

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНЕТ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПУТНИКІВ САТУРНА ЯК ДОКАЗ ЄДНОСТІ БУДОВИ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ

Анатолій Відьмаченко – д-р фіз.-мат. наук, професор

Олександр Мозговий – канд. техн. наук, доцент

Олексій Стєклов – канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник

Вадим Гуменюк - студент 1 курсу СВО магістра ВДПУ ім. М. Коцюбинського

Розглянуто на основі вивчення фізичних характеристик супутників Сатурну і гіпотез їх утворення єдність будови планетних систем.

Ключові слова. Сатурн, супутники Сатурна, Сонячна система, фізичні характеристики небесних тіл.

У системі планет Сонячної системи Сатурн займає шосте місце від Сонця. Ця планета на сьогодні має найбільшу кількість супутників різного розміру, а також таке утворення як кільця. За розмірами Сатурн поступається тільки Юпітеру. А разом із Ураном і Нептуном ці чотири планети відносяться до газових планет гігантів.

Маса Сатурну у 95 разів перевищує масу Землі при середній густині меншій за густину води і рівній $0,687 \text{ г/см}^3$; прискорення вільного падіння $10,44 \text{ м/с}^2$; об'єм у 763,59 раз більший за об'єм Землі; екваторіальний радіус Сатурна становить $60268 \pm 4 \text{ км}$, що у 9,4492 рази більше радіуса Землі; полярний радіус – $56\,364 \pm 10 \text{ км}$, що у 8,5521 раз більше за земний. Розміри планети визначають за верхню межу хмар. Сплюснутість Сатурна $0,09796 \pm 0,00018$ викликана швидким його обертанням навколо своєї осі при періоді 10,2 години. За 29,46 земних років він обертається навколо Сонця на відстані 1427 млн. км. Синодичний період – 38,09 діб; середня орбітальна швидкість $9,69 \text{ км/с}$. Ексцентриситет – $0,055723219$. Потужний шар атмосфери Сатурна містить 94% водню і 6% гелію (за об'ємом). Припускають, що планета має невелике ядро із заліза і силікатів, яке покрито льодом і глибоким шаром рідкого водню. Наявне магнітне поле трохи слабше за земне.

На Сатурні спостерігаються смуги з меншою чіткістю порівняно з Юпітером; це пояснюється густим туманом з виморожених парів аміаку над хмарами у верхній атмосфері. Наявне велике овальне утворення за розмірами Землі, яке називається Велика Біла пляма. Швидкість атмосферних потоків від 100 м/с на широті 30° до $400\text{--}500 \text{ м/с}$ поблизу екватора (рис. 1) [1, 2].

Метою статті є аналіз фізичної природи супутників Сатурна за результатами наукових досліджень космічних апаратів, гіпотез утворення супутників, що дає змогу показати єдність будови планетних систем.

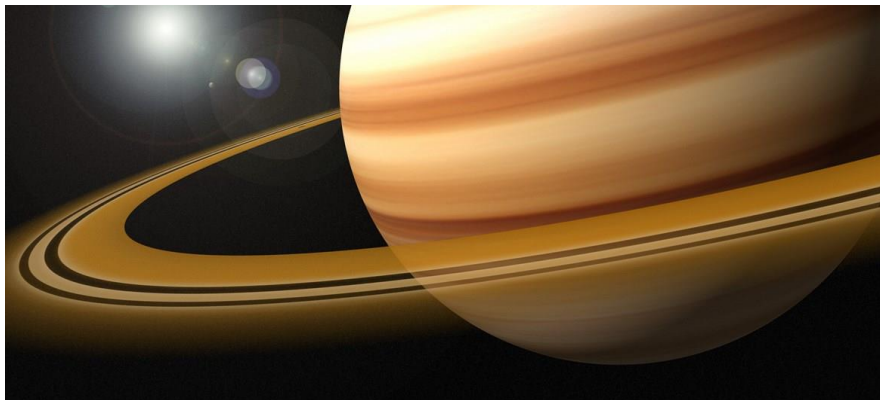
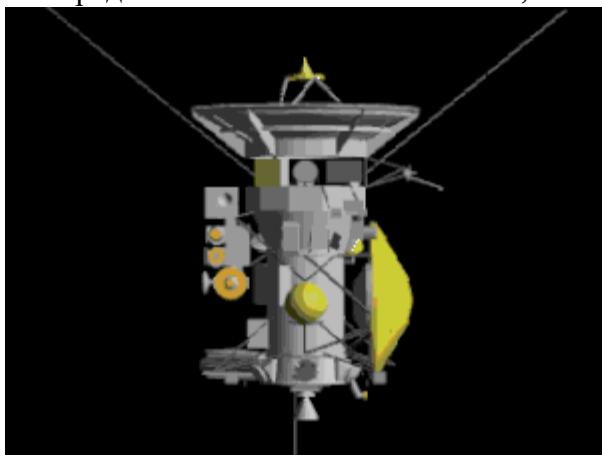


Рис. 1. Сатурн

Сатурн здавна цікавить вчених. Розвиток науки дозволяє проводити дослідження безпосередньо на планеті і біля неї. Так, автоматична міжпланетна станція «Кассіні» була



запущена до Сатурна 15 жовтня 1997 року і досягла планети 1 липня 2004 року, і перебувала на орбіті навколо планети до вересня 2017 року. Її завданням було вивчення структури кілець, супутників і динаміки атмосфери й магнітосфери Сатурна. Космічний зонд «Гюйгенс» 25 грудня 2004 року відділився від космічного зонда «Кассіні» і досягнув поверхні супутника Сатурна Титану 14 січня 2005 року [3].

Рис. 2. Кассіні – Гюйгенс



Рис. 3. Зонд "Кассіні" вийшов на зв'язок і надіслав перші фото Сатурна 27 квітня 2017

Структура, фізичні характеристики планет Сонячної системи дають змогу виділити дві групи: планети земної групи і планети гіганти. Останні відносяться до типу воднево – гелієвих (можливо, з великою домішкою води у внутрішніх районах) планет. Значне віддалення від Сонця зменшує кількість енергії, яку вони отримують. Тому ці планети повинні мати низьку температуру (-170°C , -200°C , -220°C , -230°C , відповідно.) Але, температура видимої «поверхні» цих планет, як правило на $30-50^{\circ}\text{C}$ вища. Це вказує на наявність внутрішніх джерел енергії, і підтверджується потужними вертикальними і горизонтальними рухами (швидкість від 150 до 200 м/с) атмосферних мас.

Середня густина планет гігантів близька до 1 г/см^3 . Якщо врахувати формування планет в умовах дефіциту тяжких металів, то це дозволяє оцінити їх хімічний склад: водень, гелій, вода, аміак, метали з можливою домішкою невеликої кількості силікатів і легких металів. Із динамічних міркувань (особливості руху навколо осі, величина полярного стиску, вплив на рух супутників) слідує, що планети - гіганти мають диференційовану структуру: основна маса речовини сильно концентрується до центра планети, тоді як земний спостерігач бачить лише потужні, динамічно активні шари атмосфери; верхній із них визначає розміри видимих діаметрів планет.

Характерною особливістю всіх планет - гігантів являється система кілець, площини яких розміщені в площині екватора планети. Система плоских концентричних кілець Сатурна складаються з частинок криги, пилу і невеликої кількості важких елементів; вперше вона була виявлена у 1610 році Галілео Галілеєм з допомогою телескопу. Але через низьку якість оптики він побачив збоку планети тільки деякі придатки. Лише через 45 років Христіан Гюйгенс першим побачив саме кільце Сатурна. Через 300 років були виявлені кільця в решти планет – гігантів: Урану, Юпітера і Нептуну [4]. Походження кілець не зовсім ясне. Так як всі кільця знаходяться всередині «границі Роша» (границя Роша – є відстанню A від центру планети, яка становить $A = 2,4 R$; вона обмежує область навколо планети, всередині якої внаслідок руйнівної дії припливних сил існування достатньо великого супутника теоретично неможливо). А це дає змогу зробити висновок, що кільця могли утворитися при розпаді супутника, який досить близько підійшов до планети. Можливо також, що матеріалом для кілець була протопланетна речовина, яка не змогла через дію планети сформуватися в супутники.

Вчені поділили кільця Сатурна на 7 груп, які назвали в алфавітному порядку за часом їх відкриття (назовні від Сатурна; D, C, B, A, F, G і E). Кільце F утримується на місці між двома супутниками Сатурна, Прометеем і Пандорою; тому їх називають супутниками «пастухами». Ще деякі супутники відповідають за створення поділів між кільцями.

Така будова Сонячної системи, коли планети земної групи знаходяться ближче до Сонця, в середині орбіт планет - гігантів, свідчить про її унікальність, оскільки у планетних системах інших зірок масивні планети зазвичай розміщуються ближче до зорі, а планети з меншою масою – розміщені далі від центрального світила. Механізм утворення планет і їх супутників навколо зорі, швидше за все, однаковий у Всесвіті. На відхилення у розмірах планет, наявності супутників, розташування планет навколо зорі можуть впливати початковий розподіл мас у протозоряній туманності, їх взаємодія, температура та швидкості руху протопланетної речовини. Наприклад, гіпотеза походження Сонячної системи передбачає утворення планет-гігантів пізніше за планети земної групи, коли температура навколо Сонячної туманності знизилась до критичної точки, коли починається кристалізація газу. Тугоплавкі елементи вже перебували у твердій фазі у складі ближчих до Сонця планет.

Кількість наявних супутників у планет Сонячної системи різна. Найближчі до Сонця дві планети Меркурій і Венера не мають природних супутників. Земля має один супутник – Місяць, у Марса їх два – Фобос і Деймос

Найбільше різного типу супутників зараз відкрито навколо Сатурна. Всього зараз відомо про 83 природні супутники. Більшість з них було виявлено за допомогою космічних апаратів. Особливо урожайним був 2019 рік, коли добавили до рахунку понад 20 супутників. 13 супутників мають розміри більше 50 км.

Всі супутники Сатурна поділяють на групи в залежності від того, як вони обертаються навколо планети (на якій відстані вони обертаються, напрямом їх обертання, нахил орбіти тощо).

На багатьох супутниках пейзажі значно відрізняються від земних. Дослідники не виключають можливість існування на деяких супутниках певних форм життя. Всі супутники Сатурна поділяють на 8 груп [6]:

- **Титан.** Найважливіший супутник з точки зору розміру, який виділяється своєю атмосферою.
- **Заморожені середні супутники.** Ці супутники мають стандартний розмір і покриті шаром льоду та різними кратерами. Супутники були відкриті за допомогою телескопів. Одними з найважливіших є: Тетіда, Діона, Рея, Гіперіон та Япет.
- **Кільцеві супутники** – це ті, які обертаються в межах кілець Сатурна.

- **Супутники пастухи.** Ці супутники знаходяться за межами кільця. Завдяки своїм орбітам вони можуть допомогти їх організувати та модерувати у якості пастухів. Серед найвідоміших є Пандора та Прометей, як «пастухи» для кільця F.
- **Троянські супутники.** Вони обертаються на тій же відстані від Сатурна, що і більші супутники. Зазвичай вони знаходяться на відстані близько 60 градусів перед ними, або позаду. Серед найвидатніших – Хелена та Поллукс.
- **Коорбітальні супутники.** Це ті, що мають однакову лінію, навколо якої вони обертаються. Це робить їх супутниками, які діють і рухаються таким чином, що не можуть зіткнутися один з одним.

Нерегулярні супутники. Це більша група супутників, хоча вони знаходяться досить далеко від Сатурна.

Незначні нижчі супутники. Всі вони знаходяться між орбітами Мімаса та Енцелада.

З усіх супутників Сатурна Титан має другий, самий більший розмір серед супутників Сонячної системи після Ганімеда, який обертається навколо Юпітера (рис. 4). Титан більший за Меркурій і єдиний із супутників Сонячної системи має потужну атмосферу.

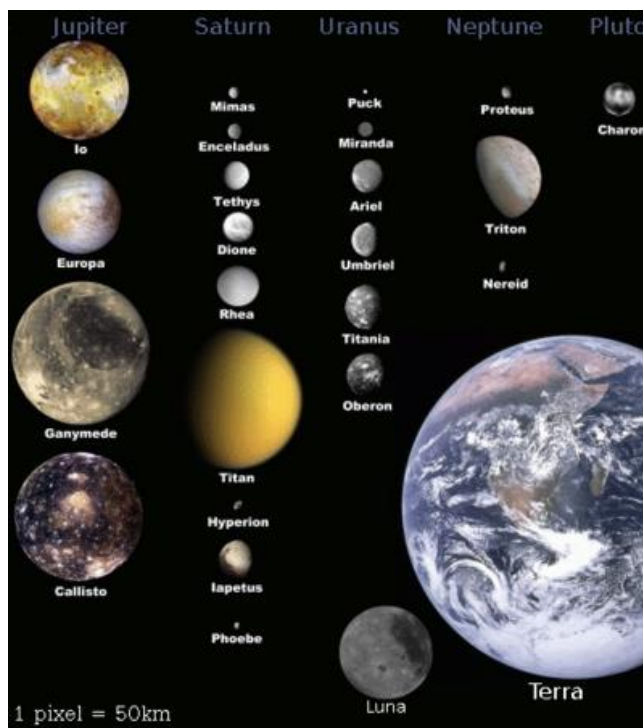


Рис. 4. Порівняльні розміри найбільших супутників Сонячної системи та Землі (<https://uk.wikipedia.org/wiki/Супутник>)

Титан складається з великої кількості вуглеводнів та водню, тому має більш жовтуватий колір. Христіан Гюйгенс відкрив Титан у 1655 році. Діаметр Титана – 5150 км, маса у два рази більша маси Місяця, у 4000 раз менше маси Сатурна. Центр маси системи Сатурн і Титан лежить від центру Сатурна на відстані 30 км; це свідчить про дуже малий вплив супутника на рух планети. Але у Титані зосереджено 95% маси всіх супутників Сатурна, що викликає його вплив на рух інших супутників. Сила тяжіння на Титані у сім разів менша від земної. Велика піввісь – 1 221 830 км, період обертання навколо планети – 16 діб [5]. Джерард Койпер у 1944 році відкрив щільну атмосферу на Титані. Тиск біля поверхні в 1,6 разів перевищує тиск на Землі. Температура становить мінус 170 – 180 °С. На Титані спостерігаються метанові моря, річки та хмари, з яких метан і етан випадають, утворюючи кругообіг подібний земному циклу води. А також спостерігаються гори, які складаються переважно з водяного льоду (рис. 5). У 2019 році Nature Astronomy створило першу глобальну геологічну карту Титана, на якій показані великі рівнини, гори, дюни, а також, озера із рідкого метану.

Вважають, що у великих океанах можуть існувати форми життя, які використовують інші хімічні елементи, ніж ми звикли. Під дуже великим крижаним панциром Титана існує водний океан, який також може підтримувати мікроскопічні форми життя, що подібні до земних.

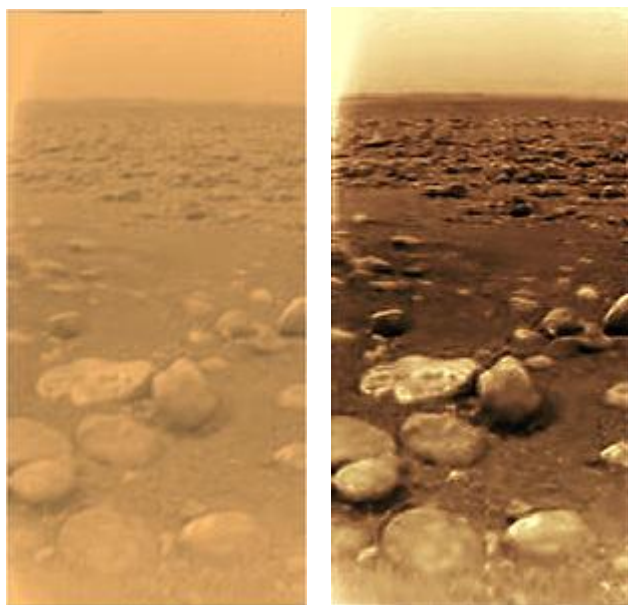


Рис. 5. Зображення «Гюйгенса» поверхні Титана: каміння, згладжене течією рідкого метану

У грудні 2022 року орбітальний інфрачервоний космічний телескоп Джеймс Вебб (англ. James Webb Space Telescope) зробив знімки хмар і атмосфери Титану [7].

У своїй будові Титан містить водяний лід і кам'яністі матеріали. Їх розподіл майже однаковий. Такий склад подібний супутникам Ганімеду, Каллісто, Тритону. Ядро Титану, імовірно, має діаметр близько 3400 км. На Титані

виявлено щонайменше один масивний гірський хребет протяжністю близько 150 км і висотою до 1,6 км, на вершинах якого є світлі відкладення, що, можливо, є покладами метану та інших органічних сполук. На супутнику існує кріовулканізм, коли роль лави виконують вода та аміак. Підтвердженням вулканічної діяльності є вивлений ізотоп аргону-40.

Дослідження Титану дозволили оцінити такий основний склад його атмосфери: 96% – азот, 3% – гелій. У Сонячній системі тільки Титан і Земля мають щільну атмосферу з переважним вмістом азоту. У невеликих кількостях наявні метан, аргон, невеликі сліди етану, ацетилену, пропану, вуглекислого газу та інших газів. Правда, практично відсутній кисень. При такому складі атмосфери є можливість переселення людей на Титан. Створення там поселень з необхідним енергетичним забезпеченням та створення умов вирощування необхідних рослин та тварин з метою харчування.

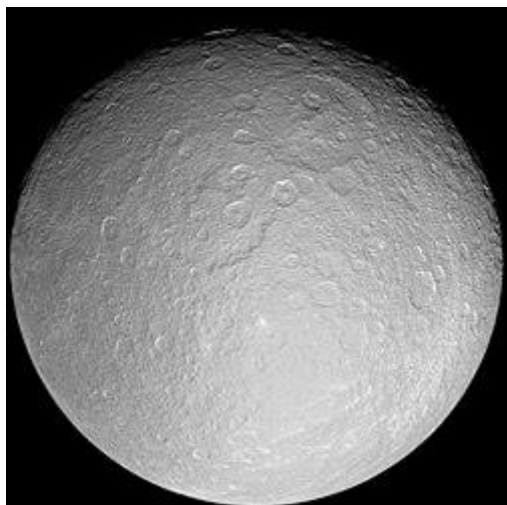
При товщині близько 400 км атмосфера має шарувату структуру, яка близька до земної (рис. 6) [5]. Властивості шарів атмосфери біля поверхні подібні до таких шарів на Венері. Постійні урагани і вітри присутні на висоті понад 10 км. Єдиної думки про походження атмосфери на зараз не існує. Різні версії не дають завершеної картини появи існуючого складу атмосфери.

Рис. 6. Шари у верхній частині атмосфери Титану (знімок «Кассіні»)

Оскільки супутник не має значного магнітного поля, то його шари атмосфери піддаються впливу сонячного вітру, космічному випромінюванню і сонячному опроміненню. Під дією ультрафіолету молекули азоту і метану розкладаються на іони, які створюють складні органічні сполуки. В результаті, поверхня Титану і атмосфера мають оранжевий колір. Кількість метану при цьому не зменшується, що дає можливість назвати одним із джерел метану вулканічну діяльність.



РЕЯ. Це ще один з найважливіших супутників Сатурна – другий за розміром після Титану, двадцять перший за віддаленістю від планети Сатурн [8]. Його діаметр – 1530 кілометрів. Існує думка, що його центральні області утворені із гірських порід та із великої кількості води. Іншими словами – це крижане тіло з середньою густиною



1,237 г/см³, що вказує на такий склад: крижаний лід і менше третини маси супутника припадає на кам'яні породи. Прискорення вільного падіння рівне 0,26 м/с². Рея була відкрита Джованні Доменіко Кассіні 23 грудня 1672 року. Радіус орбіти – 527 тис. км. Період обертання навколо своєї осі 4,518212 діб. Температура поверхні становить від -233 °С до -173 °С. Атмосфера практично відсутня. Джон Гершель запропонував таку назву на честь Реї з давньогрецької міфології – матері кількох олімпійських богів, одним із яких був Зевс.

Рис. 7. Рея. Знімок апарату «Кассіні» 6 листопада 2005 року. Великий кратер зверху – Tigris [8].

ЯПЕТ. Супутник займає третє місце серед супутників Сатурна [9]. Діаметр – близько 1470 км, радіус орбіти – 3,561 млн км. За віддаленістю від планети Япет – двадцять четвертий. Він має дві різні півкулі: одна яскрава і інша – темна (рис. 8). Це є однією з найбільших таємниць Сонячної системи. Одна із гіпотез – осідання пилу з інших супутників, зокрема Феби. Темніша поверхня спричиняє підвищене нагрівання сонячним



світлом, що прискорює випаровування і, як наслідок, ще більше потемніння. Він також відомий своїм «екваторіальним хребтом», що складається з 10 - кілометрових гір, що оточують екватор. Супутник був відкритий Дж. Д. Кассіні у 1671 році і названий Джоном Гершелем.

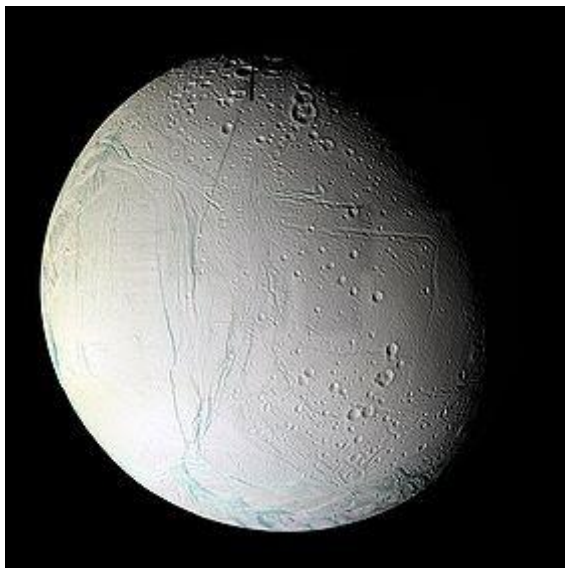
Рис. 8. Мозаїка знімків апарату «Кассіні», 2004 рік

ЕНЦЕЛАД. Супутник має діаметр 500 км, радіус орбіти – 238 тис. км і посідає шосте місце за розмірами і масою серед найбільших супутників Сатурна після Титана (5150 км), Реї (1530 км), Япета (1440 км), Діони (1120 км) і Тефії (1050 км), та чотирнадцяте місце за віддаленістю від планети (рис. 9). Він має заморожене середовище і його крижана кірка білого кольору відбиває майже 100% сонячного світла.

Перші 7 найбільших супутників Сатурна, у порівнянні з меншими супутниками, мають правильну кулясту форму.

Енцелад – найбільш геологічно активний супутник Сатурна. Він має ту особливість, що існують величезні стовпи солоної води, які витікають через тріщини з глибин підземного океану під його крижаною оболонкою. Ці шлейфи залишають за собою слід крижаних частинок, яким вдалося досягти орбіти, утворюючи одне з кілець Сатурна. Решта, у вигляді снігу випадає на поверхню, завдяки чому цей супутник має

найбільшу відбиваючу поверхню (альbedo) у всій Сонячній системі. Шлейфи дають



можливість зробити висновок, що, окрім наявності хімічних елементів, необхідних для життя, можуть існувати гідротермальні джерела, подібні до тих, що знаходяться на дні океану на Землі і викидають гарячу воду. Існує велика ймовірність, що Енцелад може підтримувати деякі форми життя.

Рис. 9. Знімок Енцелада 9 березня 2005 року космічним апаратом «Кассіні-Гюйгенс»

Наявність великого океану рідкої води робить Енцелад одним з найперспективніших місць для пошуку позаземного життя. Аналіз його води виявив у ній метан і більш складні органічні молекули. Наприклад, в гейзерах

Енцелада були знайдені сполуки водню і кисню, вуглецю, азоту і сірки – практично всіх інгредієнтів, що входять до складу біомолекул. А недавно виявили фосфор, який є ключовим компонентом нуклеїнових кислот. Про це повідомив Ясухіто Секіне (Yasuhito Sekine), який виступив на зустрічі Американського геофізичного товариства (AGU), що пройшла нещодавно в Чикаго. При цьому вчені Токійського технологічного інституту використовували дані апарату Кассіні. Зонд зібрав інформацію про хімічний склад не тільки планети і супутників, але і її яскравих кілець. У кільці Е, куди потрапляє речовина, викинута гейзерами Енцелада, виявили частинки, виключно багаті фосфатом натрію. Підлідний океан на супутнику може містити цю речовину в концентрації від одного до 20 мілімолів, що на порядок більше, ніж в океанах Землі, де фосфор – елемент вкрай дефіцитний і затребуваний. Японські вчені припускають, що на Енцеладі він потрапляє у воду з дна, при розчиненні в ній апатитів, які у великій кількості зустрічаються в складі деяких метеоритів, а значить – були і в ранній Сонячній системі, коли формувався супутник. Тому ця знахідка робить Енцелад ще більш цікавим і перспективним місцем пошуку слідів позаземного життя. Можливо, це прискорить роботу над такими проектами, включаючи місію ESA, поки що заплановану до запуску лише після 2035 р.

МІМАС. Цей супутник сьомий за розміром і десятий за віддаленістю від планети [10]. Відкритий В. Гершелем у 1789 році. Діаметр Мімаса 397 км, радіус орбіти – 185,5 тис. км. Густина Мімаса – 1200 – 1400 кг/м³, що свідчить про його основний склад – лід води. Великий кратер на поверхні супутника має назву Гершель та діаметр 130 км і, ймовірно, є наслідком падіння велетенського метеориту. Найбільша його глибина – 10 км, висота стінок – майже 5 км; у центрі – є підвищення на висоту 6 км над рівнем кратера (рис. 10). Вважають, що проміжок між двома кільцями Сатурну (щілина Кассіні) утворився внаслідок взаємодії з Мімасом.

Мімас не зовсім сферичний через припливні сили Сатурна. Розміри супутника 414,8x394,4x381,4 кілометрів. Під поверхнею Мімаса може ховатися водяний «стелс-океан», який підтримується достатньою кількістю внутрішнього тепла [11]. Апарат Кассіні зафіксував цікаву лібрацію – коливання характеристик обертання Мімаса, що свідчить про геологічну активність, яка підтримує внутрішній океан.

Модель утворення кратера Гершель показала, що його форма могла утворитись при можливому існуванні водяного океану, який себе явно не проявляє. Це новий клас – стелс-океан. Наявність у Мімаса внутрішнього океану дозволило оцінити моделі його формування і еволюції. Це дозволяє краще зрозуміти природу кілець Сатурну і

супутників середнього розміру, а також оцінити поширеність океанічних супутників, наприклад, в Урану.

Гіпотези утворення супутників вказують на різні шляхи їх появи: утворення з протопланетної хмари, захоплення гравітаційним полем планети. Частина супутників невеликих розмірів може бути залишками великих небесних тіл, які розбиті на шматки зіткненнями з іншими супутниками або з зовнішніми об'єктами, наприклад з астероїдами.

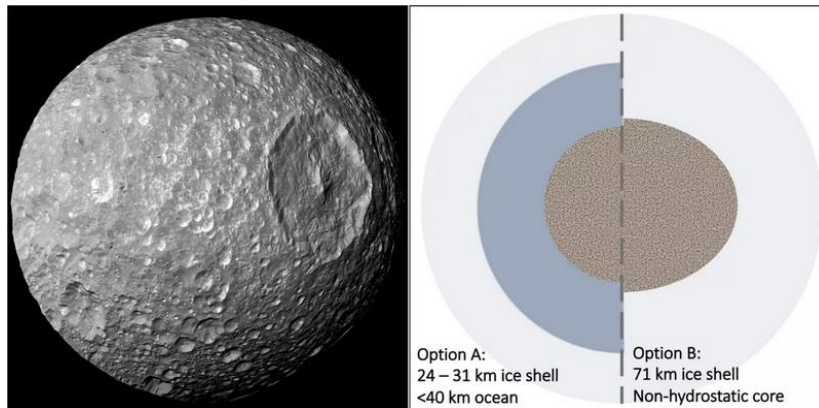


Рис. 10. Супутник Сатурна Мімас [9]

Аналіз фізичних характеристик супутників Сатурна дозволяє відзначити як подібність, так і великі відмінності у будові планет та їх супутників у Сонячній системі. Подібність полягає

у кулястій формі в першому наближенні, наявності чи відсутності атмосфери та існуючих внутрішніх джерел енергії. Великі супутники біля планет гігантів втримуються гравітаційним полем цих планет. Склад наявної атмосфери може змінюватись у процесі еволюції, що дає змогу існуванню форм життя у різних його проявах. Слід відмітити можливість створення на великих супутниках космічних баз з переселенням туди людей.

Список використаних джерел:

1. Климишин І.А. Астрономія : навчальний посібник / І.А. Климишин, Г.О. Гарбузов, Б.О. Мурніков, Т.І. Кабанов. – Одеса : Астропринт, 2012. – 352 с.
2. Сатурн (планета). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Сатурн_\(планета\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Сатурн_(планета))
3. Кассіні-Гюйгенс. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Кассіні_–_Гюйгенс
4. Кільця планети. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Кільце_\(астрономія\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Кільце_(астрономія))
5. Титан. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Титан_супутник
6. Місяці Сатурна. URL: <https://www.meteorologiaenred.com/uk/lunas-de-saturno.html>
7. Телескоп Джеймс Вебб передав свіжі знімки Титану. URL: <https://3dnews.ru/1078281/teleskop-dgeyms-uebb-peredal-potryasayushchie-snimki-oblakov-titana-sputnika-saturna?from=related-grid&from-source=1081343>
8. Рея (супутник). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Рея_\(супутник\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Рея_(супутник))
9. Япет (супутник). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Япет_\(супутник\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Япет_(супутник))
10. Мімас (супутник). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Мімас_\(супутник\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Мімас_(супутник))
11. Під поверхнею супутника Сатурна Мімаса може ховатися водяний стелс-океан. URL: <https://gadgetcity.com.ua/2023/02/03/pid-poverkhneiu-suputnyka-saturna-mimasa-mozhe-khovatysia-vodiany-stels-ocean/>

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SATURN'S SATURN SATURN AS PROOF OF THE UNITY OF THE STRUCTURE OF THE WORLD

Anatoliy Vidmachenko - Doctor of Science, Professor

Oleksandr Mozghovyi - PhD, Associate Professor

Oleksii Steklov - PhD, Senior Research Fello

Vadym Humenyuk – Student's Masters

The unity of the structure of planetary systems and the world is considered on the basis of the physical characteristics of Saturn's satellites and the hypotheses of their formation.

Keywords. Saturn, satellites of Saturn, Solar system, physical characteristics of celestial bodies.