

НОВА ЗОЛОТОВОЛОСКА

На зорі планетознавства й астрономії наше уявлення про потенційно придатні для життя світи дуже викривлював особистий досвід.

Ми живемо на гарній блакитній планеті, де поверхню здебільшого вкриває рідка вода. Наш океан взаємодіє з густою атмосферою, наповненою киснем і азотом. Наші рослини ростуть у родючих ґрунтах і допомагають підтримувати непростий баланс планетарної біосфери. Ми можемо сидіти на пляжі, слухати шум прибою і дивитись, як з-за обрію з'являється великий розжарений диск Сонця, що все це уможливило.

Існуванням земних океанів ми завдячуємо дуже вдалій відстані від Землі до Сонця: вона досить мала, щоб ми могли отримувати потрібний обсяг енергії для забезпечення себе рідкою водою, але й досить велика, щоб ця вода не випарувалася. Земля розташована в найзручнішому місці Сонячної системи, яке гарантує планеті рідку воду.

Не дивно, що логіка мислення про заселені планети від початку була зорєцентричною: для життя потрібна рідка вода, для рідкої води — енергії певної зірки, тому будь-яка заселена планета з рідководним океаном мусить бути на правильній відстані від своєї материнської зірки, щоб одержувати від неї достатню кількість енергії. На планетах, які опинились надто близько чи надто далеко (скажімо, на Венері чи Марсі), всі океани вже давно випарувались чи позамерзали. Щоб на певній планеті виникло життя, вона має бути чимось схожою на Землю, себто розташованою в ідеальному місці й нагрітою до ідеальної температури (не надто гарячою, але й не надто холодною) — мовби ідеальна за розміром тарілка каші в казці про Золотоволоску та трьох ведмедів.

Астрономи та планетологи вже давно називають ідеальною, не завелику й не замалу, відстань від материнської зірки зоною життя. Це важливе поняття підказало нам, як аналізувати умови на тисячах екзопланет, що, як відомо, існують довкола багатьох інших зірок. З'ясувавши масу цих екзопланет і їхню відстань до материнських зір, можна братися міркувати про шанси існування на їхній поверхні рідкої води.

Багато десятиліть ми оцінювали потенційні шанси планет бути придатними для життя саме за «принципом Золотоволоски». Венера, Марс і Земля для нас уособлювали три тарілки з кашею, яку скуштувала дівчинка, перш ніж ведмеді повернулись додому: надто гарячу, надто холодною й саме таку, як належить.

Але нещодавно ми знайшли й інші способи. На закрижаних супутниках із зовнішньої Сонячної системи ми виявили нову «зону Золотоволоски» — і новий спосіб перевірки придатності планет до життя.

Отже, існування рідководного океану на певній планеті може бути наслідком аж ніяк не одного типу збігу обставин. У цьому розділі я поясню, як припливно-відпливні ефекти природного супутника певної планети можуть сприяти існуванню на ній рідких водяних океанів і як розпад важких радіоактивних елементів підтримує температуру, потрібну для існування води в рідкому стані.

Ідеальні обставини для існування рідкої води — лиш одна з необхідних передумов відомого нам життя. Загалом же для нього треба три речі: рідка вода, елементи, з яких це життя будуватиметься, й енергія, що його підтримуватиме. Кожен із таких параметрів має власні еталонні «зони Золотоволоски». У цьому розділі ми проаналізуємо, якими способами планети та їхні природні супутники можуть перетворитися на потенційно придатні для життя. Йі покажемо, що цих способів досить багато.

Форма води

Фізика завжди працює, але часом однаково буває страшно.

Я їду снігомобілем над Північним Льодовитим океаном, рухаючись на північ. Наша команда хоче потрапити туди, де з наближенням літа починає скресати крига. Під нами зараз півтора-два метри льоду, а ще нижче — кількості метрів океанської води. Я мимоволі уявляю, як тріскається лід і всі ми падаємо під воду, в холодні обійми смерті.

На щастя, законам фізики байдуже до моєї уяви. Тут, на кризі, ми в цілковитій безпеці: загалом, якщо океан спокійний, нас зі снігомобілем витримає й значно тонший, уже тридцятисантиметровий лід. Цілковито безпечно кататися над Північним Льодовитим океаном можна, коли лід досягає півметрової товщини. На позір ламкий і ненадійний лід насправді виявляється напрочуд міцним бар'єром — не лише для мене, а й для всього, що лежить під ним. Океанська крига вберігає нас від провалу й водночас гріє океан, ніби ковдра, огортаючи теплом усе те, що загинуло б від контакту з холодним зовнішнім повітрям.

Перш ніж заглибитись у складнощі нових сценаріїв придатності для життя, варто пильніше придивитися до простої краси молекули води й до того, як вона змінюється, коли вода переходить з рідкого стану у твердий. Якби не ці мікроскопічні зміни, всі океанські світи давно б загинули, а вода замерзла б.

Вода — справді дивовижна речовина. В холодному середовищі вона сама собою утворює ізоляційний поверхневий бар'єр, що захищає рідину від холоду. Ми звикли до цього й не бачимо в заледенінні нічого незвичайного, але, можливо, більшість придатних для життя планет і супутників у Всесвіті завдячують цією своєю придатністю саме їй.

Проведемо мисленнєвий експеримент: уявімо, що було б, якби лід тонув. Коли б так сталося, вода поводитимася би десь як масло. Розтопивши в тарілці грудку масла й давши їй змогу знов охолонути, можна побачити, що тверді шматочки, які утворюються на поверхні, йдуть на дно. Рідке масло холоне згори і тоне, аж поки все не затвердіє. Тепер уявімо собі рідке

масляне озеро взимку. Воно б просто замерзло: затверділе масло опускалося б донизу, виставляючи розтоплене на мороз.

На щастя, в нас нема масляних озер, та й лід не тоне, а плаває. Поверхня озер узимку замерзає, і крига дедалі товстішає. Що товстіша крига, то важче холоду крізь неї проникати — тому нижчі шари озерної води не замерзають. Саме тому в арктичних озерах кілька метрів завглибшки під льодом лишається рідка вода, де безпечно живуть риби й інші підводні створіння. І саме тому в нашому всесвіті може існувати кілька мільйонів придатних для життя рідководних океанів.

Але чому лід не тоне? Над цим, знов-таки, мало хто замислюється серйозно. Лід не тоне завдяки дуже простій, але важливій зміні геометрії зв'язків між молекулами води. Перехід води з рідкого у твердий стан і відповідна зміна геометрії молекулярних зв'язків спричиняє формування об'ємнішого й менш густого матеріалу, збільшуючи при цьому ентропію системи.

Унаслідок переходу з рідкого у твердий стан (за умов нормального атмосферного тиску) густина води зменшується від 0,9999 грама на кубічний сантиметр (г/см^3) за температури 0°C до $0,9167 \text{ г/см}^3$ (коли вона вже замерзає), тобто аж на 9%! Цікаво, що за температури 4°C густина води ще більша, ніж у рідкій воді за температури 0°C , — 1 г/см^3 .

Більшість гірських порід поведуться інакше. Скажімо, коли вулканічна лава охолоджується, вона густішає. Густина базальтової лави поступово збільшується від майже $2,6 \text{ г/см}^3$ за температури плавлення (приблизно 1200°C) до $2,7 \text{ г/см}^3$ у твердій породі за температури 1000°C . Тому гірські породи не плавають, а тонуть.

Густина води змінюється через невелику зміну кута між молекулами в кристалічній структурі льоду. Молекула води (H_2O) складається з одного атома кисню і двох атомів водню. В атомі кисню вісім електронів: два обертаються довкола ядра у внутрішній електронній оболонці й шість — у зовнішній. Мені важко вигадати точнішу аналогію, щоб ви змогли уявити собі ці оболонки та зрозуміти будову молекули води,

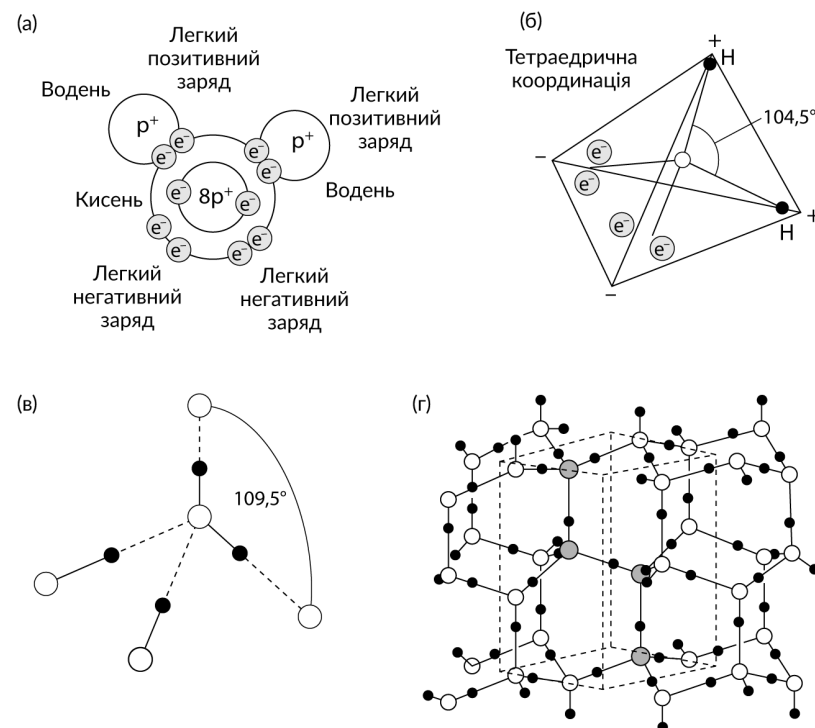
окрім як описати їх як два спарені чортові колеса. На кожному із сидінь цих коліс може сидіти два електрони. Внутрішня оболонка (внутрішнє чортове колесо) має тільки одне сидіння, а зовнішня — аж чотири. На зовнішньому колесі може кататись вісім електронів (по два на кожному з чотирьох сидінь), але після того, як два електрони атома кисню вже зайняли сидіння внутрішнього колеса, їх лишилося тільки шість. Щоби заповнити порожнє сидіння зовнішнього колеса, атомові кисню потрібно ще два електрони.

Тим часом атоми водню — це дуже прості чортові колеса: у них одне парне сидіння, де сидить лише один електрон. Атоми водню охоче поділяться своїм єдиним електроном із будь-яким атомом, який поділиться своїм електроном у відповідь. У молекулі води два атоми водню сполучаються з одним атомом кисню; кожен атом водню при цьому ділиться електроном, а кожен атом кисню — власними електронами зовнішньої оболонки. Чортові колеса кисню й водню скріплюються одне з одним і діляться пасажирами так, щоб усі їхні сидіння було заповнено. Від такого обміну електронів виграють усі. Вищеописаний принцип лежить в основі хімічного ковалентного зв'язку (див. мал. 2.1а).

Але це лише зав'язка інтриги. Атоми водню в молекулі води набувають невеликого позитивного заряду, бо їхні електрони частково запозичив собі атом кисню й тому позитивний заряд протонів у кожному з них став дещо сильнішим.

Тим часом довкола восьмипротонного ядра атома кисню обертаються вже аж десять електронів, створюючи надлишок негативного заряду, бо атом кисню запозичив два додаткові електрони для своєї зовнішньої оболонки.

Унаслідок таких атомних домовленостей молекула води «поляризується», тобто в неї з'являється ділянка з невеликим позитивним зарядом (там, де розташовані атоми водню) й ділянка з невеликим негативним зарядом (там, де розташований атом кисню). Негативно заряджений оксигеновий край однієї молекули води притягує позитивно заряджений



Малюнок 2.1. Атомна структура молекули води й ковалентний зв'язок між молекулами води. (а) Атом кисню в молекулі води має вісім електронів — два на внутрішній електронній оболонці й шість на зовнішній. Атоми водню мають лише один електрон на оболонці, де є ще одне вільне місце. Тому два атоми водню поєднуються з одним атомом кисню й утворюють молекулу води. (б) Позичивши свої електрони, два атоми водню набувають незначного позитивного заряду, а атом кисню — незначного негативного. У просторі ці заряджені атоми розташовуються так, що молекула набуває пірамідоподібної (тетраедричної) форми. (в) Оскільки в кожній молекулі води є позитивно та негативно заряджена ділянка, атоми водню однієї молекули притягуються до атомів кисню іншої. Один атом кисню притягує два атоми водню. (г) З огляду на описані особливості заряду атомів кисню та водню й тетраедричну координацію молекул, поєднуючись між собою, молекули води утворюють шестикутні структури. Саме тому в усіх сніжинках завжди по шість кінців

гідрогеновий край іншої. Молекули води постійно то притягуються одна до одної, то, навпаки, відштовхуються — наче мінімагнітики в банці. Хіміки називають цей тип зв'язку

гідрогенним (водневим) зв'язком, і саме йому вода переважно завдячує багатьма своїми цікавими властивостями, зокрема вищезгаданими перепадами густини.

Якщо копнути трохи глибше, можна зрозуміти, як водневий зв'язок впливає на плавучість льоду. Повернімося до аналогії з чортовими колесами. Кожне сидіння цих коліс у молекулі води хоче віддалитись від інших. Через таке прагнення в молекулах утворюються тетраедри — структури, схожі на піраміди (див. мал. 2.1б).

Водневі грані піраміди (Н-О-Н) розташовані під кутом $104,5^\circ$ (див. мал. 2.1в). Кисневі електрони з іншого боку молекули теж утворюють кут $104,5^\circ$. Це, власне, і все, що можна сказати про одиничну молекулу води. Вона має форму симпатичної, трохи скошеної крихітки-пірамідки.

Якщо взяти багато молекул води, вони притягуватимуться одна до одної завдяки водневому зв'язку. Молекули рідкої води можуть бути одиничними, а можуть розташовуватися ланцюжками чи шарами. (Поверхневий натяг рідкої води — якраз наслідок поєднання молекул на основі водневих зв'язків.)

Зі зниженням температури рух молекул повільнішає, і вони утворюють між собою дедалі більше водневих зв'язків. Згодом через це починають формуватися кристалічні ґратки льоду (див. мал. 2.1г). Кожні шість молекул води, поєднані між собою, утворюють трохи скошений шестикутник (сусідні атоми оксигену (О-О-О) розташовуються під кутом $109,5^\circ$).

Шестикутна кристалічна решітка льоду з повторюваними кутами $109,5^\circ$ займає дещо більше місця, аніж сукупність окремих молекул води, де кут між сусідніми атомами оксигену й гідрогену — лише $104,5^\circ$. Під час утворення льоду окремі молекули трохи розтягуються, скріплюючись зі своїми сусідками. Відстань між молекулами льоду (результат водневих зв'язків) трішки більша від середньої відстані між молекулами води, здатними тісніше притиснутись одна до одної. Це непомітно, але дуже важливо, бо саме завдяки цій більшій відстані між своїми молекулами лід не тоне.

Ну й ще один цікавий факт про кут $109,5^\circ$ і шестикутну кристалічну решітку льоду. Придивіться до сніжинок — цих магічних кристалів, що падають з неба. Саме через усе вище-описане в кожній сніжинки шість кінців, не більше й не менше. Усі їхні заворожливі візерунки — похідні від кута $109,5^\circ$, що фігурує у водневих зв'язках молекул води (див. мал. 2.2).



Малюнок 2.2. Снігове мистецтво. Знімки сніжинок, які зробив фотограф-експериментатор Вілсон Бентлі. Їхня красива шестикутна симетрія — наслідок шиккування молекул води у шестикутні структури

Плавучість льоду є тільки однією з численних дивовижних властивостей води. Ще одна важлива властивість льоду, про яку варто згадати, — його низька теплопровідність. Почасти через, знов-таки, водневі зв'язки між молекулами лід і сніг погано проводять тепло, й тому під кригою замерзлим природних супутників зберігаються тепло та рідка вода. Якби теплопровідність льоду була дуже високою, все утворене під ним тепло на Європі чи Енцеладі швидко вийшло б назовні у відкритий космос, лишивши обидва небесні тіла назавжди замерзлими.

Саме ці прості факти — плавучість і погана теплопровідність льоду — критично значущі передумови для можливості (й існування) океанських світів.

Сприятлива зона для припливів і відпливів

З огляду на властивості льоду легко пояснити, як зберігають тепло океанські світи, але ми досі не відповіли на питання, звідки ж це тепло там береться.

Джерело тепла, що дає змогу існувати океанам, — наріжний камінь у поясненні причин існування придатних для життя світів. Ця воістину нова та сприятлива передумова допомагає нам вийти за межі конвенційної зони придатності для життя, яку зумовлює енергія материнської зірки й відстань від неї до планети, що нас цікавить. Нові передумови сприятливості для життя відкривають перед нами широке поле можливостей у царині створення, підтримки та збереження рідководних океанів. Джерело енергії за цих нових передумов — припливи та відпливи.

Якщо на закрижанілому супутникові гігантської планети є океан, це означає, що тепло на ньому, найімовірніше, генерує енергія припливів і відпливів. Енергія припливів і відпливів — це наслідок гравітаційної взаємодії певного світу з іншим масивним об'єктом, планетою чи її супутником. Коли обидва небесні тіла рухаються одне відносно одного, тверда маса на кожному з них напружується й розслабляється внаслідок тяги припливів. Ніби гумовий м'ячик, який то стискають, то відпускають. Якщо багато разів стиснути і відпустити гумовий м'ячик, він почне нагріватися від внутрішнього тертя. Тяга припливів теж створює механічну енергію та тертя всередині космічного тіла, з яких, своєю чергою, виникає тепло. У цій книжці ми аналізуватимемо лише припливне нагрівання на супутниках, бо воно найтісніше пов'язане з океанськими світами.

Два найважливіші чинники припливно-відпливного нагрівання — це різниця сили тяжіння на різних ділянках супутника та зміни сили тяжіння в процесі руху супутника довкола планети по еліптичній орбіті. Ще два критичні параметри — маса планети, довкола якої обертається супутник, і період цього обертання, тобто час, за який супутник робить один повний оберт (як нас навчив Йоганн Кеплер, період обертання супутника є функцією його віддаленості від материнської планети). Якщо повернутись до аналогії зі стисканням

гумового м'ячика, ці параметри можна пояснити з огляду на силу стискання і частоту стискання та розслаблення.

З математичного погляду сила тяжіння між двома тілами прямо пропорційна добутку їхніх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними: $F = GMm/r^2$. У цій формулі G — гравітаційна стала, M — маса Юпітера (або Землі, якщо ми говоримо про Місяць), m — маса супутника, а r — відстань між планетою та супутником. Ми не заглиблюватимемось у математичні тонкощі гравітаційної взаємодії, але ви, мабуть, бачили вищенаведене рівняння на уроках фізики, тож треба буде запам'ятати, що фізика припливно-відпливних взаємодій просто зумовлена цим основним рівнянням. В описаному контексті критично важливою є взаємодія між ексцентричністю орбіти супутника (її еліптичність, або ж відхилення від ідеального кола), масою материнської планети, відстанню до цієї планети й часом повного оберту довкола неї. Відстань між протилежними точками супутника (його діаметр) визначає гравітаційну напругу на різних його ділянках, а зміна відстані до материнської планети, спричинена ексцентричністю орбіти, — зміну сили тяжіння на різних фазах оберту. Саме сукупність усіх цих факторів і позначається на припливно-відпливному нагріванні супутника.

Зараз, мабуть, корисно буде описати в цих термінах знайому нам пару Земля – Місяць. На океанських узбережжях ми теж бачимо припливи й відпливи. Чи можна їх назвати суттєвим джерелом тепла? Якщо коротко, то ні. Орбіти Землі та Місяця майже ідеально круглі, а самі вони — відносно невеликі небесні тіла з малою силою тяжіння (принаймні за планетарними стандартами). Це значить, що коли вони обертаються, відстань між ними майже не змінюється, а отже, не змінюється ані гравітаційне поле, ані припливи чи відпливи. Стабільні й незмінні, ці два небесні тіла не генерують під час свого руху майже ніякого тепла. Уявіть, що ви стиснули в руці гумовий м'ячик і не плануєте його відпускати. Він деформувався, але не нагрівся. Від самої лише зміни форми м'ячик не потеплішає. Щоб

спутник або планета відчули на собі дію припливно-відпливного нагрівання, їхнє гравітаційне поле має змінюватись (образно кажучи, ваша рука має стискати й розтискати м'ячик).

Причиною незначного припливно-відпливного нагрівання, що все-таки виникає в процесі обертання Землі та Місяця, є легкі підйоми й опадання суттєвої частини земної поверхні — материків і морського дна. Гірські ділянки Землі підіймаються й опадають на відстань від кількох до 25 см, залежно від взаємного розташування Землі, Місяця та Сонця. Земні припливи й відпливи генерують лише кілька міліватів тепла на квадратний метр ($\text{мВт}/\text{м}^2$), і це нікчемно мало порівняно із цифрою $1388 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (а саме стільки тепла ми отримуємо від Сонця).

Припливи та відпливи не додають тепла ані на Землі, ані на Місяці — зате відіграють дуже важливу роль у динаміці нашого океану. Рух рідкої океанської води на Землі генерує дуже мало тепла. На відміну від гірських порід, що опираються деформації, але зрештою гнуться й розтягуються, тручись і нагріваючись, рідка вода просто змінює напрямку руху, підлаштовуючись під гравітацію припливів і відпливів. Планета від цього не дуже нагрівається, бо рух води ніщо не стримує й вона не опирається припливно-відпливній динаміці.

Під дією місячної сили тяжіння на Землі здійснюються океанські припливні хвилі: одна просто під Місяцем, а інша — з протилежного боку планети. Легко зрозуміти, чому вода високо підіймається під Місяцем. Але чому вона це робить іще й з протилежного боку?

Згадаймо, що припливи та відпливи спричиняє різниця сили тяжіння в різних точках небесного тіла. Оскільки сила тяжіння обернено пропорційна квадрату відстані між двома тілами, Місяць притягує найближчий до нього бік Землі десь на 6 % більше, ніж найдальший. Коли найближчий бік Землі притягується до Місяця на 6 % більше, то на найдальшому лишається вода, яка теж діє в припливах і відпливах.

Земля обертається довкола своєї осі швидше (один повний оберт триває 24 години), ніж Місяць обертається довкола неї

(один повний оберт триває 27,3 дня), тому ми щоразу обертаємось до Місяця якимось новим боком. Океанські припливи залежать від позиції Місяця й виникають у різних місцях Землі упродовж її обертання (див. мал. 2.3).



Малюнок 2.3. Припливно-відпливний механізм. Під час обертання твердої Землі припливи й відпливи «зберігають» свою позицію. Під дією гравітації Місяця на найближчому до нього боці Землі, починається приплив. Приплив із протилежного боку Землі виникає, бо там лишається вільна вода і гравітаційна дія Місяця там слабша

Оскільки після припливу завжди настає відплив, а Земля обертається довкола своєї осі за 24 години, в кожній точці нашої планети щодня відбувається два припливи і два відпливи. Всі вони пов'язані з позицією Місяця. Але позаяк вода під час припливів і відпливів насправді не підіймається та не спадає, вони майже не генерують механічної енергії.

На численних природних супутниках зовнішньої сонячної системи ситуація зовсім інакша: припливно-відпливна динаміка досить відчутно їх нагріває. Чим же їхня ситуація відрізняється від пари Земля — Місяць? По-перше, ці супутники обертаються довкола гігантських планет із дуже потужними гравітаційними полями. По-друге, якщо орбіта обертання супутника має форму еліпса, відстань від нього до материнської планети щоразу змінюється, а разом з нею змінюється й гравітаційне поле. Припливні хвилі збільшуватимуться, коли супутник опинятиметься найближче до своєї планети (перебуватиме у перицентрі), й зменшуватимуться, коли він буде найдалі (перебуватиме в апоцентрі).

З кожним новим обертом припливи та відпливи спричиняють напруження й розслаблення, яке призводить до сильнішого тертя і зрештою до нагрівання. У багатьох океанських світів зовнішньої Сонячної системи (скажімо, в Європі, Ганімеда й Енцелада) еліптичні орбіти, а отже, припливи й відпливи їх теж нагрівають.

Чотири великі супутники Юпітера — вдалі приклади для аналізу особливостей сприятливої зони припливів і відпливів. Уперше про неї заговорили, коли детально вивчили їхні орбіти. 1979-го року, незадовго до посадки апарата «Вояджер» на Юпітер, Стентон Піл і Патрік Кассен (із Каліфорнійського університету в Санта-Барбарі) та Рей Рейнолдс (із Дослідницького центру Еймса на базі НАСА) опублікували статтю про теорію розсіювання припливно-відпливної енергії в системі Юпітера¹. Цікаво, що згідно з їхніми висновками, під дією припливів і відпливів надра Іо, найближчого до Юпітера супутника, переважно розтанули, тож там можна спостерегти вулканічну активність. Учені навіть ризикнули стверджувати, що ознаки вулканічної активності на Іо можна буде помітити на знімках «Вояджера-1».

Піл, Кассен і Рейнолдс зробили один із найелегантніших і найзахопливіших прогнозів в історії планетарної науки. Згодом його було підкріплено науковим відкриттям. Невдовзі після публікації статті про вулканічну активність на Іо космічний апарат «Вояджер-1» пролетів біля Юпітера і справді зробив неймовірні знімки шлейфів лави, які Іо викидала в космос.

Зовсім скоро та сама команда вчених опублікувала матеріал про ефекти припливів і відпливів на Європі під провокативним заголовком «Чи є на Європі рідка вода?»². Це був перший

1 Peale, S.J., Cassen, P., & Reynolds, R. T. (1979). Melting of 10 by tidal dissipation. *Science*, 203(4383), 892—894

2 Cassen, P., Reynolds, R. T., & Peale, S. J. (1979). Is there liquid water on Europa? *Geophysical Research Letters*, 6 (9), 731—734. Наступного року вони опублікували матеріал, де скоригували свій аргумент: Cassen, P., Peale, S.J., & Reynolds, R. T. (1980). Tidal dissipation in Europa: A correction. *Geophysical Research Letters*, 7(11), 987-988.

науково точний і строго математичний аргумент на захист існування океану на Європі. Я гадаю, що саме ця стаття започаткувала дискусію про нову «зону Золотоволоски», себто про новий спосіб визначення потенційно придатних для життя зон.

Матеріали апаратів «Вояджер-1» і «Вояджер-2», а також подальше дослідження супутників Юпітера за допомогою «Галілео» допомогли нам глибше зрозуміти справжні масштаби впливу розсіювання припливно-відпливної енергії й умови, потрібні для виникнення нової «зони Золотоволоски». Скажімо, на Іо не просто є вулкани. Це найбільш вулканічно активне небесне тіло Сонячної системи, ще активніше за Землю. Вулкани вивергаються на Іо *просто зараз*.

Оскільки на Іо немає атмосфери, хмари виверженого газу та лави летять просто в космос і зависають над планетою, мов парасольки. Така надзвичайна вулканічна активність Іо — наслідок припливно-відпливного розтягування й деформації, що виникає під час руху ексцентричною (тобто не концентричною) орбітою навколо Юпітера (у 318 разів важчого, ніж Земля).

Іо складається з гірських порід, має багате на залізо ядро, а його кам'яниста мантия чудово проводить подароване припливами й відпливами тепло. Завдяки припливам і відпливам поверхня Іо отримує 2400 Вт/м² енергії. Це на понад 1000 Вт більше, ніж Земля — від Сонця, й майже стільки ж, скільки від Сонця — Венера (2600 Вт/м²)! Якось забагато для існування води на поверхні. В межах сценарію нової Золотоволоски Іо схожа на Венеру: тамтешні припливи та відпливи генерують забагато енергії, й майже вся вода випарувалася. Як наслідок, на Іо дуже гаряче та нема океану для життя.

У Юпітера десятки супутників, і Каллісто — найвіддаленіший із четвірки найбільших. На Каллісто є океан, але він ув'язнений під дуже старою та товстою кригою, яку, очевидно, підживлює розпад важких радіоактивних елементів у внутрішніх шарах кори. Від припливів і відпливів Каллісто майже не нагрівається. Хоч її орбіта й дуже еліптична (навіть більш еліптична, ніж орбіта Іо), вона просто надто далеко

від Юпітера, й тому ексцентричність орбіти не спричиняє якихось значних розтягувань і напружень. Можна сказати, що більшу ексцентричність Каллісто (0,0074 порівняно з 0,0041 в Іо, де 0 — ідеально кругла орбіта) значною мірою компенсує більша відстань до Юпітера.

У системі координат «нової Золотоволоски» Каллісто нагадує Марс. Вона була (і теоретично лишається) придатною для життя, але одержує дуже мало енергії від припливів і відпливів, тому холодніша й не така активна, як більші внутрішні супутники.

Поміж Іо й Каллісто розташовані Ганімед і Європа — саме їм дістались найсприятливіші умови для існування життя. Припливи й відпливи на цих двох супутниках Юпітера генерують від кількох десятків до кількох сотень міліватів тепла на квадратний метр. На Європі таких умов виявилось достатньо для існування рідководного, завглибшки приблизно 100 км і зі скелястим дном (імовірно, всіяним гідротермальними джерелами) океану, вкритого відносно тонкою кригою до 30 км завтовшки. Крига тонка достатньо, щоб хімічні властивості її поверхні могли розкрити якісь хімічні — й, можливо, біологічні — ознаки океану, який вона приховує.

Європа і Ганімед виграють від цікавої властивості юпітеріанської системи, що зберігає еліптичність їхніх орбіт і допомагає отримувати припливно-відпливне тепло. Три внутрішні великі супутники Юпітера (Іо, Європа і Ганімед) — неначе троє дітей, які, провівши на гойдалках уже досить багато часу, синхронізували своє розгойдування. На кожен оберт Ганімеда довкола Юпітера припадає два оберти Європи, а на кожен оберт Європи — два оберти Іо. Отже, орбітальні періоди Ганімеда, Європи й Іо співвідносні як числа 1:2:4. Таке відношення назвали резонансом Лапласа (на честь французького математика П'єра-Сімона Лапласа, який відкрив його на початку XIX століття).

Резонанс Лапласа має важливе значення, бо змушує кожен супутник рухатись еліптичною орбітою. З часом орбіти

зазвичай округлюються і втрачають ексцентричність (тобто стають менш еліптичними). Але в системі супутників Юпітера три внутрішні великі супутники регулярно розташовуються групами по два: Іо — Європа, Європа — Ганімед та Іо — Ганімед. Коли так відбувається, попаровані супутники притягують один одного, спричиняючи «вимушену ексцентричність» і незначну зміну орбіт, які від цього набувають дещо овального, а не досконало круглого вигляду. (Зауважу, що всі три ніколи не опиняються по один бік Юпітера.)

Науковці досі ретельно досліджують, коли саме для супутників Юпітера усталився резонанс Лапласа, але вже зараз можуть стверджувати, що в певний конкретний момент у далекому минулому (імовірно, кілька мільярдів років тому) Іо почала віддалятися від Юпітера та поступово наблизилася до Європи на відстань, достатню для гравітаційної взаємодії з нею. Так ці два супутники ввійшли в парний резонанс, систематично притягували один одного, стимулювали вимушену ексцентричність і зрештою дійшли до резонансного співвідношення 1:2, яке зберігають і донині.

З часом обидва супутники під дією Юпітера втрачали дедалі більше енергії та моменту сили, і їхні орбіти більшали. Поступово вони наблизилися до Ганімеда й почали впливати на його орбіту. Врешті-решт гравітаційні сили між усіма трьома супутниками стабілізувались і сформували резонансну пропорцію 1:2:4, яку ми спостерігаємо нині.

Колись Каллісто теж стане елементом цієї пропорційної схеми. Три великі внутрішні супутники продовжують віддалятися від материнської планети й урешті (можливо, за кількасот мільйонів років) таки почнуть впливати на орбіту Каллісто. Чи сформується після цього між ними чотирма резонанс 1:2:4:8? Зараз це важко спрогнозувати, бо на втраті енергії та передачі моменту сили позначається дуже багато різних факторів, зокрема розсіювання припливно-відпливної енергії й реакція самого Юпітера на цю міжсупутникову взаємодію.

Космічний апарат «Юнона», який НАСА запустило кружляти довкола Юпітера 2016-го, може допомогти прояснити деякі глобальні питання про планетарну динаміку й внутрішній склад планет і супутників. Щойно ми чіткіше розумітимемо, як влаштований Юпітер, нам вдасться глибше збагнути його вплив на океанські світи з його орбіти.