

ВСТУП

Фотографія сходу Землі, зроблена 1968 р. астронавтом із місячної орбіти, є однією з найзахопливіших світлин ХХ ст. Здавна відомо, наскільки цінним є наш надзвичайний світ: Земля — це єдина відома нам планета, де існують океани, збагачена киснем атмосфера та життя. Проте багато хто з нас виявився неготовим до настільки приголомшливого і різючого контрасту між ворожим місячним ландшафтом, безживною темрявою космічної безодні та нашим принадним мармуроподібним домом на блакитно-білому тлі. З тієї далечини Земля видається самотньою, маленькою та вразливою, але водночас набагато красивішою, ніж будь-яке інше небесне тіло.

Ми небезпідставно зачаровуємося нашою домівкою у Всесвіті. За понад два століття до народження Христа грецький філософ та енциклопедист Ератосфен Кіренський провів перше документально зафіксоване дослідження Землі. Щоб виміряти її обвід, він винахідливо взяв за основу просте спостереження за тіннями. В єгипетському місті Сіена в день літнього сонцестояння він опівдні спостерігав за сонцем, яке в цей час було в zenіті. Вертикальна стійка взагалі не відкидала тіні. Заразом у той самий день та час у прибережному місті Александрія, у 789 км на північ, схожа вертикальна стійка відкидала коротку тінь, тим самим указуючи, що в цій місцевості сонце перебувало не прямісінько над головою. Застосувавши геометричні теореми свого грецького попередника Евкліда, Ератосфен зробив висновок, що Земля має форму кулі, і підрахував, що її обвід складає близько 40 234 км — навдивовижу близька цифра до встановленого сьогодні значення довжини в районі екватора в 40 0076 км.

Упродовж століть тисячі інших науковців, серед них і знані люди, проте імена більшості поглинув час, досліджували рідну планету та розмірковували про неї. Вони намагалися відповісти на запитання, як утворилася Земля, як вона рухається у небесній сфері,

з чого складається і як влаштована. І понад усе ці вчені чоловіки та жінки бажали дізнатися, як еволюціонувала наша динамічна планета, як тут утворилося життя. Сьогодні завдяки нагромадженим нами дивовижним знанням, а також дивам технології, нам відомо про Землю набагато більше, ніж могли собі уявити філософи в давнину. Звісно, ми не знаємо всього, втім, маємо глибокі та багаті знання про Землю.

І хоча наші знання про планету, яке ми примножуємо з моменту народження людської цивілізації, за тисячоліття стали більш упорядкованими, значна частина цього прогресу показала, що вивчення Землі — це вивчення змін.

Більшість емпіричних наукових даних указують на те, що Земля змінюється рік за роком, епоха за епохою. Періодичні напластування осаду або стрічкові глини деяких льодовикових озер Скандинавії є свідченням процесу нашарувань великозернистих та тонкозернистих часточок, що відбувався протягом понад 13 тис. років у результаті пришвидженої ерозії в час щорічної весняної відлиги. Льодовикові керни з Антарктиди та Гренландії вказують на понад 800 тис. років сезонного відкладання льоду. А утворення осадових шарів завтовшки з аркуш паперу у сланцях, знайдених у місті Грін-Рівер, штат Вайомінг, зберегли в собі свідчення того, що відбувалося протягом понад мільйона років. Усі ці відкладення сформувалися над набагато старішими породами, які самі собою зокола вказують на грандіозні цикли змін.

Дослідження поступових геологічних процесів указують на ще масштабніші події в історії Землі. Утворення величезних Гавайських островів потребувало повільної та сталої вулканічної активності, коли протягом понад десятків мільйонів років шари лави послідовно накладалися один на одного. Округла форма Аппалачів та інших древніх гірських хребтів утворилася внаслідок поступової ерозії, що відбувалася протягом сотень мільйонів років і періодично переривалася великими зсувами ґрунту. Упродовж геологічної історії зсуви тектонічних плит, подекуди такі ж раптові, як-от грім серед ясного неба, переміщали цілі континенти, зводили гори та створювали океани.

Земля завжди була неспокійною планетою з невпинним процесом еволюції. Вона безперервно змінюється від ядра до кори. Навіть

у наші дні атмосфера, океани та суходіл зазнають видозмін, хоча, вірогідно, і не з такою швидкістю, як упродовж нещодавнього минулого. Нерозумно було б не турбуватися через ці буремні глобальні зміни, і для багатьох із нас це просто не можливо: наші допитливість та турбота про рідний дім такі ж природні, які були і в Ератосфена. Проте так само нерозумно було би розглядати ситуацію, що склалася на Землі, повною мірою не скориставшись усіма перевагами, які вона дала нам, розповівши про своє дивовижне минуле, непередбачуване мінливе сьогодення, а також нас та наш світ у майбутньому.

Більшість свого життя я провів намагаючись дослідити нашу живу, складну та мінливу планету. Ще хлопчиком колекціонував каміння та мінерали, загроможуючи кімнату скам'янілостями та кристалами, які стояли поряд із якимись жучками та кістками. Ця Землецентрична тема тягнеться червоною ниткою крізь усю мою професійну кар'єру. Почав я з експериментів над об'єктами розміром із атом, які навіть важко розгледіти в мікроскоп, вивчаючи молекулярну структуру породотвірних мінералів, нагріваючи та стискаючи крихітні зерна мінералів, аби задокументувати реакції, що відбуваються у надрах Землі і за умовами нагадують роботу скороварки.

З часом мій інтерес поширився на грандіозні просторові та часові аспекти геологічного гобелену. Природні бібліотеки Землі розкривають нам довжелезну — на мільйони років — історію одночасної еволюції елементів, мінералів, гірських порід та самого життя — від пустель Північної Африки до льодяного покриву Гренландії, від узбереж Гаваїв до вершин Скелястих гір, від Великого бар'єрного рифу в Австралії до древніх скам'янілих коралових рифів, знайдених у безлічі країн. Тоді як акцент у моїй науково-дослідницькій програмі змістився на вивчення вірогідної ролі мінералів у геохімічній передісторії походження життя, я відкрив для себе, що одночасна еволюція життя та мінералів упродовж історії Землі є ще разючішою, ніж ми собі уявляли, і що певні гірські породи не тільки виникли в результаті життєдіяльності організмів, — про що свідчать вапнякові печери по всьому континенту, — але й що саме життя, можливо, виникло з гірських порід.

Протягом чотирьох мільярдів років історії Землі еволюційний розвиток мінералів та життя — геологія і біологія — переплелися настільки в дивовижний спосіб, що це починає прояснюватися тільки зараз. Кульмінацією цих ідей стала публікація 2008 р. роботи під назвою «Еволюція мінералів» — із контроверсійними новими думками, які дехто з науковців зустрів радо, можливо, як першу зміну парадигми в мінералогії за останні два століття, тоді як інші поставилися до них з обережністю — як до єретичного переосмислення нашої науки в контексті геологічного часу.

Древня наука мінералогія, хоча вона й відіграє першорядну роль у всьому, що ми знаємо про Землю та її минуле, є навдивовижу статичною та відокремленою від концептуальних непередбачуваних змін часу. Протягом понад двохсот років хлібом насущним у житті мінералога є вимірювання хімічного складу, щільності, твердості, оптичних властивостей та кристалічної структури. Завітайте до будь-якого природничого музею і ви зрозумієте, що я маю на увазі: у засклених шафах дбайливо виставлені розкішні зразки кристалів, на ярликах яких зазначені назва, хімічна формула, кристалічна система та місцезнаходження. Ці коштовні фрагменти Землі мають багатий історичний контекст, проте, найімовірніше, намарно буде шукати якісь підказки щодо віку їхнього утворення чи їхніх наступних геологічних трансформацій. Традиційний підхід фактично розлучає мінерали із захопливими історіями їхнього існування.

Така традиція потребує змін. Чим докладніше ми вивчаємо вичерпний літопис скам'янілостей Землі, тим краще усвідомлюємо, як знову і знову відбуваються трансформації у природному світі як живої, так і неживої природи. Поглиблення нашого розуміння двох планетарних реалій — часу та еволюційних змін — дозволило припустити не тільки те, як уперше виникли мінерали, але й коли це сталося. А нещодавні відкриття живих організмів у місцях, які традиційно вважалися непридатними для існування — у розпечених вулканічних жерлах, кислотних озерах, арктичних льодах та стратосферному пилі — перетворило мінералогію на ключову дисципліну в пошуку відповідей про походження та збереження життя на планеті. У листопадовому випуску провідного журналу *American Mineralogist* за 2008 р. ми з колегою запропонували новий підхід

до вивчення мінералогічної царини та її неймовірних трансформацій упродовж невивчених проміжків часу. Ми наголосили, що багато мільярдів років тому в космосі взагалі не існувало мінералів. Жодні кристалічні сполуки не могли утворитися, тим більше зберегтися в розпеченому вихорі Великого вибуху. Півмільйона років пішло на те, щоб у казанку світобудови утворилися хоча б перші атоми — водень, гелій та дрібка літію. Мільйони років потому сили гравітації таки вмовили ці первісні газоподібні елементи перетворитися на перші туманності, а згодом змусили ці туманності розпастися на перші гарячі, щільні, розпечені зірки. І лише коли ці перші світила вибухнули, ставши надновими сяючими зірками, коли згустки переповненого великою кількістю елементів газу стали розширюватися та охолоджуватися, ущільнюючи перші крихтіні кристали алмазу, тоді й розпочалася космічна сага мінералів.

Ось так перетворився я на завзятого читача свідчень гірських порід — приголомшливих, подекуди фрагментарних та неясних, історій про народження та смерть, спокій та рух, походження та еволюцію. Ця неоповідна разюча та багатоголоса розповідь про живу та неживу сфери Землі — одночасну еволюцію життя та гірських порід — є невимовно захопливою. Вона обов'язково має бути почута, адже Земля — це і є ми. Усе, що дає нам прихисток та засоби для існування, усі речі, які нам належать, фактично кожен атом та молекула нашої тілесної оболонки — усе це із Землі постало і в Землю повернеться. Пізнати наш дім — це те ж саме, що пізнати себе.

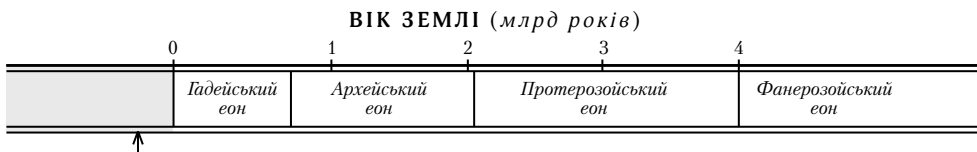
А ще нам треба почути цю сагу Землі й тому, що її океани та атмосфера зазнають змін із такою швидкістю, якої не було за всю попередню довгу історію. Підвищується рівень океанів, вони нагріваються та більше окислюються. Характер опадів змінюється на глобальному рівні, тоді як атмосфера стає все більш бурхливою. Зникають полярні льоди, починає танути тундра, змінюються звичні середовища проживання живих організмів. Як ми дізнаємося з наступних сторінок, історія Землі є сагою змін. Проте за рідкісних обставин тривожно стрімких змін, що відбувалися в минулому, життя зазнавало неабияких втрат. Для того, щоб діяти обдумано та своєчасно, і для власного ж блага

ми мусимо потоваришувати із планетою та пізнати її історію. Адже напрочуд очевидним із тієї прекрасної світлини, зробленої за 384 633 км від нас, зі світу, у якому немає життя, стає той факт, що домівка у нас лише одна.

Услід за Ератосфеном та тисячами допитливих умів, що продовжили його справу, у цій книжці я розповім довгу історію змін на Землі. Хай планета і здається нам близькою та зрозумілою, проте її бурхлива історія охоплює низку трансформацій, які навіть важко собі уявити. Для того щоб добре пізнати Землю, досягнути еони, що сформували її, ви маєте зрозуміти сім базових істин.

1. Земля складається з атомів, які неодноразово були в рециклінгу і продовжують брати участь у цьому процесі.
2. Земля надзвичайно стара в порівнянні з часовими рамками людини.
3. Земля є тривимірною, і більшість процесів приховані від наших очей.
4. Гірські породи — це архіваріуси історії Землі.
5. Системи Землі — гірські породи, океани, атмосфера та життя, поєднані складним взаємозв'язком.
6. Історія Землі охоплює довгі періоди застою, які час від часу переривалися раптовими катаклізмами з невідворотними наслідками.
7. Життя змінювало і продовжує змінювати поверхню Землі.

Ці уявлення про буття Землі лежать в основі хитросплетених історій про атоми, мінерали, гірські породи та життя, утворюючи епопею простору та часу; вони з'являтимуться на подальших сторінках книги в розповідях про фази вогняного зародження Всесвіту та довготривалої еволюції на Землі. Одночасна еволюція Землі та життя — нова парадигма, що лягла в основу цієї книги, — є частиною безповоротних послідовностей еволюційних стадій, що сягають Великого вибуху. Для кожної зі стадій характерні свої процеси та феномени, які зрештою по-своєму витісували поверхню нашої планети, знову і знову, невпинно прокладаючи шлях у чудесний світ, в якому ми сьогодні живемо. Ось вона — історія Землі.



Розділ 1

НАРОДЖЕННЯ

УТВОРЕННЯ ЗЕМЛІ

ОХОПЛЮЮЧИ МІЛЬЯРДИ РОКІВ ДО УТВОРЕННЯ ЗЕМЛІ

Спочатку не було Землі й не було Сонця, яке б її зігріло. Сонячна система з палаючою центральною зіркою, розмаїттям планет та супутників є порівняно новоприбулою: їй усього лише 4,567 млрд років. Багато чого мало статися, перш ніж наш світ постав з порожняви.

Місце народження нашої планети було підготоване набагато раніше, ще на початку всього — у момент Великого вибуху — за останніми підрахунками 13,7 млрд років тому. В історії всесвіту цей визначальний момент створення залишається найбільш розпливчастим і незрозумілим. Це був стан сингулярності — трансформації з нічого у щось, що залишається поза рамками сучасної науки чи математичної логіки. Якщо ви шукатимете в космосі ознаки існування Бога-Творця, то варто почати з Великого вибуху.

На початку буття простір, енергія та матерія виникли з непізнаваної порожнечі. Нічого. А тоді — щось. І ця концепція поза нашою здатністю створювати метафори. Наш всесвіт не виник раптово з вакууму, адже до Великого вибуху не існувало ні простору, ні часу. Наше розуміння «нічого» не передбачає порожне-

чі — до моменту Великого вибуху не існувало чогось, що могло би бути порожнім.

І згодом зненацька з'явилося не просто «щось», а все, що існуватиме відтоді завжди, усе одразу. Об'єм нашого всесвіту був менший за ядро атома. Цей ультрастислий космос постав як чиста однорідна енергія, де не було частинок, що могли би зіпсувати цю ідеальну одноманітність. Усесвіт швидко розширився, проте не назовні чи у щось подібне (у всесвіту немає «назовні»). Весь розпечений об'єм чистої енергії розширювався і ріс. І, оскільки розширювався, він холонув. Перші субатомні частинки виникли через доли секунди після Великого вибуху — це були електрони і кварки, невидима сутність усіх твердих тіл, рідин і газів, із яких складається наш світ і які матеріалізувалися з чистої енергії. Незабаром після цього, все ще протягом цієї найпершої долі найпершої космічної секунди, кварки об'єдналися в пари та триплети, утворивши більші частинки, у тому числі протони і нейтрони, які є в ядрі кожного атома. Усе це залишалося невимовно гарячим ще десь наступних півмільйона років, доки невпинне розширення зрештою не охолодило всесвіт на декілька тисяч градусів — достатньо низької температури, щоб електрони зіпилися з ядрами й утворили перші атоми. Переважно цими першими атомами були атоми водню — понад 90 % — невеликий відсоток складав гелій і ще трохи літію. Саме ця суміш елементів і утворила перші зірки.

Перше світло

Гравітація — це могутній двигун космічного притягування. Один атом водню дуже маленький, але візьміть його та відтворіть 10^{60} разів (це становитиме трильйон трильйонів трильйонів трильйонів трильйонів атомів) і тоді всі вони матимуть разючу колективну силу тяжіння. Гравітація потягне їх до спільного центру, утворюючи зірку — гігантську газову кулю із неймовірним тиском у ядрі. Коли у процесі народження зірки величезна воднева хмара колапсує і стискається, кінетична енергія атомів, що рухаються, перетворюється на потенційну гравітаційну енергію зв'язаної системи, яка зі свого боку переходить у теплову енергію — такий самий процес відбувається, коли астероїд зіштовхується із Землею, проте енергії при зіркотворенні

виробляється значно більше. Зрештою температура в ядрі газової кулі сягає мільйонів градусів, а тиск — мільйонів атмосфер.

Такі температура й тиск спричиняють новий процес — реакцію ядерного синтезу. За цих екстремальних умов ядра двох атомів водню (у кожному є по одному протону) зіштовхуються з такою силою, що нейтрони переміщуються з одного ядра в інше, у такий спосіб роблячи одні атоми масивнішими за інші. Після низки таких зіткнень утворюються ядра гелію із двома протонами. Дивовижно, але маса створеного атома гелію менша за масу початкових атомів водню, з яких він утворився, десь на 1 %. Ця втрачена маса перетворюється безпосередньо на теплову енергію (так само, як це відбувається у водневій бомбі), що тільки посилює термоядерну реакцію. Зірка «запалюється», заливаючи все довкола світловою енергією, і отримує з водню більше і більше гелію.

Великі зірки, багато з них більші за Сонце, врешті вичерпують чималі запаси атомів водню у своїх ядрах. Проте надзвичайно високий внутрішній тиск і тепла енергія продовжують підтримувати ядерний синтез. Двопротонні атоми гелію, які утворилися в ядрі зірки, з'єднуються між собою, продукуючи атоми вуглецю з шістьма протонами, — це надзвичайно важливий елемент для життя. Реакція не припиняється і коли нові поштовхи ядерної енергії спричиняють синтез гелію у сферичному шарі, який оточує зіркове ядро. Згодом синтезується неон, із неону утворюються атоми кисню, далі — магній, кремній, сірка тощо. Поступово зірка за структурою стає схожа на цибулину, де на один шар накладається інший концентричний шар зі своїми реакціями синтезу. Все швидше і швидше відбуваються ці реакції аж доки менше ніж за день не завершається кінцева фаза, коли утворюються атоми заліза. Так, через багато мільйонів років після Великого вибуху протягом життєвого циклу перших зірок завдяки ядерному синтезу утворилася більшість перших двадцяти шести елементів періодичної системи.

І стосовно атомів заліза і процесу ядерного синтезу. Коли водень перетворюється на гелій, а гелій стає вуглецем, і впродовж усіх інших реакцій об'єднання вивільнюється дуже багато ядерної енергії. Однак ядро атома заліза має найменшу енергію порівняно з будь-якими атомними ядрами інших елементів. Енергія вичерпу-

ється так само, як паливо в полум'ї перетворюється на попіл. Залізо — це наче ядерний попіл; при зіткненні ядра атома заліза з будь-яким іншим ядром ядерна енергія не вивільняється. Тож, коли перша масивна зірка неминуче виробила своє залізне ядро, гра завершилася і результати були катастрофічні. До того моменту в зірці панувала стійка рівновага і баланс між двома великими внутрішніми силами: гравітацією, яка стягувала масу до центру, та ядерними реакціями, які виштовхували цю масу назовні. Проте, коли ядро наповнилося залізом, процес виштовхування з ядра просто зупинився і тоді з невимовним шаленством запанувала гравітація. Зірка настільки стрімко колапсувала, завалюючись досередини, що спружинила від самої себе і, вибухнувши, утворила першу наднову. Зірка розпалася, викинувши більшість своєї маси назовні.

Народження хімії

Читачам, які намагаються зрозуміти, як влаштований космос, варто почати з наднових зірок, які подібно до Великого вибуху є прекрасними вихідними точками. Ясна річ, що Великий вибух неминуче призвів до утворення атомів водню, а атоми водню так само невідворотно породили перші зірки. Проте взагалі не очевидно, як самі зірки можуть привести до нашого сучасного живого світу. Велика воднева куля, хай навіть в її ядрі накопичуються важкі елементи, в тому числі й залізо, наче не дуже просуває нашу справу в якомусь цікавому напрямку.

Проте, коли вибухнули перші великі зірки, виникло дещо нове. Зруйновані космічні тіла засіяли простір елементами, які вони ж і створили. Особливо багато було елементів життя — вуглецю, кисню, азоту, фосфору та сірки. Достатньо було і магнію, кремнію, заліза, алюмінію та кальцію, які переважають у хімічному складі більшості поширені гірських порід і значна частка яких формує планети, схожі на Землю. Втім, у середовищі з неосяжно великою енергією, що вивільнилася у вибуху наднової, ці елементи поєдналися у новий і химерний спосіб, утворивши *всю* періодичну таблицю, тобто значно більше двадцяти шести елементів. Так з'явилися перші сліди більшості рідкісних елементів: дорогоцінні срібло та

золото, неблагородні мідь та цинк, отруйні миш'як та ртуть, радіоактивні уран та плутоній. Ба більше, усі ці елементи вишпурнуло в космос, де вони могли «знайти» одне одного і об'єднатися в хімічних реакціях новим та цікавим способом.

Хімічна реакція відбувається, коли один звичайнісінький атом наштовхується на інший. Кожний атом має крихітне, проте масивне ядро з позитивним електричним зарядом, оточене одним чи кількома негативно зарядженими електронами у вигляді електронних хмарок. Окремі атомні ядра практично ніколи не взаємодіють, за винятком випадків, коли середовище нагадає скороварку в надрах зірки. Проте електрони одного атома постійно наштовхуються на електрони сусідніх атомів. Хімічна реакція відбувається, коли зустрічаються два або більше атомів і їхні електрони взаємодіють та перегруповуються. Таке перемішування та спільне користування електронами відбувається через певні комбінації електронів, зокрема найстійкішими є поєднання двох, десяти чи вісімнадцяти електронів.

У результаті перших хімічних реакцій, що відбулися після Великого вибуху, були спродуковані молекули — маленькі сполуки кількох атомів, що тісно пов'язані в одне ціле. Ще до того як атоми водню почали об'єднуватись у зірках, утворюючи гелій, у вакуумі глибокого космосу виникли молекули водню (H_2), хімічно поєднані між собою два атоми водню. Кожен атом водню містить лише один електрон, і це досить хитке становище для всесвіту, в якому саме два електрони — це магічне число. Отже, коли зустрічаються два атоми водню, вони об'єднують ресурси для формування молекули із двох (магічне число) спарених електронів. Беручи до уваги надмір водню, який виник після Великого вибуху, можна висувати, що молекули водню, безумовно, передували першим зіркам й існували в космосі з моменту виникнення атомів. Коли після вибуху першої наднової космос всіяло різноманіття елементів, сформувалося багато інших цікавих молекул. Одним із прикладів такої ранньої сполуки є вода (H_2O), де два атоми водню поєднані з атомом кисню. Існує вірогідність, що молекули азоту (N_2), аміаку (NH_3), метану (CH_4), оксиду вуглецю (CO) та діоксиду вуглецю (CO_2) також збагачували простір навколо наднових зірок. Усі ці молекулярні сполуки зіграють ключову роль в утворенні планет та в походженні життя.