частинок близько 4-5 м. Для інтервалу розмірів 0,01-1 м значення параметра n = 3,4 та 3,3, на відстані 1,51 і 2,01 радіусів Сатурна. Відносний внесок в ослаблення світла частинками з розміром > 1 м становить 1/3, 1/3, 2/3 та 1 [441] на відстані 1,3-1,4, 1,50-1,52, 2,00-2,02 і 2,08-2,16 радіусів Сатурна; відносна доля внеску частинок з радіусом в межах 0,01-1 м оцінюється, відповідно, в 0,58, 0,54, 0,23 і 0 в рамках багатошарової моделі, та 0,67, 0,67, 0,50 і 0,50 для одношарової [735].

Розмір частинок визначався й за даними РЛ експериментів. Вперше це зробили Дж. Казі та Дж. Поллак [195], які розрахували абсолютну величину відбивної здатності кілець та її залежність від довжини хвилі а також ступінь деполяризації відбитого сигналу. Для частинок, розмір яких порівняний з довжиною хвилі, приймалась модель несферичної частинки. Було знайдено, що у випадку, коли кільця представляють собою системи товщиною в багато частинок, погодження зі спостереженнями було досягнуто для випадку, коли вони складаються з водяного льоду з незначним вкрапленням металічних частинок, розмір яких знаходяться в межах від сантиметрів до метрів.

Незалежність радіолокаційної відбивної здатності від довжини хвилі вимагає наявності широкого інтервалу розміру частинок у законі їх розподілу по розмірах у вигляді, представленому формулою (5.1) з показником n = -3. Хоча існує й інший розв'язок з вузьким інтервалом дисперсії розміру частинок при середньому їх радіусі близько 6 см. В [472] в моделі хаотично орієнтованих несферичних частинок типу чебишевських і сфероїдів різної витягнутості для закону їх розподілу по розмірах типу (5.1) були проаналізовані приведені вище залежності міри деполяризації  $\mu_c$ 



від кута нахилу кільця в рамках механізму когерентного розсіяння та для різних значень оптичної товщини.

Рис. 5.27. Порівняння спостережних (точки) та модельно розрахованих для чебишевських частинок з різними значеннями ефективного радіуса частинок г<sub>еff</sub> та міри деформації сфери ζ (суцільні лінії для різних значень оптичної товщини) [472]

Нагадаємо, що відхилення розміру  $r(\theta)$  чебишевської частинки від сферичної з радіусом  $r_0$  визначається виразом

$$\mathbf{r}(\theta) = \mathbf{r}_{\rm o}(1 + \zeta \cos n\theta), \tag{5.6}$$

у якому  $\zeta$  – міра деформації сфери, а  $\theta$  – полярний кут. Для сфероїдів таке відхилення визначається відношенням a/b їх мінімального «а» та максимального «b» розмірів. Виявилося, що зі спостережними даними найкраще погодження було досягнуто лише для чебишевських частинок при значеннях  $\tau$  = 2-3, ефективного розміру частинок в межах 4-10 см та міри деформації в межах від 0,02 до 0,08 (рис. 5.27).

Природа типової частинки кільця. Хоча космогонічні міркування припускають близькість хімічного складу кілець і внутрішніх супутників Сатурна, але між окремими кільцями існує помітна відмінність, що може бути пов'язане з тим що матеріалом для різних кілець служать різні супутники. В роботі [216] запропоноване таке розбиття фізико-оптичних характеристик кілець Сатурна на окремі підгрупи: в одну групу попадають кільця А й В, в іншу – кільце Сатурна Е та супутник Енцелад; кільце С розміщується трохи осторонь і за своїми характеристиками більше схоже на кільця Урана й Нептуна.

## Розділ 6. Кільця Юпітера

В 1950-х роках, розробляючи гіпотезу, згідно якої комет вулканізм джерелом £ на Юпітері. СК Всехсвятський прийшов ЛО висновку. шо В його екваторіальній площині мусить бути кільце [16], якому приписувалась темна смужка уздовж екваторіальної зони яка час від часу спостерігається на Юпітері.

В середині 1970-х років аналіз даних з вимірювання магнітного поля з борту КА «Піонер-11» показав, що в ньому досить великими (відносно дипольного) є квадрупольний (24%) та октупольний (21%) моменти, що зумовлює суттєве відхилення сумарного планетарного поля відносно магнітного поля зміщеного диполя на відстані <  $3R_{10}$ . Тому виникаюча сильна асиметрія сумарного магнітного поля має зумовлювати суттєве підвищення концентрації речовини в екваторіальній площині Юпітера, яку поставляють туди супутники Іо та Амальтея [508]. Проте лише передані КА «Вояджер-1» і «Вояджер-2» зображення з просторовою роздільною здатністю близько 600 км [355, 537, 634] не лише підтвердили існування кільця (рис. 6.1), але й виявили його структуру (рис. 6.2, 6.3).



Рис. 6.1. Кільце Юпітера (04.03.1979) (http://photojournal.jpl.nasa.gov/) Рис. 6.2. Фрагмент кільця Юпітера (http://photojournal.jpl.nasa.gov/)

На зображеннях при великому значенні фазового кута α зверху і знизу кільця на відстані до 10 тис. км було виявлено світіння (гало), яке займало практично весь простір між планетою та кільцем (рис. 6.4), що було приписано розсіянню світла на пилових частинках [168].



Рис. 6.3. Радіальний профіль кілець Юпітера. Барами сірого кольору показані орбіти Амальтеї і Теби [214]



Рис. 6.4. Фрагменти кілець Юпітера (внизу) і своєрідної атмосфери навколо них (вгорі) за даними КА «Галілео» при α→180° [524]

Оскільки нахил площин екватора та орбіти Юпітера становить трохи більше 3° (нагадаємо, що в Сатурна – майже 27°), то із Землі кільце постійно спостерігається практично в торець. Саме тому при наземних спостереженнях у візуальних променях, в яких світіння планети створює суттєвий фон неба, таке малопотужне кільце в принципі неможливо було помітити. Ситуація змінилася при спостереженнях в довжині хвиль, які відповідають потужним смугам поглинання метану [84, 212, 356, 508, 730] у яких відбивна здатність Юпітера щонайменше в 20 разів менша.

Ефективним виявилось спостереження покриття Юпітером зорі SAO 138820 з просторовою роздільною здатністю 13 км, яке було проведене 11 грудня 1980 р. за допомогою розташованого на борту літака 90-см

телескопа (обсерваторія Койпера). Отримані дані дозволили оцінити оптичну товщину кільця в межах т≤0,008 [231]. Але найповнішу інформацію про структуру кільця Юпітера дали експерименти на КА «Галілео» [456, 528] та КТХ, які, крім вже згаданих гало та основного кільця, виявили ще одне слабке зовнішнє кільце (рис. 6.5 і табл. 6.1).



Рис. 6.5. Загальна схема кілець Юпітера і їх розташування відносно орбіт супутників Метіса, Адрастея, Амальтея і Теба (http://photojournal. jpl.nasa.gov/)

Назва кілець	Відстань від центра планети		Maca	Альбедо
	в радіусах	КM	(кг)	
	планети			
«Гало»	1,30-1,72	92000-122800	?	0,015-0,05
«Головне»	1,72-1,81	122500-129230	$(10^{13})$	0,015-0,05
Внутрішнє павутинне кільце	1,82 - 2,55	129230-181000		0,015-0,05
Зовнішнє павутинне кільце	2,55 - 3,15	181000-221000		0,015-0,05

T ( 1	37	•	10 '
	Xanavrenueruvu	VITATIL	H) IIITena
таолица 0.1.	Mapakiephermkn	кілець	10mmcpa.

Внутрішнє і зовнішнє кільця Юпітера називають павутинними. Виявилося, що внутрішнє павутинне кільце обмежене орбітою Амальтеї, а зовнішнє – орбітою супутника Теба. Швидше за все, частинки довго не залишаються в кільцях через перешкоди, які створюють потужна атмосфера і магнітне поле Юпітера, тому матеріал кілець має постійно поповнюватися. Основним джерелом речовини кілець можуть бути невеликі супутники Метіс і Адрастея, орбіти яких лежать у межах кілець. Якщо на малих а кільця дуже темні (відбивна здатність від 1,5 до 5 %), то при  $\alpha \rightarrow 180^{\circ}$  яскравість кілець зростає майже в 100 разів (рис. 6.4). Це свідчить про сильну витягнутість індикатриси розсіяння вперед для частинок кілець.

За зображеннями на 10-метровому IЧ телескопі обсерваторії Мауна Кеа (Гавайї) в 2002-2003 рр. через вузькосмуговий ( $\lambda = 1,64$  мкм) і широкосмугові ( $\lambda = 2,268$  мкм і стандартний джонсонівський L') фільтри за виразом

$$W = \int (\mu \cdot I / F) dr$$
(6.1)

було розраховано ефективну протяжність W (еквівалент ефективної ширини в спектрофотометрії) основного кільця з відстанню (рис. 6.6), де  $\mu$  – косинус кута відбивання світла від площини кільця, г – відстань від центра планети, (I/F) – відносна відбивна здатність кільця [615]. Як видно з рис. 6.7 і 6.8 у діапазоні сонячних фазових кутів 1,2°  $\leq \alpha \leq 11°$  практично відсутній ефект опозиції, тоді як у більш широкому діапазоні фазова залежність показує пік розсіяння назад ( $\alpha = 0°$ ) і вперед ( $\alpha = 180°$ ) [699], що характерно для великих шершавих частинок.



Рис. 6.6. Залежність еквівалентної протяжності (W) кільця Юпітера від відстані (R) у неперервному спектрі при  $\lambda = 1,64$  мкм (зверху) та в смузі поглинання метану при  $\lambda = 2,268$  мкм (знизу) [699]

Моделювання кілець Юпітера проводилося в моделі різної форми частинок [111, 132, 616] і діапазону розміру від мінімального 0,001 мкм до максимального в межах 10-300 мкм.



Рис. 6.7. Фазова крива блиску кільця Юпітера за даними наземних і з КА спостережень [681]. Прямі лінії — лінійна, а крива — лінійноекспоненціальна інтерполяція [216]



Рис. 6.8. Фазова залежність еквівалентної протяжності W кільця Юпітера при  $\lambda \approx 2,3$  мкм і L' (темні кружки – дані KA, світлі кружки – наземні [212], трикутники – [508], ромби – [456] ( $\lambda \sim 2,05$  мкм). Модельні розрахунки для сферичних частинок [111]

Криві на рис. 6.8 відносяться до олівінових сферичних частинок з функцією їх розподілу за розміром (5.1) з параметром n = 2,5 при максимальних розмірах a\_max = 10, 30, 100 і 300 мкм (різні лінії зверху вниз). Схожість розрахованих значень і спостережних даних суттєво покращується для модельної суміші невеликих видовжених еліпсів і макроскопічних тіл [111, 616].

Вже перший спектр кільця в діапазоні довжини хвиль 0,887-2,4 мкм показав, що в ньому відсутні характерні для води, метану чи аміаку смуги

поглинання [508]. Це підтвердив і спектр пропущеного кільцем світла при  $\alpha \sim 179^{\circ}$  [456], спостереження з КА «Кассіні» на прольотній траєкторії та спостереження з КТХ [459] (рис. 6.9). Як видно з рис. 6.10, характер спектра кільця на різній відстані від центра Юпітера суттєво відрізняється, що пояснюють різною функцією розподілу частинок за розміром.



Рис. 6.9. Спектральна відбивна здатність головного кільця Юпітера. Горизонтальні лінії – спектральна роздільна здатність, вертикальні – похибки спостережень [456, 508, 513, 524, 616]. Пунктир – спектр кілець Сатурна [158]



Рис. 6.10. Спектральна відбивна здатність кільця Юпітера на відстані від центра Юпітера (в тис. км) 78,6 (штрих-пунктир), 93 (лінія з точок), 111 (штрих) і 125 (суцільна лінія) [456]

Головне кільце у видимій частині спектра є відчутно червоним адже при переході від  $\lambda = 450$  нм до 950 нм яскравість кілець збільшується у 2-3 рази, хоча альбедо частинок менше 5%. Вважають, що їх спектр подібний до спектру внутрішніх супутників Юпітера Амальтеї і Адрастеї.

К. Гершель (через 8 років після відкриття в 1789 р. ним Урана) замалював кільце і зробив запис у своєму щоденнику, що воно «коротке, й не таке, як у Сатурна». Підтвердженням реальності цього може слугувати хоча б те, що його замальовка відповідає ракурсу, у якому воно мало б бути в ті роки, хоча тоді ще не було відомо, що планета «лежить» на боці при своєму русі по орбіті навколо Сонця.

Оскільки ніхто інший кільця не бачив, то це спостереження Гершеля вважали результатом дефекту оптики його телескопа й протягом майже двох століть навіть не згадували про нього.

Наскільки нам вдалося встановити, успішні пошуки кілець Урана започаткував В. Сінтон [625], який в 1972 та 1973 рр. отримав зображення довкілля Урана через світлофільтр при  $\lambda = 888$  нм, що припадає на потужну смугу поглинання метану і в якій залишкова інтенсивність планети та фон неба ослаблені в десятки разів. На отриманих знімках він виявив 4 кільця та оцінив їх альбедо в 0,08. Надзвичайно продуктивними були проведені 10 березня 1977 р. міжнародною командою астрономів із США, Австралії, Індії й Південної Африки спостереження ефекту покриття Ураном зірки SAO 158687 8-ї зоряної величини. Вони дозволили виявити навколо Урана серію вузьких кілець в екваторіальній площині планети [233, 468] коли світло зникало й з'являлося 9 разів, потім пропало зовсім коли його перекрив Уран; після того як планета відійшла від зірки світло від неї ще 9 разів короткочасно зникало й знову з'являлося. Порівняння ших «мерехтінь» до й після покриття зірки Ураном показало що вони відбувалися симетрично відносно центра планети – за однакові проміжки часу до і після покриття.

Така симетричність перекриття світла дозволила припустити, що об'єкти, які затемнювали зірку, певним чином пов'язані з Ураном. Це могли бути його супутники, але аналіз руху відомих супутників показав, що жоден з них не міг бути тим небесним тілом, що закривало світло зірки. Припущення про те, що це могли бути 9 нових супутників з одного боку Урана й ще 9 (теж невідомих) з іншого, причому на однакових відстанях від планети та ще й розташованих строго на одній прямій, здалося зовсім неймовірним. Це спонукало припустити, що навколо Урана є 9 вузьких кілець, 5 з яких розташовані всередині границі Роша.
Кільця позначили першими літерами грецького алфавіту в порядку віддалення від планети як кільця  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  та є. Останнє з них розташоване на відстані 52 тис. км від центра Урана. Подальше опрацювання цих спостережних даних вказало на існування ще трьох внутрішніх кілець (позначено цифрами 4, 5, 6) і кільця  $\eta$ , яке знаходиться між кільцями  $\beta$  і  $\gamma$ [233].

Виявилось, що найпотужнішим є кільце є, яке ослаблювало світло зірки майже на 90%, тоді як внутрішні кільця – не більше ніж на 50%. Оскільки жодне з кілець не перекрило світло зірки повністю то на цій підставі було запропоновано що кільця Урана складаються з безлічі окремих тіл розміром не більше 4-6 км. Подібно до кілець Юпітера, вони також дуже темні, за деякими оцінками їх альбедо ~ 0,03.

Надалі спостереження під час затемнення зірок стали систематичними і до наземних долучились ще й спостереження позаатмосферними засобами (телескоп на борту літака – обсерваторія Койпера, КА «Вояджер» та КТХ) і зараз їх кількість перевищила 200 [164, 234, 266, 267, 268, 338, 407, 467, 514, 614, 619, 662]. Це дозволило досить детально вивчити структуру кілець (рис. 7.1-7.4) та їх оптичні властивості.



Рис. 7.1. Наземне зображення кілець Урана при λ = 2,2 мкм [208]

1. Кільця Урана мають еліптичну форму, їх площина трохи нахилена до площини екватора планети [266].

2. На деяких знімках помітні збурення структури кілець, які перевищують похибку спостереження, типове відхилення становить 0,5-2,0 км [267, 669].

3. Має місце східно-західна асиметрія яскравості кілець. Згідно [944] відношення яскравості північної та південної частини для більшості кілець рівне 3,2, що добре узгоджується з даними роботи [378], а для кілець α і β це відношення близьке до 1. Останнє може бути пояснене тим, що існує відносно невелике але однакове затінення в цих частинах кілець, або ж тим, що за час між спостереженнями пройшов якраз такий час, за який кільця повернулися на те ж саме місце на своїй орбіті.

4. Для кільця є існує змінна в часі азимутальна залежність еквівалентної протяжності W (6.1) кілець (рис. 7.3).



Рис. 7.2. Зображення кільцевої системи Урана з роздільною здатністю 33 км/піксель при задньому підсвічуванні. Короткі світлі смужки – сліди руху зірок (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo\_gallery)

5. За даними обробки отриманих у січні 1986 р. 7-ми зображень системи Урана при сонячних фазових кутах  $\alpha = 15,5, 21,0, 89,5$  і 172,5° для кожного з перших 9-ти кілець (6, 5, 4,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ) була оцінена відбивна здатність і значення сферичного альбедо (0,014 ± 0,004).



Рис. 7.3. Азимутальні варіації яскравості кільця є у 2002 (1), 2003 (2) і 2004 (3) pp. (неперервні лінії). Штрихові лінії – виправлені за геометрію спостережні дані. Позначено періапс (Р), апоапс (А) і довгота висхідного вузла (Ω) для кожної епохи спостереження [208]

6. Математичне моделювання і порівняння із даними спостережень дозволило зробити висновок що середнє значення радіуса пилових частинок у кільцях становить  $1,0 \pm 0,3$  мкм [522]. В той же час, згідно результатам радіопросвічування, частинки в кільцях мають дуже великі розміри і практично повністю відсутні об'єкти з розміром менше 10 см. Якщо це так, то приведені вище оцінки можуть характеризувати мікрорельєф на цих досить великих частинках. Крім того, за даними КА «Вояджер-2» було відкрито ще два кільця: розмите широке внутрішнє (1986U2R на відстані 37-39,5 тис. км від центра Урана) та 1986U1R (кільце  $\lambda$ ) в проміжку між кільцями  $\delta$  та є на відстані 50 040 км [662], що довело їх загальну кількість до 11 (табл. 7.1). За даними реєстрації явища покриття перше з цих кілець виявилось структурованим на окремі кільця, які назвали Arc1 (на відстані 41 760 км), Arc 2 (41 470 км), Arc3 (38 430 км) і кільце 2 (38 200 км); їх оптична товщина знаходиться в межах  $\tau = 0,1-0,2$  [407].

Назва	Відстань від		Ширина	Товщ	Оптична	Альбедо
	центра планети			ина	глибина	
	в радіусах	(км)	(км)	(км)		
	планети					
1986U2R	(1,49)	(38000)	(2500)	(0,1)	< 0,001	(0,03)
6	1,597	41,840	1-3	(0,1)	0,2-0,3	(0,03)
5	1,612	42,230	2-3	(0,1)	0,5-0,6	(0,03)
4	1,625	42,580	2-3	(0,1)	0,3	(0,03)
Альфа (α)	1,707	44,720	7-12	(0,1)	0,3-0,4	(0,03)
Бета (β)	1,743	45,670	7-12	(0,1)	0,2	(0,03)
Ета (η)	1,801	47,190	0-2	(0,1)	0,1-0,4	(0,03)
Гамма (ү)	1,818	47,630	1-4	(0,1)	1,3-2,3	(0,03)
Дельта (б)	1,843	48,290	3-9	(0,1)	0,3-0,4	(0,03)
1986U1R	1,909	50,020	1-2	(0,1)	0,1	(0,03)
Епсилон (ε)	1,952	51,140	20-100	< 0,15	0,5-2,1	(0,03)

Таблиця. 7.1. Характеристика системи кілець Урана

Примітка: неточність зазначених у дужках результатів не перевищує 10%.

Таким чином, кільця Урана є набором одинадцяти чорних павутинок і ще кількох неповних (так званих аркових) дуже темних кілець, радіальна ширина яких становить лише 0,6-10 км, тільки кільце є в найширшій частині сягало 100 км (рис. 7.4, 7.5). Їх товщина – в межах кількох десятків метрів. Між кільцями є великі просвіти а самі кільця мають значну «упаковку» матеріалу. За спостереженнями у 2003 і 2005 рр. на КТХ було відкрито 12-те і 13-те кільце [618] одночасно з новими супутниками Меб (Маb, діаметром 25 км, U XXVI) і Купідон (діаметром близько 18 км, U XXVII), з порядковими номерами 26 і 27 (рис. 7.6).

Як видно, зовнішній супутник Меб має радіус орбіти вдвічі більший від головного кільця і він знаходиться на одній орбіті з новим пиловим кільцем R/2003 U1, яке складається з пилинок субмікронного розміру. Друге нове кільце – R/2003 U1 – лежить між орбітою супутників Порція і Розалінда в області без відомих тіл значного розміру, які могли б бути генератором речовини цього кільця. В УФ області спектра було зареєстровано світіння атмосфери Урана аж до відстані в 50 тис. км від центра планети. Тобто атмосфера Урана тягнеться до самих кілець що може зумовлювати гальмування швидкості частинок. По цій причині проблема походження та стійкості кілець Урана виявилася дуже складною.



Рис. 7.4. Радіальні профілі південної частини кілець Урана: точки – Кек телескоп, суцільні лінії – КА «Вояджер» при розсіянні вперед [208]



Рис. 7.5. Радіальні профілі кілець є, відповідно, на вході в тінь (зверху) та виході (внизу); по осі ординат – оптична товщина [164]



Рис. 7.6. Зображення двох нових супутників і двох нових слабких кілець, отримане з телескопом Хабла [208]

За даними наземної фотометрії в травні-серпні 1985 р. в довжині хвилі 2,2 мкм (фільтр К) у діапазоні фазових кутів 0,021  $\leq \alpha \leq 2,54^{\circ}$ , та в результаті обробки зображень з КА «Вояджер-2» [216] було побудовано залежність яскравості кілець від сонячного фазового кута  $\alpha$  (рис. 7.7, 7.8). На отриманих графіках практично відсутній зумовлений когерентним розсіянням ефект опозиції в яскравості кілець. Скоріше всього, це викликано низькою відбивною здатністю частинок у кільцях. Що стосується зумовленого тіньовим механізмом ефекту опозиції, то відсутність спостережних даних у межах 2,54  $\leq \alpha \leq 19^{\circ}$  не дозволяє говорити ні про його відсутність, ні про наявність.

Зважаючи на малу яскравість кілець Урана, для них існують лише поодинокі роботи з дослідження їх спектрофотометричних властивостей. Так, за даними інфрачервоної фотометрії через стандартні широкосмугові фільтри J, H i K [209, 378, 378] було отримано що сумарне альбедо кілець дуже мале і практично не залежить від довжини хвилі в межах від  $\lambda = 0,5$  до 2,3 мкм (рис. 7.9).



Рис. 7.8. Залежність зоряної величини системи кілець Урана в довжині хвилі 2,2 мкм від сонячного фазового кута [522]

Приблизна такі ж результати дали й спостереження з КА «Вояджер-2» при  $\lambda = 412$ , 480 та 550 нм для кілець  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ . Така спектральна залежність характерна для чистого вуглецю [559].



Рис. 7.9. Спектральна залежність відбивної здатності (середні значення по спостереженнях 5 і 6 жовтня 2003 р.) Урана (ліворуч) і частинок його кілець (праворуч); горизонтальні бари показують діапазон довжин хвиль широкосмугових фільтрів; вертикальні бари — похибки вимірювання; значення при  $\lambda = 0,55$  мкм екстрапольоване до значення фазового кута  $\alpha = 1,9^{\circ}$  [280]

Спектрофотометрія з вищою роздільною здатністю [77, 375] показала, що в діапазоні  $\lambda(0,7-0,9)$  мкм спектр кілець більш плоский, ніж для поверхні супутника Япет чи відомого метеорита Мурчісон [180], тоді як при  $\lambda(0,9-1,2)$  мкм він досить круто підвищується з ростом довжини хвилі і задовільно співпадає із спектром астероїда Іда [328] (рис. 7.10), що може вказувати на присутність піроксену у кільцях Урана.



Рис. 10. Порівняння відносної інтенсивності (І/І<sub>0</sub>) та альбедо (А) в спектрі системи кілець Урана (незаповнені кружки і трикутники з барами похибок) із спектром астероїда Іда [77]

Зовнішнє кільце, подібно до кілець Сатурна, виявилося синім, що може вказувати на те, що частинки у віддаленій частині кілець менших розмірів, ніж в інших кільцях. Оскільки кільця Урана дуже темні, то вважається, що їх частинки, ймовірно, є кам'яно-крижаними, в яких метановий лід перетворений в аморфний вуглець (у сажу) під дією сонячного ультрафіолетового випромінювання.

Ще одна гіпотеза пропонує, що темний колір кілець може бути викликаний тим, що з метанових льодів кілець високоенергійними частинками потужної магнітосфери вибивається чистий вуглець (сажа), який осідає на частинки кілець. Оцінки показують, що загальної маси кілець Урана вистачило б на невеликий супутник з діаметром близько 15 км. Для порівняння нагадаємо, що маса кілець Сатурна майже в 1000 разів більша. Не розв'язаною поки що є проблема стійкості кілець планети. Можливо, що основним чинником їх утримування служать невеликі супутники в середині кілець, які стягують матеріал на свою орбіту і там його стабілізують. Проте такі супутники були виявлені лише в деяких кільцях. Хоча не виключена їх наявність у всіх кільцях, а тому найвужча частина орбіт кілець Урана може бути результатом присутності там супутникив-пастухів і саме там їх слід шукати.

## Розділ 8. Кільця Нептуна

Подібно до кілець Урана, вперше про кільце навколо Нептуна повідомив У. Лассел у жовтні 1846 р. (через кілька днів після відкриття планети). І хоча кільця він спостерігав неодноразово, але через шість років дійшов висновку, що то був результат обумовленої недоліком телескопа оптичної ілюзії.

відкриття кілець пов'язують аналізом результатів Тому 3 спостережень явища покриття Нептуном зорі [679, 718], отриманих американськими астрономами Е. Гайненом, С. Харрісом і Ф. Меллоні 7 квітня 1968 р., коли поблизу планети ослаблення світлового потоку від зорі приблизно на 30% носило нерегулярний характер. Оскільки ослаблення зорі почалося через 5 хвилин після її виходу із-за планети і тривало протягом 2 хвилин, то відстань кільця від верхньої границі хмарового шару була оцінена в 50 тис. км. Тому при спостереженнях наступних явищ покриття Нептуном зір 15 червня 1983 р. і 22 липня 1984 р. особливу увагу було приділено пошуку кільця [171, 341, 440, 621]. В результаті проведених досліджень було не лише підтверджено реальність кільця, але й показано, що воно не суцільне, а фрагментоване по орбіті.

Так, за спостереженнями покриття зорі SAO 186001 22 липня 1984 р. на двох телескопах ослаблення світла зорі було зареєстроване лише з одного боку планети. За результатами вивчення 24 явищ покриття Нептуном різних зірок в 1983-1989 рр. [621] кільце вдалося зареєструвати лише 22 липня 1984 р. (на відстані 65 300 ± 300 км) і 20 серпня 1985 р. (на відстані 63160 ± 200 км). В 1984 р. радіальна ширина кільця становила 15,1 ± 0,1 км, протяжність по азимуту більше 100 км і оптична товщина 0,074 ± 0,003; в 1985 р. радіальна ширина та оптична товщина відповідно становили 15,3 ±0,2 км і 0,058 ± 0,001. Крім того, французький астроном А. Браїк 22 липня 1984 р. виявив, що світло зорі тричі перекривалося об'єктами, які були названі дуги (арки) та які було запропоновано вважати ділянками кільця, яке ще не сформувалося. Подальші дослідження за допомогою KA «Вояджер-2», KTX та інфрачервоних телескопів в Чилі і на Гавайях у потужних смугах поглинання метану дозволили детально вивчити структуру системи кілець Нептуна (рис. 8.1-8.4, табл. 8.1).



Рис. 8.1. Схема кілець (суцільні лінії) і орбіти супутників (пунктири) Нептуна (http://en.wikipedia.org/wiki/Rings\_of\_Neptune)

Назва	Відстань від центра		Ши-	Товщина	Оптична	Альбедо
	планети	рина		глибина		
	радіус планети	(км)	(км)	(м)		
Галле (N42)	1,692-1,733	40900-42900	~2000	150	10-4	~0,015
Левер'є (N53)	2,148	53200	~110	700	~0,01	~0,015
Лассел	2,148-2,310	53200-57200	~4000	400	10-4	~0,015
Араго	2,310	57200	<100	?	?	?
Безіменне	2,501	61950	?	?	?	?
Адамс (N63)	2,541	62932	15-35	770	0,001 0,09 (в арках)	~0,015

Т.б	0 1	Vanar				II
таолиця.	0.1.	ларакте	ристики	системи	кілець	пентуна.

Основні результати зводяться до наступного.

1. Система розділена на 6 основних кілець, яким, згідно їх віддаленості від центра планети, надано імена: Галле, Левер'є, Лассел, Араго, поки що безіменне кільце і кільце Адамс, які пов'язані з іменем астрономів, що були причетними до відкриття Нептуна. Найяскравішим є кільце Левер'є.

2. Яскравість кілець при великих фазових кутах  $\alpha$  більша, ніж при малих.

3. Кільця мають фрагментарну структуру, що найхарактерніше проявляється у кільця Адамса, у якого в секторі довгот 175 < L < 220° присутні 4 фрагменти дуги; їх назвали Curage, Liberte, Egalite i Fratenite (в перекладі Відвага, Свобода, Рівність, Братерство) (рис. 8.2).



Рис. 8.2. Довготна структура кільця Адамса: Curage (C), Liberte (L), Egalite (E) і Fraternite (F) [247]

Аналогічно, кільце Левер'є також є системою окремих відрізків дуги з довжиною біля 1000 км, що заповнюють 10-25% довжини орбітального кола [423]. Порівняння багаторічних спостережень (рис. 8.3) переконливо свідчить про стійкість цих утворень на інтервалі часу мінімум у 5 років [564]. В той же час за 5 років має місце деяка зміна профілю дуг, особливо для дуги Свобода й Рівність. Так дуга Свобода перемістилася на 2° в напрямку основного обертання, ширина дуги Рівність дещо зросла; у результаті вони виявилися злегка прокрученими в напрямку обертання відносно їх положення в 1989 р.



Рис. 8.3. Радіальний фотометричний профіль (I/I<sub>o</sub>) кілець за даними з КА «Вояджер» і телескопа Кека. Профілі за 2002 і 2003 рр. показано зверху, сумарні дані – внизу [207]

Було відмічено також зміну їх інтенсивності. Вважається, що зміна морфології і яскравості могла бути зумовлена перетіканням матеріалу від дуги Свобода до дуги Рівність; це підтримує ідею щодо того, що пил, можливо, мігрує між сусідніми резонансними орбітами кілець. Дуга Свобода між 2002 і 2003 р. розбилася на дві вузькі смужки і стала темнішою від дуги Братерство.

4. Подібно F кільцю Сатурна, кільце Адамса також нагадує своєрідний переплетений канат (рис. 8.4), що приписують гравітаційному впливу розташованих поруч супутників-пастухів.

Рис. 8.4. Фрагмент кільця Адамса, який демонструє переплетіння окремих складових. [631]

5. Основні кільця також показують тонку структуру (рис. 8.5).





Хоча КА «Вояджер» передав зображення у широкому діапазоні сонячних фазових кутів  $\alpha$ , але опубліковано зображення лише при значенні  $\alpha = 14$  і 135°, які відносяться до середини дуги кільця 1989N1R, широких арок у кільці N42, N53, N63 (за виключенням яскравих дуг) і області кілець з постійною яскравістю (так зване плато) на відстані між 54,5 і 57,5 тис. км від Нептуна (рис. 8.6) [631].



Рис. 8.6. Ліворуч - фазова залежність W, праворуч - результати фотометричного моделювання оптичної товщини  $\tau$  і відносної об'ємної густини D для різних частин кілець Нептуна, середини дуги 1989N1R, широких арок у кільці N42, N53, N63 (за виключенням яскравих дуг) і області кілець з постійною яскравістю (плато) на відстані між 54,5 і 57,5 тис. км від Нептуна [631]

Що стосується області фазових кутів при  $\alpha \rightarrow 0^{\circ}$ , то на 10-м телескопі Кека з адаптивною оптикою отримані зображення системи кілець в інтервалі  $\alpha = 0,15-0,18^{\circ}$  (2002 р.) і 1,64-1,69° (2003 р.) у фільтрах К і Н [207], фрагмент яких показано на рис. 8.3, зміна блиску кілець при зміні  $\alpha$ не обговорювались у жодній роботі. Для моделювання оптичних властивостей частинок використовувались лише дані рис. 8.6 (ліворуч). Бралась модель у якій великі макроскопічні частинки в системі кілець мають фазову функцію таку ж, як і кільця Урана і альбедо частинок знаходиться в межах 0,01-0,02. В результаті порівняння модельних розрахунків і спостережень було оцінено геометричне альбедо частинок кілець як ~ 0,05 що близьке до альбедо частинок поруч з кільцями супутників і притаманне частинкам з чистого вуглецю (сажі).

Крім того, було визначено оптичну товщину т і відносну об'ємну густину D (рис. 8.6, праворуч). Як видно, значення т узгоджуються з оцінкою, отриманою за спостереженнями з КА «Вояджер-2» явища покриття зірки кільцями ( $\tau < 0,06$  для яскравого кільця Левер'є) [409]. Оскільки наземні спостереження взагалі не виявляють якогось матеріалу у місці кілець N53 і N63, де відсутні дуги, то це погоджується з тим, що  $\tau < 0,01$ -0,02. За спостереженнями на КТХ зроблено порівняння спектрального геометричного альбедо внутрішніх супутників Протеус, Лариса, Галатея, Деспіна й дуги кільця Нептуна (рис. 8.7).

Порівняння даних КА «Вояджер» при  $\alpha = 8^{\circ}$  та телескопа Кека показало, що інтенсивність кілець Адамса й Левер'є та варіація її азимутальної залежності в межах кілець дуже подібні, але суттєво відрізняються в самих дугах кілець. Так, для дуги Братерство середній орбітальний рух склав 820,1118 ± 0,0001°/добу, тоді як інші дуги показують відносне зміщення щодо дуги Братерство; інтенсивність передніх частин дуги Свобода і Відвага суттєво зменшилась відносно даних КА «Вояджер». Вважається, що за цей час у межах найстійкішої дуги Братерство відбулася ерозія дуже маленького супутника, що, можливо, й поповнило її матеріалом. Підтвердженням цього може бути червоний колір дуг (рис. 8.7).

Якщо дані рис. 8.3 і 8.4 про ослаблення системи дуг вірні, то це означає, що зараз втрата кільцями речовини є швидшою від їх поповнення за рахунок ерозії тому що ніяка інша сучасна теорія не може описати таку швидку динамічну еволюцію кілець [321a, 497].



Рис. 8.7. Спектральне геометричне альбедо внутрішніх супутників Нептуна (Протей – хрестики, Ларісса – ромби, Галатея – трикутники, Деспіна – квадрати) і його кілець (точки). Вертикальними барами показано похибки визначення альбедо A [231а]

Рис. 8.8. Довготний профіль яскравості (Ф, у мікроянських на градус) чотирьох дуг кільця у відбитому світлі та еквівалентної ширини (W, у метрах) за даними КТХ (суцільна товста лінія) і КА «Вояджер» (суцільна тонка лінія) [1689]. Штрихові лінії – дані приведені до епох 1,5 січня 2000 р. [231а]

## Розділ 9. Зв'язок кілець і супутників

Нагадаємо, що в межах розташування кілець знаходиться орбіта багатьох дрібних супутників (рис. 2.3, 2.4, 2.14, 2.15, 2.33, 6.5, 7.6, 8.1) які інколи пов'язують не лише з морфологією кілець, але й вважають джерелом матеріалу для них. Тому нижче, дещо повторюючись, розглянемо ці проблеми.



Рис. 9.1. Взаємна залежність морфологічних параметрів (амплітуда опозиційного ефекту A і півширина опозиційного ефекту HWHM), які використовуються при апроксимації головних особливостей фазової кривої лінійно-експоненціальною функцією без врахування видимого кутового розміру Сонця на орбіті планет [216]



Рис. 9.2. Взаємна залежність морфологічних параметрів (амплітуда опозиційного ефекту A і півширина опозиційного ефекту HWHM), які використовуються при апроксимації головних особливостей фазової кривої лінійно-експоненціальною функцією з врахуванням видимого кутового розміру Сонця на орбіті планети [216]

Порівняння фізичних і оптичних характеристик деяких кілець і поруч розташованих супутників вказує на органічний зв'язок між ними. Так, для Юпітера вважається встановленим тісний зв'язок супутників Метіса й Адрастея з головним кільцем [616], Амальтея й Фіва з павутинними кільцями [132]. У Сатурна аналогічний зв'язок підтверджено для супутників Пан, Дафнія і Атлас із зовнішнім кільцем [648], Прометей і Пандора з кільцем F [635], Феби з гігантським ІЧ кільцем. Для Урана встановлено зв'язок між супутниками Корделія та Офелія з кільцем епсилон [269], для Нептуна між супутником Галатея і кільцем Адамса [558]. Що стосується подібності характеристики кілець, то вузькі запилені кільця Нептуна дуже схожі на кільце 1986U1R ( $\lambda$ ) Урана та F Сатурна; широкі запилені кільця Нептуна подібні до кілець Юпітера і кільця G Сатурна; азимутально розкидані по орбіті частини дуг у кільці Адамса нагадують F кільце i кільцеву структуру Енке навколо Сатурна [631]. Щодо відмінності між кільцями навколо різних планет, то доцільно нагадати, що маса кілець Нептуна приблизно в 10 000 разів менша ніж навіть в Урана. І це на фоні того, що внутрішні супутники Нептуна значно більші й масивніші, ніж тіла, що розташовуються в кільцевих системах інших планет гігантів. Адже в Нептуна п'ять супутників (від 1989N2 до 1989N6) з діаметром у межах 55-190 км розташовуються у сфері Роша; в Урана їх там дев'ять (від 1986U1 до 1986U9), але вони мають менший діаметр (від 25 до 110 км) і суттєво меншу загальну масу, проте кільця навколо Урана виявилися значно потужнішими, ніж у Нептуна.

Очевидно, співвідношення між масою внутрішніх супутників кожної планети і масою матерії у кільцях зовсім не співвідносні. Оскільки не виключена справедливість гіпотези згідно якій кільця це продукт розірваних у сфері Роша супутників, то нагадаємо, що маса матеріалу в межах цієї сфери для кожної планети також різна. Так, маса кілець Сатурна може вміститися у крижаному тілі з приблизним розміром Мімаса (діаметр 390 км); маса кілець і внутрішніх супутників Нептуна в тілі діаметром 260 км, Урана – до 150 км.

Цікаво порівняти ці відмінності з варіаціями сучасної кратерованості внутрішніх супутників цих поверхні планет. трьох Вілносне співвідношення цієї величини для Сатурна / Урана / Нептуна складає як 3 / 100 / 50 [631]. Присутність і розповсюдження пилу в цих кільцевих вказівку відносну системах лають пряму на важливість кратероутворюючих процесів і в даний момент часу тому що відносно велике число мікроскопічних частинок у кільцях Нептуна не є унікальним, оскільки кільця Юпітера і кільце Е Сатурна також містять дрібну пилову складову в оптичній товщині кілець у межах від 50 до 80%. Проте абсолютне перевищення кількості пилу має місце в системі кілець Нептуна, яке майже вдвічі більше ніж у Юпітера і Сатурна. І це представляє серйозну не розв'язану поки що проблему адже вимагає джерела неперервного поповнення пилової складової.

Навколо різних планет домінують різні процеси видалення пилу з кілець. Так, у кільцях Урана мікроскопічний матеріал переміщується першочергово газовими потоками, у кільцях Юпітера плазмовими; у кільцях Нептуна пилова складова має відносно велику оптичну товщину (0,0001), вони відносно вільні від плазми і нейтрального газу, тому там просте вибивання пилу мікрометеоритами з поверхні макроскопічних частинок превалює над видаленням пилу з кілець. Подібно до кілець інших планет-гігантів, кільця Нептуна можуть бути залишком зруйнованих полем тяжіння планети супутників. Дослідження арок у кільцях Нептуна показало що в їх середині є ущільнення діаметром до 15 км, які оточені практично прозорим пиловим шлейфом загальною товщиною до 50 км.

Модельні розрахунки дозволили зробити висновок про те, що арками кілець Нептуна є ланцюжки раніше невідомих так званих еліптичних вихорів антициклонного типу, що складаються з твердих уламків льоду та інших замерзлих порід, найкрупніші з яких сягають кількох сотень метрів. Ці унікальні вихори були названі епітони. Вони складним чином взаємодіють між собою і з практично неперервним слабким пиловим кільцем навколо Нептуна. Пропонувалося також, що арки резонансно взаємодіють з найближчим до них супутником Галатея. З іншого боку, було знайдено, що цей супутник має досить ексцентричну орбіту, що не дозволяє пояснити наявність незвично яскравих дуг у кільцях лише його гравітаційним впливом. Прикладом такої взаємодії може бути рис. 9.3 на якому одна дуга розміром близько 10 тис. км асоціюється з супутником 1989N3 (Деспіна,  $180 \times 148 \times 128$  км), а пов'язана з супутником 1989N4 інша дуга знаходиться на відстані 62 тис. км від центру планети і приблизно за 37 тис. км від межі її хмарного покрову.



Рис. 9.3. Зображення однієї з дуг (арок) відразу за орбітою супутника 1989N4, названого Несо (діаметр 60 км) (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo \_gallery)

Загальні космогонічні міркування можуть вказувати на близькість хімічного складу кілець і внутрішніх супутників планети-гіганта. Хоча для кожної з них повинні бути певні відмінності в оптико-фізичних характеристиках і в хімічному складі супутників і кілець. Та все ж навіть між окремими кільцями навколо, наприклад, Сатурна, також існують помітні відмінності. Це, в свою чергу, також може бути пов'язане з тим, що матеріалом для різних кілець служать різні супутники з різним хімічним складом. З двох графіків на рис. 9.1 і 9.2 слідує чітка можливість розбиття фізико-оптичних характеристик кілець Сатурна на дві окремі підгрупи. В одну з них можна віднести кільця А й В, в іншу – кільце Е та супутник Енцелад; кільце С стоїть осторонь від інших кілець Сатурна і за своїми характеристиками більше схоже з кільцями навколо Урана й Нептуна. Взаємна залежність таких морфологічних параметрів, як амплітуда опозиційного ефекту А і його півширина НШНМ [216], також вказує на можливість виділення мінімум двох (рис. 9.1) взаємно зв'язаних груп (штрихована лінія і лінія з точок) серед супутників планет-гігантів і кілець Сатурна.

Проте, як видно з рис. 9.1 і 9.2 навіть вибір моделі апроксимації спостережних даних суттєво впливає на визначення морфологічних параметрів апроксимації. З рис. 9.2 випливає, що тіла, які належать до кожної планети, мають подібні значення півширини опозиційного ефекту HWHM.

Із фазових кривих для різних кілець планет-гігантів випливає таке.

1) Для галілеєвих супутників має місце найбільше значення НШИМ серед усіх досліджених супутників планет гігантів (0,2-0,5°) при амплітуді опозиційного ефекту A = 1,1-1,6.

2) Супутники Урана мають найбільшу амплітуду опозиційного ефекту (A = 1,6-1,9) але значення НШНМ є подібними до тих, які мають місце для кілець і супутників Сатурна і для галілеєвих супутників Юпітера.

3) Супутники Нептуна мають найгостріший (рис. 9.2) опозиційний пік (HWHM  $\leq 0,1^{\circ}$ ) і помірне значення амплітуди опозиційного ефекту (A = 1.2-1.4). Цим вони схожі до супутників Сатурна, що може говорити про значну відмінність структури реголіту на поверхні таких тіл.

Відзначимо, що в більшості робіт по даній тематиці не вводилось обмеження сонячного фазового кута а, зумовленого кутовими розмірами Сонця на відстані різних планет і це може вносити деяку невизначеність даних на цих рисунках. Якщо нанести на графік вищезгадані морфологічні параметри (амплітуда опозиційного ефекту А і його півширина HWHM) для кожної планети гіганта окремо на своїй відстані від Сонця [216], то також можна чітко виділити окремі групи по обох цих морфологічних параметрах (рис. 9.4). Причому, вони добре проявляються по величині амплітуди і півширини опозиційного піку, що дозволяє виділити наступні групи об'єктів.



Рис. 9.4. Залежність морфологічних параметрів (півширини опозиційного ефекту НШИМ і амплітуди опозиційного ефекту А - внизу), що використовуються при апроксимації головних особливостей фазових кривих лінійно-експоненціальною функцією, для тіл Сонячної системи від відстані до Сонця [216]

 Супутники Каллісто, Феба, класичні супутники Урана (Аріель, Титанія й Оберон), супутник Нептуна Нереїда і кільце С Сатурна мають велику півширину опозиційних піків (НWHM = 0,5-0,9°) і амплітуду А = 1,5-2,0. Переважно – всі вони є темними об'єктами з низьким і помірним альбедо. Також відомо, що ці об'єкти є сильно кратеровані [735].

2) Супутники Іо, Япет, Рея і яскраві кільця А й В Сатурна характеризуються дещо меншими амплітудою і шириною опозиційного максимуму: A = 1,4-1,7 і HWHM = 0,3-0,6°.

3) Супутники Ганімед, Європа, Енцелад і Тритон мають найменше значення амплітуди опозиційного ефекту (А = 1,3-1,6) і півширини (НWHM = 0,1-0,3°) опозиційного піку. Відмітимо, що ця група включає тільки тіла з найяскравішими поверхнями в Сонячній Системі з альбедо однократного розсіяння близьким до  $\omega_0 = 0,9$ . Поверхня цих яскравих об'єктів досить активно змінюються й зараз. Особливо тут виділяється супутник Юпітера Європа з дуже молодою поверхнею; вважається, що його поверхня характеризується зовсім недавньою активною гейзерною вулканічною діяльністю [540, 668]. Певним незначним виключенням з цього правила є альбедо Ганімеда на поверхні якого помітно багато тріщин і жолобів що могли утворитися в результаті активної тектоніки і могли колись бути пов'язані з крижаним вулканізмом. Активну зміну поверхні показує супутник Тритон і супутник Сатурна Енцелад [562].

Такого типу поділ свідчить, що найтемніші і найстаріші поверхні мають найбільшу амплітуду опозиційного піку при малому значенні сонячного фазового кута α, а найяскравіші і наймолодші – найменші амплітуди. Досить цікаво, що з якихось причин в третю групу не входить супутник Юпітера Іо, який показує значні зміни на поверхні.

Для розуміння впливу альбедо однократного розсіяння на морфологічні параметри опозиційного піку в роботі [216] використовували три методи: проста морфологічна модель, врахування розміру Сонця в морфологічній моделі і його неврахування. Результати аналізу дозволили виділити кілька фактів, які пов'язані з умовами спостережень та з механізмами утворення опозиційного ефекту для різних тіл Сонячної системи.

1) Нахили лінійної частини фазової залежності альбедо добре узгоджуються з моделюванням у рамках тіньового механізму.

2) Морфологічні параметри опозиційної хвилі (А та НWHM) чутливі до діапазону фазових кутів, особливо при найменших значеннях  $\alpha$ . Згортка фазової функції по видимому кутовому розміру Сонця показує, що значення півширини опозиційного піку (HWHM) корелює з альбедо поверхні супутників і кілець і практично не залежить від відстані до Сонця. Це свідчить про те, що спостережні дані при підході до  $\alpha = 0^{\circ}$  необхідно виправляти за кутовий розмір Сонця.

3) Лабораторні дослідження [369, 370] показали що амплітуда і півширина опозиційного піку тісно пов'язані зі значенням альбедо однократного розсіяння.

4) Ряд спостережних даних вказує на те, що суттєвий вплив на фазову залежність яскравості супутників і кілець має так звана «переробка» реголіту на їх поверхні у результаті зіткнення з метеороїдною речовиною і зарядженими частинками в потужній магнітосфері планет-гігантів. По цій причині фазова залежність яскравості поверхні деяких супутників суттєво відрізняються для їх лідируючих і ведених півкуль [126].

## Післямова.

Короткий, а в деяких випадках навіть поверховий виклад результатів дослідження поверхні супутників і кілець планет-гігантів дозволяє зробити наступні узагальнюючі висновки.

1. Тіла Сонячної системи розділяють на класичні планети (Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран та Нептун), карликові планети (Церера, Плутон, деякі інші тіла поясу Койпера), малі планети (астероїди), комети і метеороїди.

2. На початок 2012 р. виявлено 171 супутник навколо планет (Земля – 1, Марс – 2, Юпітер – 66, Сатурн – 62, Уран – 27, Нептун – 13), більше 540 500 астероїдів, для 257 450 з них точно визначено орбіту і їм присвоєно офіційний номер а 15 615 з них отримали власні імена; понад 1000 комет. Незважаючи на таку вражаючу кількість астероїдів їх сумарна маса оцінюється всього в ~  $10^{-3}$  маси Землі. Навколо деяких карликових планет та астероїдів також виявлені супутники, ряд з них представляють собою кратні тіла (в складі від 2 до 4-5 тіл). Серед цих тіл менше ніж у 10 радіус перевищує 1000 км; з радіусами більше 100 км – кількість обчислюється сотнями; основна кількість має розмір від сотень метрів до десятків кілометрів і менше.

3. Структурно система астероїдів складна, що проявляється в різноманітті розташування орбіт, нахилу їх площини та величини ексцентриситету. Основна маса відкритих астероїдів знаходиться в Головному поясі, який розташований між орбітою Марса та Юпітера. Зараз відкриті й інші пояси орбіти астероїдів у яких заходять у середину орбіти Меркурія, або ж навіть виходять за межі Сонячної системи. Особливо великої уваги заслуговують астероїди з надзвичайно витягнутою орбітою та ті, що перетинають орбіту Землі, тому можуть не лише дуже близько наближатися до Землі але й зіткнутися з нею.

4. Великі тіла (з діаметром більше 100 км) мають, як правило, близьку до сферичної форму, а дрібні – являють собою уламки (глиби) найрізноманітнішої форми.

5. Обмежена кількість цих тіл окутана газовою оболонкою різної потужності. Серед них лише супутник Сатурна Титан має потужну сталу атмосферу з атмосферним тиском біля поверхні майже 1,5 бари. Тоді як у деяких інших порівняно крупних тіл Сонячної системи, наприклад, Плутона і супутника Нептуна Тритона присутні лише сліди атмосфери змінної потужності.

6. Природу поверхневого шару тіл Сонячної системи дистанційно досліджують переважно за даними спектрофотометричних спостережень в ІЧ ділянці спектра. За спектральними особливостями поверхні поділяються на переважно льодяні чи мінеральні, або ж зі змішаним типом поверхні. Їх альбедо змінюється від кількох одиниць до 80-90%, а то й майже 100%.

7. Поверхневий шар безатмосферних тіл, як правило, сильно кратерований, а самі кратери зумовлені метеоритним бомбардуванням та активним вулканізмом. Винятком є льодяні тіла, насиченість кратерами поверхневих шарів яких незначна. Крім того, поверхневим шарам притаманний складний рельєф у вигляді гірських хребтів, руслоподібних тріщин, обривів тощо.

8. Як правило, поверхневі шари багатьох тіл Сонячної системи характеризуються оптично неоднорідними деталями, фотометричні контрасти яких змінюються з довжиною хвилі.

9. Виявлено активний вулканізм на Іо (супутник Юпітера), Енцеладі (супутник Сатурна), Тритоні (супутник Нептуна) і (можливо) на Титані (супутник Сатурна). При цьому вулканізм Іо подібний до земного, коли викидається лава і газопилові хмари, тоді як вулканізм на Енцеладі та Тритоні скоріше схожий на земні гейзери.

10. Зареєстровані численні дані про розвал кометного ядра, найхарактернішим прикладом чого був розвал ядра комети Шумейкера-Леві в 1994 р. на 22 фрагменти, які потім на великій швидкості увійшли в атмосферу Юпітера.

11. Унікальним явищем у Сонячній системі є зумовлений вулканізмом на Іо плазмово-пиловий тор.

12. Навколо планет-гігантів (а цілком можливо і навколо Землі та Марса) існує система кілець різної протяжності, потужності та природи. Якщо складовими кілець Сатурна є, найімовірніше, забруднений водяний лід, то для інших – це частинки різних мінералів.

13. У кільцях планет-гігантів розташовані орбіти дрібних супутників. Існує вагомі свідчення взаємодії супутників і кілець, тому часто ці супутники називають пастухами.

14. Зараз можна вважати практично встановленим факт наявності рідкої і замерзлої води в підповерхневих шарах Марса, полярних районах Місяця (можливо й Меркурія), в надрах супутників Юпітера Європи, Ганімеда, Каллісто, супутників Сатурна Титана, Енцелада тощо.

15. Відзначене вище різноманіття форми поверхні тіл Сонячної системи чітко проявляється в зумовлених обертанням кривих блиску, а оптична неоднорідність їх поверхні – ще й у зміні ступеня поляризації. Ці результати дистанційних досліджень використовуються для визначення

періоду обертання, орієнтації в просторі осі обертання, а також для реконструкції структури поверхневого шару та для пошуку супутників і кілець навколо них.

16. Практично у всіх супутників планет-гігантів ведучий бік є темнішим, що пов'язують зі значно енергійнішою їх взаємодією з міжпланетною матерією.

17. Практично для всіх безатмосферних небесних тіл існує чітко виражений ефект опозиції, тобто нелінійне збільшення блиску при підході до значення сонячного фазового кута  $\alpha = 0^{\circ}$ .

18. У деяких із цих тіл (особливо це стосується галілеєвих супутників Юпітера) присутній поляризаційний опозиційний ефект, який проявляються у дуже вузькому піку поляризації при  $\alpha = 0.5^{\circ}$ . Це приписується оптико-когерентному механізму. Що стосується орієнтації площини поляризації в цьому піку, то є вагомі свідчення що вона відповідає значенню  $\psi \sim 45^{\circ}$ .

19. Виявлено, що для деяких астероїдів положення площини поляризації знаходиться в межах  $90 < \psi < 180^\circ$ ; зміна значення  $\psi$  на  $90^\circ$  у точці інверсії відбувається не стрибком а плавним поворотом в деяких межах  $\Delta \psi$ .

1. Аврамчук В.В., Шавловский В.И. Оппозиционный эффект спутника Юпитера Каллисто для XX0.407- 0.755 мкм // Кинематика и физика небесн. тел. - 1988. - Т. 4, № 6. - С. 11 - 14.

Акимов Л.А. О природе оппозиционного эффекта // Вестн. Харьк. Ун-та. – 1980. – Вып. 15, №204. – С. 3–12.
 Атаи А.А., Ибрагимов Н.Б. Исследование эмиссионных линий в спектре Ио // Астрон. вестн. – 1978. – Т. 12, № 1. – С. 27–33.

4. Барабашов Н.П., Семейкин Б.Е. Монохроматическая фотометрия Сатурна и его колец

4. Бараоашов н.п., Семенкин Б.Е. монохроматическая фотометрия Сатурна и его колец // Астрон. журн. – 1933. – Т. 10, № 4. – С. 381–390.
5. Берлин А.Б., Есепкина Н.А., Зверев Ю.К. Наблюдения галилеевых спутников Юпитера на Ратан– 600 // Письма в Астрон. журн. – 1976. – Т. 2, № 8. – С. 405–409.
6. Блиох П.В., Ярошенко В.В. Электростатическе волны в кольцах Сатурна // Астрон. журн. – 1985. – Т62, № 3. – С. 569–579.
7. Бобров М.С. О строенни колец Сатурна: II. Оценка объемной плотности кольца // Астрон. журн. – 1954. – Т. 31, № 1. – С. 41–50.
8. Бобров М.С. О наблюдении покритий звезд кольцами Сатурна // Астрон. журн. – 1962. – Т. 39. № 1. – С. 41–50.

- T. 39.- №4. - C. 669-677.

9. Бобров М.С. Кольца Сатурна // Наука. М.: - 1970. - 118 с.

Ботвинова В.В., Кучеров В.А. Многоцветная поляриметрия галилеевых спутников Юпитера // Астрометрия и Астрофизика. – 1980. – Вып. 41. – С. 59–63.

11. Бугаенко О.И., Галкин Л.С. Поляриметрические исследования планет- гигантов. П. Фазовый ход поляризации избранных областей диска Сатурна // Астрон. журн. – 1972. – Т. 49, № 6.-C. 837-843

Бугаенко О.И., Гуральчук А.Л. Астрономический спектрополяриметр. І. Основные принципы работы // В кн: Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел. – Киев: Наукова.думка. – 1985. – С. 160–164.
 Видьмаченко А.П. Абсолютная электрофотометрия кольца В Сатурна // В кн: Физика планетных атмосфер. Ред. Мороженко А.В. – Киев: Наукова думка. – 1981. – С. 132–138.
 Видьмаченко А.П., Мороженко А.В., Клянчин А.И. Особенности морфологии и продуктор и протитика.

геологии поверхности спутника Юпитера Европы // Вісник астрономічної школи. – 2011. – Т. 7, № <u>1</u>. <u>C.117–132</u>.

15. 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.

И Вісник астрономічної школи. – 2011. – 1. 12, № 1. С.153–144. 16. Всехсвятский С.К. О возможности существования кольца комет и метеоров вокруг Юпитера // Астрон.. журн. – 1962. – Т. 39, № 2. – С. 290–302. 17. Гаррис Д.Л. Интегральная фотометрия и колориметрия спутников // В кн: Планеты и спутники. Изд– во ИЛ. М.: – 1963. – С. 222–305.

Спуники, изд- во ил. м.: – 1965. – С. 222–505. 18. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. – М.: Изд- во ИЛ. – 1949. – 647 с. 19. Давыдов В.Д. Интерпретация особенностей кольца F Сатурна и ее приложения // Космич. исслед. – 1981. – Т. 19, № 3. – С. 436–454. 20. Дегтярев В.С., Колоколова Л.О. Круговая поляризация как инструмент для исследования безатмосферных небесных тел. Теоретическое моделирование рассеяния света шероховатыми поверхностями // Кинематика и физика небесн. тел. – 1992. – Т. 8.– №2. – С. 8– 14. 14.

21. Дегтярев В.С., Колоколова Л.О., Мороженко А.В. Вращение плоскости поляризации света, рассеянного шероховатыми поверхностями, вблизи точки инверсии // Астрон. циркуляр.

– 1900. – № 1545. – С. 35– 36.
 22. Дегтярев В.С., Колоколова Л.О., Мороженко А.В., Цуруль М.Ф. Диагностические

Дегарсь Б.С., Колоколова Л.О., Морженко А.Б., Цуруль М.Ф. диагностические возможности круговой поляризации при изучении поверхностей безатмосферных небесных тел // Письма в Астрон. журн. – 1992. – Т. 18, № 3. – С. 279–283.
 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.
 Джевит Д., Клейна Ян., Шеппард С. Самые странные спутники в солнечной системе // В мире науки. – 2006. – № 11. – С. 22–29.

В мирс науки. – 2000. – 3 ст. п. – С. 22–25. 25. Джонсон Т., Пильчер К. Спектрофотометрия и строение поверхности спутников // В кн: Спутники планет. – М.: Мир. – 1980. – С. 267–305. 26. Довгопол А.Н., Лисина Л.Р. Светлая сторона Япета // Кинематика и физика небесных тел. – 1989. – Т. 5, № 2. – С. 38–44. 27. Довгопол А.Н., Шавловский В.И. Оптические характеристики галилеевых спутников

Юпитера в спектральной области 0.457- 0.792 мкм. І. Зависимость отражательной

способности от орбитального фазового угла вблизи оппозиции "Кинематика и физика небесн. способлести от оруди али от средского узна Селена са селена са селена са селена селена селена селена селена с гел. – 1985. – Т. 1, № 4. – С. 29–36. 28. 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 α= 6° Кинематика и физика небесн. тел. –

Способности от оргонального фазового угла волизи 0- 6 Кинематика и физика неосси. тел. – 1986. – Т. 2, № 3. – С. 48–51.
29. Жарков В.Н., Козенко А.В., Маева С.В. Строение и происхождение спутников Марса // Астрон, вестн. – 1984. – Т. 18, № 2. – С. 83–99.
30. Карташов В.Ф., Егоров Ю.А. Фазовые кривые кольца В Сатурна в 5 участках спектра // Астрон, циркуляр. – 1976. – № 903. – С. 3–5.

31. Киладзе Р.И. Фотографичечкие наблюдения колец Сатурна при прохождении Земли через их плоскость // Астрон. циркуляр. – 1967. – № 439. – С. 1.

32. Колоколова Л.О. О влиянии структуры поверхности безатмосферных небесных тел на поляризационные характеристики отраженного света // Асрон. вестн. - 1985. - Т. 18, № 2. -C. 165–173.

33. Колоколова Л.О. Ислледования некоторых статистических зависимостей между поляриметрическими характеристиками света, рассеяного поверхностями безатмосферных космических тел // Кинематика и физика небесных тел. – 1987. – Т. 3, № 5. – С. 47–51.

коспических тел // кинсматика и физика неоесных тел. – 1987. – 1. 3, № 5. – С. 4/– 51.
34. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1970. – 410 с.
35. Консольманьо Г.Дж., Льюис Дж.С. Модели строения и тепловой истории ледяных галилеевых спутников // В кн: Юпитер. І. Происхождение, внутреннее строение, спутники. Ред. Т. Герелс. – Мир. М.: – 1978. – С. 301– 322.
36. Кругов В.Д. Поверхностная яркость колец А и В Сатурна // Астрометрия и астрофизика. – 1979. – Вып. 39. – С. 47–50.

37. Ксанфомалити Л.В. Парад планет. – М. Наука. Физматлит. – 1997. – 256 с.
38. Кузьмин А.Д., Лосовський Б.Я. Измерения радиоизлученния спутника Юпитера Каллисто // Докл. АН СССР. – 1973. – Т. 211, № 4. – С. 804–805.
39. Лебединец В.Н. Абсолютная фотографическая фотометрия Юпитера и Сатурна со светофильтрами // Уч. зап. Харьковск. ун– та. 91; Тр. Астрон. обсерв. Харьковск. ун– та. – 1957. – №12. – С. 167–239.

Ленг К. Астрофизические формулы. 1. – М.: Мир. – 1978. – 449 с.

41. Мищенко М.И. Электромагнитное рассеяние в случайных дисперсных средах: фундаментальная теория и приложения: Дис. ... доктора физ. – мат. наук – Киев – Нью – Йорк. 2007. – 317 c.

42. Мороженко А.В. Исследование поляризационных свойств света, отраженного различными образцами земных пород // В кн: Физика Луны и планет. – Киев: Наук. Думка. – 1966. – C. 70–82.

43. Мороженко А.В. Поляриметрия в изучении тел Солнечной системы // Кинематика и физика небесных тел. – 2002. – Т. 18, № 6. – С. 483–507.

44. Мороженко О.В. Результати 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.

45. Мороженко О.В. Методи і результати дистанційного зондування планетних атмосфер. – Наукова думка. К.: – 2004. – 647с.

46. Мороженко А.В. Эффекты когерентного рассеяния в поляризационных свойствах галилеевых спутников Юпитера? // Кинематика и физика небесн. тел. – 2008. – Т. 24, № 2. – С. 155 - 157

47. Мороженко О.В., Яновицький Е.Г. Дослідження з фізики планет та малих тіл Сонячної системи // 50 років Головній астрономічній обсерваторії НАН України. – Київ. 1994. - C. 135-163.

48. Моррисон Д. Радиометрия спутников и колец Сатурна // Вкн: Спутники планет. Ред. Дж. Бернс. М.: Мир. – 1980. – С. 306–340.

49. Моррисон Д., Моррисон Н. Фотометрия галилеевых спутников // В кн: Спутники планет. Ред. Дж. Бернс. – М.: Мир. – 1980. – С. 402–417. 50. Полянский В.К., Рвачев В.П. К вопросу об отражении света шекроховатыми порверхностями // Оптика и спектроскопия. – 1966. – Т. 20, №4. – С. 701–709. 51. Полянский В.К., Рвачев В.П. Рассеяние света при отражении от статистически

распределенных микроплощадок // Оптика и спектроскопия. – 1967. – Т. 22, № 2. – С. 279–287.

. 52. Спутники планет. – М.: Мир. – 1980. – 632 с. 53. Спутники Юпитера. 1. – М.: Мир. – 1985. – 264 с. 54. Спутники Юпитера. 2. – М.: Мир. – 1986. – 446 с. 55. Спутники Юпитера. 3. – М.: Мир. – 1986. – 342 с.

56. Тишковец В.П. Обратное рассеяние света плотноупакованными системами частиц // Физическая и квантовая оптика. - 1998. - Т. 85, № 2. - С. 233-238.

57. Тишковец В.П. Многократное рассеяние электромагнитных волн дискретными случайными средами: Дис.... доктора физ.- мат. наук. - Харьков. - 2009. - 314 с. 58. Флоренский К.П. Базилевский А.Т., Бурба Г.А. Очерки сравнительной планетологии.

– М.: Наука. – 1981. – 326 с.

59. Фридман А.М., Поляченкео В.Л. О структуре колец Сатурна // Астрон. циркуляр. –

1981. – № 1204. – С. 1-6.
 60. Чигладзе Р.А. Поляриметрическое изучение спутников Юпитера // Тр. Тбил.ун- та. –
 1987. – Т. 270. – С. 240–247.
 61. Чигладзе Р.А. Исследование поляризационных свойств галилеевых спутников

Юпитера и планеты Уран: Дис. ... канд.физ. – мат.наук. – Абастумани: Абастум. астрофиз. обсерватория. – 1989 – 175 с. – Машинопись.

62. Шаронов В.В. Природа планет. – Изд– во ФМЛ. М.: – 1958. – 552 с.
 63. Шкуратов Ю.Г. Модель отрицательной поляризации света безатмосферных космических тел // Астрон. журн. – 1982. – Т. 59, №4. – С. 817–822.
 64. Шкуратов Ю.Г. О природе оппозиционного эффекта яркости и отрицательной

поляризации света твердых космических поверхностей // Астрон. циркуляр. – 1985. – №1400. – C. 3–6.

65. Шкуратов Ю.Г. Теневая составляющая фазовой зависимости яркости безатмосферных небесных тел // Кинематика и физика небесных тел. – 1988. – Т. 5, № 1. – С. 60–66.

66. Шкуратов Ю.Г., Дифракционный механизм формирования оппозиционного эффекта яркости поверхностей со сложной структурой // Кинематика и физика небесных тел. – 1988. – Т. 5, № 4. – С.33–40.

67. Шнырев Г.Д., Гречушников Б.Н., Мороз В.И. Мсследование инфракрасного спектра Сатурна методом преобразования Фурье // Астрон, циркуляр. – 1964. – №302. – С. 1-4.

68. Adams J.B., Filice A.L. Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders // J. Geophys. Res.–1967. – V. 72, No 22. – P. 5705–5715.

69. Allen D.A., Murdock T.L. Infrared photometry of Saturn, Titan and its rings // Icarus.–
1971. – V. 14, No 1. – P. 1–2.
70. Altobelli N., Spilker L., Pilorz S., et al., C ring fine ctructures revealed in the thermal infrared // Icarus.2007. – V. 191, No 2. – P. 691–701.
71. 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.

72. Andre S.B., Appasrent thickness of Saturn's rings // Nature.-1981.- V289, No 5797. - P. 447-450.

73. 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.
 74. 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.
 75. Bacaroal E. Bloame acaditions inside Jole orbit. Volume meansurements // L. Goenhus.

75. Bagenal F., Plasma conditions inside Io's orbit – Voyager measurements // J. Geophys. Res.-1985.-V90, No E1. - P. 311-324.

76. 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. 77. 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.
Provide the Uranian System F. et al. The imaging photopolarimeter experiment on

78. 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.
79. Ballester G.E., Moos H.W., Feldman P.D., et al. Detection of neutral oxygen and sulphur emissions near Io using IUE // Astrophys. J. -1987.- V. 319, No 1, Pt. 2. - L.33-L38.
80. Barber R.J., Miller S., Stallard T.J., et al. The United Kingdom Infrared Teleskope Deep Deep Coordinated Science - 2007

Impact observations: light curve, ejecta expansion rates qand water spectral features // Icarus. - 2007. V. 187, No 1. – P. 167–176.

81. 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

82. 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. 83. Baum W.A., Kreidl T., Westphal J.A., et al. Saturn's E ring // Icarus.-1981.- V. 47, No 1. -

P. 84–96.

84. Becklin E.E., Wynn– Williams C.G. Detection of Jupiter's ring at 2.2μm // Nature. –1979.–
V. 279, No 5710. – P. 400–401.
85. Beesley D.E. Saturn's ring markings – an historical note // Irish. Astron. J. – 1082.– V15,

No 4. – P. 337

86. 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.

87. Benner D.Ch., Fink U., Cromwell R.H. Image tube spectra of Pluto and Triton from 6800 to

9000A // Icarus. - 1978. - V36, No 1. - P. 82-91.
88. Berge G.L., Muhleman D.O. High- angular- resolution observations of Saturn at 21.1- centimeter wavelength // Astrophys. J. - 1973. - V. 185, No 1, Pt. 1. - P. 373 - 381.

89. Berge G.L., Muhleman D.O. Callisto: disk temperature at 3.71– centimeter wavelength // Science.-1975– V. 187, No 4175. – P. 441– 443.

90. 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.

91. Bergstralh J.T., Young J.W., Matson D.L., Johnson T.V. Sodium D- ine emission fromlo: a second year of synoptic observation from Table Mountain observatory // Astrophys. J. - 1977. - V. 211, No 1, Pt. 2. - L51-L55

92. Bernstein M.P., Cruikshank D.P., Sandford S.A. Near- infrared laboratory spectra of solid
H<sub>2</sub>O(CO<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub>OH/CO<sub>2</sub> ice mixtures // Icarus.-2005.- V. 179, No 4. - P. 527-534.
93. Bertaux J.L., Belton M.J.S. Evidence of SO<sub>2</sub> on Io from UV observations // Nature.- 1979.V282, No 5741. - P. 813-815.

94. Binder A.B., Cruikshank D.P. Evidence for an atmosphere on Io // Icarus.-1964.- V. 3, No 4. - P. 299- 305

4. – P. 299–303.
95. 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.
96. 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.
97. Blanco C., Catalano S. Photoelectric observations of Saturn satellites Rhea and Titan // Acteor Actemptica 1021. V. 14. PM 42, 47.

Astron. Astrophys. –1971. – V. 14.– N1. – P. 43–47. 98. Blanco C., Catalano S. On the photometric variations of the Saturn and Jupiter satellites //

Astron. Astrophys. – 1974.– V33, No 1. – P. 105–111.
 99. Bland M.T., Showman A.P., Tobie G. The production of Ganymede's magnetic field // Icarus. – 2008.– V. 198, No 2. – P. 384–399
 100. Bolkvadze O.R. Polarimetric observations of Io and Europe // Observ. and Astrophys.

Lab. Univ. Helsinki Rept. – 1981, No 2.– P. 73–80. 101. Bosh A.S., Olkin C.B., French R.G., Nicholson P.D. Saturn's F ring; inematics and

particle sizes from stellar occultation studies // Icarus.- 2002.- V157, No 1. - P. 57-75.

Description stena occuration studies // icarus.- 2002.- v157, No 1. - P. 5/- 75.
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.
Briggs F.H. The microwave properties of Saturn's rings // Astrophys. J.-1974.- V. 189, No 2, Pt. 1. - P. 367-377.
Briggs G.A. The radio brightness of Titan // Icarus.-1974.- V. 22, No 1. - P. 48-50.

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.
Broadfoot A.L., Belton M.J.S., Takacs P.Z., et al. Extreme ultraviolet observations from Voyager I. Encounter with Jupiter // Science, -1979–V. 204, No 4396. – P. 979–982.
Broadfoot A.L., Sandel B.R., Shemansky D.E., et al. Extreme ultraviolet observations from Voyager I encounter with Saturn // Science, -1981. – V. 212, No 4491. – P.206–211.
Brown R.A., Chaffee F.H., Jr. High- resolution spectra of sodium emission from Io //

108. 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.
 109. Brown R.H. The Uranian satellites and Hyperion: new spectrophotometry and compositional implications // Icasrus.- 1983.- V56, No 3. - P. 414-425.

110. Brown R.H. Surface of Miranda: identification of water ice // Icarus.– 1984.– V58, No 2. – P. 288–292.

111. Brown R.H. Baines K.H., Bellucci G., et al., Observations with the Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) during Cassini's flyby of Jupiter // Icarus.-2003.- V. 164, No 2. - P. 461-470.

112. Brown R.H. Baines K.H., Bellucci G., et al., The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) investigation // Space Sci. Rev. -2004.- V. 115, No 1-4.-P. 111-168.
113. 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.
114. Brown R.H., Cruikshank D.P. The uranian satellites: surface compositions and opposition brightness surges // Icarus.-1983.-V. 55, No 1.-P. 83-92.

III.5. 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.
II.6. Buratti, B.J. Voyager disk– resolved photometry of the saturnian satellites // Icarus.–1984.– V59, No 3. – P. 392–405.
II7. Buratti B.J. Ganymede and Callisto: surface textural dichotomies and photometric analysis // Icarus.–1991.– V. 92, No 2. – P. 312–323.

118. Buratti B.J., Cruikshank D.P., Brown R.H., et al. Cassini visual and infrared mapping spectrometer observations of Iapetus: Detection of CO<sub>2</sub> // Astrophys. J.-2005.- V. 622, No 2, Pt.2. -L149-L152

119. Buratti B.J., Gibson J., Mosher J.A. CCD photometry of the uranian satellites // Astron. J.- 1992.- V104, No 3. - P. 1618-1622.

J.- 1992.- V104, No 5. - P. 1618-1622.
120. 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.
121. 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.
122. 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.
123. Buratti B.J. McMer I.A. The dark side of Iapet: Additional evidence for an exogenous.

123. 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.
124. 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.

125. 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.
 126. Buratti B.J., Nelson R.M., Lane A.L. Surficial textures of the Galilean satellites // Nature 1000

- 1988.– V333.– N6169.– P. 148–151.
 127. Buratti B., Veverka J. Voyager photometry of Europa // Icarus.–1983.– V55, No 1.–P. 93–

110.

Buratti B., Veverka J. Voyager photometry of Rhea, Dione, Tethys, Enceladus and Mimas
Icarus. -1984.- V. 58, No 2. - P. 254-264.
Buratti B., Wong F., Mosher J. Surface properties and photometry of the uranian satellites
Icarus.-1990.- V. 84, No 2. - P. 206-215.
Buratti J.B., Gibson J., Mosher J.A., CCD photometry of the uranian satellites // Astron.
J.-1992.- V104, No 4. - P.1618-1622.
Buratti J. Burget J. A. Planetary. Pings // In The new Solar system - 4- th Edition (Beatty L K)

131. Burns J.A., Planetary Rings // In The new Solar system. – 4– th Edition (Beatty J. K., Peters C. C., Chaikin A., Eds.) Cambridge University Press. –1998–380 p.

Peters C. C., Chaikin A., Eds.) Cambridge University Press, -1998.– 380 p.
132. Burns J.A., Showalter M.R., Hamilton D.P., et al. The Formation of Jupiter's Faint Rings // Science. -1999.– V. 284, No 5417. – P. 1146–1150.
133. 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.
134. Butterworth P.S. Observations of the Galilean satellites of Jupiter from Earth orbit // Adv. Snace Res. –1981.– V 1. No. 9.– P. 177–184.

Space Res. -1981.- V. 1, No 9. - P. 177-184.

135. Calvin W.M., Clark R.N. Modeling the reflectance spectrum of Callisto 0.25 to 4.1 μm // Icarus.-1991.- V. 89, No 2. - P. 305-317.

136. Camichel H. Measure photometriques de Saturne et de son anneau // Ann. Astrophys.–
1958.– V. 21, No 5. – P. 231–232.
137. Campbell D.B., Chandler J.F., Ostro S.J. Galilean satellites: 1976 radar results // Icarus. –

1978.– V. 34, No 2. – P. 254–267.

138. Cambell 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. 139. 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.
 140. 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.- N3, Pt. 1. -P. 1082-1086.

141. Carlson R.W., Anderson M.S., Johnson R.E. Hydrogen Peroxide on the Surface of Europa
 // Science.-1999.- V. 283, No 5410. - P. 2062.
 142. 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.– 2007.– abstract #P51E–02. 143. Carr M.H. Silicate volcanism on Io // J. Geophys. Res. –1986.– V. 91, No 3. – P. 3521–

3532

144. Cerroni P., Clark R.N., Coradini A., et al. Observations with the Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) during Cassini's flyby of Jupiter // Icarus.- 2003.- V164, No 3.- P. 461-470

Chandrasekhar S. Radiative transfer // New York: Dover. –1960.– 451 p.
 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.

147. Charnoz S., Dones L., Esposito L.W., et al. Origin and evolution of Saturn's ring system // In Saturn From Cassini– Huygens. – M. Dougherty et al. Eds. – Dordrecht, Netherlands: Springer– Verlag – 2009.– P. 537–575.

148. 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.

149. Cheng A.F., Krimigis S.M., Lanzerotti L.J. Energetic particles at Uranus // In: Uranus. Eds. J.T. Bergstralh, E.D. Miner, M.S. Matthews. – University of Arizona Press, Tucson.– 1991.– P. 831-893.

150. Clark R.N. The spectral reectance of water- mineral mixtures at low temperatures // J. Geophys. Res. -1981.- V. 86, No 4 - P. 3074- 3086.

151. Clark R.N. Implications of using broadband photometry for compositional remote sensing of icy objects // Icarus - 1982.- V49, No 2. - P. 244-257.

152. 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.
153. Clark R.N., Brown R.H., Owensby P.D., Steele A. Saturn's satellites: near– infrared spectrophotometry (0.65–2.5µm) of the leading and trailing sides and compositional implications // Icarus.–1984.– V. 58, No 2. – P. 265–281.
154. Clark R.N., Curchin J., Jaumann R., et al. Compositional mapping of Saturn's satellite property of Casturn's context.

Dione with Cassini VIMS and implications of dark material in the Saturn system // Icarus.- 2008.-

V193, No 2. – P. 372–386. 155. Clark R.N., Fanale F.P. Surface composition of natural satellites // In Satellites. Burns

156. Clark R.N., Fanale F.P., Zent A.P. Frost grain size metamorphism: implications for remote sensing of planetary surfaces // Icarus. – 1983.– V56, No 2. – P. 233–245.

157. Clark R.N., McCord T.B., The Galilean satellites: New near-infrared spectral reflectance measurements (0.62-2.5µm) and a 0.325-5µm summary // Icarus.-1980.- V. 41, No 3. - P. 323-339.

158. Clark R.N., McCord T.B. The rings of Saturn: new near- infrared reflecteance measurements and a 0.326-4.08 μm summary // Icarus- 1980.- V43, No 1. - P. 161-168. 159. Clark R.N., Owensby R.D. The infrared spectrum of Rhea // Icarus. - 1981.- V46, No 3. -

P. 354– 360.

160. Collins S.A., Cook A.F., II, Cuzzi J.N., et al. First Voyager view of the rings of Saturn // Nature.-1980.- V. 288, No 5790. - P. 439-442.
161. Collins G.C., Goodman J.C. Enceladus' south polar sea // Icarus.-2007.- V.189, No1. - P.

72 - 82

1/2-82.
162. Colombo G., Goldreich P., Harris A.W. Spiral structure as an explanation for the asymmetric brightness of Saturn's A ring // Nature.-1976.- V. 264, No 5584. - P. 344-345.
163. Colvell J.E., Esposito L.W., Cremčevic, et al., Self- gravity wakes and radial structure of Saturn's B ring // Icarus.-2007.- V. 190, No 1. - P. 127-144.
164. Colvell J.E., Horn L.J., Lane A.L., et al. Voyager photopolarimeter observations of uranian ring ocultations // Icarus.-1990.- V83, No 1. - P. 102-125.
165. Conrath B., Flasar F.M., Hanel R., et al.. Infrared observations of the neptunian system //

Science. -1989.- V. 246, No 4936. - P. 1454-1459.

Science: -1999.- V. 240, 100 4930. -11.1439-1439.
166. Consolmagno G.J., Lewis J.S. The evolution of icy satellite interiors and surfaces // Icarus.- 1978.- V34, No 2. - P. 280-293.
167. Consolmagno G., Schaefer M. Words Apart: A Textbook in Planetary sciences, be G. Consolmagno, M. Shaefer. Prentice Hall.- 1994.- 453 p.
168. 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.

169. Cook A.F., Franklin F.A. An explanation of the light curve of lapetus // Icarus. –1970.– V. 13, No 2. – P. 282–291.

15, 100 2. - F. 202-291.
170. Coradini A., Tosi F., Gavrishin A.I., et al. Identification of spectral units on Phoebe // Icarus. - 2008.- V193, No 1. - P. 233-251.
171. Covault C.E., Glass I.S., French R.G., Elliot J.L. The 7 and 25 June 1985 Neptune occultastions: Constraints on the putative Neptune "arc" // Icarus.-1986.- V67, No 1.-P.126-133.
172. Crary F.J., Bagenal F. Remanent ferromagnetism and the interior structure of Ganymede // J. Geophys. Res.- 1998.- V103, No E11.- P.25757-25774

173. Croft S.K. Icy satellites: cratering and volcanism // NASA Tech. Memo. NASA TM-

4041. <u>1988.</u> – P. 404 – 406.

 174. 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.
 175. Croft, S.K., Soderblom L.A. Geology of the uranian satellites // In: Uranus. – Eds. J.T. Bergstrahh, E.D. Miner, M.S. Matthews. University of Arizona Press. – Tucson. –1991.– P. 561– 628.

176. Cross C.A. The size distribution of lunar craters // Monthly Notices Roy. Astron.Soc. -1966.- V134, No 3. - P. 245-252.

177. Cruikshank D.P. Infrared spectrum of Io, 2.8–5.3 μm // Icarus.-1980.- V. 41, No 2. - P. 240-245.

178. Cruikshank D.P. Near- infrared studies of the satellites of Saturn and Uranus // Icarus. -1980.- V41. - N2. -P. 246-258.

Cruikshank D.P., Apt J. Methane on Triton: Physical state and distribution // Icarus .-1984.- V. 58, No 2. - P. 306-311.
 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.

181. Cruikshank D.P., Brown R.H. The uranian satellites: water ice on Ariel and Umbriel // Icarus.- 1981.- V45, No 3. - P. 612-617.

182. 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.

183. Cruikshank D.P., Brown R.H., Clark R.N. Nitrogen on Triton // Icarus.-1984.- V. 58, No 2. - P. 293-305.

184. 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.
185. Cruikshank D.P., Dalton J.B., Dalle Ore C., et al. Surface composition of Hyperion // Nature. –2007. – V. 448, No 7149. – P. 54–56.
186. Cruikshank D.P., Owen T.C., Dalle Ore, C., et al. A spectroscopic study of the surfaces of Saturn's large satellites: H<sub>2</sub>O ice, tholins, and minor constituents // Icarus. –2005. – V. 175, No 2. – P. 268-283.

187. 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.

188. 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.
189. Cruikshank D.P., Silvagio P.M. Triton: a satellite with an atmosphere // Astrophys. J.– 1979. – V233, No 3, Pt. 1. – P. 1016–1020.
190. Cruikshank D.P., Veverka J., Lebofsky L.A. Satellites of Saturn – Optical properties // In Science - Coherde T. Mettheway M.S. (Ed.).

Saturn. Gehrels T., Matthews M.S. (Eds) – Univ. of Arizona Press. Tucson. AZ. –1984. – P. 640– 667.

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.
 Cuzzi J.N., Dent W.A. Saturn's rings: the determination of their brightness temperature

and opacity at centimeter wavelength // Astrophys. J.- 1975.- V198, No 1, Pt.1. - P. 223-227.

and opacity at centimeter wavelength // Astrophys. J. – 19/5. – V198, No 1, Pt. 1. – P. 225–227.
193. Cuzzi J.N., French R.G., Dones L. HST Multicolor (255–1042 nm) Photometry of Saturn's Main Rings: I: Radial Profiles, Phase and Opening Angle Variations, and Regional Spectra // Icarus. – 2002. – V158, No 1. – P. 199–223.
194. Cuzzi J.N., Lissauer J.J., Shu F.H. Density waves in Saturn's rings // Nature. –1981.– V.
292, No 5825. – P. 703–707.
195. Cuzzi J.N., Pollack J.B. Saturn's Rings: Particle composition and size distribution as constrained by microwave observations // Jearus. 1978. V33. No 2. P. 233.

constrained by microwave observations.I.Radar observations // Icarus.-1978.- V33, No 2. - P. 233-262.

196. Cuzzi J.N., Pollack J.B., Summers A.L. Saturn's rings: Particle composition and size distribution as constrained by observations at microwave wavelength // Icarus. -1980.- V. 44, No 3.

P. 683–705.
 197. 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.

198. Davies A.G. Volcanism on Io: the view from Galileo // Astronomy and Geophysics.– 2001.– V42, No 2. – P. 210–216.

199. 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.
 200. 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.

201. 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.

202. 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. 203. 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.

204. 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.

205. De Pater I., Brown R.A., Dickel J.R. VLA observations of the Galilean satellites // Icasrus.- 1984.- V57, No 1. - P. 93-111.

206. De Pater I., Dickel J.R. New information on Saturn and its rings from multi– frequency VLA data // Adv. Space. Res. – 1983.– V3, No 3. – P. 34–41.

207. De Pater I., Gibbard S.G., Chiang E., et al. The dynamic neptunian ring arcs: evidence for a gradual disappearance of Liberte and resonant jump of courage // Icarus.-2005.- V. 174, No 2. - P. 263-272.

208. De Pater I., Gibbard S.G., Hammel H.B. Evolution of the dusty rings of Uranus // Icarus.-2006. – V180, No 1. – P. 186–200.

209. De Pater I., Gibbard S.G., Macintosh B., et al. Keck adaptive optics images of Uranus and

its rings // Icarus.-2002.- V. 160, No 2. - P. 359-374.
 210. De Pater I., Hammel H.B., Gibbard S.G., Showalter M.R. New Dust Belts of Uranus: One Ring, Two Ring, Red Ring, Blue Ring // Science.-2006.- V. 312, No 5770. - P. 92-94.
 211. 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.

212. De Pater I., Showalter M.R., Burns J.A., Nicholson Ph.D. Keck infrared obaervations of Jupiter's ring system near Earth's 1997 ring plane crossings // Icarus.-1999.- V. 138, No 2. - P. 214-223.

213. De Pater I., Showalter M.R., Lissauer J.J., Graham J.R. Keck infrared obaervations of Saturn's E and G rings during Earth's 1995 ring plane crossings // Icarus. -1996.- V. 121, No 1. - P. 195-198.

214. De Pater I., Showalter M.R., Macintosh B. Keck observations of the 2002-2003 jovian

 114. De Patel 1, Showard M.K., Machilosh B. Reck Observations of the 2002–2003 jovianing plane crossing // Larus.–2008.– V. 195, No. 2. – P. 348–360.
 215. Déau E., Brahic A., Dones L., Porco C.C. The tilt effect in the Saturn's main rings with Cassini /ISS // Bul.Amer.Astron.Soc.– 2008.– V40.– P.430.
 216. Déau E., Dones L., Rodriguez S., et al. The opposition effect in the outer Solar system: A comparative study of the phase function morphology // Planet. Space Sci.–2008.– V. 57, No 11.– P. 1282-1301

217. 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.

218. 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.

219. Delitsky M.L., Lane A.L. Lee chemistry on the Galilean satellites // J. Geophys. Res. – 1998 – V103, No E13. – P. 31391–31403.

220. Dermott S.F. The "braided" F- ring of Saturn // Nature.-1981.- V290, No 5806.-P.454-

457. 221. Dollfus A. Optical polarimetry of the Galilean satellites of Jupiter // Icarus. –1975.– V. 25.

N3. – P. 416–431.
 222. Dollfus A. Optical reflectance polarimetry of Saturn's globe and rings. I. Measurements of B ring // Icarus. –1979.– V. 37, No 2. – P. 404–419.

223. Dollfus A. Saturn's rings: optical reflectance polarimetry // Icarus.-1996.- V. 124, No 1. -P. 237-261.

224. Dollfus A., Brunier S. Photometry of the unlite face of Saturn's rings // Icarus. -1982.- V. 52, No 3. – P. 516– 525.

225. 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
 226. 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

227. Dominque D., Verbiscer A. Re-analysis of the solar phase curves of the ice galilean satellites // Icarus.-1997.- V. 128. No 1. - P. 49-74.

Satelines // Earlis.-1997.- V. 1963. 1601.- 1.49-74.
228. Dones L, Cuzzi J.N., Showalter M.R. Voyager photometry of Saturn's A Ring // Icarus.-1993.- V105, No 1. - P. 184-215.
229. Dowling T.E., Muhleman D.O., Berge G.L. Aperture Synthesis observations of Saturn and its rings at 2.7- mm wavelength // Icarus.-1987.- V. 70, No 3. - P. 506-516.
230. Dreibus G., Waenke H. Origin and evolution of planetary and satellite atmospheres // Eds.
K. Aurure LD, Belleck M.G. Methoure Tweesen 1000 D. 269. 269.

S.K. Atreya, J.B. Pollack, M.S. Mattehews. Tucson. - 1989. - P. 268-288.

231. Dunham E., Elliot J.L., Mink D., Klemola A.R. Limit on possible narrow rings around Jupiter // Astron. J. –1982.– V. 87, No 10. – P. 1423–1427. 231a. Dunnas C., Terrile R.J., Smith B.A., Schneider G. Astrometry and near– infrared photometry of Neptune's snner satellite and ring arcs // Astron. J.–2002.– V. 123, No 4. – P. 1776– 1783

232. Dunn D.E., de Pater I., Wright M., Hogerheijde M.R., Molnar L.A. High- quality bima-ovro images of Saturn and its rings at 1.3 and 3 millimeters // Astron. J.- 2005.- V129, No 3.- P. 1109 - 1116

233. Elliot J.L., Dunham E., Wasserman L.H., et al. The radii of Uranian rings  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta$ , 4, 5, and 6 from their occultations of SAO 158687 // Astron. J.–1978.– V. 83, No 8.– P. 280–992.

234. Elliot J.L., Glass I.S., French R.G., Kangas J.A. The occultation of KNE 17 by Uranus and its rings // Icarus. – 1987.– V1, No 1. – P. 91–102.
235. Ellsworth K., Schubert G. Saturn's icy satellites – Thermal and structural models // Icarus.– 1983.– V54, No 2. – P. 490–510.

236. 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.

237. Emery J.P., Burr D.M., Cruikshank D.P., et al. Near-infrared (0.8-4.0 .m) spectroscopy

of Mimas, Encelad, Tedia, and Rhea // Astron. Astrophys. – 2005. – V435, No 2 – P. 353–362. 238. Epstein E.E., Jansen M.A., Cuzzi J.N., et al. Saturn's rings: 3– mm observations and derived properties // Icarus. –1980. – V. 41, No 1. – P. 103–118.

239. Epstein E.E., Jansen M.A., Cuzzi J.N. Saturn's rings: 3- mm low- inclination observations and derived properties // Icarus. - 1984.- V58, No 3. - P. 403-411.
 240. Esposito L.W., Borderies N., Goldreich P., et al. Eccentric ringlet in the Maxwell gap at

1.45 Saturn radii: multi- instrument Voyager observations // Science. -1983.- V. 222, No 4619. - P. 57-60. 241.

241. Esposito L.W., O'Callaghan M., Simmons K.E., et al. Voyager phoropolarimeter stellar occultation of Saturn's rings // J. Geophys. Res. – 1983.– VA88, No 11. – P. 8643–8649.

242. Etemad S., Thompson R., Andrejco M., et al. Weak localization of photons: Terrmination of coherent random walks by absorption and confined geometry // Phys. Rev. Lett. -1987.- V. 59, No 5. – P. 1420–1423.

243. 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.
244. Fanale F.P., Brown R.H., Cruikshank D.P., Clark R.N. Significance of absorption features

in lo's IR reflectance spectrum // Nature.-1979.- V. 280, No 5725. - P. 761-763. 245. 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.

246. Feibelman W.A. Concerning the "D" ring of Saturn // Nature.-1967.- V. 214, No 5090. -P. 793-794.

247. Ferrari C., Brahic A. Azimuthal brightness asymetries in planetary rings. I. Neptune's Arcs and narrow rings // Icarus.–1995.– V. 111, No 1. – P. 193–210.

248. Ferrin I.K. Saturn's rings. I. Optical thiockness of rings // Icarus. - 1974.- V22, No 2. - P. 159-174.

249. Fesenkov V.G. Photometric observations of the planet Saturn // Astron. Nachr. -1926.- V. 226. - P. 127-129.

250. Fesenkov V.G. Photometric observations of the planet Saturn // Astron. Nachr.-1927-V.229-P.227-231. 251. Fesenkov V.G. Photometric observations of the planet Saturn // Astron. Nachr. –1928. –

V231. - P.9-11.

252. 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.
253. 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.

254. 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.

255. 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. 256. Flasar F.M., Kunde V.G., Abbas M.M., et al. Exploring The Saturn System In The Thermal Infrared: The Composite Infrared Spectrometer // Space Science Reviews.-2004.- V. 115,

No 1-4. - P. 169-297.

1801–7. – 1. 105–2.1.
257. Focas J.H., Dollfus A. Propriétés optiques et épaisseur des anneaux de Saturne observés par la tranche en 1966 // Astron. Astrophys. –1969.– V. 2, No 3. – P. 251–265.
258. 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.
250. Ersek L.A. Pateran W.B. Sunwu of thermal ions in the Io plasma terms with the Galilao.

259. 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.

260. 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
Franklin F.A., Colombo G. A dynamical model for the radial structure of Saturn's rings // Icarus.-1970.- V. 12, No 3. - P. 338-347.
 Franklin F.A., Cook A.F. Optical properties of Saturn rings.II. Two- colour phase curves of the two bright rings // Astron. J.-1965.- V. 70, No 9. - P. 704-720.
 Franklin F.A. Cook A.F. Dhotemetry of Saturn's callification of fact of Cook A.F. Dhotemetry of Saturn's callification of the comparison of fact of

active of grantings// Astron. 3-1505- v. /0, NO 3. - F. /04-720.
active of granting 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.
active of Tranz O.G. (BV photometry of Triton // Icarus.-1981.- V45, No 3. - P.602-606.
active of Tranz O.G., Millis R.L. Photometrie of Dione, Tethys, and Enceladus on the UBV system // Icarus.-1975.- V. 24, No 4. - P. 433-442.

266. French R.G., Elliot J.L., Allen D.A. Inclinations of the uranian rings // Nature. -1982.- V. 298, No 5877. - P. 827-829.

 267. French R.G., Elliot J.L., Levine S.E. Structure of the uranian rings.II. Ring orbits and width // Icarus.-1986.- V. 67, No 1. - P. 134-163.
 268. French R.G., Jones T.J., Hyland A.R. The 1 May 1982 stellar occultation by Uranus and the Rings: observations from Mount Stromlo observatory // Icarus.-1987.- V. 69, No 3. - P. 499-505.

269. French R.G., Nicholson P.D. Edge waves and libratuions in the Uranus epsilon ring // Am. Astron. Soc.- 1995.- V27.- P.1205.

270. French R.G., Salo H., McGhe C.A., Dones L. HSWT observations of azimuthal asymetry in Saturn's rings // Icarus.-2007.- V. 189, No 2. - P. 493-522.

271. Froidevaux L. Saturn's rings: Infrared brigtness variations with solar elevation // Icarus.–
1981.– V46, No 1. – P. 4– 17.
272. Froidevaux L., Mattherws K., Neugebauer G. Thermal response of Saturn's ring particles during and after eclipse // Icarus.–1981.– V. 46, No 1. – P. 18– 28.
273. 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.

274. Gao B., Kassi S., Campargue A. Empirical low energy values for methane transitions in the 5852–6181 cm<sup>-1</sup> region by absorption spectroscopy at 81 K // J. Mol. Spectroscop. – 2009.– V253, No 1.– P. 55–63.

275. Gehrels T. Photometry of asteroids, in Surfaces and Interiors of Planets and Satellites, edited by A. Dollfus, Academic Press, London. – 1970. – P.319 – 376.

276. Gehrels T., Baker L.R., Beshore E., et al. Imaging photopolarimeter on Pioneer Saturn //

Science. 1980. – V207, No 4429. – P.434–439. 277. 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.

Gerakines, P.A., Moore M. H. Carbon suboxide in astrophysical ice analogs // Icarus.-278. 2001.- V154, No 2.- P.372- 380.

279. Gerakines, P.A., Schutte W. A., P. Ehrenfreund P. Ultraviolet processing of interstellar ice analogs I.: Pure ices // Astron. Astrophys.- 1996.- V312, No 1.- P.289-305.

analogs I., Fulle fees //. Astron. Astron. Astrophys. – 1990. – V312, No. F. 129 – 303.
280. Gibbard S.G., de Pater I., Hammel H.B. Near- infrared adaptive optics imaging of the satellites andf individual rings of Uranus // Icarus. – 2005. – V174–N1. – P.253–262. .
281. Giuranna M., Formisano V., Biondi D. et al. Calibration of the Planetary Fourier Spectrometer Short Wavelength Channel. // Planet, Space Sci. – 2005. – V53, No. – P. 975–992. 282. Goertz C.K., Morfill G. A model for the formation of spokes in Saturn's ring // Icarus. – 1983. – V53, No 2. – P.219–229.
283. Goergen J.D. Hammel H.B. Brown P.H. V photometry of Titania Obergn. and Triton //

283. Goguen J.D., Hammel H.B., Brown R.H. V photometry of Titania, Oberon, and Triton // Icarus. – 1989. – V77, No 2. – P.239 – 247. 284. Goguen J.D., Sinton W.M. Characterization of Io's volcanic activity by infrared

polarimetry // Science.- 1985.- V230, No 47221.- P.65- 69.

285. Goldberg B.A., Mekler Yu., Carlson R.W., et al. Io's sodium emission cloud and the Voyager 1encounter // Icarus.- 1980.- V44, No 2.- P.305-317.

286. Goldstein R.M., Green R.R. Ganymede:radar surface characteristics // Science. – 1980. –

V207, No 4427, – P.179–180. 287. Goldstein R.M., Green R.R., Pettengill G.H., Campbell D.B. The rings of Saturn: Two-frequency radar observations // Icarus. – 1977. – V.30, No 1. – P.104–110.

288. Goldstein R.M., Morris G.A. Radar observations of the rings of Saturn // Icarus.- 1973.-V. 20, No 3. -P.260-262

289. Gomis, O., Strazzulla G.  $CO_2$  production by ion irradiation of H<sub>2</sub>O ice on top of carbonaceous materials and its relevance to the Galilean satellites // Icarus.- 2005.- V177, No 2.-P.570-576.

290. Gradie J.A. A polarimetric surway of the Galilean satellites // Bull. Amer. Astron. Soc.–
 1974.– V5, No 4.– P.404.
 291. Gradie J., Thomas P., Veverka J. The surface composition of Amalthea // Icarus.–
 1980.–

V44, No 2.- P.373-387.

292. Greenberg R. The icy Jovian satellites after the Galileo mission // Reports on Progress in Physics.-2010.- V. 73, No 3. - P. 6801-6821.
293. 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.
294. Grün E., Garneau G.W., Terrille R.J., et al. Kinematics of Saturn's spokes // Adv. Space.
Res.-1984.- V4, No 9.- P.143-148.
L. et al. The avolution of grades in Saturn's P. ring //

Grün E., Morfill G.E., Terrile R.J., et al. The evolution of spokes in Saturn's B ring // Icarus. – 1983. – V54, No 2. – P.227 – 252.
 Grundy W.M., Buie M.W., Stansberry, et al. Near–infrared spectra of icy outer Solar

System surfaces: Remote determination of H<sub>2</sub>O ice temperatures // Icarus.- 1999.- V142, No 3.-P.536–549.

297. Grundy W.M., Schmitt B. The temperature–dependent near– infrared absorption spectrum of hexagonal H<sub>2</sub>O ice // J. Geophys. Res.– 1998.– V103, No E11.– P.25809–25822. 298. 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.

299. 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.
 300. Grundy W.M., Young L.A., Young E.F. Discovery of CO<sub>2</sub> ice and leading-trailing spectral asymmetry on the uranian satellite Ariel // Icarus.- 2003.- V162, No 1.- P.222-229

301. Guerin P. The new ring of Saturn // Sky and Telescope. – 1970. – V40, No 2. – P88. 302. Gurin P. The new ring of Saturn // Sky and Telescope. – 1970. – V40, No 2. – P88. 303. 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.

303. 303. Hagfors T., Gold T., Ierkic H.M. Refraction scattering as origin of the anomalous radar returns of Jupiter's satellites // Nature.- 1985.- V. 315, No 6021.- P.637-640.

304. 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. 305. Hall J.S., Riley L.A. A photometric study of Saturn and its rings // Icarus.- 1974.- V. 23,

No 2.- P.144-156.

306. Hämeen A.K., Itävuo H. East-west asymmetry of Saturn's rings // Astrophys..Space. Sci.-1976.-V.41.- No1.-P.57-61.

307. Hämeen-Anttila K.A.The dark-side illumination of Saturn's rings // Astrophys. Space

Sci.- 1973.- V. 20, No 1.- P.159-164. 308. Hamilton, D.P., Burns, J.A. Origin of Saturn's E ring: Self- sustained, naturally // Science.- 1994.- V. 264, No 5158.- P.550-553.

309. Handel P.H., James Ph.B. A model for the formation of spokes in Saturn's ring // Geophys. Res.Lett. – 1983.– V. 10, No 1.– P.1–4.

310. 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.
311. Hanel, R., Conrath B., Flasar F. M., et al. Infrared observations of the Uranian system // Science. – 1996. – V.233. – No 4759. – P. 70–74.
312. Hansen G.B. The infrared absorption spectrum of carbon dioxide ice from 1.8 to 333 µm // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102, No E9. – P.21569–21587.

313. Hansen G.B. Ultraviolet to near- infrared absorption spectrum of carbon dioxide ice from 0.174 to 1.8 μm // J.Geophys. Res. – 2005. – V.110, No E11. – P.11–18.

314. 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.

11-19.
315. Hansen O.L. Ten-micron eclipse observations of Io, Europa, and Ganimede // Icarus.1973.- V.18, No 2.- P.237-246.
316. 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.
317. Hansen O.L. Infrared albedos and rotation curves of the Galilean satellites // Icarus.1975.- V. 26, No 1.- P.24-29.
318. Hansen V.L. Geologic mapping of tectonic planets // Earth and Planetary Science
Letters.- 2000.- V176, No 3- 4.- P.527-542.
319. Hanke B W Ridirectional reflectance spectroscopy. I. Theory // J.Geophys.Res.- 1981.-

319. Hapke B.W. Bidirectional reflectance spectroscopy. I. Theory // J.Geophys.Res.- 1981.-V.86, No B4.- P. 3039-3054.

320. Hapke B.W. Bidirectional reflectance spectroscopy. 3. Correction for macroscopic

roughness // Icarus. – 1984. – V. 59, No 1. – P.41–59. 321. Hapke B.W. Bidirectional reflectance spectroscopy. 4. The extional coefficient and opposition effect // Icarus. – 1986. – V. 67, No 2. – P.264–280.

322. Hapke B. Coherent backscatter and the radar characteristics of outer planet satellites // Icarus.- 1990.- V. 88, No 2. - P.407-417.

323. Haring R.A., Pedrys R., Oostra D.J., et al. Reactive sputtering of simple condensed gases by keV ions III: Kinetic energy distributions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B.– 1984.– V. 5, No 3. – P. 483–488.

324. Hedman M.M., Burns J.A., Showalter M.R., et al. Saturn's dynamic D ring // Icarus.-2007.- V. 188, No 1.- P. 89-107.

2007.- V. 188, No 1.- P. 89-107.
325. Hedman M.M., Murray C.D., Cooper N.J., et al. Three tenuous rings/arcs for three tiny moons // Icarus.- 2009.- V. 199, No 2. - P. 378-386.
326. 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.
327. 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.
328. Helfenstein P., Veverka J., Thomas P.C. Uranus satellites: Hapke parameters from Voyager disk-integrated photometry // Icarus.- 1988.- V74, No 3.- P.231-239.
329. Hibbitts C.A. McCord T.B. Hansen G.B. Distributions of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> on the surface of

329. Hibbits C.A., McCord T.B., Hansen G.B. Distributions of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> on the surface of Callisto // J. Geophys. Res. -2000. – V. 105, No E9. – P. 22541–22557.
330. Hibbits 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.

331. Higgins C.A., Carr T.D., Reyes F., et al. A redefinition of Jupiter's rotation period // J. Geophys. Res. –1997.– V. 102, No A10. – P. 22033–22042

332. Hill J.R., Mendis D.A. On the braids and spokes in Saturn's ring system // Moon and

Planets. – 1981. – V24, No 4. – P.431–436. 333. Hill J.R., Mendis D.A. On the dust ring of Saturn's F–ring // Geophys.Res.Lett.– 1982.– V9, No 9.– P.1069–1071.

334. Hill T.W. Longitudinal asymmetry of the Io plasma torus // Geophys.Res.Lett.- 1983.-V10, No 10.- P.969-972.

335. Hillier J., Helfenstein P., Verbiscer A., et al. Voyager disk- integrated photometry of

335. Hillier J., Heltenstein P., Verbiscer A., et al. voyager disk- integrated photometry of Triton // Science.- 1990.- V250, No 4979.- P.59-61.
336. Holberg G.B. Identification of 1980 S27 and 1980 S26 resonances in Saturn's A ring // Astron. J.- 1982.- V87, No 10.- P.1416- 1427.
337. Holberg J.B., Forrester W.T., Lissauer J.J, Identification of resonance features within the rings of Saturn // Nature.- 1982.- V297, No 5862.- P.115- 120.
338. Holberg J.B., Nicholson P.D., French R.G., Elliot J.L. Stellar occultation probes of the uranian rings at 0.1 and 2.2 µm: a comparison of Voyager UVS and earth- based results // Astron. J.- 1987.- V94, No 1.- P.178-188.
339. Houpis H.L.F., Mendis D.A. The fine structure of the saturnian ring system // Moon and Planets - 1983.- V29. No 1.- P.39-46.

Planets. – 1983. – V29, No I. – P.39 – 46.
 340. 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 I. - P.27-37.

341. Hubbard W.B., Brahic A., Sicardy B., et al. Occultation detection of a Neptunian ring-like arc // Nature. – 1986. – V319, No 6055. – P.636–640.

342. Hudson H.S., Lindsey C.A., Sojfer B.T. Submillimeter observations of planets // Icarus.–
 1974.– V23, No 3.– P.374–379.
 343. Ingersol A.P., Orton G.S., Munch, et al. Pioneer Saturn infrared radiometer: preliminary

results // Science.- 1980.- V207, No 4429.- P.439-443.

344. Ip W.H. On plasma transport in the vicinity of the rings of Saturn: a siphon flow mechanism // J.Geophys.Res.-1983.-VA88, No 2.-P.810-822.

345. 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.
346. Irvine W.M. The shadowing effect in diffuse reflection // J.Geophys.Res.- 1966.- 71, No

12.- P.2931-2937

347. Irvine W.M., Simon Th, Menzel D.H., et al. Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets.II.Observations from Le Houga observatory // Astron.J.- 1968.- V73, No 4.- P.251-264.

348. Irvine W.M., Simon Th, Menzel D.H., et al. Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets.III.Observations from the Boyden observatory // Astron.J.- 1968.- V73, No 9.-P.807-828

349. 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.

350. 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.

351. 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.

352. Janssen M.A., Olsen E.T. A measurement of the brightness temperature of Saturn's rings at 8– mm wavelength // Icarus. – 1978. – V33, No 2. – P.263–278.

353. 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.
354. 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.

355. Jewitt D.C., Danielson G.E. The Jovian ring // J. Geophys. Res.-1981.- VA86, No 10 - P. 8691-8697.

356. Jewitt D.C., Danielson G.E., Terrile R.J. Ground-based observations of the jovian ring and inner satellites // Icarus. – 1981. – V48, No 3. – P.536–539. 357. Johnson P.E., Kemp J.C., King R., et al. New results from optical polarimetry of Saturn's rings // Nature. – 1980. – V283, No 5743. – P.146–149.

358. 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.

359. 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.
 360. Johnson T.V. Triton's Interior and Heat Flow // Bull. Am. Astron. Soc. -1990.- V22, No

3.- P.1128

361. 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.

362. 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 363. Johnson T.V., McCord T.B. Galilean satellites. The spectral reflectivity 0.30– 1.10 microns // Icarus.- 1970.- V13, No 1.- P.37–42. 364. Johnson T.V., McCord T.B. Spectral geometric albedo of the Galilean satellites 0.3– 2.5

microns // Astrophys. J.–1971.– V169, No 3.Ptl.–P589–594. 365. Johnson T.V., Morrison D., Matson D.L., et al. Heat flow from Io: longitudinal distribution // "Lunar and Planet. Sci. Vol. 15, Abstr. Pap. 15<sup>th</sup> Conf., 12–16 March 1984, Pt 1"

Houston // Lunai and Fianci, Sci. vol. 15, Abstr. Pap. 15" Conf., 12– 16 March 1984, Pt 1" Houston, Tex.– 1984.– P.409–410. 366. 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. 367. Johnson T.V., Veeder G.J., Matson D.L. Evidence for frost on Rhea 's surface // Icarus.– 1975.– V24, No.4.– P.428–432.

19/5.- V24, No 4.- P.428-452.
368. 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.
369. Kaasalainen S. Laboratory photometry of planetary regolith analogs. I. Effects of grain and packing properties on opposition effect // Astron. Astrophys. - 2003. - V409, No 3. - P.765- 769.
370. Kaasalainen S., Muinonen K., Piironen J. Comparative study on opposition effect of icy solar system objects // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer.-2001.- V. 70, No 4- 6. - P. 529- 543.
371. 1176. Kaeufl H.- U., Ballester P., Biereichel P., et al. CRIRES: a high-resolution infrared performance for ESO's VI T. // Ground-based lastrumentation for Astronomy. Edited by Alan E.M.

spectrograph for ESO's VLT // Ground- based Instrumentation for Astronomy. Edited by Alan F.M. Moorwood and Iye Masanori. Proceedings of the SPIE. - 2004.- V5492. - P. 1218- 1227.

372. Kaiser M.L., Desch M.D. Narrow-band Jovian kilometric radiation – A new radio component // Geophys. Res. Letters.–1980.– V. 7, No 5 – P. 389–392.
373. Kargel J.S. Encelad: Cosmic gymnast, volatile miniworld // Science.– 2006.– V311, No

5766. – P. 1389–1391.

374. Kargel J.S., Pozio S. The Volcanic and Tectonic History of Enceladus // Icarus. -1996.-V. 119, No 2. -P. 385-404.

375. Karkoschka E. Rings and satellites of Uranus: Colorful and not so dark // Icarus.- 1997.-V125, No 2.– P.348–363. 376. Karkoschka E

376. Karkoschka E. Methane, ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and Titan from CCD- spectrophotometry // Icarus. – 1998. – V133, No 1. – P.134–146.

377. 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.

378. Karkoschka E. Photometric modeling of the epsilon ring of Uranus and its spacing of

J. Karkoschka E. Thousener of the epsilon fing of oralids and its spacing of particles. // Icarus. - 2001. – V151, No 1. – P.78–83.
379. Karkoschka E. Comprehensive photometry of the rings and 16 satellites of Uranus with the Hubble Space Telescope // Icarus. - 2001. – V151, No 1. – P.51–68.
380. Karkoschka E., Tomasko M.G. Rain and dewdrops on Titan based on in situ imaging // Icarus. - 2009. – V199, No 2. – P. 442–448.

381. Keller H.U., Arpigny C., Barbieri C., et al. First Halley Multicolour camera imaginmg

 Solt, Keilog 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.

383. Kemp J.C., Murphy R.E. The linier polarization and transparency of Saturn's rings // Astrophys.J.- 1973.- V186, No 2,Pt1.- P679- 686.

384. 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.
385. 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.
 386. 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. 387. Khurana K.K..

387. 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.

388. Kieffer S.W., Lopes- Gautier R., McEwen A., et al. Prometheus: Io's Wandering Plume // Science. -2000.- V. 288, No 5469. - P. 1204-1208.
389. 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.
390. Kieffer H.H., Smythe W.D. Frost spectra: comparison with Jupiter's satellites // Icarus.-1974.- V21, No 4.-P.506-512.
391. Kiugleon M.G. Khurang K.K., Corportit F.V., et al. Magnetic field and magnetoenberg of

391. 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.

392. 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.

393. 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.337–340 394. Kivelson M.G., Khurana K.K., Walker R.J. Lo's Interaction with the Plasma Torus: Galileo Magnetometer Report // Science. – 1996. – V274, No 5286.– P.396–398.

395. Kliore A.J., Fjeldbo G., Seidel B.L., et al. The atmosphere of Io from Pioneer 10 radio occultatiob measurements // Icarus. – 1975.– V24, No 4.– P.407–410. 396. Kouchi A., Kuroda T. Amorphization of cubic ice by ultraviolet irradiation // Nature. – 1990.– V344, No 6262,– P. 134–135.

397. Kozyrev N.A. East- west asymmetry of Saturn's rings // Astrophys.Space Sci.- 1974.-V. 27, No 1.– P.111–116.

398. 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.
 399. 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.
 400. Krüse S., Klavetter J.J., Dunham E.W. Photometry of Phoebe // Icarus.- 1986.- V68, No

1.- P.167-175

401. Kulik I., Jockers K., Ground-based photometrsi observations of Jupiter's inner satellites Thebe, Amalthea, and Meris at small phase angles // Icarus – 2004. – V170, No 1. – P.24–34.

402. Kupo I., Mekler Yu., Eviater A., Detection of ionized sulfur in the jovian magnetosphere

// Astrophys.J.- 1976.- V205, No 2, Pt.2.- L51-L53. 403. Kyrala A., On a magnetic anomaly origin for the braids of Saturn's F- ring // Moon and Planet.- 1981.- V25, No 1.- P.129-130.

404. Labeyrie A. Attainment of difraction limited resolution in large telescopes by Fouerier analyzing specle patterns in star images // Astron.Astrophys.- 1970.- V6, No 1.- P.85-87.

405. Landolt A.U. UBVRI photometric standard stars in the magnitude range  $11.5 \le V \le 16.0$ 

around the celestial equator // Astron. J.– 1992.– V104, No 1.– P.340–491.
 406. Lane A.L., Hord C.W., West R.A., et al. Photopolarimetry from Voyager– 2: preliminary results on Saturn, Titan, and the rings // Science.– 1982.– V215, No 4532.– P.537– 543.
 407. Lane A.L., Hord Ch.W., West R.A., et al. Photometry from Voyager 2: Initial results from the prevention of the

the uranian atmosphere, satellites, and the Rings // Science. 1986. – V233, No 4759.– P.65–70. 408. Lane A.L., Nelson R.M., Matson D.L. Evidence for sulphur implantation in Europa's UV absorption band // Nature.– 1981.– V292, No 5818.– P.38–39.

409. Lane A.L., West R.A., Hord Ch.A., et al. Photometry from Voyager 2: Initial results from the Neptunian atmosphere, satellites, and rings // Science. – 1989. – V246, No 4936. – P.1450–1454.
410. 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.
411. Laquzerotti 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.

412. Larson S.M. Observations of the Saturn D rings // Icarus.- 1979.- V37, No 2.- P.399-403.

413. 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.
 414. Lebofsky L.A., Identification of water frost on Callisto // Nature.- 1977.- V269, No

5631.- P.785-787.

415. 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.

416. 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.

417. Lebofsky L.A., Johnson T.V., McCord T.B. Saturn's rings: Spectral reflectivity and compositional implications // Icarus-1970.- V13, No 2.- P.226-230.

418. 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.
 419. Lee Th. Spectral albedos of the Galilean satellites // Comm.Lunar Planet.Lab.– 1972.–

V9, No 166 .- P.166-180.

420. Lewis J.S. Satellites of the outer planets: their physical and chemical nature // Icarus. -1971.- V15, N2. - P.174-185.

421. Lissauer J.J. Ballistik transport in Saturn's rings: an analytic theory // Icarus.- 1984.-V57, No 1.– P.63–71. 422. Lissauer J.J., French R.G. HST high– resolution dackscatter imasge of Saturn's G rimg //

Icarus.- 2000.- V146, No 1.- P.12-18.

423. Lissauer J.J. Nicholson P.D., Models of Neptune's arc rings // Adv.Space.Res.- 1990.-V10, No 1.- P.231-237.

424. Lockwood G.W., Lumme K., Thompson D.T. The recent photometric variability of Io // Icarus.- 1980.- 44, No 2.- P.240- 248.
425. Lockwood G.W., Thompson D.T. Photoelectric photometry of Europa and Callisto 1976-1991 // J.Geophys.Res.- 1992.- V97, No E9.- P.14761-14772.

426. 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. 427. Lopes R.M.C., Williams D.A. Io after Galileo // Rep. Prog. Phys.–2005.– V. 68.– N2 – P.

303-340.

428. 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.
429. Lumme K., Esposito L.W., Benton W.D., Daum W.A. International planetary patrol

observations of Saturn rings.I.Observations and data reduction // Astron. J.- 1979.- V84, No 9.-P.1402-1407.

430. Lumme K., Esposito L.W., Irvine W.M., Baum W.A. Azimuthal brightness variations of Saturn's rings.II.Observations at an intermediate tilt angle // Astrophys.J.- 1977.- V216, No 3,Pt2.-L123–L126.

431. Lumme K., Irvine W.M. Photometry of Saturn's rings // Astron. J.- 1976.- V81. No 10.-P.865-893

432. Lumme K., Irvine W.M. Azimutha Astrophys.J.– 1976.– V204, No 1,Pt1.– L55– L57. Irvine W.M. Azimuthal brightness variations of Saturn's rings //

<sup>ASD OpUYS-J.- 17/0.- V204, NO 1.PTL-E-D2-L27.
433. Lumme K., Irvine W.M., Esposito L.W. Theoretical interpretation of the ground-based photometry of Saturn's B ring // Icarus.- 1983.- V53, No 2.- P.174-184.
434. Lumme K., Irvine W.M., Martin L.J., Baum W.A. Azimutal brightness of Saturn's rings.
III. Observation at tilt angle B≈11.5° // Astrophys. J.- 1979.- V229, No 2,Pt.2 - L109-L111.
435. Lumme K., Reitsema H.J. Five-color photometry of Saturn and its rings // Icarus.1978.- V33, No 2.- P.288-300.
436. Lumine L. Climate evolution on Marc. Earth and Titure and the start of a first of the start </sup>

436. Lunine J.I. Climate evolution on Mars, Earth, and Titan: was the ancient Sun fainer? // Planetary Systems, the long view. Eds. L.M. Celnikier, J. Tran Thrank Van. 1998. – P. 231–236.

437. 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.

A and B fills? // Cards. - 2000. • 140, 100 1.- P.45-47. 438. Lyot B. L'aspects des planetes au Pic du Midi dans une lunette de 60 cm d'ouverture // Astronomie.- 1953.- V67.- P.3-21. 439. Macy W.W.,Jr., Trafton L.M. Io's sodium emission cloud // Icarus.- 1975.- V25, No 3.-

P.432-438

440. Manfroid J., Haefner R., Bouchet P., New evidence for a ring around Neptune // Astron. Astrophys.- 1986.- V157, No 1.-L3-L5
441. Marouf E.AS., Tyler G.L., Zebker H.A., et al. Particle size distributions in Saturn's rings from Voyager 1 radio occultation // Icarus.- 1983.- V54, No 2.-P.189-211.
442. Matthewing, P.A. The derivative of Hupetria and the origin of Hupetrian // O. L. P. Astron.

442. Matthews, R.A. The darkening of Japetri and the origin of Hyperion // Q. J. R. Astron. Soc. – 1992.– V33, No.3.– H253–258.

443. 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. 444. 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. 445. McCord T.B., Hansen G.B., Clark R.N., et al. Non– water–ice constituents in the surface investigation // J. Geophys. Res. - 1998.- V103, No E4. - P. 8603-8626.

446. 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.
447. McCord Th.B., Johnson T.V. Lunar spectral reflectivity (0.3 to 2.5µm) and implications for remote mineralogical analysis // Science.-1970.- V169, No 3948.- P. 855-858.
448. McCord T.B., Johnson T.V., Elias J.H. Saturn and its satellites: Narrow band spectrophotometry (0.3-1.1.m) // Astrophys. J. - 1971.- V. 165, No 2, Pt.1 - P. 413-424.
449. McCoud G.C. Polarization properties of simple dielectric rough surface model // L Opt.

449. McCoyd G.C. Polarization proparties of simple dielectric rough surface model // J. Opt. Soc. Amer. -1967.- V. 57, No 11. - P. 1345-1350.
 450. 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.

451. 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.

452. 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.
453. 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.

454. McFadden L.A., Bell J., McCord T.B. Visible spectral reflectance measurements 0.3-1.1µm of the Galilean satellites at many orbital phase angles 1977–1978 // Icarus. – 1980. – V. 44. – N3. – P. 410–430.

455. McGhee C.A., French R.G., Dones L., et al. HST observations of spokes in Saturn's B ring // Icarus. - 2005. - V. 173. - N2. - P.508-521.
456. McMuldtoch S., Pilorz S.H., Danielson G.E. NIMSE Science Team Galileo NIMS Near-

Infrared observations of Jupiter's ring system // .Icarus. - 2000. - V. 146, No 1. - P.1 - 11

457. Mekler Yu., Eviator A. Spectroscopic observations of Io // Astrophys.J.- 1974.- V. 183, No 3, Pt.2.- L151-L152

458. Mekler Y., Eviatar A., Kupo I. Jovian sulfur nebula // J.Geophys.Res.- 1977.- V. 82, No 19.- P.2809-2814.

459. Melnick G., Russell R.W., Gosnell T.R. Harwit M. Spectrophotometry of Saturn and its rings from 60 to 180 microns // Icarus.- 1983.- V53, No 2.- P.310-318.

460. Mertz L., Coleman I. Infrared spectrum of Saturn's ring // Astron. J.- 1966.- V.71, No 8.- P.747-748.

461. 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.
462. Milazzo M.P., Keszthelyi L.P., McEwen A.S. Observations and initial modeling of lava SO<sub>2</sub> interactions at Prometheus, Io // J.Geophys. Res.-2001.- V. 106, No E12.-P. 33121-33128.
463. Millis R.L. UBV photometry of lapetus // Icarus.- 1973.- V. 18, No 2.- P.247-252.
464. Millis R.L. UBV photometry of lapitus: results from five apparitions // Icarus.- 1977.-

V31, No 1.– P.81– 88.

465. Millis R.L. Photoelectric photometry of JV // Icarus.- 1978.- V. 33, No 2.- P.319-322

Millis R.L., Thompson D.T. UBV photometry of the Galillean satellites // Icarus.- 1975.-466. V. 26, No 4.- P.408-419

467. Millis R.L., Wasserman L.H. The occultation of BD- 15° 3969 by the rings of Uranus // Astron.J.- 1978.- V. 83, No 8.- P.993-998.

468. Millis R.L., Wasserman L.H., Birch P.V. Detection of rings around Uranus // Nature.-1977.- V. 267, No 5609.- P.330- 331.

469. 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.

470. Mischenko M.I. Polarization characteristics of the coherent backscatter opposition effect // Earth, Moon, Planets. – 1992. – V. 58, No 2. – P.127–144.

471. Mishchenko M.I. On the nature of the polarization opposition effect exhibited by Saturn's rings // Astrophys.J.- 1993.- V.411, No 1, Pt.1.- P.351-361.

 472. Mishchenko M.I., Dlugach J.M. Weak localization of electromagnetic waves and radar polarimetry of Saturn's rings // Mon.Not.R.Astron.Soc. – 2008. – V. 389. – P.1665–1674.
 473. Mishchenko M.I., Luck J–M. Nieuwenhuizen T.M. Full angular profile of the coherent polarization opposition effect // J.Opt.Soc.Amer. – 2000. – V. 17, No 5. – P.888–891.
 474. Mishchenko M.I., Rozenbush V.K., Kiselev N.N. Weak localization of electromagnetic waves and opposition phenomena exhibited by high– albedo atmospherless solar system objects // Appl. Out – 2006 – V 45. Appl. Opt.- 2006.- V. 45, No 18.- P.4459- 4463.

475. 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.

476. 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.
477. 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.

478. Moose H.W., Durrance S.T., Skinner T.E., et al. IUE spectrum of the Io torus: identification of the  ${}^{5}S_{2} \rightarrow {}^{3}P_{2,1}$  transition of SIII // Astrophys. J.– 1093.– V. 275, No 1, Pt.2.– L19– 23.

479. Morfill G.E., Fechtig H., Grün E., Gourtz C.K. Some consequences of meteoroid impacts on Saturn's rings // Icarus.– 1983.– V. 55, No 3.– P.439– 447.
480. Morfill G.E., Goertz C.K. Plasma clouds in Saturn's rings // Icarus.– 1983.– V. 55, No 1.–

P.111-123.

481. Morfill G.E., Grun E., Johnson T.V. Saturn's E. G and F rings: modulated by the plasma sheet // J.Geophys.Res.- 1983.- VA88, No 7.- P.5573- 5579. 482. Morgan J.S. Temporal and spatial variations in the Io torus // Icarus.- 1985.- V. 62, No

3.- P.389-414.

483. Morrison D., Ckuikshank D.P. Thermal properties of the Galilean satellites // Icarus.-1973.- V. 19, No 2.- P.224-236.

484. Morrison D., Cruikshank D.P., Murphy R.E., et al. Thermal inertia of Ganimede from 20– micron eclipce radiometry // Astrophys.J.– 1971.– V. 167, No 3, Pt.2.– P. L107–L111.
485. 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.
486. Marrison D., Cruikshank D.P., D.P. Dicker G.P. Dicker G.P. Dicker G.P. States at the second states of the second stat

486. 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.

487. Morrison, D., Johnson, T.V., Shoemaker E.M., et al. Satellites of Saturn-Geological erspective. In: Gehrels, T., Matthews, M.S. (Eds.), Saturn. Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ,-1984.– P. 609–639.

488. Morrison D., Morrison N.D., Lazarewicz A.R. Four- Color Photometry of the Galilean satellites // Icarus.- 1974.- V23, No 3.- P.399-416.

489. Morrison D., Telesco C.M. Io: Observational constraints on internal and thermophysics of

the surface // Icarus. – 1980.– V. 44, No 2. – P. 226–233. 490. Murcray F.J., Goody R. Pictures of the Io sodium cloud // Astrophys.J.– 1978.– V. 226, No 1, Pt.1. – P. 327–335.

491. Murphy R.E., Temperatures of Saturn's rings // Astrophys.J.- 1973.- V. 181, No 2, Pt.2.-L87-L90.

492. Murphy R.E., Cruikshank D.L., Morrison D. Radii, albedo, and 20- micron brightness temperature of lapetus and Rhea // Astrophys.J.- 1972.- V. 177, No 2., Pt.2. - L93- L95.
493. Murray B.C., Westphal J.A., Wildey R.L. The eclipse cooling of Ganimede // Astrophys.J.- 1965.- V. 141- No 4. - P.1590- 1592.)
494. Murray B.C., Wildey R.L., Westphal J.A. Observations of Jupiter and the Galilean satellites at 10 microns // Astrophys.J.- 1964.- V. 139, No 3. - P.986-993.

495. Murray J.B. New observations of surface markings on Jupiter's satellites // Icarus.-

1975. - V. 25, No 3. – P. 397–404.
 496. Murray J.B. Visual observations of Saturn's ring D // J./Brit. Astron. Assoc. – 1979. – V.
 89, No 3. – P. 250–255.

497. Namouni F., Porco C. The confinement of Neptune's ring arcs by the moon Galatea // Nature - 2002.- V. 417, No 6884. - P.45-47.

498. Nash D.B. Io's 4- µm band and the role of absorbed SO<sub>2</sub>. // Icarus.-1983.-V. 54, No 3. -P.511-523

499. 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

500. 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.
 501. Nassh D.B., Fanale F.P., Nelson R.M. SO<sub>2</sub> frost: UV- visible reflectivity and Io surface coverade // Geophys.Res.Lett.- 1980.- V. 7, No 9. - P. 665-668.
 502. Nash D.B. Nelson P.M. Spectral ovidence for available of a subserbates on a shearbates of the // Nature and Statement of the surface sector ovidence for available of the subserbates of the surface of the subserbates of the surface over the surface

502. Nash D.B., Nelson R.M. Spectral evidence for sublimates and absorbates ob Io // Nature.-1979.- V. 280, No 5725.- P.763-766.

503. Nash D.V., Matson D.L., Johson 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. 504. Neish C.D., Somogyi A., 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.

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.
 So6. 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.
 Nelson R.M., Lane A.L., Matson D.L., Veeder G.J., et al. Spectral geometric albedos of the Colligene satellities for 0.24 trio 2.24 micrometers // Mathematical Ultervision

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.

508. Neugebauer G., Becklin E.E., Jewitt D.C., et al., Spectra of the jovian ring and Amalthea // Astron. J.-1981.- V. 86, No 4. - P. 607-610.

509. 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.

510. 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.

511. Nicholson P.D., French R.G., Campbell D.B., et al. Radar imaging of Saturn's rings // Icarus.- 2005.- V. 177, No 1.- P. 32-62.

512. Nicholson P.D., Hedman M.M., Clark R.N., et al. A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS // Icarus -2008.- V. 193, No 1.- P. 182-212.

513. Nicholson P.D., Matthews K. Near– infrared observations of the jovian ring and small satellites // Icarus. –1991.– V. 93, No 2. – P. 331– 346. 514. Nicholson P.D., Persson S.E., Matthews K., et al. The rings of Uranus: results of the 10 April 1978 occultation // Astron.J.–1978.– V83, No 10.– P.1240– 1248.

515. Nimmo F., Pappalardo R.T. Diapir-induced reorientation of Saturn's moon Enceladus // Nature.- 2006.- V. 441, No 7093. - P. 614-616.

516. 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.

517. 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.
518. Noll, K.S., Roush, T.L., Cruikshank, D.P., et al. Detection of ozone on Saturn's Satellites Rhea and Diona // Nature.- 1997.- V. 388, No 6675.- P. 45-47.
519. Nolt I.G., Barrett E.W., Calswell J., et al. IR brightness and eclipse cooling of Saturn's rings // Nature.- 1980.- V. 283, No 5750.- P. 842-843.

520. Nolt I.G., Tokunaga A., Gillett F., C., Caldwell J. The 22.7 micron brightness of Saturn's

rungs versus declination of the Sun // Astrophys.J.– 1978.– V. 219, No 1, Pt. 2.– P. L63– L66. 521. Northrop T.G., Hill J.R. The inner edge of Saturn's B ring // J.Geophys.Res.– 1983.– V. A88, No 8.– P. 6102–6108.

522. Ockert M.E., Cuzzi J.N., Porco C.C., Johnson T.V. Uranian ring photometry: results from Voyager 2 // J.Geophys.Res. – 1987. – V. A92, No 13. – P. 14969–14978.

523. 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.

524. Ockert- Bell M.E., Burns J.A., Dauber I.J., et al. The structure of Jupiter's ring system as revealed by the Galileo imaging experiment // Icarus., 1999. – V. 138, No 1. – P. 188–213. 525. 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.

revealed by the Galileo imaging experiment // Icarus. - 1999.- V138, No 2. - P. 188-213.

S29. Osterbrock D.E., Cruikshank D.P., J.E.Keeler's discovery of a gap in the outer part of the A ring // Icarus. – 1983.– V53, No M2.– P.165–173.
S30. 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.
S31. Ostro S.J., Pettengill G.H., Campbell D.B. Radar observations of Saturn's rings at intermediate tilt angle // Icarus.– 1980.– V41, No 3.– 381–388.
S32. Ostro S.J. Pettengill G.H. Campbell D.B. Goldetain P.M. Dalay, Decelar and an analysis of the sature of the s

532. Ostro S.J., Pettengill G.H., Campbell D.B., Goldstein R.M. Delay–Doppler radar observations of Saturn's rings // Icarus. – 1982. – V. 49, No 3. – P. 367–381.

533. 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. 534. Owen F.N., Lazor F.J., Surface color variations of the Galilean satellites/Icarus. – 1973.–

V. 19, No 1. - P. 30-33

535. 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.

536. 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.

537. Owen T., Danielson G.E., Cook A.F., et al. Jupiter's rings // Nature. – 1979. – V. 281, No 5731. – P.442–446.

538. Papaloizou J.C.B., Melita M.D. Structuring eccentric- narrow planetary rings // Icarus. - 2005. - V.175, No 2. - P. 435-451

539. 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.

540. 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.

Status Ironi Suntee Ingin- Resolution Inlight // Icaus.-1996. V. 155, No 2. - P. 2/0-302.
S41. 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.
S42. Pascu D., Storrs A.D., Wells E.N., et al., HST BVI photometry of Triton and Proteuus // Icarus. - 2006. - V185, No 2. - P487-491.
S42. Pauliny. Tack LIK, Wienel A. C., and the C. T. Market A. C. State A. C. Store A. State A. C. State A. C. State A. State

543. Pauliny-Toth I.I.K., Witzel A., Gorgolewski S. The brightness temperatures of Ganimede and Callisto at 2.8 cm wavelength // Astron. Astrophys. - 1974. - V. 34, No 1. - P.129-132

544. Pauliny–Toth I.I.K., Witzel A., Gorgolewski S. Observations of Ganimede and Kallisto at 1.3 cm wavelength // Astron. Astrophys. – 1977. – V. 58, No 3. – P. L27–L28.

545. Peterson Ch. An explanation for Iapetus' asymmetric reflectance // Icarus.- 1975.- V. 24, No 4. - P.499-502

546. Pieters C.F., Polarization in a mineral absorption band // Planets, Stars and Mebulae studied with polarimetry. Ed. Gehrels T. The university of Arizona press, Tucson, Arizona. – 1974. – P.405-418

547. Pieters C. M., Mustard J. F., Sunshine J.M. Quantitative mineral analyses of planetary surfaces using reflectance spectroscopy, in Mineral Spectroscopy: A Tribute to R. G. Burns, (edited by M.D. Dyar, McCammon, and M. Schafer), The Geochemistry Society, University Park, PA.– 1996. – P. 3207–325. 548. Pilcher C.B. Images of Jupiter's sulfur ring // Science.– 1980.– V. 207, No 4427. – P.181–

183.

549. 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.

J. 1965. V. 291, 180 F. 11. 11. 11. 377 395.
 S. The distribution of S II forbidden line emission around Jupiter // Astrophys. J. – 1980.– V. 238, No 1, Pt. 1. – P. 375–380.
 S. The distribution of S II forbidden line emission around Jupiter // Astrophys. J. – 1980.– V. 238, No 1, Pt. 1. – P. 375–380.
 S. 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.
 S. S. Pilcher C.B., Ridgway S.T., McCord Th.B. Galilean satellites: identification of water frost (1) Science 1072. V. 128.

// Science.- 1972.- V. 178, No 4065. - P. 1097-1089.

Michael C. 1912. - V. 176, NO 4003. - P. 1097-1097.
 553. 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.
 554. Piescia J.B. Geological terrains and crater frequencies on Ariel // Nature. - 1987. - V. 327, No 6119. - P. 201-204.
 555. Plescia J.B. Cratering history of the uranian satellites: Umbriel, Titaniya, and Oberon // J. Carbier. Bace. 1090. V. 20 No 14. P. 14018. 14023.

Gophys. Res. – 1989. – V. 92, No 14. – P. 14918–14932.
 556. Pollack J.B., Burns J.A., Tauber M.E. Gas drag in primordial circumplanetary envelopes—A mechanism for satellite capture // Icarus. – 1979. – V. 37, No 3. – P. 587–611.

557. 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. 558. Porco C.C., An explanation for Neptune's ring arcs // Science. – 1991. – V. 253, No 5023.

- P. 995-1001.

P. 995-1001.
559. Porco C.C., Cuzzi J.N., Ockert M.E., Terrile R.J. The color of the Uranian rings // Icasrus.- 1987.- V. 72, No 1. - P.69-78.
560. Porco C.C., Danielson G.W. The periodic variation of spokes in Saturn's rings // Astron.
J - 1982.- V. 87, No 5. - P.826-833.
561. Porco C., Danielson G.E., Goldreich P., et al., Saturn's nonaxymetric ring edges at 1.95
Rs and 2.27Rs // Icarus.- 1984.- V. 60, No 1. - P. 17-28.
562. 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.
563. Porco C. Nicholson P.D. Borderies N. et al. The eccentric saturnian ringlets at 1.29 Reference.

563. Porco C., Nicholson P.D., Borderies N., et al. The eccentric saturnian ringlets at 1.29  $R_s$ 

Sof. Poico C., Nicholson, P.D., Doleris K., et al. The cecture saturnar ingress at 1.27 KS and 1.45 Rs // Icarus. – 1984.– V60, No 1.– P.I– 16.
 Sof. Porco C.C., Nicholson, P.D., Cuzzi, J.N., et al. Neptune's ring system // In: Neptune.
 Cruikshank, D.P. (Ed.), Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ.– 1995.– P. 703–804.
 Sofs. Poulet, F., Cruikshank, D.P., Cuzzi, J.N., et al. Compositions of Saturn's rings A, B, and C force fich resolution point information proctomerging characterizations // Astron Astrophys. – 2003.– V

C from high resolution near infrared spectroscopic observations // Astron. Astrophys.- 2003.- V. 412, No 1, Pt. 1.- P.305-316.

566. Poulet, F., Cuzzi, J.N. The composition of Saturn's rings // Icarus – 2002. – V. 160, No 2. – P. 358-263

567. Poulet F., Cuzzi J.N., French R.G., Dones L. A study of Saturn's ring phase curve from HST observations // Icarus. - 2002.- V. 158, No 2.- P.224-248.
568. 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.

569. Puetter R.C., Russell R.W. The 2–4 µm spectrum of Saturn's riedes // Icarus .– 1977.– V. 32, No 1.– P. 37–40.

570. Quirico E., Schmitt B. Near-Infrared Spectroscopy of Simple Hydrocarbons and Carbon Oxides Diluted in Solid N\_2 and as Pure Ices: Implications for Triton and Pluto // Icarus.- 1977.- V. 127, No 2. - P. 354-378.

571. Quirico E., Schmitt B.A. Spectroscopic Study of CO Diluted in N<sub>2</sub> Ice: Applications for Triton and Pluto // Icarus.- 1997.- V. 128, No 1. - P. 181-188.
572. Rathbun J.A., Spencer J.R., Howell R.R., et al. Io: A periodic volcano // Geophys. Res. Lett.-2002.- V. 10. - P. 84-91.

573. Reitsema H.J., Beebe R.F., Smith B.A., Azimuthal brightness variations in Saturn's rings // Astron. J. – 1976. – V. 81, No 3.– P. 209–215.
 574. Reitsema H.J., Smith B.A., Westrop D.E., Visual and infrared photometry of uranuan satellites // Bull.Amer.Astron.Soc.– 1978.– V10.– P.585.

575. Reynolds R.T., Squyres S.W., Colburn D.S., McKay Ch.P., On the habitability of Europa // Icarus. – 1983.– V56, No 2.– P.246– 254.
 576. Riddle A.C., Warwick J.W. Redefinition of System III longitude // Icarus. –1976.– V.

27.- No 3. - P. 457-459.

577. Rieke G.H. The temperature of Amalthea // Icarus. - 1975. - V. 25, No 2. - P.333-334.

578. Rieke G.H. The thermal radiation of Saturn and its rings // Icarus. - 1975. - V. 26, No 1. -P. 37-44.

579. Rieke G.H., Lebofsky L.A., Lebofsky M.J. A search for nitrogen on Titan // Icarus.–
1985.– V. 64, No 1. – P.153–155.
580. Roe H.G., de Pater I., McKay C.P. Seasonal variation of Titan's stratospheric ethylene (C:H<sub>2</sub>) observed // Icarus.–2004.– V. 169, No 2.– P. 440–461.
581. Roelling T.L., Ennis D.L., Houck J.R. The 1– mm brightness temperature of Titan // Icarus.–2014.– V. 45, No 3. – P. 642.

Icarus.- 1981.- V. 45, No 3. - P. 618-623.

1861–97.45, 1865–97.45, 1865–97.
 582. Roesler F.L., Scherb F., Oliversen R.J. Periodic intensity variation in (SIII) 9531 A emission from the Jupiter plasma torus // Geophys.Res. Lett. – 1984.– V. 11. – No 2.– P. 128–130.
 583. Roesler F.L., Scherb F., Oliversen 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.

Instrum.Eng. 1981.- V. 290.- F. 160-163.
584. Rosen M.D.A., Pipkin F.M. Reflectance spectra for sodium and potassium doped ammonia frosts: comparison for lo's surface // Icarus.- 1978.- V. 35, No 2. - P. 252-262.
585. Ross M. N., Schubert G. Viscoelastic models of tidal heating in Encedalus // Icarus.- 1989.- V. 78, No 1. - P. 90-101.
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.

Karting, Metville, VI., 1995. 1. 143-153.
 S87. Rozenbush V.K., Avramchuk V.V., Rosenbush A.E., Mishchenko M.I. Polarization properties of the Galilean satellites of Juputer: Observations and preliminary analysis // Astrophys.J. – 1997. – V. 487, No 1. – P. 402–414.
 S88. Rozenbush V.K., Kiselev N.N. Polarization opposition effect for the Galilean satellites of Jupiter // Icarus. – 2005. – V. 179, No 2. – P.490–496.
 S89. Rozenbush V.K., Kiselev N.N., Jockers K., et al. Optical polarimetry of the Galilean to the Galilean satellites of the Galilean satellites of the Galilean satellites of Jupiter // Icarus. – 2005. – V. 179, No 2. – P.490–496.

satellites, Iapetus, and 64 angelina near opposition // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supol. ser. - V. 3. - 2000. - P. 227-230.

590. Russell H. The stellar magnitudes of the Sun, planets and their satellites // Astrophys. J.-1916. – V. 43, No 1. – P. 103–129.
 591. Salo H. Theoretical profile of Saturn's rings // Earth, Moon, and Planets. – 1984. – V. 30,

No 2. - P. 113-128

592. 592. Salo H., Hänninen J. Neptune's Partial Rings: Action of Galatea on Self-Gravitating Arc Particles. // Science. – 1998. – V. 282, No 5391. – P. 1102–1104

593. Sandel B.R., Dessler A.J. Dual periodicity of the Jovian magnetosphere // J. Geophys.

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.
Sandel B.R., Shemansky D.E., Broadfoot A.L., et al. Extreme ultraviolet observations from the Voyager 2 encounter with Saturn // Science. – 1982.– V. 215, No 4532. – P. 548–553.

596. Sandford S.A., Geballe T.R., Salama F., Goorviotch D. New narrow infrared absorption features in the spectrum of Io between 3600 and 3100 cm<sup>-1</sup> (2.8–3.2µm) // Icarus. – 1994. – V. 110, No 2. – P.292–302.

597. Sandner W., Observations de Saturn en 1954 // Gaz.astron.- 1954.- V36, No 11- 12.-P.94-95.

598. Santer R., Dollfus A., Optical reflectence polarimetry of Saturn's global and rings // Icarus. - 1981. - V48, No 3. - P.496-518.

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.
 Sasaki S. Phobos and Deimos as Sources of Martian Dust Ring/Torus // Lunar and Planet.

Sci. - 1996. - V. 27. - P. 1127.

condensation and wall collisions in tiger stripe fractures // Nature. - 2008. - V. 451, No 7179. - P. 685-688.

604. 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.
605. Seeliger H.H. Theorie der Beleuchtung der grossen Planeten, insbesondere des Saturn // Abhandl. Bayer. Akad. Wiss. – 1887. – V. 16. – P.581.

606. Shapiro I.I. Theory of the radar determination of planetary rotations // Astron.J. - 1967.-V. 72, No 10. - P. 1309-1323.

607. Shaefer M.W., Shaeter B.E 1987.– V. 333, No 6172. – P.436–438. Shaefer M.W., Shaefer B.E. Large-amplitude photometric variations of Nereid // Nature.-

608. Shavlovskij V.I. Analysis of the solar phase curves of the Galilean satellite Callisto // Кинематика и физика небесн.тел. – Приложение, – 2000, № 3.– С.234–236. 609. Shavlovskij V.I. Preliminary analysis of the solar phase curves of the Jupiter's satellite Ganymede // Кинематика и физика небесн.тел.– Приложение. – 2000, № 3.– С. 237–238.

Сапупеце // Кинематика и физика неоесн.тел.– приложение. – 2000, № 5.– С. 257–256. 610. Shavlovskij V.I. Оррозіtion effect of Jupiter's satellite Io and Europa // Кинематика и физика небесн. тел. – Приложение. – 2005, № 5.– С.513–517. 611. Sheppard S.S., Jewitt D.C. An abundant population of small irregular satellites around Jupiter // Nature. – 2003. – V. 423, No 6937. – P. 261–263. 612. Shoenberg E. Photometrishe Untersuchungen uber Jupiter and das Saturn system // Ann. Acad. Sci. Fennicae. – Ser. A. – 1921. – V. 16, No 5. – P.7–18. 613. Shoenberg F. May Untersuchungen über den Saturn eing // Viortaliahrassah. Astron. Con

613. Shoenberg E. Neue Untersuchungen über den Saturn ring // Vierteljahressch. Astron. Ges. – 1933. – V. 68. – P387– 395.

614. Showalter M.R. Arcs and clumps in the uranian  $\lambda$  ring // Science. – 1995.– V.267, No 5197.- P.490-493.

615. Showalter M.R. Saturn's D ring in the Voyager images // Science. – 1996. – V.124, No 2. – P.677-689

P.07/-689.
616. Showalter M.R., Burns J.A., Cuzzi J.N., Pollack J.B. Jupiter's ring system: New results on structure and particle properties // Icarus. – 1987. – V. 69, No 3. – P. 458–498.
617. Showalter M.R., Cuzzi J.N. Seeng Ghosts: Photometry of Saturn's G ring // Icarus. – 1993. – V. 103, No 1. – P.124–143.
618. 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.
619. Sicardy B., Combes M., Brahic A., et al. The 15 august 1980 occultation by the Uranian system: Structure of rings and temperature of the upper atmosphere // Icarus. – 1982. – V. 52, No 3. – P. 452. P. 454–472

620. Sicardy B., Lecacheux L., Laques P., et al. Apparent thickness and scattering properties of Saturn's rings from March 1980 observations // Astron. Astrophys. - 1982. - V. 108, No 2. - P. 296-305.

621. Sicardy B., Roques F., Brahic A. Neptune's rings, 1983–1989: Ground-based stellar occultation observations // Icarus. – 1991.– V. 89, No 2. – P. 220–243.
622. Simonelli D.P. Amalthea: implications of the temperature observed of the Voyager //

Icarus. – 1983.– V. 54, No 3.– P.524– 538. 623. Simonelli D.P., Veverka J. Voyager disk–integrated photometry of Io // Icarus. – 1984.–

V. 59, No 3. - P. 406-425.

624. 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. 625. Sinton W.M. Uranus: The rings are black // Science.– 1977. – V. 198, No 4316. – P. 503–

504

626. Sinton W.M. Io: are vapor explosions responsible for the 5–  $\mu$ m outbursts? // Icarus. – 1980. – V.43, No 1.– P. 56–64.

627. 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.

628. 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.
629. Sinton W.M., Good J., Orton J.S. Infrared scans of Saturn // Icarus. – 1980. – V. 452, No

2. - P.251-256.

630. Skypeck A., Veverka J., Helfenstein P., Baker L. The photometric roughness of Ariel is ot unusual // Icarus. – 1991. – V. 90, No 1. – P. 181–183. 631. 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

Kestas', Solerblor, L.A., Solerblon, L.A., Batson R., et al. A new look at the Saturn system: the Voyager 2 imager // Science. – 1982. – V. 215, No 4532. – P. 504–537.
Smith B.A., Soderblom L.A., Beebe R., et al. Voyager – 2 in the Uranian system: imaging science results // Science. – 1986. – V. 233, No 4759. – P. 63–64.
Smith B.A., Soderblom L.A., Johnson T.V. The Jupiter system through the eyes of Voyager 1/ (Science).

Voyager 1 // Science. -1979.- V. 204, No 4396. - P. 960-972

635. Smith B.A., Soderblom L.A., Johnson T.V., et al. Encounter with Saturn: Voyager-1 imaging science results // Science. – 1981. – V. 212, No 4491. – P. 163–191.

636. Smyth W.H. Io's sodium cloud: explanation of the east- west asymmetries // Astrophys.J.

630. Sinvin W. n. to's sodium cloud: explanation of the east- west asymmetries // Astrophys.J. - 1979, - V. 234, No 3, Pt. 1. - P. 1148-1153.
637. 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.
638. 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.
639. Smythe W.D., Lopes-Gautier R., Ocampo A., et al. Galilean satellite observation plans for the near inferrad mapping spectrometer asymptiment on the Galileon space for for property.

639. 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.
640. Smythe W.D., Nelson R.M., Nash D.B. Spectral evidence for SO<sub>2</sub> frost or absordate on Io's surface // Nature. – 1979. – V. 280, No 5725. – P. 766.
641. 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.
642. 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.
643. Soter S. Brightness of Iapetus // IAU Colloq. 28. Cornell University, August 1974. – P. 45–46

45 - 46.

644. Spahn F., Albers N., Hörning M., et al. E ring dust sources: Implications from Cassini's dust measurements // Planet. Space Sci. – 2006. – V. 54, No 9–10. – P. 1024–1032.

645. Spencer J.R. Thermal segregation of water ice on the Galilean satellites // Icarus. - 1987.-V. 69, No 2. - P. 297-313

646. 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
647. Spencer J.R., Moore J.M. The inuence of thermal inertia on temperatures and frost stability on Triton // Icarus. – 1992. – V99, No 1. – P. 261–272.
648. 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.

649. 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. 650. Squires S.W., Buratti B., Veverka J., Sagan C. Voyager photometry of Iapetus // Icarus. -1984. - V. 59, No 3. - P. 426- 435.

651. Squyres S.W., Reynolds R.T., Cassen P.M. The evolution of Enceladus // Icarus. – 1983. – V.53, No 2. – P. 319–331.

652. Squyres S.W., Sagan C. Albedo asummetry of Iapetus // Nature. -1983. - V.303, No 5920. - P. 782-785.

653. 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.

654. Stebbins J., Jacobsen T.S. Further photometric measures of Jupiter 's satellites and Uranus, with tests for the solar constant // Lick Obs. Bull. –1928.– V. 13, No 2, – P. 180–195.

655. Steffl A.J., Bagenal F., Stewart A., Ian F. Cassini UVIS observations of the lo plasma torus. II. Radial variations // Icarus. - 2004.- V. 172, No 1. - P. 78-90.
656. SteigmanG.A. A polarimetric model for a dust covered planetary surface // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. - 1978.- V. 185, No 3. - P. 877-888.
657. Stephen M., Cwilich G. Rayleigh scattering and weak localization: Effects of polarization // Phys.Rev.- 1986.- V. B34, No 12. - P. 7564-7572.
658. Stern S.A., Festou M.C., Santvoort J. Van, Buratti B.J. The first Uv spectrum of a uranian stellities: UIE observations of Observations from 2650-3200A // Astron. L. - 1900.

satellites: IUE observations of Oberon from 2650- 3200A // Astron. J. - 1990.- V. 100, No 5. - P. 1676-1679

659. Stier M.T., Traub W.A., Fazio G.G., et al. Far- infrared observations of Uranus, Neptune, and Ceres // Astrophys. J.- 1978.- V.226, No 1, Pt. 1.- P. 347-349. 660. Stone E.C., Miner E.D. Voyager 1 encounter with Saturnian system // Science.- 1981.-

V. 212, No 4491. – P. 159–163.

661. Stone E.C., Miner E.D. Voyager 2 encounter with Saturnian system // Science. - 1982. -V. 215.- No 4532. - P. 499-504. 662. Stone E.C., Miner E.D., The Voyager 2 Encounter with the Uranian system // Science.-

1986.- V233, No 4759.- P39-43.

663. Stooke P.J., The shapes and surface features of Prometheus and Pandora // Earth, Moon, and Planets, -1993. - V 62, N3. - P. 199-221.

664. Stooke P.J., The surfaces of Larissa and Proteus // Earth, Moon, and Planets. - 1994.- V. 65. No 1 - P. 31-54.

665. Storrs A., Weiss B., Zellner B., et al. Imaging observations with Hubble Space Telescope // Icarus. – 1999. – V. 137, No 2. – P. 260–268.

666. Strazzulla G., Organic material from Phoebe to Japetus // Icarus. - 1986. - V. 66, No 2. -P. 397-400

667. 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. 668. 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.

669. Svitek T. Azimuthal brightness variation and albedo measurements of the uranian rings //

J. Geophys. Res. – 1987. – V. A92, No 13. – P. 14979–14986. 670. Thilen D.J., Zellner B. Eight– color photometry of Hyperion, Iapetus, and Phoebe // Icarus. – 1983. – V. 53, No 2. – P. 341–347.

Icarus.- 1983. - V. 53, No 2. - P. 341- 347.
671. Tholen D.J., Zellner B. Multicolor photometry of outer jovian satellites // Icarus.- 1984.V. 58, No 2. - P. 246- 253.
672. Thomas P.C. Shapes of small satellites // Icarus. -1988. - V. 77, No 2. - P. 248- 274.
673. Thomas P., Veverka J. Hyperion: analysis of Voyager observations // Icarus. - 1985.V.64, No 3. - P. 414-424.
674. 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.
675. 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.
676. 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.
677. Thompson D.T., Lockwood G.W., Photoelectric photometry of Europa and Callisto 1976-

and estimated radii // Icarus. – 1989.– V. 81, NO 1. – P. 92–101.
677. 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.
678. Thompson W.T., Lumme K., Irvine W.M., et al. Saturn's rings: Azimuthal variations, phase curves, and radial profiles in four colors // Icarus. – 1981.– V. 46, No 2. – P. 187–200.
679. Thomsen D.E. Neptune rings: an occultation story // Sci.Vews. – 1982.– V. 121, No 25. –

P. 403.

680. Throop H.B., Esposito L.W. G ring particle sizes derived from ring plane crossing observations // Icarus.- 1998.-V. 131, No 1.- P.152-166. 681. Throop H.B., Porco C.C., West R.A., et al. The jovian rings: New results derived from Cassini, Galileo, Voyager, and Earth- based observations // Icarus.-2004.-V. 172, No 1.-P. 59-77.

682. 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.

683. 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.

backed random medium // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Iranster. -2007. - V105, No 3. - P.454-465.
684. Tishkovets V., Litvinov P., Petrova E. Backskattering effects for discreate random media: Theoretical results // In: Photopolarimetry in remote sensing. Ed. Videen G., Yatskiv Ya., Mischenko M. Kluywer academic publishes. Dordrecht/Boston/London. - 2004. - P. 221-242.
685. 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.
686. Tokunaga A.T., Caldwell J., Nolt I.G., The 20- um brightness temperature of the unilluminated side of Saturn's rings // Nature. - 1980. - V. 287, No 5779, - P. 212-214.

687. Tomasko M.G., Smith P.H., Photometry and polarimetry of Titan: Pioner 11 observations and their implications for aerosol properties // Icarus. –1982.– V. 51, No 1. – P. 65–95.

688. Trafton L. Detection of a potassium cloud near Io // Nature. -1975.- V. 258, No 5537. -P. 690-692

689. Trafton L. Periodic variations in Io's sodium and potashium clouds // Astrophys. J.-1977.- V. 215, No 3, Pt. 1. - P. 960-970.

690. Trafton L. The Jovian SII torus: its longitudinal asymmetry // Icarus. – 1980. – V. 42, No

P. 111–124.
 G91. 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.
 G92. Trafton L., Macy W., Jr. On the distribution of sodium in the vicinity of Io // Icarus.–1978.– V. 33, No 2. – P. 322–325.

693. 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. 694. 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. 695. Tryka K.A., Brown R.H., Anicich V., et al. Spectroscopic determination of the phase

composition and tevperature of nitrogen ice on Triton // Science. -1993.- V. 261, No 5122. - P. 751-754.

696. Tuler G.L., Marouf E.A., Simpson R.A., et al. The microwave opacity of Saturn's rings at wavelength of 3.6 and 13 cm from Voyager 1 radio occultation // Icarus.-1983.- V. 54, No 2. - P. 160-188.

697. 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. 698. Twomay S., Herman D., Rabinof R., A extension of Chahine method of inverting the radiative transfer solution equation // J.Atmosph. Sci. 1977.– V. 34, No 7.– P. 1085–1090. 699. Tyler G.L., Eshleman V.R., Anderson J.D., et al. Radio science investigations of the

Saturn system with Voyager 1: Preliminary results // Science. - 1981.- V. 212, No 4491. - P. 201-206.

700. Tyler G.L., Sweetnam D.N., Anderson J.D., et al. Voyager radio science observastions of Neptune and Triton // Science. -1989.- V. 246, No 4936. - P. 1466-1473.

701. Ulich B.L. Absolute brightness temperature measurements at 2.1 mm wavelength // Icarus. – 1974. – V.21, No 3.– P. 254–261.
702. 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.
703. 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.

704. 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.

705. Verbiscer A.J., Veverka J. Albedo dichotomy of RHEA – Hapke analysis of Voyager photometry // Icarus. – 1989.– V. 82, No 2.– P. 336–353.
706. Verbiscer A., Veverka J., Detection of Albedo Markings on Enceladus // Bull. Am. Astron. Soc. – 1991.– V. 23, No 3. – P. 1168.
707. Verbiscer A. J. Veverka J. de la characterization of C. and M. Stron. Soc. – 1991.– V. 23, No 3. – P. 1168.

707. Verbiscer A.J., Veverka J. A photometric study of Enceladus // Icarus. - 1994.- V. 110, No1. – P. 155–164. 708. Veverka

No1. - P. 155-164.
708. Veverka J. Polarization measurements of the Galillean satellites of Jupiter // Icarus.1971.- V.14, No3. - P. 355-359.
709. Veverka J. Titan: Polarimetric evidence for optically thick atmosphere // Icarus. - 1973. V. 19, No 4. - P. 657-660.
710. Veverka J., Helfenstein P., Skypeck A., Rhomas P. Minnaert photometrie parameters for the satellites of Uranus // Icarus. - 1989.- V78, No 1.- P.14-26.
711. Veverka J., Thomas P., Helfenstein P. Satellites of Uranus: Disk- integrated photometry form Voyager imaging observations // I. Gaconby, Res. 1987. V. 402. No13. P. 1485. 14004.

711. Veverka J., filomas F., filemenstein F. Satelines of Oralus. Disk- Integrated photometry from Voyager imaging observations // J. Geophys. Res. – 1987. – V. A92, No13. – P. 14895–14904.
 712. Vilas F. A cheaper, faster, better way to detect water of hy ration on solar system bodies // Icarus.– 1994.– V.111, No 2. – P. 456–467.
 713. 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.
 714. Vilas F., Larson S.M., Stockstill K.R., Gaffey M.J. Unraveling the Zebra: Clues to the Iapetus dark material composition // Icarus.– 1996.– V. 124. No 2.– P. 262–267.

Iapetus dark material composition // Icarus.- 1996.- V. 124, No 2. - P. 262-267.

To the start matchine to imposition of magma discharge during basaltic eruptions // J. Volcanology and Geothermal Res. – 1981. – V. 11, No I. – P. 139–168.
To 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.
Wajter P. AA<sub>29</sub>: Earth's recurrent quassi– satellite // Icarus. – 2009. – V200, No 1. – P.147–152.

153.

718. Waldrop M.M. Neptune: a ring at last? // Science. – 1982. – V217, No 4555. – P.143. 719. Walsh T.F., Zimmerman P.D. Width of Cassini's division in Saturn's rings // Nature. – 1971. – V.230, No 5291. – P.233 – 234.

720. Wansteker W. Narrowband photometry of the Galilean satellites // Comm.Lunar Planet.Lab. – 1972. – V. 9, No 167. – P166–177.

721. 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.
722. Weizer H., Moos H.W. A rocket observation of the far– ultraviolet spectrum of Saturn // Astrophys. J. – 1978.– V.222, No 1, Pt. 1. – P.365–369.
723. Wienbruch U., Spohn T. A self-sustained magnetic field on Io? // Planet. Space Sci. – 1995.– V. 43, No 9.– P. 1045–1057.

724. 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.

177, NO 1. - F. 07-00.
 725. 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
 726. Wilson P.D., Sagan C. Spectrophotometry and organic matter on Japet. Models of interhemispheric asymmetry // Icarus.- 1996.- V.122, No 1. - P. 92-106.
 727. Wolff M. The polarization of light reflected by rough planetary surface // Appl. Opt. -

727. Wolff M. The polarization of light reflected by rough planetary surface // Appl. Opt. – 1975. – V. 14, No 6. – P. 1395–1404. 728. Wolff M. Theory and application of the polarization– albedo rules // Icarus. – 1980. –

V.44, No 4.– P. 780–792.

729. Wolff M. Computing diffuse reflection from particulate planetary surface with a new function // Appl. Opt. - 1981. - V. 20, No 14. - P. 2403- 2498.
730. Wong M.H., de Pater I., Showalter M.R., et al. Ground-based near infrared spectroscopy of Jupiter's ring and moons // Icarus. - 2006. - V. 185, No 2. - P. 403- 415.
731. 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.
732. Wu F. M. Tudie D. L. Cerken P. W. Europe: ultraviolet amigning and the possibility of the second seco

732. 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.

733. Zebker H.A. Saturn's rings: particle size distributions for thin layer models // Icarus.–
1985. – V. 64, No 3. – P. 531–548.
734. Zahnle K., Schenk P., Levison H., Dones L. Cratering rates in the outer Solar System //
Icarus. –2003. – V. 163, No 2. – P. 263–289.

735. Zebker H.A., Tyler G.L. Thickness of Saturn rings from Voyager 1 observations of microwave scatter // Science. – 1984. – V. 223, No 4634. – P. 396–398.

736. Zebker H.A., Tyler G.L., Marouf E.A. On obtaining the forward phase functions of Saturn ring features from radio occultation observations // Icarus. – 1983.– V. 56, No 2. – P.209– 228. 737. Zellner B. On the nature of Iapets // Astrophys.J. – 1972.– V. 174, No 2, Pt. 2. – P. 107–

109.

 Zellner B. The polarization of Titan // Icarus. – 1973. – V. 18, No 4. – P. 661–664.
 Zharkov V.N. The Role of Jupiter in the Formation of planets // Geophys. Monograph 74, IUGG Am. Geophys. Union. – 1993. – V.14. – P. 7–17.