

# Зміст

<i>Передмова</i> .....	11
<b>1. ГРАВІТАЦІЯ</b>	
<i>Кожна частинка матерії діє силою притягання на будь-яку іншу частинку матерії</i> .....	13
<b>2. ЕЛЕКТРИКА</b>	
<i>Використовуючи силу, яка в 10 000 мільярдів мільярдів мільярдів разів сильніша за гравітацію, ми живимо електроенергією весь світ</i> .....	25
<b>3. ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ</b>	
<i>Молекули, як-от вуглекислий газ, поглинають тепло, що випромінює поверхня Землі, і затримують його в атмосфері</i> .....	35
<b>4. ЧОМУ СОНЦЕ ГАРЯЧЕ</b>	
<i>Воно має величезну масу</i> .....	44
<b>5. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ</b>	
<i>Є набагато більше способів створити невпорядкованість, аніж порядок. Тож якщо кожен зі способів однаково ймовірний, то порядок поступово перетвориться на невпорядкованість</i> .....	53
<b>6. ТЕКТОНІКА ПЛИТ</b>	
<i>Земна кора поділена, як погано вкладена бруківка, на плити, які під дією магми зіштовхуються одна з одною</i> .....	61

7. КВАНТОВА ТЕОРІЯ	
<i>Частинки можуть поводитися як хвилі, а хвилі можуть поводитися як частинки</i> .....	70
8. АТОМИ	
<i>Атоми — це алфавіт природи. Якщо розташовувати їх у різний спосіб, можна створити троянду, галактику чи новонароджену дитину</i> .....	83
9. ЕВОЛЮЦІЯ	
<i>Ознаки, які дають організмам змогу успішно конкурувати за обмежені харчові ресурси, а отже, виживати й розмножуватися, стають більш поширеними з кожним прийдешнім поколінням</i> .....	92
10. СПЕЦІАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ	
<i>Світло невловиме</i> .....	102
11. МОЗОК	
<i>Основний вид діяльності мозку — внесення змін у самого себе</i> .....	109
12. ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ	
<i>Гравітація — це прискорення</i> .....	119
13. ЕВОЛЮЦІЯ ЛЮДИНИ	
<i>Три слова характеризують людину та її предків: міграція, міграція, міграція</i> .....	127
14. ЧОРНІ ДІРИ	
<i>Досить сконцентрована маса створює бездонну яму в просторі-часі, з якої не може вирватися ніщо, навіть світло</i> .....	135
15. СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ	
<i>Уся різноманітність світу випливає з перестановок тільки трьох фундаментальних будівельних блоків, які скріплюються між собою за допомогою трьох фундаментальних сил</i> .....	144

16. КВАНТОВІ КОМП'ЮТЕРИ	
<i>Вони або використовують копії самих себе в паралельних усесвітах, або поводяться так, ніби вони це роблять</i> .....	152
17. ГРАВІТАЦІЙНІ ХВИЛІ	
<i>Це вібрації барабанної мембрани простору-часу — голос космосу</i> .....	160
18. ПОЛЕ ГІГГЗА	
<i>Основні будівельні блоки матерії не мають власної маси, але набувають її завдяки взаємодії з бозонами Гіггза</i> .....	169
19. АНТИМАТЕРІЯ	
<i>Фотон має нульовий заряд, тому коли він перетворюється на електрон, заряд електрона має компенсувати частинка з протилежним зарядом — античастинка</i> .....	178
20. НЕЙТРИНО	
<i>Хоча вони є швидкісними примарами, вплив яких ледь помітний у фізичному світі, насправді вони є другим за поширеністю видом частинок у Всесвіті</i> .....	186
21. ВЕЛИКИЙ ВИБУХ	
<i>Усесвіт розпочав своє існування в гарячому щільному стані. Відтоді він тільки розширюється й охолоджується</i> .....	194
<i>Подяки</i> .....	203
<i>Глосарій</i> .....	204
<i>Примітки</i> .....	218

### 3 Глобальне потепління

Молекули, як-от вуглекислий газ,  
поглинають тепло, що випромінює  
поверхня Землі, і затримують його в атмосфері

Одного дня Земля може стати схожою на Венеру

*Стівен Гокінґ*

**К**ілька типів молекул, з яких складається атмосфера Землі, мають властивість затримувати тепло, що підіймається від поверхні планети. Завдяки такій властивості ці молекули не дають планеті перетворитися на льодяну бурюльку й уможливають життя на ній. Насправді без найголовнішої з усіх молекул-уловлювачів тепла (водяної пари) планета була б гігантською сніжкою із середньою температурою близько  $-18$  градусів Цельсія.

Той факт, що повітря навколо нас не пасивне, а нагрівається під сонячними променями, відкрила 1856 року маловідома американська науковиця Юніс Фут. Дівоче прізвище Юніс — Ньютон. Вона була донькою Ісаака Ньютона-молодшого, далекого родича відомого англійського фізика, який серед усього іншого відкрив закон усесвітнього тяжіння. Фут вклала термометри в довгі скляні трубки, які заповнювала різними газами, як-от киснем і воднем.

Коли вона піддала трубки впливу сонячного світла, то виявила, що з усіх газів водяна пара й вуглекислий газ (діоксид вуглецю, який вона назвала «вуглецевою кислотою») нагрівалися найсильніше<sup>8</sup>. Зауваживши це, вона зробила припущення: зміна кількості цих двох газів в атмосфері може вплинути на

клімат. Пані Фут була першою людиною в історії, що встановила цей взаємозв'язок. Ірландський фізик Джон Тіндаль не знав про висновки американської дослідниці. Незалежно від неї через три роки він підтвердив її відкриття. Надважливим є те, що він зробив наступний крок у дослідженні цього явища. Фут не встановила, чи гази в атмосфері нагріваються безпосередньо завдяки видимому світлу сонця, чи завдяки теплу у вигляді невидимого інфрачервоного світла, що випромінюється нагрітою сонцем поверхнею Землі. Тіндаль змайстрував джерело інфрачервоного випромінювання з мідного куба, наповненого окропом (відомого як «куб Леслі»). Він продемонстрував, що водяна пара й вуглекислий газ поглинають не безпосереднє сонячне світло, а саме інфрачервоне випромінювання планети<sup>9</sup>. З погляду ретроспективи нам є цілком очевидним той факт, що повітря не нагрівається безпосередньо сонячним світлом. Зрештою, здоровий глузд підказує, що атмосфера є досить прозорою і тому не поглинає видимого світла. Якби вона не була прозорою, то як ми могли б крізь неї спостерігати за сонцем, місяцем і зірками в космосі?

Отже, протягом дня видиме світло від сонця проникає крізь атмосферу й нагріває землю. Після цього тепло випромінюється у вигляді інфрачервоного випромінювання, яке здебільшого поглинають водяна пара й вуглекислий газ. «Атмосфера дає сонячному теплу змогу вільно проникати, але утримує його на виході. У результаті маємо тенденції до накопичення тепла біля поверхні планети», — писав Тіндаль\*.

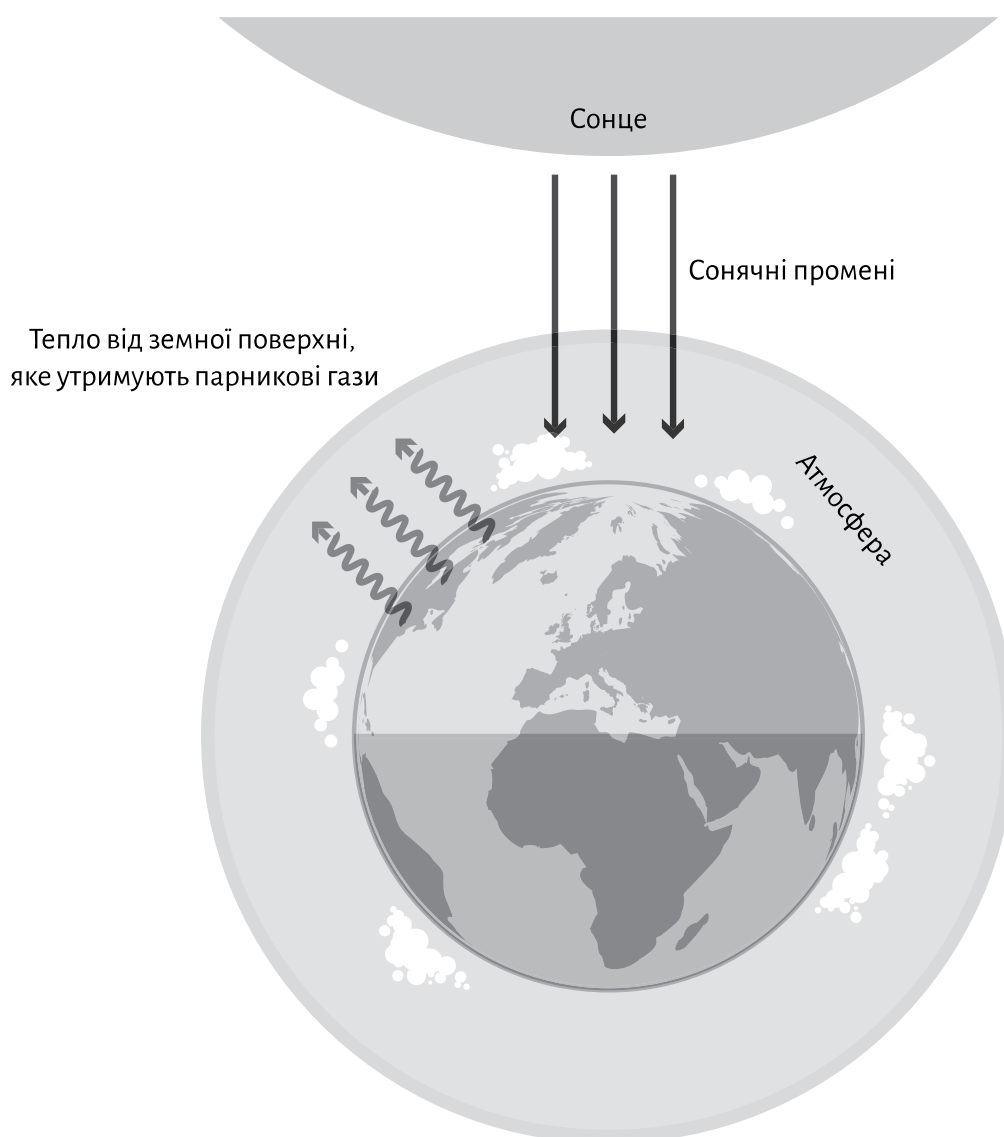
Звичайно ж, ви вже здогадалися, що це саме той знаменитий «парниковий ефект», хоча це й помилкова назва. У парнику (теплиці, оранжереї тощо) повітря гаряче головню не через

---

\* Джонові Тіндалю було вже понад п'ятдесят, коли 1876 року він урешті-решт одружився. Шкода, але саме його обоженювана дружина випадково стала причиною загибелі науковця. У 1893 році через погане освітлення вона дала йому неправильну й, на жаль, летальну дозу ліків.

наявність теплопоглинальних молекул, а тому що скляний дах перешкоджає його підйому (конвекції) й охолодженню.

Загалом інфрачервоне світло поглинається простими молекулами, що складаються із двох або більше атомів, оскільки енергія такого світла змушує якраз такі молекули вібрувати. Зовсім спрощено можна уявити, що атоми всередині молекули, як-от води ( $\text{H}_2\text{O}$ ) або вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) з'єднані пружинами, які можуть поперемінно стискатися та розтягуватися.



*Теплова пастка: земля прогрівається сонцем, і тепло, яке потім вона випромінює, поглинається атмосферними «парниковими» газами, як-от водяною парою та вуглекислим газом.*

\* \* \*

Найпоширенішими молекулами в нашій атмосфері є азот ( $N_2$ ), що становить 78,08 %, і кисень ( $O_2$ ), що становить 20,95 % повітря. Отже, виникає очевидне запитання: чому ці молекули не діють як парникові гази<sup>10</sup>? Відповідь досить специфічна. Молекула може поглинути інфрачервоне випромінювання тільки за умови, що вібрація «пружин» між двома її атомами *також* змінює поділ між негативним і позитивним електричним зарядом у молекулі. Це явище відоме як «дипольний момент». На щастя для нас, це не стосується молекул азоту або кисню. Якби це було так, Земля була б гарячою, як піч!

Відкриття Фут і Тіндаля здивувало широкий загал. По-перше, воно продемонструвало, що щось таке несуттєве, як повітря, може утримувати тепло. По-друге, що навіть незначні концентрації таких речовин, як вуглекислий газ (який становить лише 0,04 % атмосфери), мають справді величезний ефект. Обидва науковці зробили припущення про існування зв'язку між вуглекислим газом і кліматом. Однак саме шведський хімік Сванте Арреніус у 1896 році висунув гіпотезу про те, що в кінці льодовикових періодів саме збільшення концентрації вуглекислого газу допомагало нагрівати Землю<sup>11</sup>.

Він також наочно продемонстрував, що спалювання викопного палива, як-от вугілля та нафти, може генерувати досить велику кількість вуглекислого газу й призвести до того, що дослідник називав «парниковим ефектом». Ця назва так і не набула популярності, але все одно дала людству уявлення про явище, яке ми тепер називаємо глобальним потеплінням. Отже, Арреніус був першим, хто наголосив на тому, що діяльність людини здатна змінювати клімат<sup>12</sup>.

Тепер ми знаємо, що він мав рацію. З 1958 року науковці регулярно вимірюють рівень вуглекислого газу в обсерваторії, що розташована поблизу вершини вулкана Мауна-Лоа на одному з Гавайських островів. За час спостережень концентрація збільшилася з 315 частинок на мільйон до 420 частинок на мільйон



(станом на 2021 рік). Зростання концентрації вуглекислого газу ідеально корелює з підвищенням середньої температури в усьому світі саме так, як і передбачав Арреніус.

Наразі ми навчилися опосередковано отримувати дані про клімат Землі в ті далекі часи, коли ще не існувало точних наукових вимірювань. Нам доступні новітні методи визначення кількості вуглекислого газу в атмосфері та температури в доісторичні часи. Наприклад, інформацію про концентрацію вуглекислого газу можна отримати завдяки дослідженням річних кіл дерев або ж панцирів різних тварин. Тоді як температуру можна визначити за допомогою крижаних кернів, адже сніговий покрив формується дещо відмінно за різних температур.

Завдяки великим масивам зібраних даних вимальовується абсолютно чітка картина. Вуглекислий газ, що утворюється від горіння викопного палива, призвів до підвищення глобальної температури приблизно на 1,18 градуса Цельсія супроти доіндустріального періоду. Період із 2016 по 2020 рік був найтеплішим за весь час ведення точних записів. Площа льодовикових щитів Гренландії й Антарктики суттєво зменшилася, а льодовики (великі крижані ріки) стрімко відступають у всьому світі. Протяжність і товщина арктичного пакового льоду, що вкриває Північний Льодовитий океан, зменшуються швидкими темпами протягом останніх десятиліть. На додаток до цього вуглекислий газ, який викидається в атмосферу внаслідок людської діяльності, поглинається океанами й перетворюється на карбонатну (вугільну) кислоту. Та підвищує кислотність води й негативно впливає на таких істот як, наприклад, корали.

Наразі всі країни світу зобов'язуються вживати рішучих заходів, щоби стримати підвищення температури на відмітці менш ніж +2 градуса Цельсія порівняно з доіндустріальним рівнем. Для цього треба скоротити об'єми викидів вуглекислого газу на 80 % до 2050 року, що само собою є грандіозним завданням. Проте людству потрібно знайти спосіб генерувати переважну частину електроенергії без використання викопного



палива, яке поки є основним методом перетворення води на пару для обертання турбін. Найочевидніші способи — приборкання для своїх потреб сил вітру та хвиль, а також використання сонячних панелей, щоби продукувати електроенергію без посередньо з сонячного світла.

Однак причина глобального потепління — не тільки вуглекислий газ від спалювання горючих корисних копалин. Ще одним джерелом є цемент, який виготовляється з вапняку. Окрім того, в атмосфері зростає також рівень інших парникових газів, як-от метану й оксиду азоту (нітрогену оксиду). Оксид азоту виділяється разом з іншими вихлопними газами легкових і вантажних автомобілів. Метан є побічним продуктом життєдіяльності сільськогосподарських тварин.

Найбільше занепокоєння викликає той факт, що рано чи пізно ми досягнемо критичної точки, коли коло замкнеться і кліматична система почне поводитися як ядерна реакція: у відповідь на кожне наступне збурення проблема буде загострюватися з дедалі більшими темпами (так званий позитивний зворотний зв'язок). Наведемо приклад: зі зменшенням площі пакового морського льоду знижується і його здатність відбивати сонячне світло назад у космос, а отже, темп потепління зростає. І коли тане вічна мерзлота, то з ґрунту вивільняється накопичений у ньому метан, який є навіть потужнішим парниковим газом, аніж діоксид вуглецю. А отже, темп потепління знову збільшується.

Найбільша іронія полягає в тому, що хоча спричинене людиною (антропогенне) парникове потепління нині загрожує існуванню людської цивілізації, але, як ми вже згадували раніше, саме парниковий ефект був запорукою того, що Земля залишалася придатною для зародження та збереження на ній життя протягом більш ніж 4 мільярдів років. Наша планета навіть має природний механізм для регуляції кількості вуглекислого газу в атмосфері, щоб через його надлишок на ній не стало занадто жарко, або через нестачу — надто холодно. Вуглекислий газ

реагує з гірськими породами та водою, утворюючи карбонатну кислоту, з якої виникають вапняк та інші карбонати. Коли тектонічні плити пірнають одна під одну, ці карбонатні гірські породи потім переносяться вглиб Землі (див. Розділ 6 про тектоніку плит). Що більше вуглекислого газу вивільняється в атмосферу (з вулканів та інших джерел), то швидше вуглецевий цикл утилізує газ. Так регулюється кількість газу в атмосфері, зберігаючи глобальну температуру стабільною. На жаль, кругообіг вуглецю — досить повільний процес. Він просто не встигає видаляти весь той діоксид вуглецю, який людина викидає в атмосферу з безпрецедентною швидкістю.

До речі, за історію планети вуглецевий цикл принаймні тричі виходив із ладу: 2,2 мільярда років тому, 746 мільйонів років тому і 635 мільйонів років тому. Під час кожного такого збою рівень вуглекислого газу падав настільки, що наша планета вкривалася льодом від полюса до полюса. Періоди «Крижаної Землі» врешті-решт завершувалися тоді, коли завдяки посиленню вулканічної активності в атмосферу потрапляло вдосталь вуглекислого газу, щоб розтопити лід.

Критична важливість наявності тектоніки плит і вуглецевого циклу стає більш ніж очевидною, якщо порівняти Землю з її найближчою сусідкою по Сонячній системі. За розміром Венера майже ідентична до Землі. В юний період свого існування ця планета, ймовірно, також мала океани й річки. Однак її орбіта пролягає на 30 % ближче до Сонця, ніж земля, що призвело до випаровування океанів. Через це виникла згадана вище неконтрольована ситуація позитивного зворотного зв'язку, оскільки випаровування перенасичувало атмосферу водяною парою, яка утримувала тепло й спричинювала ще стрімкіше підвищення температури. У верхніх шарах атмосфери молекули води навіть розщеплювалися під дією сонячного ультрафіолетового випромінювання на частини у вигляді атомів водню й кисню, які потім просто мігрували у відкритий космос. Увесь цей час під впливом неймовірно високих температур діоксид вуглецю

буквально випаровувався з розпечених гірських порід. Через це сьогодні атмосфера Венери на 96 % складається з вуглекислого газу. Температура на поверхні планети досить висока, щоб розплавити свинець, а колосальний тиск еквівалентний такому, який у нас можна знайти на майже кілометровій глибині в товщі земного океану.

А тепер замисліться: кількість вуглекислого газу в атмосфері Венери еквівалентна тій, що наразі надійно зберігається в карбонатних породах на Землі. Катастрофічний парниковий ефект Венери — яскраве попередження для людства. «Можливість неконтрольованого парникового ефекту вказує на те, що нам варто бути вельми обережними, — писав американський планетолог Карл Саган. — Зростання глобальної температури навіть на один-два градуси може мати катастрофічні наслідки»<sup>13</sup>.

Із парниковими процесами також пов'язана й загадка, над якою довгий час міркували науковці. Йдеться про «парадокс слабкого Сонця». Астрофізичні моделі еволюції Сонця вказують на те, що за часів формування і юності Землі наша зірка була на 30 % менш яскравою. За таких умов планета мала бути повністю замороженою. Але дослідження цирконів (найдавніших на Землі порід, які збереглися до нашого часу без будь-яких змін) вказують на те, що вже навіть 4,4 мільярда років тому вода на поверхні нашої планети вже перебувала в рідкому стані. Найкращим поясненням цього феномена є те, що первісна Земля мала щільну атмосферу з високим умістом діоксиду вуглецю від вулканічної діяльності. Під високим ми маємо на увазі не жалюгідні сьогоднішні 0,04 %, а цілих 70 %. Але навіть цього може бути замало.

У 2021 році Рене Геллер з Інституту дослідження Сонячної системи при товаристві Макса Планка в німецькому Геттінгені разом із колегами вказав на ймовірну причину, а саме — на утворення Місяця через зіткнення нашої планети з марсоподібним\* тілом незабаром після формування Землі. Спочатку

---

\* Об'єкт із масою, близькою до маси Марса.

Місяць міг бути в п'ятнадцять разів ближчим до Землі, ніж сьогодні, спричинюючи в магмі чи рідких океанах припливи заввишки до 2 кілометрів. Припливи є результатом розтягування та стискання одного астрономічного тіла під дією сили тяжіння іншого. Як ми вже згадували в розділі про гравітацію, завдяки цьому ефекту супутник Юпітера Іо перетворився на найбільш вулканічно активний об'єкт у Сонячній системі. Подібне приливне нагрівання на первісній Землі, ймовірно, могло б доповнити парниковий ефект і вберегти планету від повного замерзання<sup>14</sup>.

Але якщо у випадку із Землею парниковий ефект може бути основним фактором того, чому вона не замерзла на світанку свого існування, то у випадку з Марсом парадокс слабкого Сонця — ще більша проблема, яка заганяє у глухий кут науковців у всьому світі. Є численні докази того, що колись по поверхні Марса протікала вода, а в перші пів мільярда років його існування, можливо, на ньому були як річки, так і океани. Проблема полягає в тому, що Марс міститься приблизно на 50 % далі від Сонця, ніж Земля, тобто він отримує приблизно половину від тієї кількості тепла, яку отримує наша планета. І наразі ніхто не знає, як Марс уникнув перетворення на крижану бурульку.