

УДК 549:544:539:53.01
Ш65



Оригінальна назва твору:
SYMPHONY IN C: Carbon and the Evolution of (Almost) Everything

*Усі права збережено.
Жодна частина цієї книжки не може бути відтворена
в будь-якій формі без письмового дозволу
власників авторських прав.*

*Моїм друзям і колегам
з Обсерваторії глибинного вуглецю*

Пригода тільки починається.

Гейзен Роберт М.

Г27 Симфонія вуглецю. Вуглець та еволюція майже всього на світі / пер. з англ. О. Буйвол. — Харків : ВД «Фабула», 2023. — 288 с.

ISBN 978-617-522-074-0

Ми живемо на вуглецевій планеті, і ми є вуглецевим життям. Жоден інший елемент не є таким важливим для нашого добробуту. Вуглець — водночас повсюдний і таємничий, унікальний серед хімічних елементів завдяки своїй універсальності — є важливим об'єктом для вивчення як у космічному масштабі, так і на рівні окремих молекул, адже він містить відповіді на деякі з головних запитань людства. Звідки взялася Земля? Що зрештою станеться з цим світом і нами?

Американський мінералог і астробіолог, професор геофізики, один із небагатьох людей, на чию честь названо мінерал, а до того ж і музикант, Роберт Гейзен досліджує Всесвіт, щоби відкрити минуле, сьогодення та майбутнє найважливішого елемента життя. Ця книжка для всіх, хто цікавиться природничими науками.

УДК 549:544:539:53.01

Copyright © 2019 by Robert M. Hazen
© О. Буйвол, переклад з англ., 2022
© ВД «Фабула», макет, 2023

ISBN 978-617-522-074-0

Купити книгу на сайті kniga.biz.ua >>>

ЗМІСТ

Пролог	5
Частина перша. Земля	
ПРЕЛЮДІЯ. До виникнення Землі	19
ЕКСПОЗИЦІЯ. Виникнення й еволюція Землі	35
РОЗВИТОК. Глибинний вуглець Землі	67
РЕПРИЗА. Вуглецеві світи	89
КОДА. Запитання без відповідей	94
Частина друга. Повітря	
ІНТРОДУКЦІЯ. До повітря	97
АРІОЗО. Походження земної атмосфери	100
ІНТЕРМЕЦО. Глибинний вуглецевий цикл	109
АРІОЗО ДА КАПО. Атмосферні зміни	133
КОДА. Відоме, невідоме й непізнаване	141
Частина третя. Вогонь	
ІНТРОДУКЦІЯ. Матеріальний світ	147
СКЕРЦО. Корисні речовини	154
ТРІО. Наноматеріали	160
СКЕРЦО ДА КАПО. Історії	165
КОДА. Музика	175
Частина четверта. Вода	
ІНТРОДУКЦІЯ. Первісна Земля	179
ЕКСПОЗИЦІЯ. Походження життя	180
РОЗВИТОК. Еволюція життя (теми й варіації)	213
РЕПРИЗА. Вуглецевий цикл людини	250
ФІНАЛ. Земля, повітря, вогонь і вода	256
Подяки	259
Посилання	262
Показник	279

Пролог

Озирніться навкруги, і ви побачите, що вуглець є всюди: у папері цієї книжки, у друкарській фарбі на її сторінках та в клеї, що скріплює їх, у підшвах і шкірі ваших черевиків, у синтетичних тканинах і барвниках вашого одягу, у тефлонових застібках-блискавках і текстильних застібках-липучках, якими ви користуєтесь, у кожному шматочку вашої їжі, у пиві й міцних алкогольних напоях, у газованих напоях й ігристих винах, у килимах у вас під ногами, у фарбі на стінах, у кахлях на стелі, у різноманітному паливі, починаючи від природного газу й закінчуючи бензином, у свічному воску, у міцній деревині й відполірованому мармурі, у всіх клеях і змазках, у стрижні олівця й діамантовій каблучці, в аспірині й нікотині, у кодеїні й кофеїні і всіх інших ліках, які ви приймали протягом усього вашого життя. Вуглець є складовою всіх речей, що виготовлені з пластмас, починаючи від пакетів із супермаркету й велосипедних шоломів і закінчуючи дешевими меблями та дорогими дизайнерськими сонцезахисними окулярами. Атоми вуглецю оточують нас від пелюшок до оздобленої шовком труни.

Вуглець дарує життя. Ваші шкіра, волосся, кров, кістки, м'язи й сухожилля існують лише завдяки вуглецю. Кожна клітина у вашому тілі (я нітрохи не перебільшую, кожна частина кожної клітини) спирається на міцний вуглецевий скелет. Вуглець молока матері стає вуглецем серця її дитини. Вуглець є хімічною складовою очей, рук, вуст і мозку того, кого ви кохаєте. Коли ви дихаєте, то видихаєте вуглець. Коли ви цілуєтеся, задіяні атоми вуглецю.

Якщо брати до уваги речі, що оточують нас у повсякденному житті, буде легше перерахувати ті, які не містять жодного атома вуглецю, ніж перелічити хоча б 10 % тих, у складі яких його можна знайти. Це алюмінієві бляшанки з консервами у вашому холодиль-

нику, кремнієві мікросхеми в айфоні, золоті зубні коронки тощо. Ми живемо на вуглецевій планеті й самі є вуглецевою формою життя.

Кожен хімічний елемент є по-своєму унікальним, але деякі вирізняються своєю унікальністю більше, ніж інші. З усіх різноманітних мешканців періодичної таблиці шостий елемент є унікальним за своїм впливом на наше життя. Вуглець — це не просто статичний елемент, що входить до складу «матерії». Він забезпечує найважливіший хімічний зв'язок у просторі й часі. Вуглець є ключем до розуміння космічної еволюції. Протягом майже 14 млрд років Усесвіт еволюціонував, стаючи все більш складним, різноманітним, чудернацьким і навіть химерним. Вуглець лежить в основі цієї еволюції — хореографії появи планет, життя і нас з вами. Більше, ніж будь-який інший елемент, вуглець сприяв появі нових технологій, починаючи від парових двигунів промислової революції й закінчуючи сучасною «пластиковою епохою», хай навіть він прискорив безпрецедентні зміни навколишнього природного середовища й клімату в планетарному масштабі.

Навіщо приділяти стільки уваги вуглецю? Водень є набагато більш поширеним хімічним елементом, гелій — більш стабільним, а кисень — більш хімічно активним. Можна було б розповісти чимало захопливих історій про залізо, сірку, фосфор, натрій, кальцій або азот. Усі вони відіграли важливу роль у складній еволюції Землі, але, якщо ви бажаєте розгледіти сенс і мету в холоднечі темряви безмежного Всесвіту, вам варто звернути увагу саме на вуглець. Цей елемент сам собою й у з'єднанні з атомами інших елементів забезпечує неперевершений, безпрецедентний потенціал для оновлення Всесвіту, для космічної еволюції.

Серед понад сотні хімічних елементів вуглець має репутацію елемента наших прагнень і страхів. Щороку з'являються тисячі нових матеріалів на основі вуглецю. Паперові серветки *Kleenex*, еластична тканина спандекс, фреон, нейлон, поліетилен, вазелін, лістерин, бектин, скотч, пластичні іграшки покращують наше життя незліченними способами, далеко не всі з яких ми здатні навіть усвідомити. На жаль, поширення цих синтетичних хімічних речовин призвело до непередбачуваних наслідків — появи небезпечних для життя людини алергічних реакцій і канцерогенів, дірок у захисному озоновому шарі. Як основа всіх біомолекул вуглець краще за інші елементи сприяє благополуччю та стійкості життя на Землі, зокрема нашого

біологічного виду. Відсутність або зміщення атомів вуглецю може призвести до хвороб і навіть смерті.

Поверхневий вуглецевий цикл стабілізує клімат Землі, підтримує здоров'я екосистем і забезпечує нас численними джерелами недорогої енергії. Проте внаслідок спотворення розподілу вуглецю через природні чинники або діяльність людини (виверження вулканів, спалювання вугілля, падіння астероїду або знищення лісів) клімат може змінюватися, що призводить до руйнації окремих екосистем. Вплив шостого елемента не обмежується поверхневою сферою життя. Участь вуглецю в глибинних, прихованих від нас процесах, які протікають у надрах Землі, визначає динаміку та умови того, що відрізняє нашу планету від усіх інших відомих світів.

Історія вуглецю є, у певному сенсі, історією всього. Цей усюди-сущий, незамінний елемент має багато таємниць. Ми не знаємо, скільки вуглецю містить Земля, не до кінця усвідомлюємо різноманіття вуглецевих форм, що приховані глибоко всередині нашої планети. Ми достеменно не знаємо, як рухаються атоми вуглецю, коли вони циркулюють між поверхнею Землі та її глибинними надрами, не можемо сказати, чи суттєво змінилися ці рухи протягом мільярдів років історії Землі — починаючи від «глибокого часу».* Попри існування мільйонів відомих сполук вуглецю, учені тільки почали досліджувати багатство вуглецевої хімії. І найбільша таємниця з усіх — походження життя — нерозривно пов'язана з поведінкою вуглецю у складних хімічних сполуках з іншими елементами.

Коли справа доходить до вуглецю, його кількості, форм, рухів і походження, скрізь ми стикаємося з браком наших знань через власне невігластво. Ми повинні знайти відповіді, але як ми можемо сподіватися заповнити настільки великі прогалини у своєму розумінні? Здається, сама структура пошуку наукових знань здатна перешкоджати сталому прогресу. В університетах бракує кафедр, що вивчають вуглець, масштабні міждисциплінарні дослідження є великою рідкістю. Наукові відкриття робляться завдяки правильно сформульованим питанням про світ природи, однак також неможливі без отримання фінансування з обмежених фондів. Перед

* «Глибокий час» — концепція геологічного часу, заснована на вкрай повільному характері геологічних процесів і великій древності Землі; розроблена у XVIII столітті шотландським геологом Джеймсом Гаттоном (1726–1797).— Тут і далі, якщо не зазначено інше, прим. перекл.

ученими ставлять жорсткі строки, а інтеграція часто стає жертвою спеціалізації.

Хто зможе створити радикально іншу систему фінансування науки?



Місце дії — приміщення клубу *Century Association* у Нью-Йорку. Час дії — початок 2007 року. Збирачі коштів з Інституту Карнегі запросили кілька десятків потенційних спонсорів на вишукану звану вечерю. Економіка процвітає, а Барак Обама — ще сенатор від штату Іллінойс. У просторах, оздоблених дерев'яними панелями приміщеннях клубу виставлено роботи найвідоміших художників і скульпторів Америки. Видатні митці, серед яких можна виділити Джона Фредеріка Кенсетта, Вінслоу Гомера й Пола Меншипа, колись обміняли свої творіння на бажане й дороге членство в клубі. Обладка виявилася взаємно вигідною: клуб зібрав чудову колекцію шедеврів, а митці отримали доступ до багатих меценатів, які могли дозволити собі високі вступні внески.

Після вечері я виголосив промову на тему дослідження походження життя. За своїм змістом вона була майже розважальною. Свої міркування я наочно підкріплював простими речами, як-от склянка газованої води, камінь, підібраний у місцевому парку, чайна ложка й соломинка. Вуаля! Цього виявилось достатньо для того, щоби проілюструвати хімічні кроки, за допомогою яких життя могло виникнути з глибокого розжареного, багатого на вуглець вулканічного середовища на дні океану. Те, що мої ідеї були дещо суперечливими, — і спричинили жваві, іноді гострі дискусії зі скептично налаштованими колегами — додало моїм реплікам децицію пікантності. Як бонус кожен присутній отримав екземпляр моєї нещодавно надрукованої книжки *«Буття. Науковий пошук походження життя»* (*Genesis: The Scientific Quest for Life's Origin*), яку було присвячено саме цій темі. Я відчув себе схожим на художників, чії картини висіли на стінах клубу. Як і вони, я відпрацював запрошення на вечерю, намагаючись привернути увагу когось із потенційних меценатів і сподіваючись, що наступний спонсорський внесок дозволить мені з колегами створити нове наукове полотно.

Наука — дороге задоволення. Грошова підтримка роботи аспіранта або докторанта складає близько 100 000 доларів на рік. Нові аналітичні прилади можуть коштувати до мільйона доларів, а ще

треба платити за їхнє обслуговування й поточний ремонт. Це додає ще десять, якщо не більше, відсотків до попереднього кошторису. Вам нізащо не обійтись без поїздки на конференції, оплати публікацій, закупівлі найнеобхіднішого для лабораторії: пробірок, реактивів, серветок для оптики *Kimwipes* тощо. І це тільки початок. Я вже не кажу про непередбачувані витрати. Без фінансової підтримки промислових компаній, урядових організацій і недержавних фондів наукові дослідження дуже швидко зійшли б нанівець. Ось тільки отримати її ніколи не було легко. Досить важко подавати заявки на гранти до установ і фондів, коли розумієш: шанси отримати 100 000 доларів на рік не перевищують 1 до 10.

Саме тому я потрапив до Великого Яблука і стояв перед усіма цими людьми, які мало що тямлять у науці, з капелюхом у простягнутій руці. Можна відвідати кілька дюжин подібних заходів з нульовим результатом, але однаково треба намагатися. Той вечір видався напрочуд веселим, проте я швидко про нього забув через біганину, спричинену дослідницькими проектами й заявками на отримання грантів. А потім мені зателефонували, і цей дзвінок усе змінив.



Трапилося це на початку весни 2007 року, за три місяці після тієї званої вечері. Вашингтон утопав у цвіті дерев.

— Привіт, Бобе! Вас турбує Джессі Осубель із Фундації Альфреда Слоуна в Нью-Йорку.

Мабуть, я познайомився із Джессі, коли виступав з доповіддю в клубі *Century Association*, однак я його не запам'ятав. Його приємний баритон звучав доброзичливо, проте в мене склалося враження, що я маю справу з діловою людиною.

— Фундація Слоуна розмірковує над тим, щоби започаткувати нові програми.

Я нашоросив вуха. Фундація Альфреда Слоуна фінансувала важливі наукові дослідження й інформаційно-просвітницьку діяльність. Вони вклали кошти в амбітний проект «Облік кількості морських організмів», дослідження космосу за допомогою цифрових технологій, завдяки чому вчені відкрили темну енергію, фінансували Національне громадське радіо (*NPR*) й Громадську мовну службу (*PBS*).

— Нас цікавить, чи не хотіли б ви взяти участь у програмі з вивчення глибинного походження життя?

Тема мого нью-йоркського виступу саме стосувалася вельми хиткої гіпотези, згідно з якою життя виникло в глибинній вулканічній зоні на дні океану. Отже, мої зусилля не були марними.

Осубель сказав, що програми Фондації Альфреда Слоуна зазвичай тривають десять років, а на їх фінансування виділяють від 7 до 10 млн на рік. Потім він узяв паузу, очікуючи на мою реакцію. У мене забракло слів. Одиниця з вісьмома нулями заволоділа всіма моїми думками.

Зрештою я оговтався, і ми почали обговорювати деталі. Я зауважив, що зосередження виключно на глибинному походженні життя є занадто вузьким для масштабного дослідження, яке триватиме десять років, оскільки з вуглецем на нашій планеті пов'язано багато фундаментальних таємниць не лише в біології, але й у фізиці, хімії та геології. Я пояснив, що ми не зможемо належно розібратись у таємниці стародавнього походження життя, доки не будемо знати всю історію вуглецю на Землі.

Джессі Осубелю сподобалась ідея комплексного підходу. Наші дослідження повинні були охопити фізику, хімію, геологію та біологію, історію геологічного розвитку Землі за 4,5 млрд років від ядра до кори, беручи до уваги не лише глобальні масштаби, а й наносвіт. Він запропонував річний дослідницький грант на суму 400 000 доларів, який, за його словами, уже схвалено, щоби зібрати експертів з усього світу, провести семінари, визначити, що нам відомо, а що ні, а також розглянути глобальну стратегію, спрямовану на переосмислення ролі вуглецю в процесах, що протікають на Землі.

Назвати це полотном, створеним заради науки, було б применшенням. Це була надзвичайно амбітна симфонія Бетховена з безпрецедентною силою — чудовим багатоголосим хором, кількома оперними солістами та величезним оркестром з багатьма інструментами, починаючи від туби й закінчуючи маленькою флейтою. Нічого подібного раніше створити не намагалися.

Минув рік. 15 травня 2008 року ми зібрали понад сотню експертів із різних куточків світу.¹ Видатні професори разом із молодими вченими з десятка країн були представниками найрізноманітніших наукових напрямів досліджень. Ми повинні були з'ясувати, чи має сенс створити цілісний підхід до вивчення вуглецю, чи достатньо у всіх бажання.

Перший день не був особливо обнадійливим, оскільки вчені рідко виходять зі своєї зони комфорту. Попри високу риторику про «відмову від обмежень» і «перетинання кордонів», біологи загалом спілкувалися з біологами. Те саме стосувалося геофізиків і хіміків-органіків.

Другий день виявився більш успішним. Поступово, оскільки завдяки нашим жвавим дискусіям почали проявлятися обриси незвіданих перспектив (таємниця вуглецю в ядрі Землі, загадкове давнє походження життя, циклічний рух літосферних плит, ознаки існування величезної мікробної біосфери під поверхнею Землі), ми побачили свої вузькі спеціальності в нових, ширших контекстах. Уперше ми дізналися про парадоксальні, поки що недосліджені зв'язки між виверженням вулканів і покладами алмазів, між рухом тектонічних плит і зміною клімату, між хімічно активними мінералами й прихованим глибинним життям. Привабливість вуглецевих досліджень як універсальної цілісної теми зачарувала нас.

До кінця третього дня було визначено структуру нового глобального проекту. З'явилися лідери, які з ентузіазмом поставилися до нових викликів. Спостерігачі з Фондації Альфреда Слоуна відчували енергію в залі, побачили зацікавленість у наших очах і швидко дали зелене світло Обсерваторії глибинного вуглецю.² Вона повинна була стати масштабним, амбіційним проектом у царині наукової думки. Перспективи були захопливими, але я підозрюю, що всі також хвилювалися, що можуть стати частиною приголомшливого, бентежного й дуже дорогого провалу.

Десять років по тому результати цієї авантюри перевершили найсміливіші очікування. Інтернаціональна армія дослідників вуглецю, що складається з понад тисячі науковців із п'ятдесяти країн, поступово розгадує таємниці шостого елемента на Землі. Завдяки міжнародним грантам на загальну суму пів мільярда доларів, які ми отримуємо від десятків фондів та інших організацій з усіх куточків світу, Обсерваторія глибинного вуглецю перетворилася на один із найбільш всеосяжних міждисциплінарних дослідницьких проектів в історії.

Як завжди буває, коли наукова ініціатива досягає своєї мети, ми багато чого навчилися, але також стали більш гостро усвідомлювати, чого ми ще не знаємо. Питання, які не давали нам спокою і залишилися без відповіді, усе ж стали більш чітко окресленими,

що допоможе майбутнім, більш наполегливим дослідникам. Таким є парадокс науки: що більше ми дізнаємося, то ясніше розуміємо, скільки залишається невідомого нам, можливо, навіть непізнаваного. Кожне відкриття відчиняє двері в новий, незвіданий світ.

Я хочу поділитися з вами приголомшливими відкриттями вуглецевих досліджень, що від них перехоплює подих, перелічити досягнене нами й окреслити те велике незвідане, яке ще належить дослідити. Але як це краще зробити? На місці Джона Фредеріка Кенсетта чи Вінслоу Гомера я створив би картину. Висловлювати думки важче. Багатотомна енциклопедія, присвячена вуглецю, навряд чи охопить усі численні нюанси цієї теми. Як тоді відобразити історію шостого елемента на сторінках однієї книжки? Цей виклик вабив мене, але я відчував, що опинився в глухому куті. Чиста сторінка знушалася з мене, аж поки Джессі Осубель не запропонував мені чудову ідею.

— Ти мусиш створити симфонію, — порадив він.³

Джессі знав, що я протягом сорока років грав на трубі в симфонічних оркестрах, поєднуючи денну роботу в лабораторії та вечірні виступи з багатьма колективами. Я регулярно грав у Вашингтонському камерному симфонічному оркестрі та оркестрі Національної галереї, а також іноді виступав у Національному симфонічному оркестрі й Вашингтонській національній опері. Хоча я неодноразово грав кожену симфонію Бетховена, Брамса, Шумана й Мендельсона, подібна пропозиція спочатку мене спантеличила. Симфонія в словах, а не звуках? Чотири частини... Але чого?

Я перебував у невизначеності, відчував себе трохи збентеженим, проте запропонована метафора мала сенс на кількох рівнях. Як в Обсерваторії глибинного вуглецю працюють різні за фахом учені — фізики, хіміки, біологи й геологи, так у симфонічному оркестрі грають різні музиканти, кожен з яких має багаторічну підготовку та сповнений ентузіазму. У кожного музиканта оркестру свій інструмент: скрипка або туба, флейта або малий барабан, труба або альт. Кожен тембр і діапазон є важливими, проте ніхто окремо не здатен передати величі цілого музичного твору. Те саме із симфонією вуглецевих досліджень. Без багатьох голосів нашої Обсерваторії симфонію вуглецю ніхто ніколи не почув би.

Ця метафора також не суперечить тому факту, що видатні сольні партії виділяються на загальному фоні гри оркестру. Наша симфонія вуглецю була б значно скромнішою без участі видатних дослід-

ників і дослідниць, чий окремий внесок став складовою загального успіху.

Як і будь-яка симфонія, ця книжка є індивідуальною подорожжю — несхожою на інші, обмеженою за обсягом, зумовленою моїм суб'єктивним поглядом і зіграною по-різному залежно від настрою. Я спирався на плідну роботу сотень моїх колег, але ця розповідь про вуглець, по суті, є лише моєю. Інші симфонії вуглецю чекають свого часу.



Коли я провів паралелі між науковим проектом і великою оркестровою композицією, мені стала подобатися ідея вуглецевої симфонії, хоча скласти чіткі рамки твору було складно. А потім я згадав, як давні вчені писали про те, що космос складається з чотирьох основ: землі, повітря, вогню й води. Кожна має свій власний набір характеристик, кожна є невичерпною складовою Всесвіту, а разом вони є джерелом походження всієї матерії. Вуглець, єдиний серед атомів періодичної таблиці, має характеристики всіх чотирьох класичних первинних основ. Це наштовхнуло мене на думку розділити свою книжку на чотири частини.

Як і в симфонії, чотири частини цієї книжки відрізняються широтою охопленої теми, настроєм і темпом. «Частина перша. Земля» присвячена мінералам і скелям, які складають тверду кристалічну основу нашої планети. Ця частина починається зі світанку творіння, який мав місце задовго до формування планети Земля, коли атоми вуглецю утворилися з більш дрібних елементарних частинок. Потім мова заходить про еволюцію мінеральних багатств Землі, про зростання різноманітності й незрівнянну красу кристалічних сполук вуглецю.

«Частина друга. Повітря» розповідає про велич вуглецевого циклу Землі. Атоми вуглецю постійно переміщуються з місця на місце, між океаном і атмосферою, потрапляють глибоко в надра Землі, коли рухаються літосферні плити, а потім викидаються на поверхню під час виверження сотень активних вулканів. Протягом мільйонів років цей глибинний вуглецевий цикл перебуває в надійній рівновазі, але зараз він порушується діяльністю людини, що може призвести до небажаних наслідків. Як у справжній поемі, ця частина вимагає більш повільного та м'якого виконання.

Важлива роль вуглецю в енергетиці та промисловості, а також його все більш активне використання у високих технологіях