

С.М. Кирилюк

ЗЕМЛЯ І ЗЕМЛЕТРУСИ



Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

С.М. КИРИЛЮК

ЗЕМЛЯ І ЗЕМЛЕТРУСИ

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК



Чернівці

Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

2023

УДК 551.1+550.34

К431

Рекомендовано вченою радою

Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
(протокол № 15 від 27.12.2023 року)

Рецензенти : *Сивий М.Я.*, доктор географічних наук, професор кафедри географії та методики її навчання Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка, академік Національної академії наук вищої освіти України по відділенню наук про Землю;

Тиханович Є.В., кандидат географічних наук, доцент кафедри геоєкології і фізичної географії Львівського національного університету імені І. Франка

Кирилюк С.М.

К431 Земля і землетруси : навч.-метод. посібник. Чернівці : Чернівецьк. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2023. 408 с.

ISBN 978-966-423-829-5

У навчально-методичному посібнику розглядаються питання, які стосуються Землі як планети (внутрішня будова, рух у космічному просторі, цикли Міланковича тощо) і землетрусів (сейсмологія і сейсмометрія, методи передбачення землетрусів, географія землетрусів, впливу землетрусів на людину тощо).

Для учнів старших класів і студентів географічних факультетів.

УДК 551.1+550.34

ISBN 978-966-423-829-5

© Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, 2023

© С.М. Кирилюк, 2023

© С.М. Кирилюк, обкладинка, 2023



ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	6
<u>ЧАСТИНА ПЕРША. ЗЕМЛЯ ТА ЇЇ ІСТОРІЯ</u>	
РОЗДІЛ 1	
ПРО ЗЕМЛЮ (ВИБРАНІ ТЕМИ)	8
1.1. Внутрішня будова Землі	
<i>Що ми знаємо про внутрішню будову Землі?</i>	8
1.2. Магнітне поле Землі	
<i>Що таке планетні магнітні поля?</i>	17
1.3. Причини кулястості Землі та інших планет	
<i>Чому планети сферичні?</i>	22
1.4. Рух Землі	
<i>Як швидко рухається Земля?</i>	30
1.5. Земна кора та її рухи	
<i>Яка сила схована в надрах Землі?</i>	38
1.6. Тектоніка плит і сейсмічність	
<i>Як пов'язані тектонічні плити і землетруси?</i>	45
1.7. Формування та руйнування гір	
<i>Чому гори не ростуть безмежно?</i>	52
1.8. Вулканічні виверження	
<i>На що здатні вулкани?</i>	58
1.9. Вулкани та атмосфера	
<i>Як виверження Тонга об'єднує Мохо та стратосферу?</i>	66
1.10. Цикли Міланковича	
<i>Що змінюють цикли Міланковича?</i>	74
1.11. «Землетруси» на інших планетах	
<i>Чи тремтить Марс?</i>	84
РОЗДІЛ 2	
ІСТОРІЯ ЗЕМЛІ	93
2.1. Перший еон Землі	
<i>Яким був догеологічний етап розвитку Землі?</i>	93
2.2. Початок земної еволюції	
<i>Як еволюціонувала Земля в архей?</i>	100
2.3. Найдовший еон Землі	
<i>Яким був найдовший еон Землі – протерозой?</i>	110



2.4. Кембрійський період <i>Як змінилася Земля в кембрійському періоді?</i>	121
2.5. Ордовицький період <i>Чим особливий ордовицький період?</i>	128
2.6. Силурійський період <i>Що відбувалось у силурійському періоді?</i>	136
2.7. Девонський період <i>Чому девон називають періодом риб?</i>	146
2.8. Карбоновий (кам'яновугільний) період <i>Чому карбоновий період називають кам'яновугільним?</i> ..	156
2.9. Пермський період <i>Чому пермський період катастрофічний?</i>	169
2.10. Тріасовий період <i>Період, коли з'явилися динозаври</i>	179
2.11. Юрський період <i>Період гігантських плазунів</i>	189
2.12. Крейдовий період <i>Період, в якому жили найбільші хижаки на Землі</i>	197
2.13. Палеогеновий період <i>Коли почали домінувати ссавці?</i>	205
2.14. Неогеновий період <i>Неогеновий період – колиска сучасної природи</i>	213
2.15. Четвертинний період <i>Період, коли з'явилася сучасна людина</i>	220

ЧАСТИНА ДРУГА. ЗЕМЛЕТРУСИ

РОЗДІЛ 3

СЕЙСМОЛОГІЯ І СЕЙСМОМЕТРІЯ	228
3.1. Коротка історія сейсмології <i>Як засвідчити земний неспокій?</i>	228
3.2. Землетруси. Сейсмічні шкали <i>Які інтенсивність та енергія землетрусів?</i>	239
3.3. Загальна модель виникнення землетрусу <i>Які механізми призводять до землетрусів?</i>	248
3.4. Дослідження форшоків <i>Чи допомагає статистика землетрусів їх прогнозувати?</i>	262
3.5. Вогнище і макросейсмічне поле <i>«Точка», де народжується землетрус</i>	266
3.6. Сейсмічні хвилі <i>Що собою являють сейсмічні хвилі?</i>	274



3.7 Сейсмографи	
<i>Як влаштовані прилади для реєстрації землетрусів?</i>	286
3.8. Світова сейсмічна мережа	
<i>Хто стежить за землетрусами?</i>	293
РОЗДІЛ 4	
ПЕРЕДБАЧЕННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ	299
4.1. Методи передбачення землетрусів	
<i>Чи можливо спрогнозувати землетрус?</i>	299
4.1.1. Геохімічні методи	299
4.1.2. Геофізичні методи	310
4.1.3. Деформаційні методи	319
4.1.4. Геодинамічні методи	326
РОЗДІЛ 5	
ГЕОГРАФІЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ	332
5.1. Сейсмічні пояси та межі літосферних плит	
<i>Де відбуваються землетруси?</i>	332
5.2. На суші і на морі	
<i>Що таке мікросейсми і як народжуються цунамі?</i>	343
5.3. Землетруси і вулкани	
<i>Чи пов'язані між собою вулкани і землетруси?</i>	353
РОЗДІЛ 6	
ЗЕМЛЕТРУСИ І ЛЮДИНА	359
6.1. Міфи і правда про землетруси	
<i>Чи варто боятися землетрусів?</i>	359
6.2. Деякі великі землетруси на Землі	
<i>Найбільші і найвеличніші</i>	366
ПІСЛЯМОВА	379
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	380
ДОДАТКИ	398
<i>Додаток А. Відповіді до контрольних питань і кросвордів</i>	399
<i>Додаток Б. Відповіді до тестів</i>	402
<i>Додаток В. Покликання на візуалізовані параграфи</i>	403



ПЕРЕДМОВА

Навчально-методичний посібник «Земля і землетруси» розроблений для учнів старших класів ЗЗСО I-III ст. і для навчальних дисциплін, які викладаються на географічному факультеті Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а саме: «Загальне землезнавство», «Фізична географія материків та океанів», «Геологія загальна та історична», «Сейсмологія та сейсмічний моніторинг», «Геоморфологія». Подана комплексна інформація сприяє кращому формуванню географічного мислення здобувачів, формуванню ширшого світогляду, усвідомленню складного ланцюжка причинно-наслідкових зв'язків між природними компонентами і процесами, що протікають в них.

Навчально-методичне видання націлене на формування в учнів старших класів і студентів комплексних знань про планету Земля – її будову, внутрішні процеси, що протікають у внутрішніх шарах планети; тектоніку плит; вулканізм і землетруси (причини виникнення, методи вивчення і передбачення тощо).

Книга складається з двох частин.

У першій частині описується Земля як планета (внутрішня будова, особливості її руху, тектоніка плит і сейсмічність, цикли Міланковича, а також її історія: починаючи від догеологічного етапу і завершуючи четвертинним періодом).

У другій частині висвітлюється сейсмологія, сейсмометрія та їх історія, головні методи передбачення землетрусів – переваги і недоліки, географія землетрусів, землетруси та їхній вплив на людину тощо.

«Земля і землетруси» підготовлений за сприяння *GFZ German Research Centre for Geosciences* (Потсдамський центр наук про Землю, Німецький центр дослідження Землі).

ЧАСТИНА 1
ЗЕМЛЯ ТА ЇЇ ІСТОРІЯ



РОЗДІЛ 1 ПРО ЗЕМЛЮ (ВИБРАНІ ТЕМИ)

1.1. Внутрішня будова Землі *Що ми знаємо про внутрішню будову Землі?*

Ми, на диво, мало знаємо про те, що відбувається у нас під ногами. Наприклад, Нобелівський комітет почав раніше присуджувати премії, ніж ми дізналися, що в Землі є ядро. Ідея про те, що материки дрейфують, стала загально визнаною менше, ніж 60 років тому. Окрім того, ми знаємо більше про розподіл речовини в глибинах Сонця, ніж про внутрішню будову Землі.

Відстань від поверхні до центру Землі складає всього 6 371 кілометр. Підраховано, що якщо викопати криницю з такою глибиною і кинути у неї цеглину, то вона досягне дна за 45 хвилин. Проте і сьогодні спроби досягти центру Землі доволі скромні – трохи більше 12 000 м на Кольському півострові.

Висновок про ядро зроблений лише у 1906 р. ірландським геологом Ричардом Олдемом під час аналізу записів сейсмографа¹ землетрусу у Гватемалі (рис. 1). Так, він визначив, що окремі сейсмічні хвилі сягали певної глибини, а потім відбивались під кутом, тим самим вказуючи на ймовірну перешкоду (Oldham 1909²). Пізніше хорватський сейсмолог Андрій Мохоровичич, вивчаючи сейсмограми землетрусу у Загребі³, дійшов схожих висновків, хоча вони стосувалися й менших глибин (рис. 2).

¹ **Сейсмограф** – прилад для автоматичного запису коливань земної поверхні, зумовлених сейсмічними хвилями (при землетрусах та сейсмозвідді).

² Тут і далі всі імена у посиланнях вказані мовою оригіналу.

³ **Загреб** – столиця Хорватії. Найбільше місто країни та її економічний, політичний і культурний центр.



У такий спосіб він відкрив загальновідому перехідну зону між корою і мантією, названу поверхнею Мохоровичича або, скорочено, Мохо ([Mohorovičić 1908, 1910](#)).

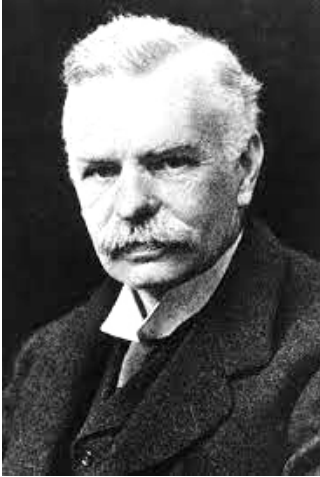


Рис. 1. Ричард Олдем

Ричард Олдем (1858–1936) – британський геолог, який вперше чітко ідентифікував окремі надходження Р-хвиль, S-хвиль і поверхневих хвиль на сейсмограмах і перший, хто чітко довів те, що Земля має центральне ядро.

Детальніше ядро розділила вже у 1936 р. данська дослідниця Інге Леманн, вивчаючи записи сейсмографа у Новій Зеландії ([рис. 3](#)). Вона висунула ідею про існування двох шарів ядра – внутрішнього, яке ми сьогодні вважаємо твердим, і зовнішнього – рідкого ядра (що, до речі, раніше виявив і Олдем), і яке пов'язує із джерелом земного магнетизму⁴ ([Lehmann 1936](#)). Межа між внутрішнім і зовнішнім ядром названа розривом Леманн–Буллен.

Загалом сучасні науковці погоджуються, що Земля виповнена 4-ма головними шарами: твердою зовнішньою корою, мантією, що складається переважно із силікатів й оксидів, рідким

⁴ **Земний магнетизм (геомагнетизм)** – властивість Землі як небесного тіла, що зумовлює існування навколо неї магнітного поля.



зовнішнім ядром і твердим залізо-нікелевим внутрішнім ядром. Окрім того, у межах мантиї розрізняють від глибини 650–700 до 2 700–2 885 кілометрів нижню мантию, де вирізняється відносно тонкий шар D , у якому швидкість сейсмічних хвиль аномально низька. Приблизно між 2 885–2 900 км знаходиться межа між мантиєю і зовнішнім ядром, яка називається розривом Гутенберга (рис. 4).



Рис. 2. Андрій Мохоровичич

Андрій Мохоровичич (1857–1936) – хорватський геофізик та сейсмолог, член Хорватської АН. Він найбільш відомий завдяки однойменній поверхні Мохоровичича і вважається одним із засновників сучасної сейсмології.

Земна кора під океанами сягає лише 5–10 кілометрів, близько 40 під континентами і понад 65 кілометрів під великими гірськими системами. Але навіть ці незначні глибини Землі виявились недоступними для безпосереднього дослідження. У 1960-х рр. існував цілий проєкт Мохол, що мав на меті пробурити свердловину до поверхні МОХО у тонкій океанічній корі, проте найглибша свердловина сягнула лише 180 м. У 1970 р. розпочато новий науковий проєкт на Кольському півострові поблизу Мурманська.

З певними перервами до 1990 р. досягнуто глибини 12 262 м. І хоча вдалося пройти лише третину глибини земної



кори Балтійського щита, все ж відкрито низку цікавих фактів: відсутність чіткого переходу між гранітним і базальтовим шарами на глибині 7 кілометрів, наявність води на цій глибині та решток мікроскопічного планктону⁵ на рівні 6 км. Окрім того, підземний світ виявився набагато спекотнішим – на глибині 10 000 метрів температура сягнула +180 °С, що й стало однією з причин закриття проекту.



Рис. 3. Інґе Леманн

Інґе Леманн (1888–1993) – данська науковиця-геофізик, сейсмологиня, викладачка Королівського товариства в Лондоні. 1936 року вона відкрила внутрішнє ядро Землі на основі вивчення поширення сейсмічних хвиль від землетрусів у південній частині Тихого океану.

Про мантію відомо ще менше. Більшість відомостей зібрано переважно за методом поширення сейсмічних хвиль, які неоднаково поведуться на різних глибинах. Ще одна можливість – кімберлітові трубки⁶, в яких сформувалися алмази. Вулканічний

⁵ **Планктон** – сукупність дрібних організмів, що живуть у товщі води у завислому стані та не можуть активно протистояти перенесенню течією.

⁶ **Кімберлітова трубка** – вертикальна геологічна структура (геологічне тіло) неправильної конусоподібної або циліндричної форми (трубка вибуху), заповнена алмазоносною породою (кімберлітом чи лампроїтом). Численні алмазоносні кімберлітові трубки знайдені в ПАР та Якутії.



вибух глибоко у надрах Землі із надзвуковою швидкістю викидає близько до поверхні так звані заряди магми – інтрузії⁷, складені перидотитом⁸, кристалами олівіну⁹ і лише зрідка – алмазами¹⁰. Кімберлітові трубки перетворили Південно-Африканську республіку на найприбутковішу країну за видобутком алмазів, хоча це не єдине місце у світі, де вони поширені. Розробка трубчаток також ведеться в Якутії (Росія) та Канаді.

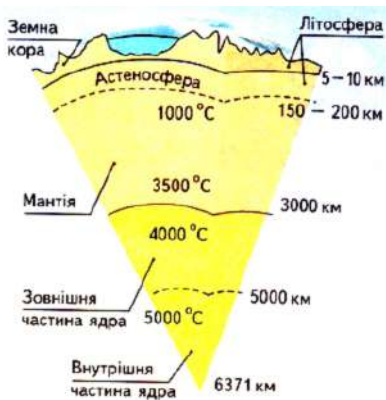


Рис. 4. Схема внутрішньої будови Землі

Земну кору разом із частиною верхньої мантії до 200 км називають літосферою, яка ніби плаває на поверхні еластичнішого прошарку, відомого як астеносфера (у перекладі «слабка»). Хоча радше мова йде про її надзвичайно повільний рух, що у 10 000 разів повільніший за рух стрілки годинника. Ці переміщення відбуваються не лише горизонтально, а й вертикально – конвективно. Питання, на якій глибині відбу-

вається цей конвекційний потік, і досі залишається дискусійним і не до кінця з'ясованим. Деякі вчені вважають, що це глибини –

⁷ **Інтрузія** – процес проникнення магми в товщу земної кори. В результаті інтрузій утворюються інтрузивні гірські породи.

⁸ **Перидотити** – загальна назва сімейства глибинних ультраосновних піроксен-олівінових порід, що містять 40–90% олівіну.

⁹ **Олівін** – породотвірний мінерал класу силікатів. Ортосилікат магнію та заліза острівної будови.

¹⁰ **Алмаз** – мінерал класу самородних неметалів, тверда кристалічна алотропна видозміна карбону кубічної сингонії.



650 км, інші – понад 3 000 км (Baumgardner 1985; Arnould et al. 2020; Castellanos et al. 2020).



Рис. 5. Едвард Буллард

Едвард Буллард (1907–1980) – британський геофізик, який разом із Морісом Юінгом (1906–1974) вважається засновником дисципліни морської геофізики. Він розробив теорію геодинамо, піонер використання сейсмології для вивчення морського дна, виміряв геотермальний тепловий потік через океанську кору та знайшов нові докази теорії дрейфу континентів.

І хоча мантія загалом складає 82 % об'єму Землі і 65 % її маси, наразі достеменно відомо лише те, що до глибини 150 км вона складається з перидотитів – гірських порід, які поєднують мінерали олівіну та різні піроксени¹¹. Відомо також, що нижня мантія більш жорстка, ніж верхня та перехідна зони. Головною причиною є шалений тиск, який утримує нижню мантію у твердому стані.

Ще більший тиск у центральних частинах Землі. Відомо, що у внутрішньому ядрі він сягає 3,7 млн атм, і незважаючи на високу температуру – приблизно +6 000 °С (вищу, ніж на поверхні Сонця), все ж утримує ядро твердим. До речі, за розрахунками, за 5 млрд років температура внутрішнього ядра Землі знизилась лише на 110 °С.

¹¹ **Піроксени** – група породотвірних мінералів класу силікатів, підкласу ланцюгових силікатів.



Із зовнішнім ядром пов'язують магнетизм. Ще у 1949 р. Едвард Буллард припустив, що рідка частина земного ядра обертається так, що по суті, перетворює його на геомагнітне динамо, яке породжує магнітне поле Землі, що пересічно змінює полярність кожні 500 000 років (рис. 5). І, можливо, навіть зараз відбувається чергова зміна полярності.

А поки магнітне поле утримує подалі від земної поверхні небезпечне для життя космічне та сонячне випромінювання у радіаційних поясах Ван Аллена¹², ми маємо змогу безпечно насолоджуватися красивим відгомонам цього процесу в полярних сьйвах.



¹² **Пояси Ван Аллена (радіаційні пояси)** – внутрішні шари магнітосфери планет, у яких утримуються високоенергійні заряджені частинки (здебільшого протони та електрони).



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Хто відкрив перехідну зону між земною корою і мантією?
2. Хто розділив ядро Землі на зовнішнє і внутрішнє?
3. Яким терміном описується земна кора і верхня частина мантії?
4. Як називається шар мантії, що лежить нижче літосфери?
5. Хто припустив, що земний магнетизм пов'язаний із зовнішнім ядром?

ТЕСТ

1. Що таке літосфера?

- а) тонкий внутрішній шар Землі в) тонкий зовнішній шар Землі
б) частина ядра г) частина мантії

2. Хто відкрив перехідну зону між корою і мантією?

- а) Едвард Буллард в) Інге Леманн
б) Ричард Олдем г) Андрій Мохоровичич

3. Кольська свердловина сягає глибини...

- а) 6 182 м в) 22 555 м
б) 12 262 м г) 8 848 м

4. У кімберлітових трубках добувають...

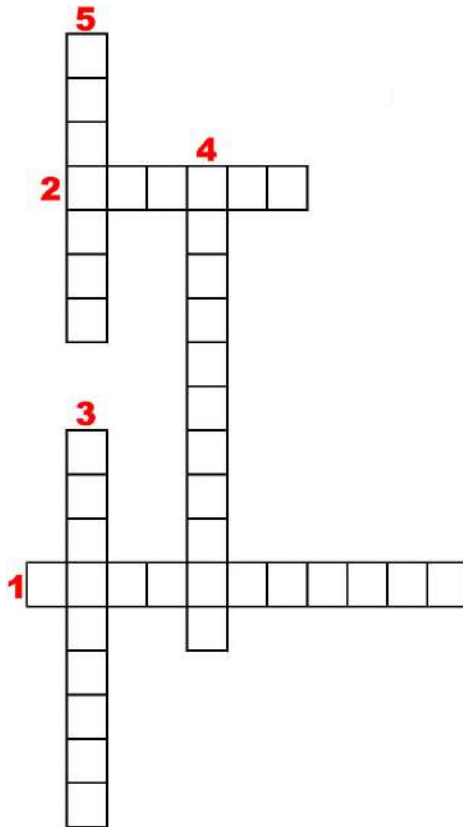
- а) залізо в) топази
б) свинець г) алмази

5. Де земна кора має більшу потужність?

- а) в межах океанів в) в межах океанів і континентів
б) в межах континентів г) ніде



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 1-5)





1.2. Магнітне поле Землі *Що таке планетні магнітні поля?*

У багатьох об'єктів Сонячної системи є магнітні поля. Що ж це таке? Звідки вони беруться? І що вони можуть розказати про ці небесні тіла?

Магнетизм наявний скрізь в Сонячній системі і за її межами. Від нього залежить 11-річний цикл сонячної активності, і він захищає Землю від сонячної радіації.

Якщо говорити зовсім просто, магнетизм – це сила, яка утворюється між двома об'єктами, у кожного з яких є магнітне поле. Однак магнетизм пов'язаний і з електрикою, й обидві ці сили є складовими аналогічної за природою фундаментальної природної сили – електромагнетизму.

Потужний магнетизм формується під дією деяких характеристик окремих електронів. Кожен електрон поводить себе як маленький магніт, але в більшості матеріалів електрони спрямовані в різні сторони, тому здатні гасити магнітний ефект один одного. Проте в залізі і деяких інших матеріалах з кристалічною структурою електрони вибудовуються в лінію під дією магнітного поля і залишаються в такому положенні, навіть коли сила поля щезає, а залізо набуває власного магнетизму.

Тверде залізо й інші феромагнітні матеріали є єдиними постійним магнітами, хоча будь-які заряджені частинки, що рухаються, створюють електричний струм, також будуть генерувати тимчасове магнітне поле навколо себе. Власне магнітне поле Землі врешті-решт виникає під дією електричних струмів, які обертаються в розплавленій частині залізного ядра Землі.

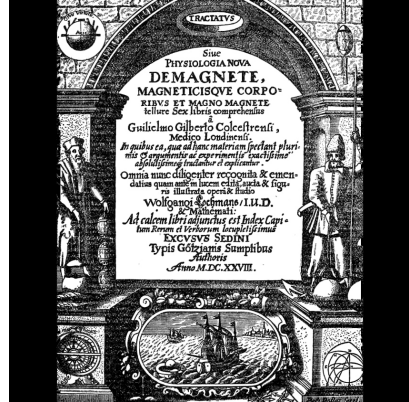
Англійський філософ і лікар Вільям Гілберт епохи королеви Єлизавети I здійснив одні з перших серйозних дослідів з магнетизму й електрики, які описав у книзі «De magnetibus» в 1600 році (рис. 6). Він виявив істинну причину, чому стрілка компаса



завжди спрямовується на північ, хоча така ідея виникала й в інших вчених, наприклад в Йоганна Кеплера, які намагалися пояснити рух планет магнітним тяжіннями (Edgar 1941).



a



b

Рис. 6. Вільям Гілберт (1544–1603) – англійський фізик, придворний лікар Єлизавети I і Якова I. Вивчав магнітні та електричні явища, першим ввів термін «електричний» (a);

De Magnete – У «De Magnete» Вільям Гілберт описав багато своїх експериментів зі своєю моделлю Землі під назвою «terrella» (b)

Зі всіх матеріалів, здатних генерувати магнітні поля, залізо у цьому розумінні, мабуть, найпотужніше. Оскільки ядро Землі складається із заліза з домішкою нікелю, наша планета діє як гігантський магніт. Але магнетизм Землі формується завдяки розплавленій матерії навколо ядра.

Завдяки стрімкому обертанню електрично-зарядженого розплавленого заліза у зовнішній частині ядра під дією динамо-ефекту утворюється потужне магнітне поле, що формує величезні петлі, які простягаються далеко в космос (рис. 7).

У більшості інших планет з великим металевим ядром також є магнітне поле, проте у нашої планети воно найсильніше. Ядро Меркурія характеризується лише сотою частинкою магні-



тної сили Землі, оскільки його ядро, можливо, досі перебуває у розплавленому стані.

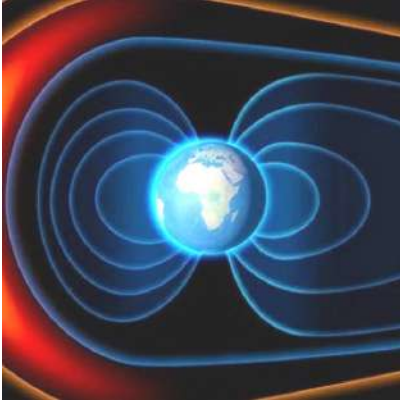


Рис. 7. Магнітне поле Землі

Венера приблизно такого ж розміру, що і Земля, тому в її ядрі повинна зберігатися якась частина рідкого заліза, однак внутрішнього магнетизму у неї немає. За однією з теорій, відсутність магнетизму пояснюється тим, що повільне обертання Венери і практична відсутність тектонічних плит призвели до значно швидшого затвердіння її ядра, на відміну від Землі.

В інших частинах Сонячної системи деякі рідкі середовища також формують магнітні поля. Вихрові океани металічного гідрогену в глибинах Юпітера і Сатурна породжують динамо-ефект, значно потужніший, ніж розплавлене залізо в ядрі Землі. Саме електрично-заряджений гідроген відповідальний за формування динамічного магнітного поля і нашої зірки – Сонця. У Нептуна й Урана також є магнітні поля, але вони істотно відхилені від осі обертання планет. Це дає підстави вважати, що електрично-заряджене рідке середовище розташоване ближче до поверхні цих планет.

Ми поки навіть не знаємо, що за рідина формує магнітні поля цих двох крижаних планет-гігантів – це може бути будь-яка речовина, яка розпадається на велику кількість заряджених іонів.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

6. Як називається сила, яка утворюється між двома об'єктами, у кожного з яких є магнітне поле?
7. Хто написав працю «De magnetе»?
8. Який елемент є найкращим у генерації магнітного поля землеподібних планет?
9. Який елемент бере участь у генерації магнітного поля планет-гігантів?
10. Яку фундаментальну силу створюють магнетизм й електрика?

ТЕСТ

6. Де проявляється магнетизм?

- а) тільки на Землі
б) лише на землеподібних планетах
в) у Сонячній системі
г) у Всесвіті

7. Який з наведених феромагнітних матеріалів є постійним магнітом?

- а) золото
б) залізо
в) платина
г) свинець

8. Хто є автором твору «De Magnetе»?

- а) Кеплер
б) Галілей
в) Гілберт
г) Галлей

9. Який механізм лежить в основі генерації магнітного поля Землі?

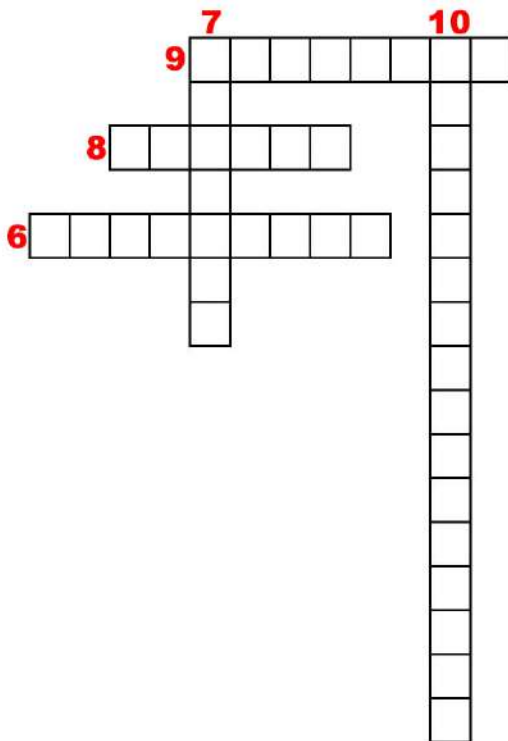
- а) швидке обертання електрично-зарядженого розплавленого заліза у зовнішній частині ядра
б) швидке обертання Місяця навколо Землі
в) швидке обертання Землі навколо своєї осі
г) швидке обертання Землі навколо Сонця

10. Який елемент формує магнітне поле на Юпітері і Сатурні?

- а) гідроген
б) гелій
в) кремній
г) кисень



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 6–10)





1.3. Причини кулястості Землі та інших планет *Чому планети сферичні?*

Чому планети сферичні? Що притягує важкі метали до ядер планет? Відповідь на ці питання – диференціація, ефект, який визначається безпосередньою дією закону гравітації.

Коли Ісак Ньютон у XVII ст. відкрив закон гравітації, то зрозумів, що цей закон завжди працює однаково у будь-якому куточку Всесвіту (рис. 8). Оскільки сила тяжіння об'єкта залежить лише від його маси і відстані до нього, вона завжди буде однаковою у будь-якій точці сфери, центром якої і є цей об'єкт. А все тому, що всі точки на цій сфері розташовані на одній і тій же відстані від самого об'єкта (Harper 2011).

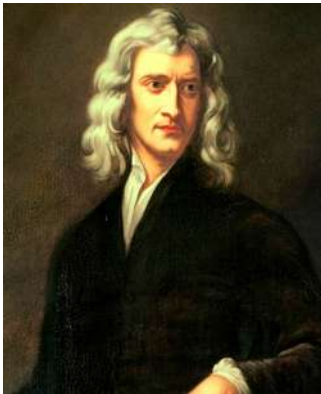


Рис. 8. Ісак Ньютон

Ісак Ньютон (1643–1727) – англійський науковець, який заклав основи сучасного природознавства, творець класичної фізики та один із засновників числення нескінченно малих.

Це правило пояснює, чому планети мають сферичну форму і як вони розділилися всередині на окремі шари.

Цікаво, що хоч кожна окремо взята маса гірської породи чи іншої речовини всередині планети генерує власну силу тяжіння, спостерігач, який перебуває на поверхні планети або за її межами, буде вважати, що вся матерія сконцентрована в одній точці –



центрі мас. У сферичного об'єкта, наприклад у планети, він буде розташований ближче до центра.

Це означає, що будь-який об'єкт на поверхні планети відчуває більш або менш однакову силу тяжіння до центру планети, куди має тенденцію провалитися, якщо щось не втрутиться та не утримає його наверху.



**Рис. 9. Гіперіон –
спутник Сатурна**

Чим вища гравітація, тим сильніший цей ефект, саме тому на Місяці можуть існувати глибокі кратери з крутими схилами.

Цікаво, що розмір супутника Сатурна Гіперіона¹³ теоретично дав би змогу йому мати сферичну форму, проте його неправильна форма наводить на думку, що, можливо, це фрагмент більшого тіла, яке розпалося у результаті зіткнення (рис. 9).

Гравітаційна диференціація спричиняє розділення речовин у розплавлених надрах доти, поки не утвориться структура, на зразок існуючої наразі у Землі.

Як результат дії цього закону, чим більший розмір планети, тим вища ймовірність, що в неї буде доволі плоска сферична поверхня.

Очевидно, існує деяка нижня межа розміру для істинно сферичної планети. Важливо розуміти, що для менших планет зіткнення (колізії), які формували їх на початках геологічної іс-

¹³ **Гіперіон** – двадцять третій за віддаленістю від планети супутник Сатурна. Відкритий 16 вересня 1848 англійським астрономом Вільямом Ласселлем. Названий відкривачем на честь грецького титана Гіперіона.



торії, ніколи б не давали такого зростання температури, достатнього для плавлення їхніх «нутрощів».

При цьому гравітація продовжує впливати на надра планети. Як і у прикладі з об'єктом на поверхні планети, цілком можна вважати, що і кожний шар всередині планети притягається до центру гравітацією сусідніх товщ. І хоча гравітація з однаковою силою діє на всі види речовини, щільніша матерія буде швидше занурюватися у менш густому середовищі до того часу, поки «начинка» планети остаточно не розшарується.



а



б

Рис. 10. Джордж Бідделл Ері (1801–1892) – англійський астроном, член Лондонського королівського товариства (а);
Джон Пратт (1809–1871) – британський священник, астроном і математик. Будучи талановитим математиком, працював над проблемами геодезії та наук про Землю. Це спонукало його до розробки теорії ізостазії (б)

Залізо та нікель врешті-решт опиняться біля центру, де утворять щільне ядро. Всередині більших планет температура може зростати до такого рівня, що почнуть плавитися важкі метали. Тепло, підіймаючись вгору від ядра, формує великі конве-



кційні комірки у товщі мантиї, тому процес ділення на шари ніколи не завершується.

Ще одним непрямим доказом диференціації є ізостазія, або ізостатична рівновага – гідростатичний рівноважний стан земної кори, при якому менш щільна земна кора ніби плаває у щільнішому шарі верхньої мантиї – астеносфері, підкоряючись закону Архімеда¹⁴.



Рис. 11. Кларенс Даттон

Кларенс Даттон (1841–1912) – американський геолог і офіцер армії США. Закінчив Єльський коледж у 1860 році та проходив там аспірантуру до 1862 року. У 1871 році був обраний членом Американського філософського товариства.

Теорія ізостазії виникла завдяки даним, отриманим під час перших геофізичних спостережень. Тоді сформувалося припущення, що над горами сила тяжіння повинна бути більшою, ніж на рівнинах або в океанах, оскільки самі гори мають значну масу. Однак вимірювання показали, що в районах з різним рельєфом сила тяжіння дуже близька, і гори практично «нічого не важать». Щоб пояснити цей факт, висувалися різні гіпотези. Серед

¹⁴ **Закон Архімеда** – основний закон гідростатики та аеростатики, згідно з яким на будь-яке тіло, занурене в рідину або газ, діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої даним тілом рідини (газу), за напрямом протилежна їй і прикладена у центрі мас витісненого об'єму рідини (газу).



них і гіпотеза ізостазії, яка стала наріжним каменем усіх «великих» геодинамічних гіпотез.

Головні ізостатичні моделі були запропоновані в 1855 р. Ері і Праттом (рис. 10), а сам термін «ізостазія» був введений Даттоном у 1889 р (рис. 11) (Oreskes 2002; Orme 2007).

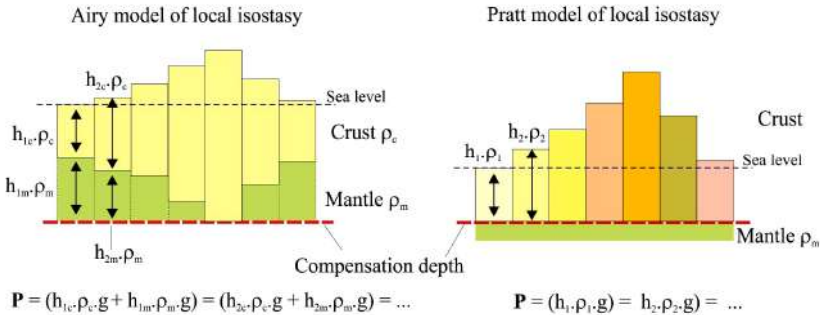


Рис. 12. Головні ізостатичні моделі

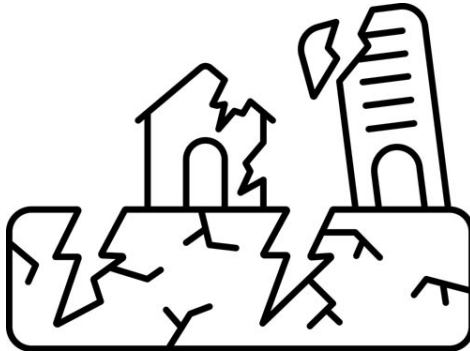
Ері виходив з припущення про однорідність щільності кори, і з того, що для компенсації підвищень рельєфу земної кори, наприклад, гірських хребтів висотою 5–7 км, підшва земної кори під ними повинна зануритися в мантию на глибину, пропорційну величині гірської системи. У моделі Пратта підшва земної кори плоска і компенсація відбувається за рахунок різної щільності окремих блоків земної кори, тобто в блоках, що утворюють гірські хребти, щільність кори повинна бути нижчою, ніж в блоках западин.

Сучасні експериментальні дані показують наявність як варіацій щільності кори в горизонтальному напрямку, так і прогинів поверхні Моховоричича, які корелюють з рельєфом, тобто ізостатична рівновага забезпечується поєднанням як моделей Ері, так і Пратта (рис. 12) (Cochran 1980; Watts 2001).



У надрах гігантських планет, таких як Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун, процес диференціації може протікати легше, і схоже, що у трьох з цих планет, як мінімум, такий процес продовжується. Щільніша речовина безперервно «тоне» у напрямку центру, проштовхуючись крізь менш щільну і генеруючи при цьому тепло завдяки тертю.

Вважається, що саме такий тип нагрівання, завдяки гравітаційному стисненню, пояснює, чому Юпітер, Сатурн і Нептун випромінюють більше енергії, ніж отримують від Сонця.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

11. Хто відкрив закон гравітації?

12. Як називається процес, який відбувається з речовиною всередині планет під дією гравітації?

13. Як називається гідростатичний рівноважний стан кори, який є доказом диференціації і який підкоряється закону Архімеда?

14. У чий моделі подошва земної кори плоска і компенсація відбувається за рахунок різної щільності окремих блоків кори?

15. У чий моделі ізостатична рівновага забезпечується прогином поверхні Мохоровичича?

ТЕСТ

11. Що таке диференціація?

- | | |
|---|---|
| а) формування земної кори з «легших» речовин | в) формування земної кори з «важчих» речовин |
| б) занурення у надра планети «легших» речовин і піднімання «важчих» | г) занурення у надра планети «важчих» речовин і піднімання «легших» |

12. Ким були запропоновані головні ізостатичні моделі?

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| а) Даттоном і Ньютоном | в) Даттоном і Ері |
| б) Ері і Праттом | г) Даттоном і Праттом |

13. Ким був введений термін «ізостазія»?

- | | |
|------------|-------------|
| а) Ері | в) Даттоном |
| б) Праттом | г) Ньютоном |

14. Чи відбуваються процеси диференціації на інших планетах?

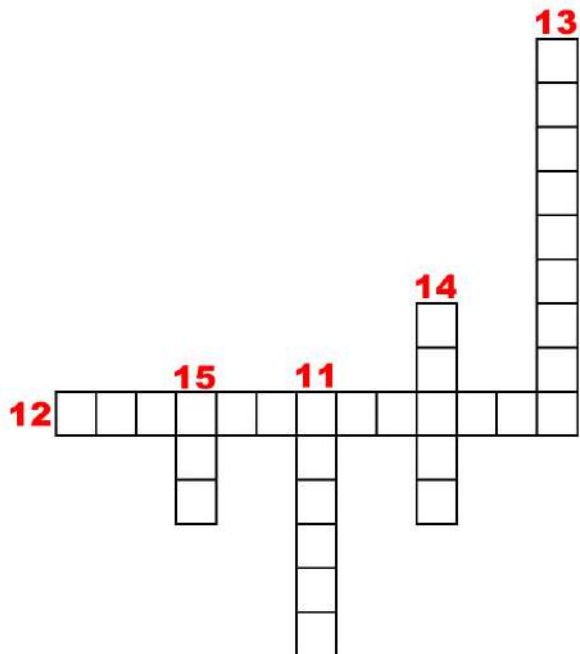
- | | |
|------------------------|--|
| а) так, відбуваються | в) диференціація характерна лише для Землі |
| б) ні, не відбуваються | г) диференціація характерна лише для планет-гігантів |

15. Закон Архімеда – це...

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| а) закон гідростатики та аеростатики | в) закон термодинаміки |
| б) закон механіки | г) це не фізичний закон |



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 11–15)





1.4. Рух Землі

Як швидко рухається Земля?

Рух та нестационарність – запоруки функціонування та підтримки стабільності Землі і Всесвіту загалом. У Всесвіті всі його компоненти здійснюють міриади різночасових і різноспрямованих рухів, що підтримують системи різних рівнів у рівновазі.

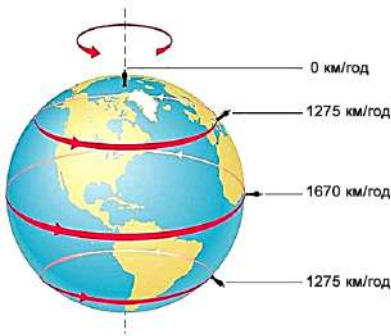


Рис. 13. Добове обертання Землі

Тому відповіді однозначно на питання, з якою швидкістю рухається Земля, видається складно, а без систем відліку знайти відповідь взагалі неможливо.

Розглянемо рух Земного геоїда¹⁵ відносно центру планети. Земля здійснює повний оберт кожні 23 години 56 хвилин та 4,09053 секунди. Час, за який кожна точка земної поверхні (окрім полюсів) здійснює повний оберт навколо земної осі, називають зоряною добою, а окружність такого обертання складає приблизно 40 075 кілометрів. Отже, Земля на екваторі рухається зі швидкістю 460 метрів за секунду (рис. 13).

Ще школярами ми дізнаємося, що Земля обертається навколо нашого Сонця майже коловою орбітою. По ній вона мчить зі швидкістю приблизно 30 кілометрів за секунду. Проте, озна-

¹⁵ **Геоїд** – форма Землі, визначена з використанням рівня моря та уявним його продовженням під землею поверхнею, за умови збереження рівня гравітаційного потенціалу.



чення «майже» свідчить про насправді еліптичну орбіту, внаслідок чого відстань від Землі до Сонця змінюється від 147 117 (у перигелії¹⁶) до 152 083 млн км (у афелії¹⁷). Тому в перигелії, на початку січня, рух орбітою дещо пришвидшується, роблячи зимове півріччя у північній півкулі коротшим, ніж у південній (рис. 14).

Але і це ще не все. Під гравітаційним впливом інших планет положення площини орбіти, а також її форма повільно змінюється впродовж мільйонів років: кут нахилу екліптики – від 0 до 2,9°, а ексцентриситет¹⁸ – від 0 до 0,067. Внаслідок еліпсоїдальної орбіти та нахилу земної осі до площини обертання на 23°30', земна вісь розташовується в тілі Землі (так звана прецесія¹⁹), описуючи конус. Завдяки їй додається ще низка періодів – як-от прецесійний цикл – 25 735 тропічних років і триваліші ритми 41 та 200 тис. років, які пов'язані із взаємодією Землі, Місяця і Сонця.

Усі рухи Землі нерегулярні й постійно змінюються в часі, тому навіть земні події, як от потужний землетрус, здатні змінити швидкість її руху. Наприклад, згідно з моделюванням Лабораторії реактивного руху НАСА, потужний землетрус магнітудою 8,8, у Чилі 27 лютого 2010 року за 300 км від столиці призвів до зсуву на 20 см від осі обертання Землі, що спричинило скорочення доби на 1,26 мікросекунди. Інколи, коли земна кора деформується і просідає під час потужного землетрусу, окруж-

¹⁶ **Перигелій** – найближча до Сонця точка орбіти планети або комети; лінія, що проходить через цю точку й центр Сонця, — головна (велика) вісь конічного перерізу, що являє орбіту, називається лінією апсид.

¹⁷ **Афелій** – найвіддаленіша від центра Сонця точка еліптичної орбіти планети, комети або іншого небесного тіла, що рухається навколо Сонця.

¹⁸ **Ексцентриситет** – числова характеристика конічного перетину, яка показує ступінь його відхилення від кола.

¹⁹ **Прецесія** – повільне (у порівнянні з періодом обертання тіла) зміщення осі обертання по конусу.



ність планети дещо зменшується. Цей рух маси до центру Землі, навпаки, спричинює прискорення обертання Землі навколо своєї осі, подібно до того, як фігурист пришвидшує своє обертання, притискаючи до тіла руки.

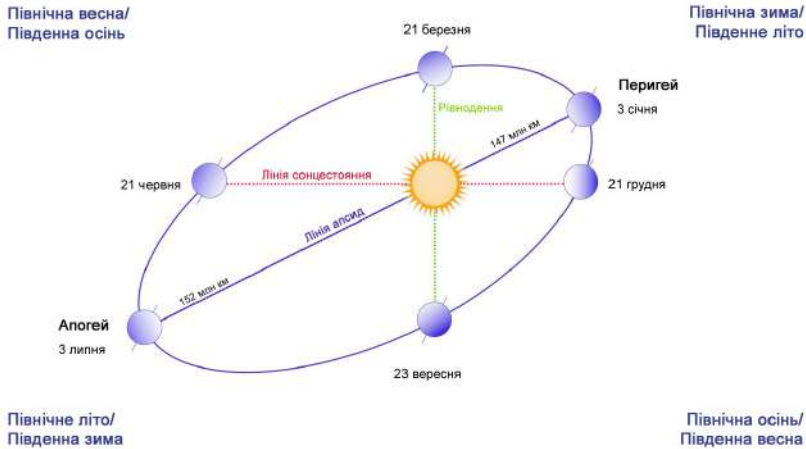


Рис. 14. Орбітальний рух Землі

Крім того, Сонячна система обертається навколо центру нашої галактики зі швидкістю (за різними оцінками) від 230 до 400 кілометрів за секунду (Innanen et al. 1978; Chakrabarti 2020). Зважаючи на таку швидкість, період обертання Сонця навколо центру Галактики становить 240–250 млн років. Один такий оберт називають галактичним роком. Галактичний рік – важлива складова геохронологічної шкали, оскільки особливості руху Сонячної системи навколо галактичного центру та взаємодія її членів із галактичними об’єктами, наприклад іншими зорями, а також проходження крізь області міжгалактичного газу й пилу формують тектонічну ритмічність, визначаючи основні епохи



орогенезу²⁰ – каледонської²¹, герцинської²², мезозойської²³ та альпійської²⁴ складчастостей.

Продовжуючи розкривати різні рухи, в яких бере участь Земля, швидкість стає просто величезною!

Наш Молочний Шлях і сусідні галактики мчать зі швидкістю майже 1000 кілометрів за секунду у напрямку Великого Атрактора²⁵, частини космосу, розташованої від 150 до 250 мільйонів світлових років від нас (до речі, один світловий рік – це $9,46 \cdot 10^{15}$ м) (рис. 15). Великий Атрактор, маючи масу в 100 квадрильйонів разів більшу, ніж наше Сонце, та протяжність близько 500 мільйонів світлових років, складається з видимої речовини, яку ми можемо бачити, і так званої темної речовини²⁶, яку поки що не вдалося експериментально виявити.

²⁰ **Орогенез** – сукупність інтенсивних висхідних вертикальних тектонічних рухів (складчастості та розривів), процесів, з якими пов'язане виникнення та розвиток гір.

²¹ **Каледонська складчастість** – ера тектогенезу, яка протікала в ордовицькому та силурійському періодах, проявилася у сукупності геологічних процесів деформації земної кори (інтенсивній складчастості, гороутворення і гранітоїдного магматизму) в палеозої (500–400 млн років тому).

²² **Герцинська складчастість** – ера тектогенезу, одна з найінтенсивніших в історії Землі (кінець девону – початок тріасу) деформацій земної кори, що відбувалася протягом пізнього палеозою.

²³ **Мезозойська складчастість** – деформації земної кори, які відбувалися з кінця юрського до початку палеогенового періоду.

²⁴ **Альпійська складчастість** – складчастість земної кори, наймолодша за геологічним віком деформація земної кори, яка проявилася в кінці мезозойської і в основному сформувалась протягом кайнозойської ери.

²⁵ **Великий Атрактор** – гравітаційна аномалія, розташована в міжгалактичному просторі на відстані приблизно 65 Мпк або 250 млн світлових років у напрямку сузір'я Косинця.

²⁶ **Темна речовина (матерія)** – один із компонентів Всесвіту, існування якого виявлено нещодавно лише за гравітаційним впливом на видиму матерію і на фонове випромінювання, оскільки вона не випромінює і не розсіює елект-



Кожен із згаданих вище рухів заданий відносно певного орієнтира. Рух навколо Сонця був описаний відносно нашого світила, тоді як рух локальної групи галактик – відносно Великого Атрактора. Виникає питання: чи існує якась універсальна система відліку, відповідно до якої ми можемо визначити рухи всіх відомих об'єктів у Всесвіті?

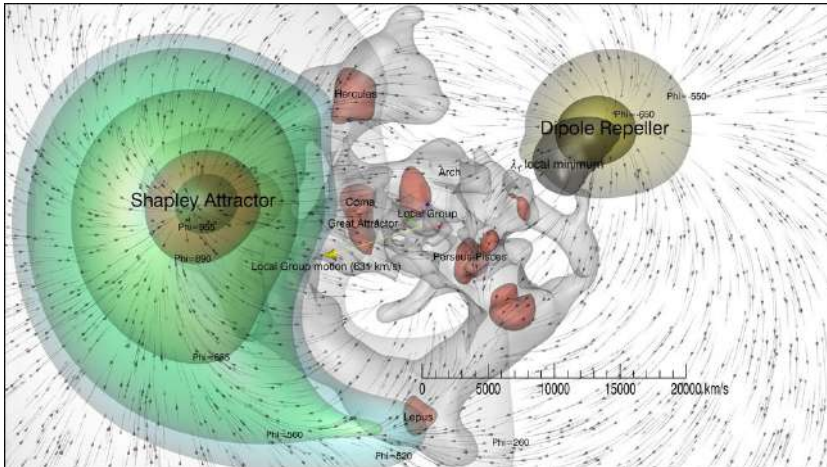


Рис. 15. Великий Атрактор

Одну з відповідей вдалося отримати з даних супутника *Cosmic Background Explorer (COBE)*, виведеного на орбіту Землі у 1989 році (Rowland 2021).

Знову ж таки, Земля є орієнтиром! Супутник призначений для вивчення реліктового фону Всесвіту (іноді званого також мікрохвильовим фоном), який є відлунням часу народження нашого Всесві-

ромагнітне випромінювання, а також не бере участі у сильній (ядерній) взаємодії.



ту. Реліктове випромінювання пронизує весь простір. Це еквівалент усього молодого Всесвіту, що мовби «світиться теплом».

Одним із відкриттів *COBE* було те, що Земля рухається відносно реліктового випромінювання із чітко визначеною швидкістю та напрямком. Оскільки випромінювання пронизує увесь простір, ми можемо нарешті ствердно відповісти на початкове питання, використовуючи реліктовий фон як орієнтир, відносно якого Земля рухається. Вимірювання червоного і синього доплерівського зсуву²⁷ реліктового випромінювання на протилежних сторонах Всесвіту – на лінії, що проходить через точку у сузір'ї Водолія з одного боку і точку у сузір'ї Лева з іншого, свідчать, що Сонячна система рухається в напрямку Лева зі швидкістю близько 390 кілометрів за секунду.

Однак значно цікавіше місцеве переміщення нашого Сонця з усіма планетами, міжпланетним пилом і астероїдами відносно ста найближчих до нас зірок у напрямку сузір'я Геркулеса зі швидкістю всього 19,2 кілометрів за секунду. Цей рух іноді ще називають «прогулянкою в дворі». Пощастило ж, що ми ні об що не вдаряємось, рухаючись у просторі протягом свого життя із неймовірною швидкістю найрізноманітнішими траєкторіями!

²⁷ Доплерівський зсув (ефект Доплера) – явище зміни частоти хвилі, яку реєструє приймач, викликане переміщенням джерела або приймача.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

16. Оберт навколо земної осі називається ... доба.
17. Один оберт Сонячної системи навколо центральної частини Молочного Шляху називається ... рік.
18. Місцева група галактик разом із нашою рухається в напрямку Великого ...?
19. Яке випромінювання вивчали з допомогою штучного супутника *COBE*?
20. У якості чого використовують реліктовий фон під час визначення руху Землі?

ТЕСТ

16. Усі рухи Землі є...

- а) збалансованими
б) регулярними
в) нерегулярними
г) рівномірними

17. Якою орбітою обертається Земля навколо Сонця?

- а) коловою
б) параболічною
в) еліпсоїдною
г) гіперболічною

18. Що таке галактичний рік?

- а) один оберт Сонця навколо центра галактики
б) один повний оберт галактики
в) один оберт Сонця навколо своєї осі
г) час життя нашого Сонця

19. У напрямку якого сузір'я рухається Земля?

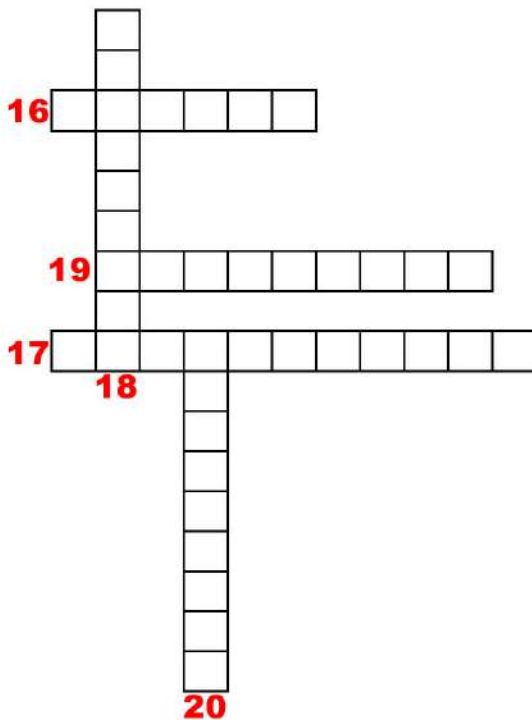
- а) Геркулеса
б) Діви
в) Водолія
г) Лева

20. У напрямку якого сузір'я відбувається місцевий рух Землі?

- а) Геркулеса
б) Діви
в) Водолія
г) Лева



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 16–20)





1.5. Земна кора та її рухи

Яка сила схована в надрах Землі?

Під відносно твердим шаром земної кори приховані повільно циркулюючі маси розпеченої гірської породи, які безперервно змінюють вигляд поверхні нашої планети.

Одна з унікальних рис, що вирізняє Землю з-поміж більшості планет-сусідок у Сонячній системі, це її кора. Вся вона розламана і фрагментована на плити, повільний і рівномірний рух яких впливає на геологію планети, клімат і географію загалом.

Яка ж сила переміщує цілі континенти?

Рис. 16. Альфред Вегенер



Альфред Вегенер (1880–1930) – німецький метеоролог, геолог, геофізик та астроном, автор теорій руху літосферних плит та ударного походження кратерів на планетах земної групи.

Окремі сегменти земної кори називають тектонічними плитами (від грецького слова «тектон» – майструвати, будувати). Теорію про них запропонував у 1912 р. німецький вчений Альфред Вегенер (**Вегенер 1925**) (**рис. 16**). Поштовхом до його теорії про дрейф материків, предтечі теорії тектоніки плит, стало усвідомлення Вегенером того факту, що узбережжя дуже



віддалених один від одного континентів, наприклад західні окраїни Африки і східні Південної Америки, збігаються (рис. 17а). Подібну схожість помічали і картографи XVI ст. Вегенер доєднав до свого дослідження і відкриття про дивний характер розподілу безсумнівно ідентичних викопних видів у різних частинах світу (рис. 17б). Вперше він оприлюднив свою теорію в 1912 р., проте її ігнорували майже п'ятдесят років.

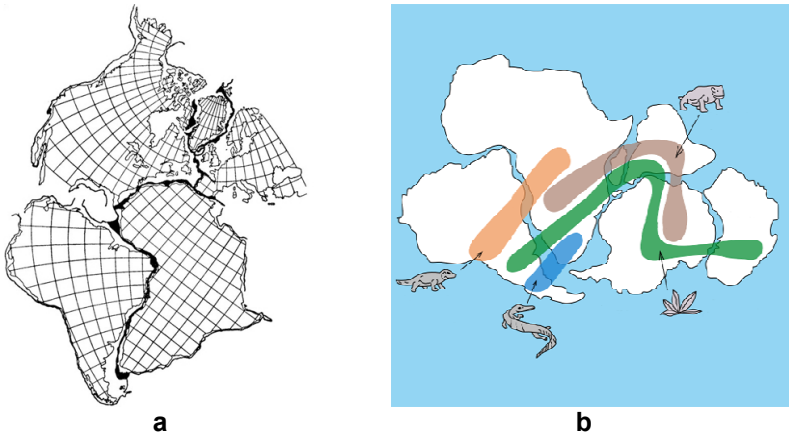


Рис. 17. Збіг контурів материків – вказує на існування в минулому єдиного суперматерика (а);
збіг місцезнаходжень викопних організмів на різних материках – ще одне свідчення того, що в минулому сучасні материки формували єдиний надконтинент (б)

Тектонічні плити розрізняють за розміром – від відносно невеликих – як Анатолійська, до гігантських – як Тихоокеанська. Тектонічні плити зазвичай складені з комбінації двох характерних типів кори – тонкої океанічної і значно товстішої континентальної.

Тектонічні плити формуються з верхньої частини мантії, відомої як літосфера, яка ніби пливе по астеносфері. Висока температура і тиск в мантії змушують гірські породи рухатися і



деформуватися впродовж уже багатьох мільйонів років. Струмені жару, які підіймаються від ядра, нагрівають мантіяну речовину, за рахунок чого вона розширюється, стає менш густою та виштовхується вгору через холодніші оточуючі товщі. Рухаючись вгору нагріті породи холонуть і, опиняючись у верхній частині мантії, набувають температури, яка не відрізняється від оточуючих температур. Під тиском нових теплих потоків, що продовжують надходити з глибин, охолола речовина відтісняється в боки і знову йде на переробку, опускаючись вниз до ядра, де знову нагрівається і підіймається. Так цикл повторюється знову і знову.

Мантія Землі розбита на низку конвекційних комірок, якими один і той же матеріал проходить колом неперервний цикл переробки. На поверхні таких комірок речовина астеносфери рухається паралельно до плит і тягне їх за собою зі швидкістю лише кількох сантиметрів на рік. Однак цей процес настільки потужний, що за мільйони років відбувається повне перетворення зовнішнього вигляду планети.

Центральні частини окремих плит відносно стабільні, тоді як їхні периферії – одні з найактивніших місць на Землі, де плити за посередництвом різноманітних рухів формують три типи меж (рис. 18):

- *дивергентні* – плити рухаються в боки одна від одної;
- *конвергентні* – плити рухаються назустріч одна одній, причому одна з них занурюється під іншу;
- *трансформні* – плити ковзають горизонтально відносно одна одній.

Більшість дивергентних меж утворюється в океанічній корі. Дивергентні розломи оперізують планету у вигляді глибоководних вулканічних гір – серединно-океанічних хребтів, які підносяться над поверхнею океану лише в деяких місцях, на-



приклад в Ісландії. Дивергентні межі стали беззаперечними доказами теорії тектоніки плит у 1960-х рр.

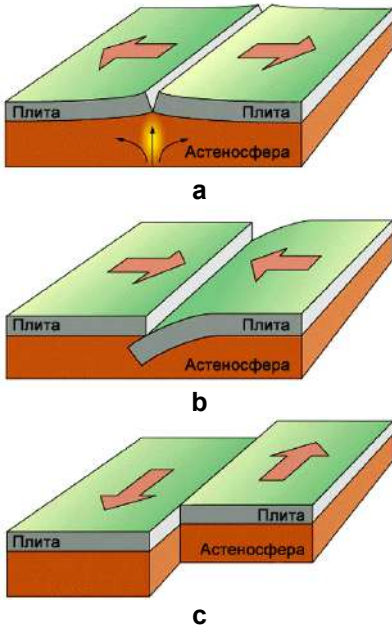


Рис. 18. Головні типи меж між літосферними плитами – конвергентні (а); дивергентні (b); трансформні (с)

На конвергентних межах плити зіштовхуються між собою. Океанічна кора зазвичай занурюється під континентальну. Цей процес називають субдукцією. Пізніше занурена плита у верхньому шарі мантії та створює додатковий тиск і тепло, які активізують вулканічні пояси уздовж таких меж (наприклад Тихоокеанське вогняне кільце) і сприяють формуванню гірських масивів, таких як Анди. У деяких випадках процес занурення однієї плити під іншу порушується і дві плити безпосередньо зіштовхуються між собою. Такий процес називають обдукцією. Тоді обидві плити вигинаються і зминаються, утворюючи високі

гірські масиви, зокрема Гімалаї.

Трансформні межі – різновид меж між літосферними плитами у вигляді здвигових зон різного типу. Вони виникають як в системах стиснення, так і в системах розтягнення земної кори. Трансформні розломи утворюються переважно в межах океанів, але трапляються і в межах континентів. До останніх належать відомі трансформні розломи Мертвого моря і розлом Сан-Андреас на заході США.



Тектоніка плит – скульптор поверхні Землі, який безперервно переміщує континенти на ній. Приблизно 300 млн років тому всі континенти об’єдналися в один суперконтинент, який Вегенер назвав Пангеєю або ж Всеземлею. Пізніше цей континент розділив океан Тетіс, залишки якого формують сучасне Середземне море. Всеземля розділилася на два суперконтиненти – Лавразію і Гондвану, які і дали початок усім сучасним континентам.

Безупинний рух тектонічних плит формує більшість гірських систем нашої планети, але, незважаючи на постійні міграції плит гори, створені з їхньою допомогою, не ростуть безмежно (детальніше [див. §1.7](#)).





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

21. Хто розробив теорію про дрейф материків?
22. Якими є центральні частини окремих плит?
23. Якими є зазвичай периферії плит?
24. Мантия Землі розбита на низку ... комірок.
25. Яку назву мав один з останніх суперконтинентів?

ТЕСТ

21. Збіг контурів материків вказує на існування:

- | | |
|--|--|
| а) в минулому кількох суперма-
териків одночасно | в) великих архіпелагів |
| б) багатьох материків, які не змі-
нилися впродовж тривалого часу | г) в минулому єдиного суперма-
терика |

22. Коли плити рухаються в боки одна від одної, то це ... плити

- | | |
|-----------------|----------------|
| а) дивергентні | в) трансформні |
| б) конвергентні | г) взаємодіючі |

23. Коли плити рухаються на зустріч одна одній, то це ... плити

- | | |
|-----------------|----------------|
| а) дивергентні | в) трансформні |
| б) конвергентні | г) взаємодіючі |

24. Коли плити ковзають відносно одна одної, то це ... плити

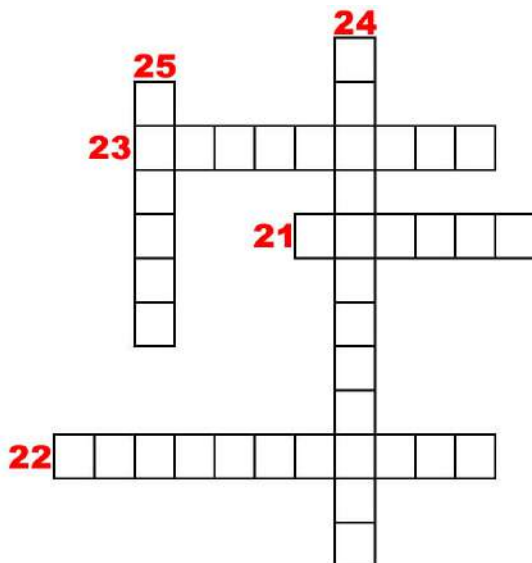
- | | |
|-----------------|----------------|
| а) дивергентні | в) трансформні |
| б) конвергентні | г) взаємодіючі |

25. Пангея розпалася на...

- | | |
|------------------------|------------------------|
| а) Лавразію і Тетіс | в) Тетіс і Всеземлю |
| б) Гондвану і Всеземлю | г) Лавразію і Гондвану |



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 21–25)





1.6. Тектоніка плит і сейсмічність

Як пов'язані тектонічні плити і землетруси?

На початку минулого сторіччя сейсмологи встановили, що під островними дугами глибини вогнищ землетрусів сягають кількох сотень кілометрів.

Усі вогнища там групуються в порівняно вузькі в поперечнику сейсмофокальні зони²⁸ (70–80 км), які занурюються до глибини 600, а іноді й більше кілометрів під кутом від 30 до 80°.

В 50-х роках ХХ ст. Х. Беньофф інтерпретував ці зони як великий скид і насув між двома жорсткими краями верхньої мантії (рис. 19а). Саме тоді такі зони і отримали назву зон Беньоффа (James, Perry 1969). Цікаво, що в середині 30-х років ХХ ст. японський геофізик К. Вадаті помітив разючу схожість між положенням сейсмофокальних зон із проміжними глибинними вогнищами (100–200 км) і поясом сучасної вулканічної активності Японії (Cliff 1987) (рис. 19б). А в 40-х роках ХХ ст. радянський вчений О. Заварицький опублікував працю, в якій зосередив увагу на петрологічній і металогенічній проблемах еволюції гірських порід в сейсмофокальних зонах.

Тому під час комплексного геолого-геофізичного підходу щодо аналізу процесів, які відбуваються в зонах глибоко фокусної сейсмічної активності, ці зони варто називати зонами Вадаті–Беньоффа–Заварицького.

Протягом кількох десятиліть в геології домінувало традиційне уявлення, що зони Вадаті–Беньоффа–Заварицького являють

²⁸ Сейсмофокальні зони (зона Вадаті–Беньоффа–Заварицького) – нерівна, криволінійна зона концентрації гіпоцентрів землетрусів, нахилена вбік від океанських жолобів під активні островні дуги або континентальні околиці на глибину до кількох сотень кілометрів, через яку відбувається занурення однієї плити під іншу.



собою тріщини, вздовж яких переміщаються краї жорстких блоків мантиї (незважаючи на вислови деяких геофізиків, які вважали, що сейсмічна активність викликана зануренням літосфери).



a



b

Рис. 19. Хьюго Беньоф (1899–1968) – американський вчений-сейсмолог. Відомий своїми працями зі складання карт розташування джерел глибоких землетрусів у Тихому океані (**a**); **Кію Вадаті (1902–1995)** – Був одним із перших сейсмологів Центральної метеорологічної обсерваторії Японії, який досліджував глибокі землетруси (**b**)

Остаточний удар по таких припущеннях завдали сейсмологічні дані. В сейсмології існує поняття добротності²⁹ Q – величини, зворотної затуханню пружних хвиль. Відомо, що добротність літосфери висока: приблизно 800–1000, добротність частково розплавленої і розташованої нижче неї астеносфери значно менша: 100–200. С. Федотов, М. Кутсумата, Л. Сайкс, Ж. Олівер та

²⁹ **Добротність** – характеристика резонансних властивостей системи. Відношення амплітуди коливань системи при резонансі до амплітуди коливань далеко від нього для вимушених коливань, або відношення енергії запасеної в системі до втрат енергії за одне коливання, для вільних коливань.



інші вчені, які досліджували умови розповсюдження пружних хвиль в корі і мантії Землі, до кінця 60-х років ХХ ст. встановили низку важливих закономірностей в глибинній будові і характері напруг під островними дугами. Високу добротність, яка навіть перевищує літосферну, має лише сама зона Вадаті–Беньоффа–Заварицького. Вище неї, безпосередньо під вулканами до глибини 40–70 км, добротність мантії дуже низька, вона зменшується в 15–20 разів. Просте пояснення цьому факту дала теорія тектоніки літосферних плит – в мантію занурюється порівняно холодна літосфера, яка має високу добротність, міцність і крихкість. Саме останні властивості зумовлюють сейсмічну активність під островними дугами. У процесі занурення в мантію океанічна літосфера розігрівається і поступово перестає бути крихкою. Звичний час для такого розігріву сягає приблизно 10 млн років. Так пояснюється кореляція між протяжністю зон Вадаті–Беньоффа–Заварицького і лінійною швидкістю підсування, врахованою за швидкістю розростання плит на конструктивних межах.

Про сучасні, доволі активні геодинамічні процеси еволюції, на периферії Тихого океану свідчать й інші геологічні та геофізичні ознаки. Серед них найяскравіші – рельєф поверхні літосфери і характер порушення ізостації (див. §1.3). Відомо, що по периферії Тихого океану перехід нормального океанічного ложа до континенту відбувається через низку закономірних морфоструктур: передовий вал, глибоководний жолоб, островне пасмо (дуга) і крайове (шельфове) море, в межах Азіатсько-австралійського сектору, або вал, жолоб і гірська споруда континенту – на протилежному Американському боці (рис. 20). При цьому всі вали характеризуються позитивними (перші десятки мілігал³⁰) ізостатичними аномаліями сили тяжіння, глибо-

³⁰ Гал – одиниця прискорення в системі одиниць СГС. Позначається Гал. 1 Гал дорівнює 1 см/с². Широко використовується в гравіметрії (геофізика) при вимірюванні прискорення вільного падіння.



ководні жолоби – від’ємними аномаліями (екстремальні значення досягають перших сотень мілігал), до невулканічних піднять острівних дуг і гірських споруд приурочені позитивні гравітаційні аномалії, амплітуда яких здебільшого близька за величиною до амплітуди від’ємних (Sjöberg 2013). В переведенні на тиск – максимальні величини порушень рівноваги сягають $\pm (1-1,5) \text{ т/см}^2$. Вказані особливості рельєфу поверхні і порушення ізостазії літосфери в перехідній зоні Тихого океану свідчать, що вал, жолоб і невулканічне пасмо (острівне або гірське) являють собою результат єдиного геодинамічного процесу.



Рис. 20. Профіль ложа Тихого океану

Якісне і кількісне пояснення явища, яке ми безпосередньо спостерігаємо, можна одержати, якщо прийняти механізм субгоризонтального стиснення і підсування периферії двох літосферних плит, кожна з яких рухається внаслідок передбачуваними астеносферними потоками, що, очевидно, являють собою прояв великомасштабної щільнісної конвекції у всій земній мантії. Природним аналогом процесу стиснення, зламу, насуву і підсування літосфери є морські тороси³¹. Але під час утворення торосів суттєвою відмінністю є надзвичайно мала величина сили тертя насування однієї крижини на іншу, тоді як підсування однієї плити під іншу, тертя між ними відіграють суттєву роль і у формуванні

³¹ **Тороси** – нагромадження уламків льоду в крижаному покриві морів, річок, озер.



характерного рельєфу пов'язаних між собою морфоструктур, ва-ла, жолоба, пасма й ізостатичних аномалій.

Якісно процес порушення ізостації в острівних дугах можна представити так: великомасштабне перемішування всієї мантії Землі зумовлює рух динамічного ансамблю літосферних плит. Над низхідними мантійними потоками літосфера зазнає стиснення. Коли боковий тиск перевищує умовно миттєву міцність літосфери на сколювання, по одній з осей головних напруг відбувається скид і починається підсування одного з новоутворених країв плити під іншу. Тут важливу роль відіграє питома вага кожної з плит. Океанічна літосфера, щільність якої близька і навіть перевищує щільність астеносфери, завжди занурюється під континентальну, оскільки середня щільність останньої на $0,2 \text{ г/см}^3$ менша. Завдяки тертю плита, що підсувається, утримує насунутий край літосферної плити і вигинає його, при цьому сама опускається під дією ваги насунутого краю. Саме цей процес і призводить до утворення характерних форм рельєфу (валу, жолоба і пасма), а також пов'язаних між собою зон позитивних і негативних ізостатичних аномалій сили тяжіння. Іншими словами, і характерний рельєф, і порушення ізостації в острівних дугах зумовлені міцністю літосфери під час підсування. Такий рельєф зберігається лише доти, поки відбувається динамічний процес підсування однієї плити під іншу. Після припинення підсування відбувається вирівнювання рельєфу поверхні літосфери в межах острівної дуги внаслідок зняття напруги шляхом пластичної деформації. При цьому некомпенсоване пасмо і передовий вал опустяться, а літосфера на ділянці глибоководного жолоба підніметься до рівня нормальної глибини океану в сусідній непорушеній області. Час вирівнювання (на основі аналогії з ізостатичним підйомом областей недавніх материкових зледенінь, таких як Феноскандія і Канада) в геологічному вимірі доволі швидко – кілька десятків – перші сотні тисяч років.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

26. Як називається нерівна, криволінійна зона концентрації гіпоцентрів землетрусів, нахилена вбік від океанських жолобів?

27. Хто інтерпретував сейсмофокальні зони як великий скид і насув між двома жорсткими краями верхньої мантії?

28. Хто помітив значну схожість між положенням сейсмофокальних зон з проміжними глибинними вогнищами?

29. Як називається одиниця прискорення в системі СГС?

30. Що є природним аналогом процесу стиснення, зламу, насуву і підсування літосфери?

ТЕСТ

26. Сейсмофокальні зони – це...

- а) сконцентровані тектонічні розломи в) сконцентровані вулканічні пояси
б) сконцентровані вогнища г) сконцентровані острівні дуги
землетрусів

27. Які значення добротності літосфери?

- а) 700–900 в) 800–1000
б) 800–1200 г) 1100–1300

28. Про сучасні, активні геодинамічні процеси еволюції, на периферії Тихого океану свідчать...

- а) порушення ізостазії в) вулканічні пояси
й тектонічні розломи
б) рельєф й порушення ізостазії г) глибоководні жолоби

29. Які гравітаційні аномалії приурочені до невулканічних піднять острівних дуг і гірських споруд?

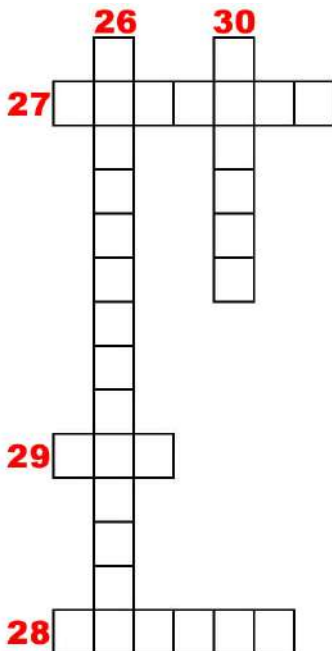
- а) нейтральні в) негативні
б) змішані г) позитивні

30. Стиснення і підсування країв двох літосферних плит спричинені...

- а) астеносферними потоками в) вулканічними потоками
б) мантійними потоками г) землетрусами



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 26–30)





1.7. Формування та руйнування гір *Чому гори не ростуть безмежно?*

Питання, як утворились гори, цікавило людей ще з давніх-давен, але відшукати на нього відповідь не вдавалося, оскільки склад і будова земної кори тоді були невідомими.

Невідомість вела до появи безлічі міфів та легенд, як-от про створення гір богами, щоб підперти небосхил, або ж що у горах, наприклад Олімпі, жили Боги Стародавньої Греції. Такі легенди з'являлися майже у кожного народу, але зазвичай не містили жодних ґрунтовних пояснень.

Гори на Землі фігурально можна порівняти зі складками-зморшками, які утворюються на шкірці всохлого яблука або картоплі. Складки можна спостерігати і вивчати на гірських схилах і пагорбах, в ущелинах, на крутих обривах берегів річок, озер і морів – взагалі скрізь, де на денній поверхні відслонюються пласти осадових гірських порід. Ці товщі спершу формуються на днищах водойм, накопичуючись горизонтальними або під вкрай незначним нахилом пластами. Але в горах ми бачимо, що ці пласти круто нахилені або взагалі прямовисні, ніби «поставлені на голову». Наче якісь неймовірні сили підняли їх та зрушили з місця.

А зараз давайте з'ясуємо, чому під дією таких потужних сил гори не ростуть безмежно?

Закономірно виникає думка, що чим вищає гравітація, тим нижчі гори, оскільки при досягненні певної висоти, вони починають руйнуватися під власною вагою. Чи так це з наукової точки зору?

Так і не зовсім так. Дійсно, гравітація обмежує висоту гір. Але не через руйнування самих гір, а завдяки їхньому просіданню. Під відносно твердою корою знаходиться пластична базальтова речовина мантиї. Якщо гори перевищують критичну висоту,



вони всією своєю масою починають продавлювати кору і повільно занурюватися у розпечену мантію. Підшва такої гірської системи поступово розплавляється в мантії і гори осідають все більше і більше – доти, поки сила тяжіння не зрівноважиться із силою Архімеда. Така рівновага називається ізостазією (див. § 1.3). Після цього осідання припиняється й активні гірські системи протягом довгого часу зберігають критичну висоту. Для Землі така висота складає 11–12 кілометрів.

Які ж сили руйнують гори? Та ті ж самі, що й людські сподруди: спека і мороз, дощ і сніг, вода і вітер, гравітація та навіть рослини, які разом формують комплекс процесів фізичного, хімічного (розчинення гірських порід – наприклад у воді) та біологічного вивітрювання (насамперед через життєдіяльність різноманітних рослинних угруповань) (рис. 21). Всім гірським породам притаманні тріщинки, з яких і розпочинається робота цих руйнівних сил. Наприклад, у спекотні сонячні дні скелі сильно нагріваються, а вночі остигають. Такі перепади особливо різкі навесні та восени. Відбувається почергове розширення та стиснення гірських порід. Ще швидше руйнує гори вода, яка замерзає в тріщинах і дрібних порожнинах гірських порід і уже у формі льоду призводить до їхнього розширення. За сотні і тисячі років зчеплення між окремими зернами гірських порід втрачають міцність і вони повністю розсипаються на складові частини. Новоутворений матеріал підхоплює дощова і тала вода, транспортуючи його вниз стрімчками. Особливо активно процеси транспортування вивіреного матеріалу протікають під час сходження селєвих потоків. З водними потоками, в яких містяться агресивні хімічні речовини, взаємодіють деякі мінерали, які розчиняються в ній (зокрема кам'яна сіль, гіпс, вапняк).

У високих горах до руйнівних процесів долучаються постійний сніговий покрив та гірські льодовики, що в мінливих погодних умовах чинять сукупну скульптурну дію на гори періодичною активізацією лавин та сповзаючими льодовиками.



Навіть рослини видозмінюють поверхню гір. На скелях селяться лишайники, поступово роз'їдаючи поверхні брил і сприяючи розширенню тріщин. У збільшені щілини набиваються дрібні піщинки і пилінки, які приносить той же вітер або змиває вода із верхніх частин схилу. Потім цей субстрат у тріщинках поступово трансформується у ґрунт, на якому поселяються рослини, розвиваючи довге і чіпке коріння. А далі їхня дія на гірські породи схожа на вищезгадані процеси.



Рис. 21. Комплекс процесів вивітрювання

Сучасні міжнародні проекти про зміни природи гірських систем свідчать, що екстремальні прояви комплексу екзогенних руйнівних сил будуть лише частішати, сприяючи посиленню попереджувальних, моніторингових та адаптаційних заходів.

Отже, скульптурне розмаїття гір – спільний результат часу, внутрішніх (ендогенних) та зовнішніх (екзогенних) процесів. Вражає неповторність обрисів земних

гір і їхньої геометрії. В одних місцях ми спостерігаємо високі, відносно молоді гори Кавказу й Альп. В інших куточках – гори нижчі, з округленими вершинами і пологими схилами. Такі гірські системи Середнього Уралу, Карпат й Аппалачів. Знаходимо й ще більш низькі гори, з малопомітними плоскими вершинами, з пологими схилами і широкими долинами. Такі системи майже повністю позбавлені своєї головної краси – скель, ущелин, обривів і водоспадів. Це гори Північної Німеччини, Північного і Південного Уралу, Єнісейський кряж. У Казахському степу від гір залишилися лише розрізнені пагорби, нерівномірно розсіяні



на великій території. Нарешті, є такі місця, як Донецький і Тіманський кряжі, де лише по окремих горбовинах та виходах специфічних гірських порід можна здогадатися, що і тут колись здіймалися гори. Подібно і форми поверхні території України бережуть пам'ять тектонічних циклів – від палеопротерозойських³², закарбованих в будові Українського щита, до альпійського, протягом якого виникли Карпати.

Так і відбувається кругообіг речовини у неживій природі. Одні форми планети змінюються іншими – спершу вони інтенсивно ростуть, проходять цикли скульптурних трансформацій, старіють, руйнуються і зникають, а на їхньому місці з'являються інші. Та нівелюються лише форми й обриси, сама речовина, з якої складається Земля, набуваючи нового стану і вигляду, проходячи по колу мантійним горнилом, і надалі залишається субстратом для майбутнього неповторного різноманіття гірських систем.

³² **Палеопротерозой** – геологічна ера, частина протерозою. Почався 2,5 мільярдів років тому, а закінчився 1,6 мільярдів років тому.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

31. Що обмежує висоту гір?
32. «Що» руйнує гірські споруди?
33. Як називаються внутрішні процеси Землі?
34. Як називаються зовнішні процеси Землі?
35. Яка речовина бере найактивнішу участь у перенесенні зруйнованих гірських порід?

ТЕСТ

31. Яка критична висота гір на Землі?

- | | |
|-------------|-------------|
| а) 9–10 км | в) 13–14 км |
| б) 11–12 км | г) 15–16 км |

32. Фізичне вивітрювання – це...

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| а) вітер, вода, температура | в) розчинення гірських порід |
| б) життєдіяльність рослин | г) всі варіанти правильні |

33. Хімічне вивітрювання це...

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| а) вітер, вода, температура | в) розчинення гірських порід |
| б) життєдіяльність рослин | г) всі варіанти правильні |

34. Біологічне вивітрювання здебільшого спричинене...

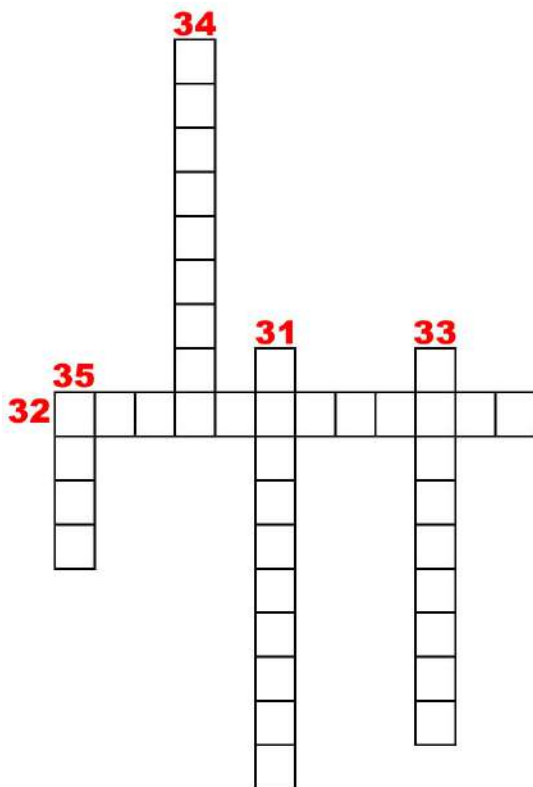
- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| а) вітром, водою, температурою | в) розчиненням гірських порід |
| б) життєдіяльністю рослин | г) всі варіанти правильні |

35. Скульптурне розмаїття гір – спільний результат...

- | | |
|--|--|
| а) вивітрювання, часу та ендегенних процесів | в) тектонічних циклів, ендегенних та екзогенних процесів |
| б) вивітрювання, часу та екзогенних процесів | г) часу, ендегенних та екзогенних процесів |



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 31–35)





1.8. Вулканічні виверження

На що здатні вулкани?

Минуло не так багато часу після виверження вулкану Фоградальсф'ядль, що за 30 кілометрів від столиці Ісландії. Вчені з Ісландського інституту Наук про Землю визначили, що за місяць вилилося 14 млн метрів кубічних лави з викидом понад 5 000 т вуглекислого газу та 2 000 діоксиду сірки за день. Мало це чи багато? На щастя, швидкість такого виливу незначна, оскільки вулкани Ісландії належать до вулканів щитового типу. Більше того, 90% усіх активних вулканів світу такого ж типу. Така назва з'явилась через схожість обрисів цих вулканічних форм зі щитом давнього воїна. Щитові вулкани виникають у місцях виливу з верхньої мантії дуже гарячої й рідкої лави з низьким вмістом вулканічних газів. Завдяки високій температурі й низькій в'язкості така лава тече вільно й розливається на великій площі, перш ніж застигнути.

Тому країну льоду та вогню вважають справжнім раєм для вулканологів. Існує не так багато місць на Землі, де геологія та історія людства настільки тісно пов'язані з вулканізмом, як в Ісландії. Острів завдячує своєму існуванню потужній вулканічній гарячій точці³³, яка розташована в межах серединно-океанічного хребта. Межа між Американською та Євразійською літосферними плитами перетинає Ісландію з півдня на північ, а тому спрединг плит можна безпосередньо виміряти та спостерігати на суші.

Щитові вулкани поширені не лише на Землі, а й на інших планетах (рис. 22). Найвища відома гора Сонячної системи,

³³ **Гаряча точка** – район тривалого вулканізму з розплавами мантійного походження.



Олімп на Марсі (з відносною висотою близько 26 км) – також щитовий вулкан (Кирилюк, Кирилюк 2018). На відміну від Марса, вулкани на Землі внаслідок дрейфу літосферних плит із часом зміщуються від місць виходів магми до поверхні, і через це не встигають набути великого розміру. Тому земні вулкани не такі масивні, як марсіанські.

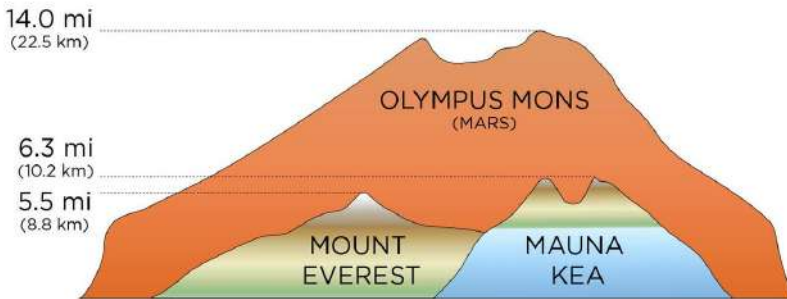


Рис. 22. Порівняльні розміри марсіанського вулкана Олімп із найвищими земними вершинами

Але повернемося на Землю, зрештою 10 % активних світових вулканів не так пощастило. Хоча про роль наймасштабнішого за останні два мільйони років виверження Тоби в історії людства і досі сперечаються. Близько 74 000 років тому на території сучасної Суматри вибухнув вулкан Тоба (рис. 23). Виверження утворило 2 800 кубічних кілометрів лави, що призвело до накопичення метрових прошарків попелу та викиду сотень тисяч тонн сірчаної кислоти та діоксиду сірки. Можливо, це причина зниження глобальної температури на 10 °C протягом наступного десятиліття з деяким подальшим похолоданням, що тривало майже тисячу років.



Це був середній палеоліт³⁴, коли вершиною людських технологій були кам'яні знаряддя праці та вогонь. Отже, ви розумієте, чому вчені вважають, що гігантський вибух міг істотно вплинути на людську популяцію. Але, ймовірно, палеорекострукції демонструють, що з людством все було переважно добре.

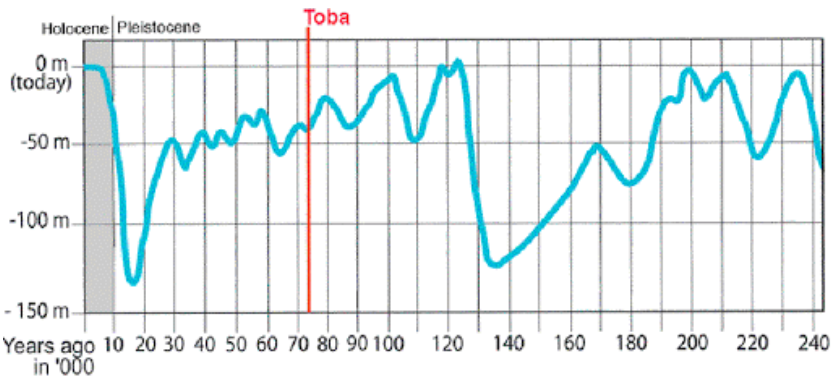


Рис. 23. Подія Тоба та тренд рівня Світового океану

І поки що не зовсім зрозуміло, чому так.

Основні кліматичні наслідки вулканів спричиняються попелом та газами сірки, які вони постачають в атмосферу. Після великого виверження цей матеріал може циркулювати в атмосфері роками, не пропускаючи сонячного світла, і в такий спосіб призводити до глобального похолодання – звідси і можлива десятирічна вулканічна зима, зумовлена Тобою.

І впевнені, ви погодитесь, що нескінченна глобальна зима буде поганою новиною і для сучасних жителів планети.

³⁴ **Середній палеоліт** – починається за традиційною схемою заледенінь під час рис-вюрмського інтергляціала. Науково датований – від 125–100 до 40 тисяч років тому.



А тепер порівняємо виверження Тоби із виверженням уже більш знаної серед науковців Тамбори – визнаного як найпотужніший задокументований в історії вулкан уже плінійського вибухового типу. Його активна діяльність у 1815 році перетворила наступний рік без літа і призвела до неврожаю та голоду по всьому світу (рис. 24).

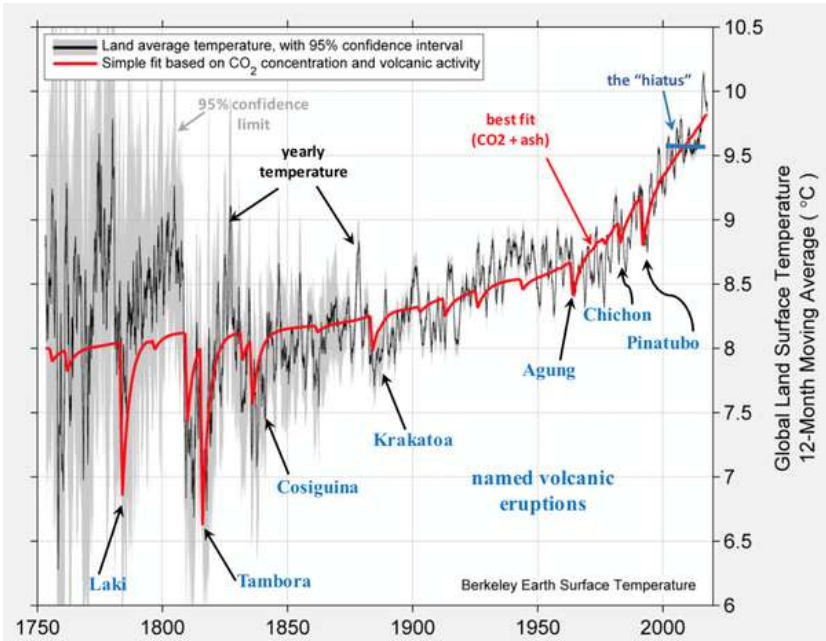


Рис. 24. Подія Тамбора (<http://berkeleyearth.org/>)

До речі, цікаво, що цей рік завдяки специфічній циркуляції атмосфери був найтеплішим для теренів України, тоді як у Західній та Північній Європі річні температури повітря були нижчими на 2 °C протягом періоду 1960–1990-х рр.



Виверження Тамбори вивільнило лише 175 кубічних кілометрів вулканічного матеріалу порівняно з тисячами Тоби (Clyne et al. 2021).

Тому у 1990-х роках Стенлі Амброуз запропонував так звану теорію катастрофи Тоба (Williams et al. 2009). Його ідея полягала в тому, що виверження могло майже знищити людство, з приблизно 100 000 людей до 10 000. Про це свідчить і той факт, що люди африканського походження генетично різноманітніші за інших людей, а це означає, що решта людства в якийсь момент зазнала так званого генетичного «ефекту пляшкового горла»³⁵ – різкого зниження популяції, яке призвело до втрати генетичного різноманіття.

Згідно з теорією катастрофи Тоба, винуватцями було гігантське виверження вулкану та глобальна зима як наслідок. Тропічний дім африканців, згідно з теорією, допоміг захиститися від наслідків вулканічної зими і запобігти значному скороченню населення, що відбулося в інших районах.

Проте у 2010 році науковці створили математичну модель можливого клімату після виверження за ефектом частинок матеріалу, викинутого в атмосферу, що відбивав сонячну радіацію. Результати свідчать, що глобальні наслідки виверження могли бути м'якшими та короткочаснішими – зниження температури на три-п'ять градусів протягом двох-трьох років, замість десятиградусного падіння, яке тривало десятиліттями (Black et al. 2021).

І, можливо, цього було недостатньо, щоб знищити 90% населення світу.

³⁵ **Ефект пляшкового горла** – скорочення чисельності популяції або виду, що супроводжується посиленням генетичного дрейфу, оскільки інтенсивність генетичного дрейфу перебуває у зворотній пропорційній відношенні до чисельності популяції.



Останні дослідження також виявили, що викопні рослинні рештки у зразках з африканського озера Малаві не вказують на великі зміни у житті рослин до і після виверження. Ще одне дослідження, проведене на узбережжі Південної Африки й Індії, не виявило жодного переривання людської діяльності.

Хоча, як бачимо, зниження глобальної температури повітря всього на один градус у випадку 1816 року було достатнім, щоб той рік був без літа і відтак настали ще кілька холодних і сухих років в Європі і Північній Америці.

Так, ми переконуємось, що вулкани – неймовірні руйнівники, проте саме їм ми завдячуємо дихаючою атмосферою та океанами. Багато тварин, таких як малий фламінго та галапагоська ігуана, пристосувалися до вулканічного життя і процвітають поблизу деяких найактивніших вулканів світу.

Зрештою, формуючи понад 80 % земної поверхні та багатий мінералами попіл від регулярних вивержень, що удобрюють Землю, вулкани забезпечують платформу для життя. Останні десять тисяч років кількість виділеного ними вуглецю підтримувала нашу планету стабільною та теплою.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

36. Як називається найвища відома гора Сонячної системи?
37. Надпотужне виверження якого вулкана відбулося 74 000 років тому?
38. Виверження якого вулкана призвело до неврожаю та голоду?
39. Як називається відтворення (моделювання) природних умов у геологічному минулому?
40. Хто запропонував теорію катастрофи Тоба?

ТЕСТ

36. Де поширені щитові вулкани?

- а) на Марсі
б) лише на Місяці
в) на землеподібних планетах Сонячної системи
г) на Землі

37. Виверження Тоби відбулося...

- а) 44 000 років тому
б) 54 000 років тому
в) 64 000 років тому
г) 74 000 років тому

38. Як називаються період, коли вершиною людських технологій були кам'яні знаряддя праці та вогонь?

- а) нижній палеоліт
б) середній палеоліт
в) верхній палеоліт
г) палеоліт

39. Найпотужніший задокументований в історії вулкан називається...

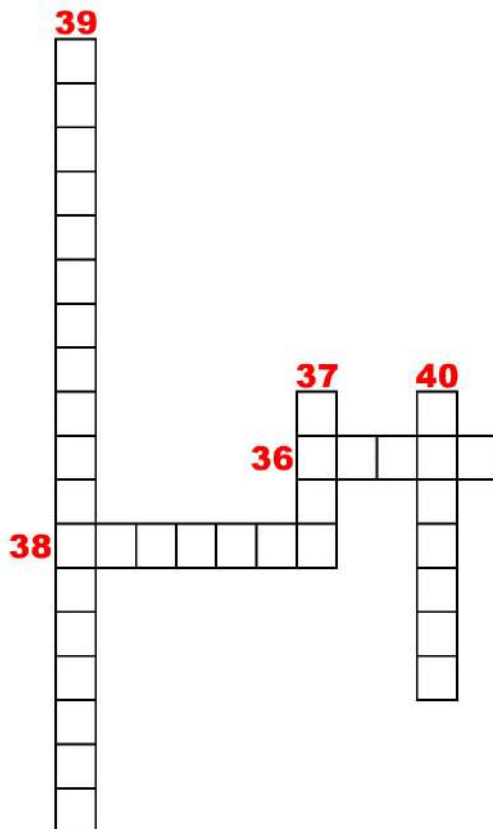
- а) Тамбора
б) Тоба
в) Фаградальсф'ядль
г) Олімп

40. Як називається момент різкого зниження популяції, яке призводить до втрати генетичного різноманіття?

- а) «ефект вузького горла»
б) «ефект звуженого горла»
в) «ефект вимирання популяції»
г) «ефект пляшкового горла»



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 36–40)





1.9. Вулкани та атмосфера

Як виверження Тонга об'єднує Мохо та стратосферу?

15 січня 2021 р. на антарктичній станції «Академік Вернадський», розташованій за більш як 7 800 км від острівного архіпелагу Тонга, українські полярники зафіксували хвилі, спричинені підводним вулканом Хунга-Тонга-Хунга-Хапай. Це виверження супроводжувалося землетрусами магнітудою понад 5 та цунамі, хвилі якого, власне, і досягли узбережжя Антарктиди. Окрім того, зафіксовані «стрибки» атмосферного тиску. Такий ефект пов'язаний з вибухом: у момент виверження біля жерла поширюється вибухова хвиля, яка в міру зниження енергії через кілька десятків кілометрів перетворюється на звукову, а через сотні і тисячі км переходить у коливання атмосферного тиску повітря, яке і вловлюють чутливі датчики. Це зафіксували датчики в Україні.

Але повернемося до райських островів. Острівний архіпелаг Тонга розташований на стику двох великих літосферних плит – Індо-Австралійської плити на заході і Тихоокеанської на сході. Це частина тихоокеанського «вогняного кільця»³⁶, яке оконтурює весь океан (рис. 25). Океанічна кора Тихоокеанської плити зародилася в центрі спредингу³⁷ в східній частині океану приблизно 180 мільйонів років тому, її формування продовжу-

³⁶ **Тихоокеанське вогняне кільце** – пояс активної вулканічної діяльності та землетрусів, розташований навколо басейну Тихого океану. Має форму підкови довжиною близько 40 тис. км та викликаний рухом тектонічних плит, зокрема Тихоокеанської плити, плит Наска та Кокос.

³⁷ **Спредінг** – геодинамічний процес розтягування, що виражається в імпульсивному і багаторазовому розсуванні блоків літосфери і в заповненні вивільненого простору магмою, що генерується в мантії, а також твердими протрузіями мантіїних перидотитів.



ється й донині. Ця кора рухається у напрямку Австралії та Азії, ковзаючи розплавленою верхньою мантією. Там, де вона зустрічається з краєм Індо-Австралійської плити на сході, океанічна кора опускається назад у мантію вздовж «зони субдукції»³⁸.



Рис. 25. Місцезнаходження архіпелагу Тонга

Найбільш очевидними проявами зон субдукції є глибоководні жолоби та інтенсивна вулканічна активність, спричинена плавленням земної кори. Такі речовини, як вода, потрапляючи під плиту, що занурюється, сприяють плавленню та призводять до вибухових вивержень, характерних для вулканів «Вогняного кільця» Тихого океану.

³⁸ **Субдукція** – тектонічний процес, який проходить по конвергентній границі літосферних плит, на якій одна плита рухається по іншій тектонічній плиті, пірнаючи в земну мантію.



Вивчення зон субдукції, тобто процесу, що відбувається на конвергентних межах, де одна літосферна плита занурюється під іншу і далі в мантію, є фундаментальною темою в багатьох науках, пов'язаних із Землею. Оскільки зазвичай у цих зонах відбуваються суттєві варіації щільності, правильне моделювання цих областей є основоположним при вивченні земної кори.

Ще на початку ХХ ст. ми практично нічого не знали про внутрішню будову Землі, і навіть про існування земної кори. І тільки в 1909 р. сейсмолог Андрій Мохоровичич, вивчаючи сейсмограми землетрусу у Загребі, виявив, що приблизно 50 км під землею відбуваються раптові злами сейсмічних хвиль.

Відтоді ця межа між земною корою і нижньою мантією була відома як розрив Мохоровичича, або Мохо. Поверхня Мохоровичича, або Мохо – границя розділу (складна перехідна зона) між земною корою та верхньою мантією Землі, яка виявлена за стрибкоподібним збільшенням швидкості проходження поздовжніх сейсмічних хвиль від 6,7–7,6 до 7,9–8,2 км/с, поперечних з 3,6–4,2 до 4,4–4,7 км/с. Навіть сьогодні майже все, що ми знаємо про глибинні шари Землі, отримано двома методами: сейсмічним та гравіметричним.

Традиційніші сейсмічні методи засновані на спостереженні за змінами швидкості поширення сейсмічних хвиль між корою і мантією. Гравіметрія ж розглядає гравітаційний ефект через різницю в щільності, спричинену зміною складу кори та мантії. Проте моделі *Мохо*, створені на основі сейсмічних або гравітаційних даних, зазвичай обмежені незначним масивом даних або ці дані доступні лише для окремих профілів.

Та рівно століття після неймовірного відкриття Мохоровичича, «дослідник гравітаційного поля й сталих океанічних течій», мова йде про європейський науково-дослідний супутник, запущений на орбіту, дав поштовх новим відкриттям поверхні *Мохо*.



Проект *GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications* – або GEMMA допоміг створити першу світову карту високої роздільної здатності межі між земною корою та мантією на основі даних із супутника GOCE. GOCE вимірює гравітаційне поле та моделює геоїд із безпрецедентною точністю (рис. 26).



Рис. 26. Штучний супутник GOCE

Так до чого тут регіон Тонга – спитаєте ви? Власне субдукційна плита Тонга стала кондиційною природною лабораторією для моделювання субдукційних плит, з огляду на глобальну інверсію гравітаційного поля для відтворення основних рис земної кори, використовуючи градієнти тяжіння з даних GOCE (Brockmann et al. 2021).



Пізніші результати даних GOCE показали деталі мантії Землі, включаючи мантіїні плюми, давні зони субдукції та залишки океану Тетіс. Результати місії GOCE також значно збільшили розуміння геологічного складу антарктичного континенту, зокрема, виявивши залишки стародавнього континенту та щонайменше трьох кратонів³⁹ під антарктичним льодом.

І тоді як космічні спроби у дослідженні поверхні Мохо – вагомі, спроби досягти поверхні Мохоровичича глибоководним бурінням – поки невдалі. Глибина залягання поверхні Мохоровичича – від 25–90 км під континентами та 7–10 км під океанами. В 1961–1966 роках запущений цілий проєкт Мохол, що мав на меті пробурити свердловину до поверхні Мохо у тонкій океанічній корі, проте найглибша свердловина сягнула лише 180 м. У 1970 р. розпочато новий науковий проєкт, розпочатий на Кольському півострові поблизу Мурманська, де земна кора наближена до океанічної і відносно тонка. Дослідники намагались досягти Мохо з 1970 по 1992 рік. Портал до центру Землі – Кольська надглибока свердловина – сягнула глибини 12 260 метрів, рекордної в світі.

Свердловина мала сягнути глибини приблизно 14 500 метрів. Але вчені та інженери були змушені зупинитись через несподівано високі температури. На глибині 12 км під породами віком 2,7 млрд років зафіксовані температури близько +180 °С. Це майже вдвічі більше, ніж передбачалось. Такі високі температури деформували бурове долото і труби. Самі породи також стали більш податливими та пластичними.

Оскільки буріння зупинено в 1992 році, а сам проєктний майданчик був залишений приблизно через десять років, Кольська надглибока свердловина залишається рекордною найглиб-

³⁹ **Кратон** – консолідовані ділянки земної кори, нездатні до перетворення альпінотипною складчастістю.



шою штучною точкою на Землі. Відтоді люди викопали довші свердловини, зокрема свердловину протяжністю в 12 289 м, пробурену на нафтовому родовищі Аль-Шахін в Катарі, і морську нафтову свердловину довжиною 12 345 метрів поблизу російського острова Сахалін. Але найглибшою все ж залишається Кольська.

А поки поверхня Мохо ще чекає на своїх відкривачів, сірчистий газ з вулкану Тонга вже дістався іншої, але вже атмосферної границі – стратопаузи і далі в атмосфері. Сірчистий газ у значних кількостях, поглинаючи вхідну сонячну радіацію в стратосфері, знаний як потенційний охолоджувач. Наскільки потужний? Для прикладу, внаслідок виверження філіпінського Пінатубо в 1991 році (до речі, з того ж регіону Вогняного кільця) і викиду 20 млн т сірчистого газу, вчені розрахували зниження середньої глобальної температури приблизно на 0,6 °С за 15-місячний період та утворення озонової дірки над Антарктидою.

На разі ми не знаємо який ефект створить вулкан з регіону Тонга, але щоразу скаржачись на погодні витівки, задумаймося, можливо, десь за десятки тисяч кілометрів від нас, потужна природна споруда намагалася виправити людську спадщину глобального потепління.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

41. Як називається геодинамічний процес розтягування, що виражається в імпульсивному і багаторазовому розсуванні блоків літосфери?

42. Як назвати процес, коли одна плита рухається по іншій тектонічній плиті, пірнаючій в земну мантію?

43. Під якою назвою відома межа між земною корою і нижньою мантією?

44. Яка назва найглибшої свердловини на Землі?

45. Хто виявив, що приблизно 50 км під землею відбуваються раптові злами сейсмічних хвиль?

ТЕСТ

41. На якій станції зафіксували хвилі, спричинені підводним вулканом Хунга-Тонга-Хунга-Хапай?

- а) «Академік Соколовський» в) «Академік Лісовський»
б) «Академік Вернадський» г) «Академік Степовий»

42. Океанічна кора Тихоокеанської плити зародилася в центрі...

- а) спредінгу в) обдукції
б) субдукції г) трансформного розлому

43. Найглибша свердловина на Землі...

- а) Хібінська в) Скандинавська
б) Кольська г) Тихоокеанська

44. Призначення місії GOCE...

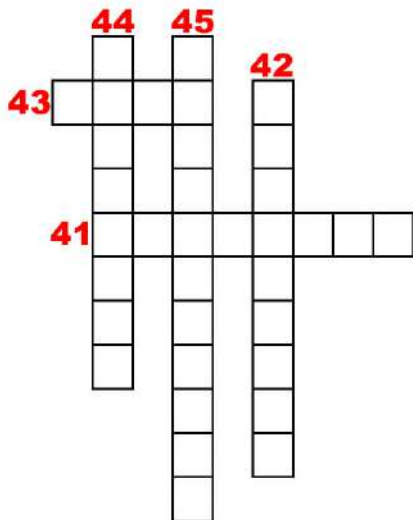
- а) вимірювання електричного поля Землі в) вимірювання гравітаційного поля Землі
б) вимірювання теплового потоку Землі г) вимірювання параметрів магнітного поля Землі

45. У якому океані розташоване «Воняне кільце»?

- а) Північному Льодовитому в) Атлантичному
б) Індійському г) Тихому



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 41–45)





1.10. Цикли Міланковича

Що змінюють цикли Міланковича?

Мабуть, ви погодитесь зі мною, що наше життя буквально обертається циклами: серією подій, які регулярно повторюються в однаковому порядку. У нашому світі та у Всесвіті існують сотні різних типів циклів. Деякі з них є природними, наприклад, зміна сезонів, щорічні міграції тварин або циркадні ритми, які регулюють режим сну. Інші створені людиною, такі як вирощування та збирання врожаю, музичні ритми чи економічні цикли.

Цикли також відіграють ключову роль у короткочасній погоді Землі та довгостроковому кліматі. Століття тому сербський учений Мілутін Міланкович висунув гіпотезу про тривалі результуючі наслідки змін положення Землі щодо Сонця, які є сильним рушієм довгострокового клімату Землі і відповідають за початок і кінець періодів зледеніння (рис. 27).

Земля рухається у просторі не лише завдяки зміні довжини й форми орбіти, але й через ритмічну зміну кута розташування до Сонця – всі ці повороти й погойдування позначаються на тривалості й інтенсивності сонячного освітлення на будь-якому клаптику Землі. Якщо йдеться про тривалі періоди часу, то найбільше впливають три типи змінних – нахил осі обертання, прецесія і ексцентриситет орбіти (рис. 28). Міланковича цікавило, чи немає зв'язку між початками і закінченнями льодовикових епох і цими складними циклами. Проблема полягала в тому, що згадані цикли мають різну тривалість – приблизно 20, 40 і 100 тис. років відповідно, але в кожному випадку варіювались в межах кількох тисяч років. Це означало, що визначення їхнього сукупного ефекту протягом тривалих інтервалів часу вимагало практично нескінченних розрахунків. По суті, Міланковичу було потрібно обчислити кути падіння сонячних променів і трива-



лість випромінювання для кожної широти і кожної пори року за мільйон років, скорегувавши їх з огляду на три мінливі змінні.



Рис. 27. Мілутін Міланкович

Мілутін Міланкович (1879–1958) – сербський цивільний інженер, кліматолог, геофізик, астроном, математик та письменник-фантаст, академік Сербської академії наук і мистецтв.

Зрештою, як було підраховано, ці циклічні орбітальні рухи, які стали відомими як цикли Міланковича, спричиняють коливання до 25 % кількості вхідної інсоляції в середніх широтах Землі.

По-перше, ексцентриситет, або ж паломництво Землі навколо Сонця мінливою еліптичною орбітою, є причиною того, чому наші сезони мають дещо різну довжину, оскільки літо в Північній півкулі в даний час приблизно на 4,5 дні довше, ніж зима, а весна приблизно на три дні довша, ніж осінь. У міру зменшення ексцентричності тривалість наших сезонів поступово вирівнюється.

Мінливість орбіти Землі проявляється в тому, що з плином часу сила тяжіння двох найбільших планет нашої Сонячної системи – газових гігантів Юпітера та Сатурна, змушує форму орбіти Землі змінюватися від майже кругової до дещо еліптичної.

Різниця у відстані між найближчим розташуванням Землі до Сонця (відомим як перигелій), яке відбувається приблизно 3



січня кожного року, та найдалшим відходом від Сонця (відомим як афелій) 4 липня або близько до цього періоду, наразі становить приблизно 5 мільйонів кілометрів (близько 3 мільйонів миль), варіація на 3,4 %. Це означає, що кожного січня Землі досягає приблизно на 6,8 % більше сонячної радіації, ніж кожного липня.

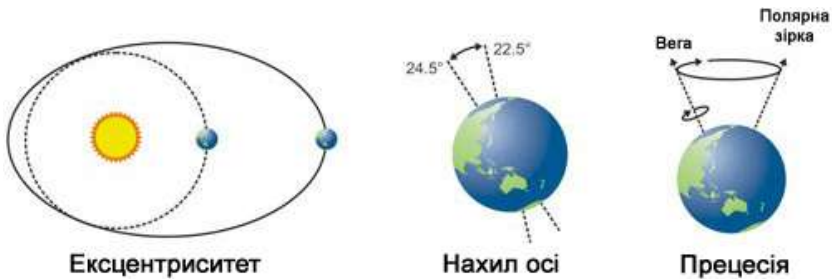


Рис. 28. Три типи змінних циклів Міланковича

Коли орбіта Землі набуває найбільшої еліптичності, приблизно на 23 % більше сонячної радіації, що надходить, досягає Землі при найближчому наближенні нашої планети до Сонця щороку, ніж при її найдалшому відході від Сонця. В даний час ексцентриситет Землі найменший і дуже повільно змінюється за цикл, який охоплює близько 100 000 років.

По-друге, нахил осі обертання, перпендикулярний до орбітальної площини Землі, за останній мільйон років коливався від $22,1^\circ$ до $24,5^\circ$. Чим більший кут осьового нахилу Землі, тим екстремальніші наші сезони, оскільки кожна півкуля отримує більше сонячного випромінювання протягом літа, коли півкуля нахилена до Сонця. Більші кути нахилу сприяють періодам зледеніння. Ці ефекти не однорідні у всьому світі – вищі широти отримують більшу зміну загальної сонячної радіації, ніж області, розташовані ближче до екватора.



В даний час вісь Землі нахилена на $23,4^\circ$, або приблизно на половину шляху між її крайніми точками, і цей кут дуже повільно зменшується в циклі, який охоплює близько 41 000 років. Востаннє він досяг свого максимального нахилу приблизно 10 700 років тому, а мінімального нахилу досягне приблизно через 9 800 років. Оскільки нахил зменшується, це поступово сприяє пом'якшенню сезонів, що призводить до дедалі теплішої зими та прохолоднішого літа, яке поступово, з часом, дає змогу снігу та льоду у високих широтах накопичуватися у великі крижані покриви. Зі збільшенням крижаного покриву збільшується частка відбитої у космос сонячної радіації, сприяючи ще більшому охолодженню.

По-третє, ефект прецесії – коли Земля, обертаючись, розхитується навколо своєї осі, як трохи нецентрована спінінгова вершина іграшки. Це коливання відбувається через припливні сили, спричинені гравітаційним впливом Сонця та Місяця, які змушують Землю випинатися на екваторі, впливаючи на її обертання. Тенденція в напрямку цього коливання відносно фіксованого положення зірок відома як осьова прецесія. Цикл осової прецесії охоплює близько 25 771,5 років.

Осьова прецесія робить сезонні контрасти більш екстремальними в одній півкулі та менш екстремальними в іншій. В даний час перигелій трапляється взимку в Північній півкулі та влітку в Південній. Це робить літо Південної півкулі спекотнішим і зумовлює помірні сезонні коливання в Північній. Але приблизно через 13 000 років осьова прецесія призведе до зміни цих умов, причому Північна півкуля відчувє більше екстремумів сонячного випромінювання, а Південна – менші сезонні коливання.

Осьова прецесія також поступово змінює настання пір року, змушуючи їх починатись раніше з часом, і поступово змінює те, до якої зірки спрямована вісь Землі на Північному полюсі (Полярній зірці). Сьогодні Північною зіркою Землі є Полярис,



хоча ще пару тисяч років тому це були Кохаб і Феркад, а південною Сігма Октанта.

Водночас не тільки вісь Землі «хитається», але і весь орбітальний еліпс Землі нерегулярний, насамперед завдяки взаємодії з Юпітером і Сатурном. Цей цикл апсидальної прецесії охоплює близько 112 000 років. Апсидальна прецесія змінює орієнтацію орбіти Землі щодо еліптичної площини. Поєднані ефекти осьової та апсидальної прецесії призводять до загального циклу прецесії, що охоплює в середньому близько 23 000 років.

А тепер повернемося до самого Міланковича і з'ясуємо, чому саме він зміг всі ці ефекти інтерпретувати ще у ХІХ ст.

ХІХ ст. – час Малого льодовикового періоду, час виверження сумнозвісної Тамбори, що спровокувала рік без літа і, відповідно, згадайте хоча б похмуро-барвисті тони картин Тернера, дедалі більше зростання популярності природничих наук – геології, астрономії, кригознавства як на той час. Відповідно впродовж століття частіше з'являються здогадки про льодовикові періоди – зважаючи на знахідки решток північних оленів на півдні Франції та нетипові і гранітні валуни-брили в гірських масивах Юри.

Мілутін Міланкович родом із Сербії, тодішньої Австро-Угорщини, жив саме у цей час. Міланкович взагалі був інженером, займався конструкціями залізобетонних мостів, і до астрономії відношення не мав. Його цікавість до теорії льодовикових періодів виросла якраз у той час, коли вона зависла у повітрі, зважаючи на відсутність пояснень об'єктивних причин. До цього британець Крол уже запропонував астрономічну теорію пояснення кліматичних змін, але розрахунки його підводили і не збігалися з геологічними знахідками. На щастя, кропітка праця відповідала якнайбільше характеру Міланковича.

Упродовж 20-х рр. ХХ ст., навіть під час відпусток, він не випускав олівця з рук і логарифмічну лінійку, роблячи підрахунки циклів – нині, звісно, ці розрахунки можна зробити за до-



помогою комп'ютера за день-два, не те що у 1920 р., і які були підсумовані у праці: «Математична теорія термічних явищ, спричинених сонячним випромінюванням» (Міланкович 1939).



Рис. 29. Володимир Кеппен

Володимир Кеппен (1879–1958) – видатний метеоролог і кліматолог. Основні праці присвячені питанням загальної та синоптичної метеорології та кліматології. Проводив перші аерологічні дослідження, вивчав кліматичні умови багатьох районів Землі. У 1900 році розробив класифікацію кліматів земної кулі (з деякими подальшими, зробленими ним самим, змінами в 1918 та 1936).

Результати, викладені в цій праці, створили йому гарну репутацію в науковому світі, особливо завдяки кривій інсоляції на поверхні Землі. Ця сонячна крива була насправді прийнята лише в 1924 році, коли великий метеоролог і кліматолог Володимир Кеппен зі своїм зятем Альфредом Вегенером застосував цей графік у праці *Klimate der geologischen Vorzeit* (Клімат геологічного минулого) (рис. 29). Після цього Міланковичу було запропоновано у 1927 р. співпрацювати у двох важливих публікаціях: перша – довідник із кліматології (*Handbuch der Klimatologie*), а друга – довідник із геофізики (*Guttenberg's Handbuch der Geophysik*).

Для другого підручника Міланкович написав чотири розділи, розробляючи та формулюючи свою теорію руху полюсів Землі та теорію льодовикових періодів. Цілком усвідомлюючи, що його теорія сонячного випромінювання була успішно завершена і що статті,



які стосуються цієї теорії, були розподілені в окремих публікаціях, він вирішив зібрати та опублікувати їх під однією обкладинкою. У такий спосіб, 1941 р., напередодні війни в його країні, було завершено друкування великої праці «Канон освітлення Землі та його застосування до проблеми льодовикових періодів».

У 50-х рр. ХХ ст. висловлені заперечення проти теорії льодовикових періодів Міланковича. Вони надходили головно від метеорологів, які стверджували, що зміни інсоляції внаслідок змін в елементах орбіти Землі були надто незначні, щоб суттєво збурити кліматичну систему. Однак наприкінці 60-х та 70-х років ХХ ст. дослідження глибоководних відкладів і теоретичні праці з небесної механіки та кліматичного моделювання показали, що погляд Міланковича був правильним і що астрономічно зумовлені зміни інсоляції справді були першо-причиною коливань чвертинних крижаних покривів.

Лише приблизно через 10 років після його смерті в 1958 р. Світове наукове співтовариство почало серйозно звертати увагу на його теорію. У 1976 р. у дослідженні [Hays \(1976\)](#) за допомогою глибоководних осадових відкладів було встановлено, що цикли Міланковича відповідають періодам основних змін клімату за останні 450 000 років, причому льодовикові століття наставали, коли Земля переживала різні стадії орбітальних змін. Кілька інших проектів та досліджень льодовикових кернів у Гренландії та Антарктиді також підтвердили обґрунтованість праці Міланковича.

Наукові дослідження для кращого розуміння механізмів, що спричиняють зміни в обертанні Землі, та того, як конкретно цикли Міланковича у поєднанні впливають на клімат, тривають. Водночас теорія про те, що вони визначають час льодовиково-міжльодовикових циклів, цілком прийнятна.

Ми розуміємо, що цикли Міланковича не можуть пояснити всіх кліматичних змін, що відбулися за останні 2,5 мільйона років або близько того. І що більш важливо – вони не можуть по-



яснити поточний період швидкого потепління, який пережила Земля з доіндустріального періоду (період між 1850 і 1900 рр.), особливо із середини ХХ ст.

По-перше, цикли Міланковича діють на тривалих часових шкалах – від десятків тисяч до сотень тисяч років. На відміну від цього, поточне потепління Землі відбувалося в часі від десятиліть до століть. За останні 150 років цикли Міланковича не сильно змінили кількість сонячної енергії, поглиненої Землею. Насправді супутникові спостереження NASA показують, що за останні 40 років сонячна радіація насправді дещо зменшилася.

По-друге, цикли Міланковича – лише один фактор, який може сприяти зміні клімату, як у минулому, так і в теперішньому. Навіть під час льодовикових періодів зміни масштабів льодовикового покриву та атмосферного вуглекислого газу значною мірою впливали на коливання температури впродовж останніх декількох мільйонів років.

Зараз Земля перебуває в міжльодовиковому періоді, тобто періоді з м'якшим кліматом порівняно з епохами зледеніння. Якби не було впливу людини на клімат Землі, згідно з орбітальними положеннями Землі в циклах Міланковича, наша планета повинна б охолоджуватися, а не теплішати, продовжуючи тривалу тенденцію охолодження, яка розпочалася 6 000 років тому.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

46. Хто висунув гіпотезу про тривалі результуючі наслідки змін положення Землі щодо Сонця?

47. Як називається паломництво Землі навколо Сонця мінливою еліптичною орбітою?

48. Як називається ефект, коли Земля обертаючись, розхитується навколо своєї осі?

49. Який кліматолог співпрацював із Міланковичем?

50. Різке похолодання в ХІХ ст. носить назву ... льодовиковий період.

ТЕСТ

46. Цикли Міланковича включають в себе...

а) ексцентриситет, циркадні ритми, прецесію

б) кут розташування Сонця, нахил осі, прецесію

в) ексцентриситет, нахил осі, прецесію

г) ексцентриситет, нахил осі, кількість сонячної радіації

47. Ексцентриситет – це...

а) міра відхилення від кола

б) міра відхилення від еліпса

в) міра відхилення від екліптики

г) міра відхилення від осі обертання Землі

48. Нахил осі обертання перпендикулярний до...

а) вектору Полярної зірки

б) Південного полюса

в) орбітальної площини Землі

г) площини екліптики

49. Ефект прецесії – це...

а) зміна осі обертання в просторі

б) стабільність осі обертання

в) зміна географічних полюсів

г) зміна магнітних полюсів

50. В якому столітті відбувся Малий льодовиковий період?

а) ХХ ст.

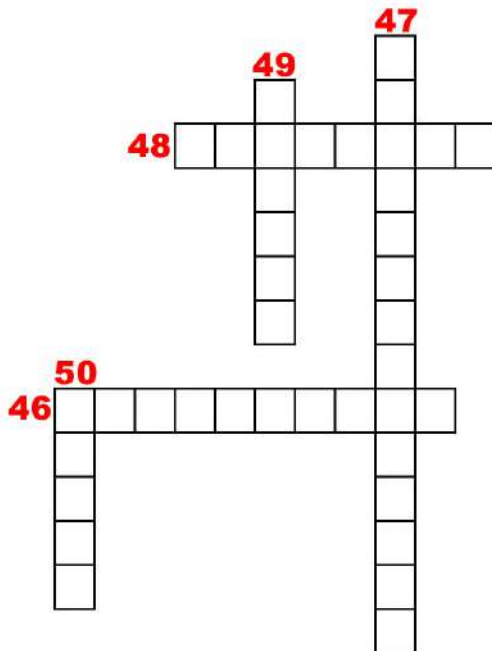
б) ХІХ ст.

в) ХVІІІ ст.

г) ХVІІ ст.



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 46–50)





1.11. «Землетруси» на інших планетах *Чи тремтить Марс?*

Перші сейсмічні спостереження на Марсі проведені через сто років після знаменного 1877 р. – року Великого протистояння, коли були відкриті супутники й «канали» Марса. Досвід земної і позаземної (місячної) сейсмології дозволяє розраховувати, що й на Марсі сейсмологія виявиться провідним методом при вивченні внутрішньої будови планети, зробить свій внесок у розв’язання як фундаментальних загальнопланетарних, так і локальних проблем (походження планети, закономірності її еволюції, характер тектонічної активності, природа магнетизму, проблеми води та ін.).

Ще продовжувалася робота місячної сейсмічної мережі, коли до сейсмічного «патруля» приєдналася третя планета Сонячної системи – Марс. На поверхні Марса планувалася робота двох сейсмічних станцій – вони і летіли на космічних апаратах «Вікінг». Перший сейсмометр, що зробив м’яку посадку на рівнині Хріса, не «розпакувався» і не включив живлення. Зате другий – на рівнині Утопія – працював протягом 19 земних місяців, з 4 вересня 1976 по 3 квітня 1978 р., до повного виснаження джерела живлення (Sagan et al. 1977).

Сейсмологи сподівалися оцінити фон мікросейсм, зареєструвати місцеві, а якщо пощастить, то і далекі марсотрусіння (завдання виявилось складним, оскільки ресстрація велася лише в одній точці), а також вивчити особливості хвилевої картини. Це дозволило б встановити, на що більше схожий Марс – на Землю (де бувають чіткі вступу хвиль від границь) чи на Місяць (де сейсмограма має велику тривалість, а в інтерференції хвиль важко виділити фази, відповідні окремим границям). Результати отримані мінімальні, але навіть вони дозволяють зробити значні висновки.



Сейсмометр вів реєстрацію на плоскій, кам'янистій, червоноуватій рівнині, усіяній каменями різної величини і форми, вкритої тонко-дисперсним шаром ґрунту. Ландшафт нагадував деякі земні пустелі і був каменистим. Навколо тягнулася рівнина з кратерами ударного походження, значно менш розповсюдженими в порівнянні з місячним ландшафтом. На відміну від місячної, місцевість досить згладжена вітровою та водною ерозією. Каменів у точці посадки «Вікінга-2» було більше, ніж у «Вікінга-1». Видно «язики» викидів з 100-кілометрового кратера, розташованого в 200 км від місця посадки (Masursky, Crabill 1976). У пиловій масі навколо місця посадки відобразилися сліди струменів гальмівних двигунів. Вузькі, вільні від каменів улоговини утворюють прямокутну мережу.

Опори «Вікінга-2» заглибилися в ґрунт на кілька сантиметрів, апарат стояв нерівно і погойдувався під поривами вітру. Власне, прилад розташовувався над однією з опор на висоті 1 м від поверхні (рис. 30).

У таких умовах опинився і потім працював більше 1,5 років перший і поки єдиний марсіанський сейсмометр, встановлений на рівнині Утопія в точці $47^{\circ}89'$ пн.ш., $225^{\circ}86'$ зх.д.

Перша сейсмограма з Марса була передана в осінній марсіанський полудень 4 вересня 1976 р. У момент включення сейсмометра на Землі було 00 год 53 хв 01 с за Гринвічем – мить народження марсіанської сейсмології.

Сейсмічна станція включала трикомпонентний сейсмометр, підсилювачі, фільтри, магнітну пам'ять, автоматику для виділення, стиснення в часі, калібрування і передачі сигналу на Землю. Розмір станції $12 \times 12 \times 15$ см, вага 2,2 кг, споживана потужність – 3,5 Вт. Сейсмометри – електродинамічні, налаштовані на реєстрацію швидкості зсуву, їх резонансна частота 4 Гц, загасання 0,6. Частотний діапазон реєстрації 0,1–10 Гц, максимальне збільшення тракту 218 000 (на частоті 3 Гц), мінімально помітний сигнал 2 мкм на 3 Гц і 10 мкм на 1 Гц. Марсіанський



сейсмометр був у 70 разів менш чутливий за місячний (Anderson et al. 1977).

При м'якій посадці вертикальний сенсор одержав нахил 8° (допустимий – 15°), один з горизонтальних виявився направленим на північний захід, другий, ортогональний, – на південний захід.



Рис. 30. Модель космічного апарату «Вікінг-2» та астроном Карл Саган (1934–1996)

Перші 62 марсіанських дні спостереження йшли 6-денними серіями в різних режимах. Коли Марс на 40 днів зайшов за Сонце, реєстрація велася в режимі очікування (нормальному). Передачі на Землю спочатку йшли кожен день, надалі – двічі в тиждень. Кожна команда містила «розпорядження» про режим реєстрації, збільшення на вертикальному і горизонтальному каналах, частоті фільтра, калібрувальному сигналі, часі виконання команди тощо.

Пориви вітру фіксувалися незалежно метеоприладами і сейсмометром, їх можна було порівнювати.



При аналізі марсіанських сейсмограм у земних лабораторіях вдалося відокремити вітрові перешкоди від приладових (робота електродвигуна, ґрунтозабірника, повороту антен): ці перешкоди виявилися більш високочастотними й легко нівелювалися фільтрами.

Основне джерело мікросейсм на Марсі – вітер. Відмічені добові та сезонні варіації напрямку і швидкості вітру марсіанським літом. Перші 60 діб спостережень показали найтихішим нічний час з 18 години (2 години після заходу сонця) до 4 ранку, швидкість вітру не перевищувала 1–2 м/с (вона фіксувалася тільки метеодатчиками – поріг сейсмічної чутливості склав 3 м/с). Зі сходом Сонця вітрові ефекти посилювалися, пориви тривали 1–3 хв, створюючи перешкоди, між ними на 10–50 хв установлювалося затишшя.

У період 60–90 доби з початку реєстрації затишшя тривало з 18 години вечора до 7 ранку, а максимальні пориви до 7–10 м/с починалися біля полудня. Тиха ніч, відносно тихий ранок, збільшення сили вітру пополудні – такий вітровий характер марсіанської осені. При цьому рано-вранці вітер дув з північного сходу, з 7 до 9 години він змінювався на південно-східний, опівдні, продовжуючи обертання за годинниковою стрілкою, ставав південно-західним, а пополудні – північно-західним. Період зміни сезонів був відмічений штормовими вітрами і відповідними мікросейсмічними бурями. На 119-ту добу з 11 ранку вітер перевищив 7,5 м/с, а пополудні спостерігалися пориви до 15,1 м/с. Екстремальна «негода» відбулася на 131–132-гу добу спостережень: вітер перевищував 18 м/с і викликав напруги в конструкції апарату. Очевидно, що мікросейсми були зумовлені тремтінням «Вікінга» під вітром, а не коливаннями ґрунту. Про це свідчить тісна кореляція: амплітуда переміщень сейсмометра пропорційна квадрату швидкості вітру – саме таке співвідношення характеризує турбулентні вихори.



Така погода на рівнині Утопія переважала понад півтора року сейсмічних спостережень. Лише близько 3 місяців у сумі були тихими (Wall 1981). На 12-ту марсіанську добу була одержана сейсмограма імпульсного вигляду, потім на 23-тю, 42-гу, 49-ту і так аж до заповітного 80-го дня – 6 листопада 1976 р. Вісім «кандидатів» претендували на те, щоб представляти марсіанську сейсмічність, і лише один запис витримав «іспит» – інші не «пропустили» метеодані (сейсмічні імпульси припали на сильні пориви вітру).

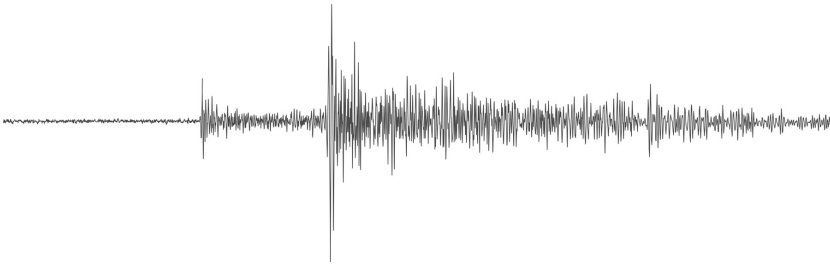


Рис. 31. Сейсмограма з посадкового апарату NASA «InSight»

І хоча 6 листопада метеодатчик не працював, так що незалежних вимірювань швидкості вітру не було, сейсмологи одноставно вирішили, що цей запис – марсотрус. Підстав для такого висновку кілька. По-перше, подія відбулася рано, коли було безвітряно. По-друге, вступ мав досить високу частоту (4,8 Гц), тоді як у вітрових імпульсів вона не перевищувала 3,0–3,9 Гц. А головне, вид сигналу, його зміна в часі дуже нагадував записи, одержані в південній Каліфорнії з апаратури «Вікінг» під час її тестування на Землі. Один із таких записів – запис афтершоку землетрусу в Сан-Фернандо (1971 р.) магнітудою 3,0 на відстані 65 км. Інша – запис хімічного вибуху (102 т) у кар’єрі Корона (еквівалентна магнітуді 2,5) на віддалі 69 км.



З цього унікального марсіанського запису вдалося витягнути вступні поздовжньої і – через 13 с – поперечної хвилі. Якщо вважати, що в марсіанській корі хвилі біжать з тією ж швидкістю, що й у земній, і що сейсмічний поштовх відбувся поблизу поверхні, можна визначити відстань до епіцентра – 110 км. Виміряна амплітуда поперечної хвилі відповідає магнітуді в епіцентрі 2,8 за шкалою Ріхтера, якщо дійсно розсіяння і поглинання хвиль у марсіанській корі схожі на земні. На записі вертикального приладу услід за інтенсивною поперечною хвилею виразно видно ще два виступи, що запізнюються на 10 с. Якщо вважати, що поперечна хвиля біжить зі швидкістю 3,5 км/с, то ці особливості запису можуть бути пояснені двократним віддзеркаленням від межі на глибині близько 15 км. Пізніше з використанням новітніх приладів були підтверджено сейсмічну активність на Марсі (рис. 31).

Що це за межа? Чи відповідає вона земній межі Мохо – розділу між корою і мантією? Адже на карті, побудованій за гравітаційними аномаліями, в припущенні, що середня потужність кори Марса 40 км, а перепад щільності між корою і мантією $0,6 \text{ г/см}^3$, регіону рівнини Утопія відповідають глибини межі близько 15–20 км. Але оскільки запис єдиний, такий висновок неоднозначний. Навіть для Місяця, для якого сейсмограм значно більше, природа межі в корі остаточно не пояснена.

За єдиним записом марсотрусу вдалося зробити перші оцінки сейсмічної активності Марса. На Землі відбувається щорічно 45 землетрусів з магнітудою 6,5. Якби Марс був такий самий активний, як Земля, то, враховуючи його менші розміри, щорічно можна було б чекати 13 таких поштовхів, у середньому по одному в місяць. Проте за три місяці їх відмічено не було (правда, тихі періоди в марсіанській атмосфері були несучільними, мабуть, погода «стерла» дорогоцінні хвилі), зафіксовано всього одну подію з магнітудою близько трьох. Це достатня підстава стверджувати, що або Марс сейсмічно пасивний по відношенню



до Землі, або рівнина Утопія (і взагалі «океанічна» половина планети) – асейсмічна. Із загальних міркувань і аналогій із Землею саме так і повинно бути, тобто сейсмічно активними на Марсі виявляються континентальні, тим більше – вулканічні регіони.

Якби сейсмостанція «Вікінга», менш чутлива, ніж у «Аполлона», опинилася в районі Фра-Мауро на Місяці, то за шість років реєстрації вона записала б всього три дрібнофокусних тектонічних поштовхи (з магнітудою 4,5) і не «відмітила» б жодного припливного глибокофокусного з магнітудою $\sim 1,5$ і глибиною вогнища землетрусу 800 км. Це означає, що з великою вірогідністю можна стверджувати: сейсмічність Марса вища за місячну не більше ніж на порядок.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

51. Який космічний апарат уперше зафіксував марсотруси?
52. Яке основне джерело мікросейсм на Марсі?
53. На якій рівнині працював «Вікінг-2»?
54. Який ландшафт переважав у точці посадки «Вікінга-2»?
55. Чим, окрім метеоприладів, фіксувалися пориви вітру на апараті «Вікінг-2»?

ТЕСТ

51. На якій марсіанській рівнині мав працювати перший сейсмометр Марса?

- а) Аркадія
б) Утопія
в) Ацидалійська
г) Хріса

52. Який фон сподівалися зафіксувати сейсмологи на Марсі?

- а) сейсмічний
б) метеорологічний
в) мікросейсм
г) вітровий

53. Які перешкоди вдалося відділити в земних лабораторіях на марсіанських сейсмограмах?

- а) сейсмічні від приладових
б) вітрові від приладових
в) приладові від радішумів
г) радішуми від сейсмічних

54. З якою швидкістю розповсюджуються сейсмічні хвилі на Марсі у порівнянні із Землею?

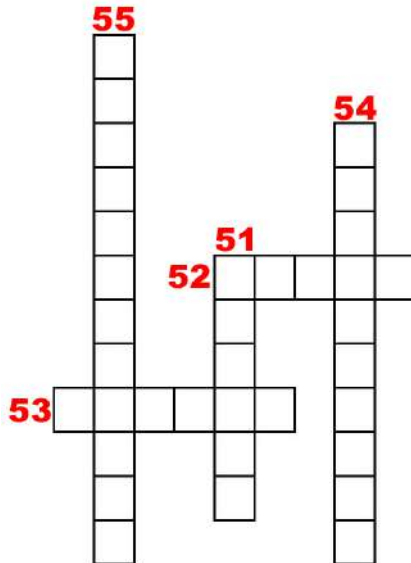
- а) швидше на Марсі, ніж на Землі
б) з однаковою на обох планетах
в) швидше на Землі, ніж на Марсі
г) у різних випадках по-різному

55. Яка з планет сейсмічно активніша: Марс чи Земля?

- а) Земля
б) Марс
в) обидві планети мають однакову сейсмічну активність
г) обидві планети мають слабку сейсмічну активність



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 51–55)





РОЗДІЛ 2 ІСТОРІЯ ЗЕМЛІ

2.1. Перший еон Землі

Яким був догеологічний етап розвитку Землі?

Геологічну історію Землі ми розпочинаємо зазвичай з раннього архею, тобто з часу 4-х млрд років тому, з якого збереглися найдавніші гірські породи. Проте у західній Австралії поблизу *Jack Hills* були знайдені конгломерати, які за детритивним цирконієм датовані 4,4 млрд років, що підтверджує існування земної кори вже у той час і відтерміновує початок формування Землі як повноцінної планети Сонячної системи до 5,5–4,7 млрд років тому, оскільки, перш ніж сформувалася порівняно тонка, нестійка первинна земна кора, яка легко дробилася, розплавлялась і знову виникала, пройшло кількасот мільйонів років (Turner et al. 2020). Через мереживо глобальних тріщин на денну поверхню виливалася величезна кількість магми, заповнюючи великі простори і формуючи «лавові моря», подібні до тих, які збереглися на видимій півкулі Місяця.

Цей еон називають Гадеєм, Катархеєм або Азоєм. Це перший еон у геологічній історії Землі, який не розділений на ери та періоди (рис. 32).

Найістотнішими подіями у ньому стали утворення Землі та Місяця у проміжку 4,7–4,5 млрд років тому. Поверхня нашої планети у той час перебувала в розплавленому стані, а за складом нагадувала сучасний місячний реголіт. Не існувало також атмосфери та гідросфери у сучасному розумінні. Більшість наукових джерел вказують на активність потужних вулканів й інтенсивних викидів газів, хоча окремі дослідження свідчать, що у той період на Землі ще не відбувався жоден із цих процесів.



У Катархеї утворився Місяць. Своїм існуванням він порушує багато правил формування нашої планети. Звідки ж він з'явився насправді?



Рис. 32. Ландшафт Землі під час гадею

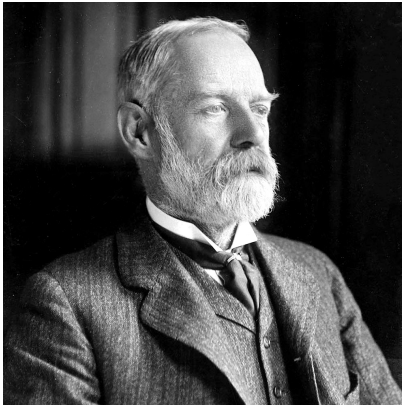
Довгий час існували три головні гіпотези походження супутника Землі. Перша з них стверджувала, що Місяць утворився з матеріалу, який обертався навколо Землі, аналогічно до того, як виникла й сама колиска людства. Головним недоліком цієї теорії було те, що весь запас «космічного каміння» та пилу вичерпався на формування внутрішніх планет. Тому складно пояснити, як могла утворитися Земля з таким величезним кільцем невикористаного матеріалу.

Ідея другої гіпотези полягала в тому, що Місяць утворився у внутрішній частині Сонячної системи незалежно від Землі, а потім, опинившись поблизу земної орбіти, був «захоплений» нашою планетою. Але тут теж є прогалини. По-перше Місяць щорічно віддаляється від Землі на 3,5 см, що у рамках цієї гіпотези пояснити складно. По-друге, ймовірність того, що Місяць був захоплений Землею, але при цьому її власна орбіта не змінилася, мізерна.

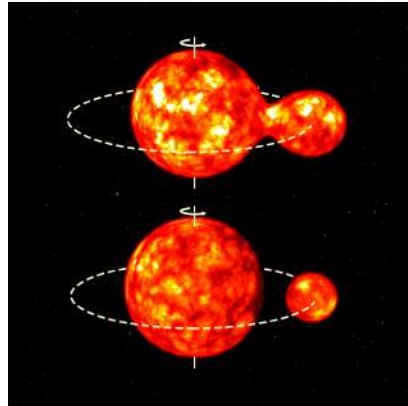
Третя гіпотеза, запропонована Джорджем Дарвіном (рис. 33а), сином Чарльза Дарвіна, пояснювала спіраль місячної орбіти, що розкручується, і пов'язаний із нею факт поступового уповільнення обертання Землі (так, в наш час доба на дві години довша, ніж 600 млн років тому, а у Катархейському еоні вона



ймовірно тривала лише 6 годин). Згідно з цією гіпотезою, під час зародження Земля оберталася ще швидше, внаслідок чого від її екватора відокремився шматок речовини, який вийшов на орбіту і трансформувався у Місяць (рис. 33b). Англійський геолог і геофізик Осмонд Фішер навіть передбачив, що у результаті цього процесу сформувався Тихий океан. Однак невдовзі стало зрозуміло, що Земля не могла обертатися з такою швидкістю.



a



b

Рис. 33. Джордж Дарвін (1879–1958) – англійський астроном і математик, член Лондонського королівського товариства. Син видатного натураліста Чарльза Дарвіна (a);

Гіпотеза Джорджа Дарвіна про походження Місяця (b)

Окрім цих ідей, були ще гіпотеза випаровування, гіпотеза метеоритного бомбардування та гіпотеза багатьох місяців.

Однак програма Аполлон здобула на Місяці докази на користь ще однієї гіпотези, згідно з якою рання Земля зазнала зіткнення по дотичній з тілом розміром з Марс (Тейєю). У процесі зіткнення на орбіті Землі опинилося чимало зірваного матеріалу з обох планет, який і став будівельним матеріалом для порівняно швидкого народження нашого супутника.



Після ударного формування Місяця частина речовини біля поверхні Землі перебувала у газоподібному стані, формуючи так звану первинну важку атмосферу, до складу якої окрім парів легких металів, також входили водяна пара і водень.

У цю ж епоху грандіозна вулканічна активність на Землі супроводжувалася інтенсивним метеоритним бомбардуванням. Земна кора поступово ставала товстішою і міцнішою, лави виливались вже більш зосереджено, лише уздовж великих розломів. Продовжувала еволюціонувати атмосфера, яка дуже відрізнялася від сучасної – азотно-кисневої. Основним джерелом газів були вулканічні виверження, які постачали на її поверхню азот, аміак, вуглекислий газ, водяну пару, метан, водень, інертні гази, соляну, борну та фтористоводневу кислоти. Катархейська атмосфера була практично безкисневою, вона інтенсивно втрачала гелій і водень за рахунок дисипації у космічний простір. Коли земна кора охолола до температури нижче точки кипіння води, остання стала займати певні простори на Землі – виникли перші озерні та морські басейни. Сформувались умови для розмиву і транспортування матеріалу, почали формуватися перші осадові товщі гірських порід.

Отже, догеологічний етап розвитку Землі, іноді званий Місячним, тривав порівняно недовго – від формування первинної земної кори до появи гідросфери.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

56. Коли утворився Місяць?

57. Хто запропонував гіпотезу в якій шматок речовини відірвався від Зкемлі, через її швидке обертання, й утворив Місяць?

58. Що випадало на Землю у великій кількості одразу після формування Землі як планети?

59. Хто передбачив утворення Тихого океану відірваним шматком речовини?

60. Як ще іноді називають догеологічний етап розвитку Землі?

ТЕСТ

56. Як називають догеологічний етап формування Землі?

а) Гадей, Палеозой або Азой

в) Кайнозой, Катархей або Азой

б) Гадей, Катархей або Мезозой

г) Гадей, Катархей або Азой

57. Що стверджує перша розглянута гіпотеза походження Місяця?

а) Місяць утворився з матеріалу, який обертася навколо Землі

в) Місяць утворився у внутрішній частині Сонячної системи незалежно від Землі

б) від Землі відокремився шматок речовини, який вийшов на орбіту і трансформувася у Місяць

г) рання Земля зазнала зіткнення по дотичній з Тейєю, що призвело до утворення Місяця

58. Що стверджує друга розглянута гіпотеза походження Місяця?

а) Місяць утворився з матеріалу, який обертася навколо Землі

в) Місяць утворився у внутрішній частині Сонячної системи незалежно від Землі

б) від Землі відокремився шматок речовини, який вийшов на орбіту і трансформувася у Місяць

г) рання Земля зазнала зіткнення по дотичній з Тейєю, що призвело до утворення Місяця



59. Що стверджує третя розглянута гіпотеза походження Місяця?

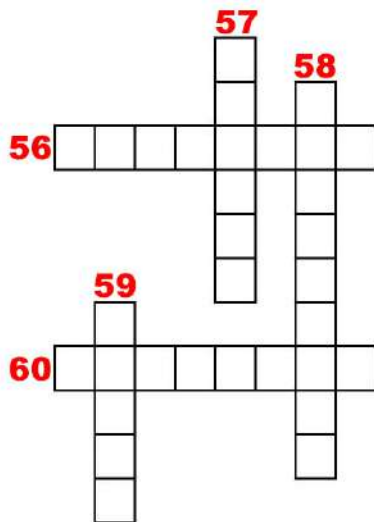
- а) Місяць утворився з матеріалу, який обертався навколо Землі
- б) від Землі відокремився шматок речовини, який вийшов на орбіту і трансформувався у Місяць
- в) Місяць утворився у внутрішній частині Сонячної системи незалежно від Землі
- г) рання Земля зазнала зіткнення по дотичній з Тейєю, що призвело до утворення Місяця

60. Що стверджує загальноприйнята гіпотеза походження Місяця?

- а) Місяць утворився з матеріалу, який обертався навколо Землі
- б) від Землі відокремився шматок речовини, який вийшов на орбіту і трансформувався у Місяць
- в) Місяць утворився у внутрішній частині Сонячної системи незалежно від Землі
- г) рання Земля зазнала зіткнення по дотичній з Тейєю, що призвело до утворення Місяця



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 56–60)





2.2. Початок земної еволюції Як еволюціонувала Земля в архей?

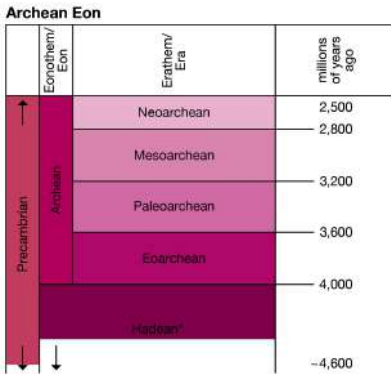


Рис. 34. Архей

Архей (з грецької (*archios*) – стародавній) – геологічний еон, який передуює протерозою. Верхньою межею архею прийнято вважати час близько 2,5 млрд років тому (± 100 млн), нижньою – 3,8–4 млрд років тому (рис. 34). Розпливчастість нижньої межі архею пояснюється двома підходами до її визначення. За першим – вона відзначена появою найдавніших організмів, близько 3,8 млрд років тому.

Згідно з другою – нижньою межею слід вважати остаточне формування земної кори та гідросфери у попередньому еоні – Катархеї. Загалом архей тривав приблизно 1,5 млрд років.

Архей, за сучасними уявленнями, поділяється на 4 ери: еоархей, палеоархей, мезоархей та неоархей, які виділені лише хронологічно (рис. 35).

Еоархей – нижній період архейського еону, що охоплює часовий інтервал від 4-х до 3,6 мільярда років тому. Еоархей примітний тим, що є часом остаточного формування гідросфери та появи перших прокариот⁴⁰, строматолітів⁴¹ і найдавніших гірських порід.

⁴⁰ **Прокариоти** – організми без ядра клітини; здебільшого також без будь-яких інших мембранних органел, таких як мітохондрії чи ендоплазматичний ретикулум.



Наступний період після еоархею – палеоархей. Це час формування першого суперконтиненту в історії Землі – Ваальбари і єдиного Світового океану (de Kock et al. 2009). До цього часу належать і перші віднайдені залишки живих організмів (бактерій) і слідів їхньої життєдіяльності. Палеоархей тривав 400 млн років.



Рис. 35. Ландшафт Землі під час архею

По його завершенні розпочався мезоархей, що тривав з 3,2 до 2,8 млрд років тому. Цей період цікавий передусім розколом Ваальбари і широким поширенням прадавніх форм життя.

Останній період архейського еону – неоархей. Закінчився 2,5 млрд років тому. Це час формування основної маси континентальної земної кори і найстарших частин сучасних континентів.

ТЕКТОНІКА

Для тектоніки архею характерне формування найдавніших ядер континентів (цитів). Їхні релікти поширені на всіх древніх

⁴¹ **Строматоліти** – викопні залишки ціанобактеріальних матів.



платформах, окрім Китайсько-Корейської і Південно-Китайської. З формуванням континентальних ядер пов'язана кольська чи саамська (Балтійський щит), або трансваальська (Південна Африка) складчастість, яка проявилася на рубежі близько 3 млрд років тому, і біломорська складчастість, відома також як кеноранська (Канадський щит) або родезійська (Південна Африка), близько 2,6 млрд років тому.

У догеологічний період на Землі не існувало великих континентальних утворень. Їхньому формуванню заважала потужна глобальна геологічна активність. Але приблизно 3,6 млрд років тому все змінилося і перші великі ділянки суходолу Землі змогли об'єднатися у перший гіпотетичний суперконтинент Ваальбару. Це підтверджують як геохронологічні, так і палеомагнітні дослідження між двома архейськими кратонами або протоконтинентами: Кратоном Каапваль (ПАР) і Кратоном Пілбара (Західна Австралія) (Eriksson et al. 2002). Переконливим свідченням є і збіг стратиграфічної послідовності зеленокам'яних⁴² і гнейсових поясів на обох кратонах.

Приблизно 2,8 млрд років тому перший в історії Землі суперконтинент почав поступово розколюватися.

Про це свідчать геохронологічні та палеомагнітні дослідження, які виявили циркулярний поперечний поділ кратонів⁴³ Каапвааль і Пілбара близько 2,77 млрд років тому (рис. 36).

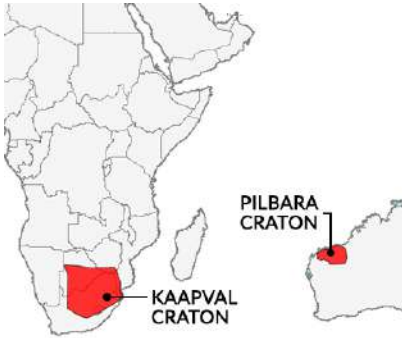
Загалом для архейського еону характерна бурхлива тектонічна активність, яка призводила до частих вулканічних вивержень та землетрусів і підтримувалася високими температурами

⁴² Зеленокам'яні пояси – один із структурних елементів древньої континентальної платформи. Являють собою комплекс порід, що включає ультраосновні і основні вулканіти, вулканогенно-осадові утворення і гранітні інтрузиви.

⁴³ Кратон – платформа із фундаментом докембрійського віку. Стародавні платформи є ядрами материків і займають великі їх частини.



внутрішніх шарів Землі, формуванням планетарного ядра та розпадом короткоживучих радіонуклідів.



**Рис. 36. Кратони
Каапвааль і Пілбара**

Приблизно 3,8 млрд років тому на Землі сформувалися перші достовірно підтвержені метаморфічні та магматичні гірські породи: граніти, діорити й анортозити.

Іноді вік саме цих найдавніших гірських порід приймають за нижню межу архею.

3 млрд років тому настав період активного формування континентальної земної кори. За період у 500 млн років сформувалося до 70 % всієї її маси. Хоча більшість вчених

все ж вважає, що загалом континентальна кора архейського часу становить до 40 % від всієї сучасної континентальної кори.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

На зорі архейського еону води на Землі було надзвичайно мало, замість Світового океану спостерігалися лише розрізнені мілководні басейни. Температура води іноді сягала $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$, що було можливо лише за умови існування щільної вуглекислої атмосфери. Адже з усіх можливих газів лише вуглекислий міг створити підвищений атмосферний тиск. Розраховано, що для архею він становив 8–10 бар. Азоту в ранньоархейській атмосфері містилося порівняно мало (10–15 % її обсягу), а кисень взагалі був майже відсутній (Catling, Zahnle 2020). Вулканічна активність постачала і такі гази, як метан й аміак.

Температура архейської атмосфери завдяки парниковому ефекту досягала майже $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Приблизно 3,4 млрд років тому кількість води на Землі значно збільшилася і виник Світовий океан. У результаті помітно посилювалася гідратація⁴⁴ базальтової океанічної кори. Швидкість росту парціального тиску вуглекислого газу в пізньоархейській атмосфері дещо знизилася. Радикальне ж зменшення відбулося лише на рубежі архею і протерозою, після остаточного формування земного ядра і, як наслідок, різкого зниження тектонічної активності Землі. З цієї ж причини скоротилися й виливи океанічних базальтів у ранньому протерозої. Базальтовий шар океанічної кори став помітно тоншим порівняно з архейським, і під ним вперше сформувався габро⁴⁵-серпентинітовий⁴⁶ шар – головний і постійно оновлюваний резервуар зв'язаної води на Землі.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

В архейських відкладах відсутня скелетна фауна, яка є основою побудови стратиграфічної шкали фанерозойського еону, проте інших слідів органічного життя тут чимало.

До них належать продукти життєдіяльності ціанобактерій⁴⁷ – строматоліти, що являють собою коралоподібні, карбонатні, рідше кремнієві осадові формації, й онколіти – вапнякові або доломітові

⁴⁴ **Гідратація** – оборотне приєднання води до речовин, що перебувають у розчиненому або вільному стані, з утворенням гідратів (кристалічні — кристалогідрати), де вона зберігає свою структурну цілість і здатна термічно або під дією дегідратуючих засобів відщеплюватися (процес дегідратації).

⁴⁵ **Габро** – магматична інтрузивна рівномірнозерниста порода, що складається з основного плагіоклазу, моноклінного піроксену, олівіну або рогової обманки.

⁴⁶ **Серпентиніт** – щільна гірська порода, яка утворилася в результаті серпентинізації гіпербазитів.

⁴⁷ **Ціанобактерії** – тип бактерій, що отримують необхідну енергію через фотосинтез.



структури, схожі до строматолітів, але, на відміну від них, сферичної структури. Онколіти характерні для вапняків Товтр⁴⁸.

Найдавніші строматоліти, виявлені у Канаді, Австралії, Африці, на Уралі і в Сибіру, датовані 3,2 млрд років тому (рис. 37). Варто наголосити на окремих свідченнях про знахідки залишків перших прокаріотів і строматолітів у відкладах віком 3,8–3,5 млрд років, в Австралії і Південній Африці (Schopf et al. 2007).



Рис. 37. Строматоліти (сучасні)

У кременистих гірських породах раннього архею знайдені своєрідні нитчасті водорості. Вони добре збережені, тому можна розгледіти навіть деталі клітинної будови цих організмів. Дискусійними залишаються віднайдені округлі одноклітинні органі-

⁴⁸ **Товтри** – сильно розчленовані, скелясті вапнякові пасма, здебільшого на території України. Це єдиний у світі гірський кряж, що з’явився не внаслідок тектонічних процесів, а утворений живими організмами.



зми акрітархи на багатьох стратиграфічних рівнях пізнього архею, оскільки достовірно їхня поява підтверджена лише в ранньому протерозої (Saito et al. 2003).

Тваринний світ архею значно бідніший, ніж рослинний. Окремі свідчення про знаходження у породах архею залишків тварин стосуються об'єктів, які, найімовірніше, мають неорганічне походження або є продуктами вилуговування строматолітів. Багато скам'янілостей архею залишаються не до кінця розшифрованими і часто не мають точної прив'язки.

Отже, в архейському еоні достовірно відомі прокаріоти – бактерії, переважно хемосинтезуючі та ціанобіонти – анаеробні⁴⁹ і фотосинтезуючі. Ймовірно, в археї з'явилися і перші еукаріоти⁵⁰, морфологічно подібні до сучасних дріжджових грибів.

Найдавніші бактеріальні біоценози, що включали лише продуцентів⁵¹ і редуцентів⁵², були схожі на плівки цвілі (так звані бактеріальні мати), що вкривали днища водойм у прибережних зонах. Оазисами життя часто слугували і вулканічні області, де на поверхню з надр молодішої літосфери надходили сірководень, водень і сірка.

Протягом майже всього архейського еону живі організми були одноклітинними і повністю залежали від природних факторів. Лише на межі архею і протерозою відбулися дві масштабні еволюційні події: з'явилися багатоклітинні організми й амфі-

⁴⁹ **Анаероби** – організми, здатні жити без атмосферного кисню, за рахунок так званого анаеробного дихання.

⁵⁰ **Еукаріоти** – домен одно- та багатоклітинних організмів, що характеризуються переважно полігеомними клітинами, морфологічно сформованим ядром та наявністю мембранних субклітинних органел.

⁵¹ **Продуценти** – організми, які продукують органічні речовини із неорганічних сполук. Організми, які здатні до фото- або хемосинтезу.

⁵² **Редуценти** – організми, що отримують необхідні для життєдіяльності речовини, руйнуючи залишки мертвих рослин і тварин чи відмерлі частини рослин і тварин, абсорбуючи розчинні органічні сполуки.



міксис⁵³. Гаплоїдні організми (ціанобактерії, наприклад) мають лише один набір хромосом. Кожна нова мутація відразу ж проявляється у їхньому фенотипі. Якщо мутація корисна, вона зберігається у процесі природного добору, якщо шкідлива, усувається. Гаплоїдні організми⁵⁴ безперервно пристосовуються до середовища, але принципово нових ознак і властивостей у них не виникає. Статевий ж процес різко підвищує можливість пристосування до мінливих умов середовища, внаслідок створення численних комбінацій у хромосомах. Диплоїдність⁵⁵, що виникла одночасно зі становленням ядра, уможлиблювала збереження мутацій і використання їх як резерву спадкової мінливості для подальших еволюційних перетворень.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

В архейський еон сформувалося багато корисних копалин. Це, передусім, грандіозні родовища залізних руд (залізисті кварцити і джеспіліти), алюмінієвих (кіаніт і силіманіт) і марганцевих. З конгломератами архею пов'язані найбільші родовища золотих і уранових руд; з основними і ультраосновними гірськими породами – великі родовища мідних, нікелевих і кобальтових руд; з карбонатними – свинцево-цинкові родовища. Архейські пегматити є головним джерелом слюди (мусковіт), керамічної сировини і рідкісних металів.

⁵³ **Амфіміксис** – найпоширеніший тип статевого процесу, при якому відбувається злиття ядер чоловічої і жіночої статевих клітин.

⁵⁴ **Гаплоїдні організми** – організми з одинарним набором непарних хромосом.

⁵⁵ **Диплоїдні організми** – організми з парними хромосомами.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

61. Що у перекладі з грецької означає слово «архей»?
62. Як називаються організми без ядра і мембранних органел?
63. Як називався перший суперконтинент?
64. Які утворення сформувалися внаслідок життєдіяльності ціанобактерій?
65. Як називаються стародавні ядра континентів?

ТЕСТ

61. На скільки ер поділяється архей?

- а) 1 в) 3
б) 2 г) 4

62. Стародавнє ядро континенту називається...

- а) щит в) кратон
б) плита г) платформа

63. Який газ домінував в архейській атмосфері?

- а) азот в) кисень
б) вуглекислий газ г) метан

64. Бактеріальні мати називаються...

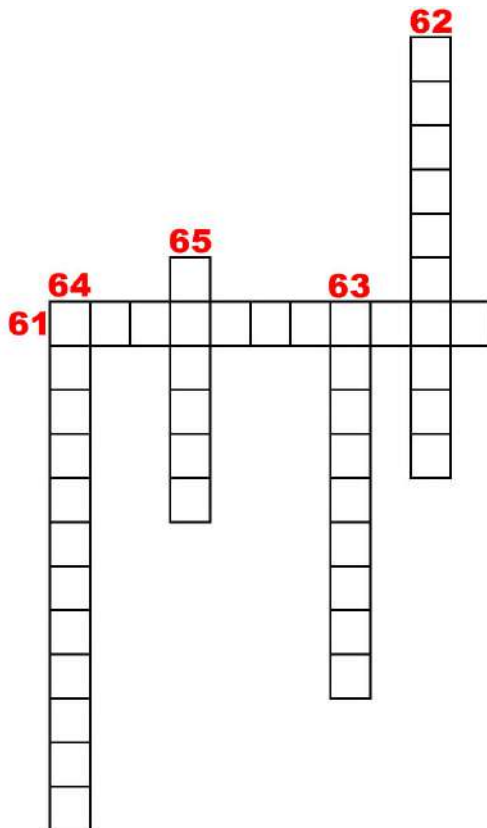
- а) строматолітами в) еукаріотами
б) покаріотами г) ціанобактеріями

65. В архей живі організми були переважно...

- а) одноклітинними в) вірусними
б) багатоклітинними г) ще не було живих організмів



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 61–65)





2.3. Найдовший еон Землі Яким був найдовший еон Землі – протерозой?

Proterozoic Eon

Enothem/ Eon	Erathem/ Era	System/ Period	millions of years ago
Precambrian Proterozoic	Neoproterozoic	Ediacaran	541.0 ± 1.0
		Cryogenian	~635
		Tonian	~720
	Mesoproterozoic	Stenian	1,000
		Ectasian	1,200
		Calymnian	1,400
		Statherian	1,600
	Paleoproterozoic	Orosirian	1,800
		Rhyacian	2,050
		Siderian	2,300
		Siderian	2,500

Рис. 38. Протерозой

Протерозой (з грецької (*proteros*) – перший, старший і (*zoe*) – життя) – найтриваліший геологічний еон, наступний після архею. Так, нижньою межею протерозою вважають час 2,5 млрд років тому. Верхньою – 541 млн років тому ± 1 млн (рис. 38).

За сучасними уявленнями, через низку еволюційних змін і подій протерозой поділений на 3 ери: палеопротерозой, мезопротерозой і неопротерозой (рис. 39).

ТЕКТОНІКА

Протягом протерозойського еону продовжували формуватися ядра континентів з фрагментів найдавніших протоконтинентів – кратонів. Зокрема, під час палеопротерозою сформувалися значні частини щитів Індії, Північного Китаю і Південної Америки. Так, найдавніше ядро Південної Америки – так званий амазонський кратон, займає майже всю північну і центральну частину Бразилії з прилеглими регіонами Венесуели, Гайани і Сурінаму. На схід від амазонського кратону збереглися фрагменти архейського щита.

Ядро континентальної частини Європи також сформувалося під час протерозойської ери – шляхом об'єднання трьох кратонів у єдиний континент Балтика: Фенноскандії, що займає те-



риторію Балтійського щита, який сформувався в архейський час, Волго-Уральського (басейн річки Волги) і Сарматського, що на території України, Молдови і прилеглої частини Румунії. Об'єднання цих трьох кратонів завершилося до кінця палеопротерозою – 1600 млн років тому.



Рис. 39. Ландшафт Землі під час протерозою

Протерозойське походження має і континентальне ядро Індії, яке сформувалося у результаті об'єднання чотирьох кратонів.

Протягом всього палеопротерозою, як і в археї, молодій планеті була притаманна інтенсивна вулканічна діяльність, однак уже з переважанням на суші, а не під водою, як у попередні геологічні епохи. Таку зміну пов'язують зі збільшенням площі і кількості континентів, що стимулювалося накопиченням значних мас земної кори континентального типу.

Наступний після палеопротерозою – мезопротерозой, виразний формуванням суперконтиненту Родинії 1150 млн років тому. Про це свідчать збіги країн літосферних плит Північної Америки й Антарктиди.



900 млн років тому Родина зазнала розколу. У результаті розпаду утворилося принаймні 8 великих фрагментів.

Протягом протерозойської ери відбулося кілька епох тектогенезу (складчастості). Так, близько 2 млрд років тому закінчилася ранньокарельська (Балтійський щит), або ебурнейська (Західна Африка), епоха, що тривала 250 млн років і разом з наступною пізньокарельською епохою (гудзонською для Канадського щита і майомбською для Африки), що відбулася близько 1700 млн років тому, зіграла вирішальну роль у формуванні фундаментів усіх древніх платформ. Тектоно-магматичні епохи в інтервалі 1700–1400 млн років (наприклад, лаксфордська у Шотландії) виявлені лише на окремих континентах.

Планетарне значення має готська (Балтійський щит), або ельсонська (Канадський щит), епоха, що мала місце в Ектазії і Стенії – періодах мезопротерозою. Вона проявилася не лише у складчастості геосинклінальних утворень, а й у повторному метаморфізмі і гранітизації окремих зон у межах фундаменту древніх платформ. Наступна епоха – дальсландська (Балтійський щит), Гренвільська (Канадський щит), або Сатпурська (Індостан), на межі Ектазії і Стенія, була першою великою епохою складчастості геосинклінальних поясів Південної Америки і Вест-Індії.

Нарешті з протерозоєм пов'язана і байкальська складчастість, що відбувалася протягом Тонія й передувала каледонській тектонічній епосі раннього палеозою. Термін «байкальська складчастість» запропонував у 1932 р. Микола Шатський. Тривалість складчастості спочатку визначали від завершення формування товщі підняття Балтійського щита (1200 млн років тому) до нижнього або навіть до середнього кембрію (500 млн років тому). Після детального вивчення геологічної будови Південної Скандинавії виявлена ймовірність існування у цьому відрізку історії Землі не однієї, а двох епох: дальсландської (або ранньобайкальської) і байкальської (або пізньобайкальської) з



межею між ними близько 900 млн років. Типовими районами розвитку геосинклінальних утворень, сформованих в результаті байкальської складчастості (байкаліди), є складчасті системи південного обрамлення Сибірської платформи. Байкаліди утворюють древні ядра багатьох палеозойських складчастих масивів Уралу, Таймиру, Казахстану, Тянь-Шаню, ймовірно, і значних просторів фундаменту Західносибірської рівнини. Масиви байкальської складчастості, тією чи іншою мірою регенерованих альпійськими тектонічними рухами, встановлені на Кавказі, в Афганістані, Ірані і Туреччині. Одновікові з байкалідами структури добре розвинені на всіх континентах. Структурний план Землі, закладений протягом байкальської складчастості, визначив подальшу еволюцію найголовніших структурних елементів літосфери.

У межах багатьох древніх платформ байкальська тектонічна епоха стала часом формування давніх тектонічних грабенів (авлакогенів), які заповнювалися потужними товщами осадових і осадово-вулканогенних порід і складають нижні горизонти чохлаів цих платформ.

Подібні авлакогени виявлені завдяки бурінню і геофізичним дослідженням у глибоких частинах Східноєвропейської та Сибірської платформ.

Південні платформи Землі в період байкальської складчастості зазнали потужних процесів магматизму і метаморфізму.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Найважливіші зміни в атмосфері та гідросфері цього часу пов'язані з активним розвитком фотосинтезу та окисно-відновними процесами відповідно. Парникові гази, такі як вуглекислий і метан, яких було значно більше в архейській атмосфері, поступово фіксувалися і руйнувалися завдяки фізичним й органічним процесам – вони ж, очевидно, вплинули і на призем-



ні температури атмосфери й океану та відіграли важливу роль у великих зледеніннях Землі у протерозої.

Льодовикові відклади палеопротерозойського часу знайдені у Північній Америці, Північно-західній Європі, Індії, Південній Африці та Західній Австралії. Геологічні формації Гуронської супергрупи товщиною до 12 км свідчать про три льодовикові епізоди та кілька періодів із значною кількістю вільного кисню в атмосфері. Так звана «киснева катастрофа» пов'язана з виділенням великої кількості поживних речовин до Світового океану під час танення льоду, накопиченого першим Гуронським зледенінням у межах від 2,45 до 2,3 млрд років тому. Далі такі події почергово повторювалися. Водночас у проміжку між 1 млрд років до 720 млн років тому виділяється період Тоній, з якого віднайдено мало свідчень про зледеніння та формування родовищ залізних руд.

Після нього розпочався один із наймасштабніших та найсуворіших льодовикових періодів в історії Землі – Криогеній. Про нього свідчать льодовикові відклади того часу у тропічних широтах. Саме з цими подіями пов'язують гіпотезу про так звану Землю-сніжку (Kopp et al. 2005). Водночас, за останніми дослідженнями газів, захоплених кристалами солі, уже на початку Едіакарського періоду – у час чергового масштабного потепління і, відповідно, окислення, вміст кисню в атмосфері досяг 11 %.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

На межі архею та протерозою перехід атмосферного складу від хімічно активного вуглекислотного до нейтрального, безумовно, позначився й на організації земного життя.

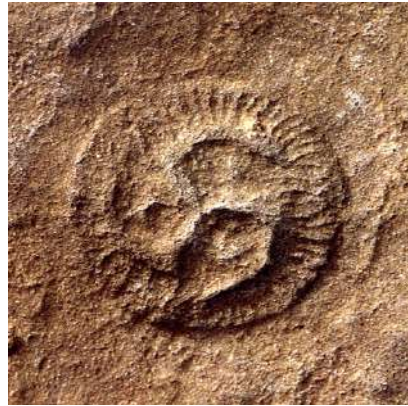
Очевидно, саме ця подія стала поштовхом до виникнення принципово нових – еукаріотних форм одноклітинних організмів і водоростей з чітко відокремленим ядром та іншими органами. Серед ранньопротерозойських еукаріотів були представники 3-х царств: грибів, рослин і тварин, різноманітність яких



особливо зросла в другій половині протерозою – 1700–542 млн років тому (раніше цей період називався рифей). На початку цього часового проміжку з'явилися одноклітинні рослини, пізніше – приблизно 1 млрд років тому – багатоклітинні рослини (зелені і червоні морські водорості) й одноклітинні тварини, і нарешті 700 млн років тому виникли перші представники багатоклітинних тварин.



a



b

Рис. 40. Деякі виявлені організми протерозою – чарнії (a); трибрахідіуми (b)

До найдавніших знахідок таких тварин належать чарнії (рис. 40a) і чарнодискуси з товщі Чарнвуд-Форест у Великобританії (Kenchington et al. 2018). Багата фауна неопротерозою відкрита в районі Едіакарій у Південній Австралії, де знайдено близько 1600 екземплярів тварин, на підставі вивчення яких австралійськими геологами Глеснером і Уейдом описано близько 30 видів. Понад 60 % колекції цього району складають кишковопорожнинні. Особливо численні медузи (белтанелли і цикло-медузи), а також форми, близькі до сучасних морських пер. Велика різноманітність кільчастих і 5 видів багатоцетинкових че-

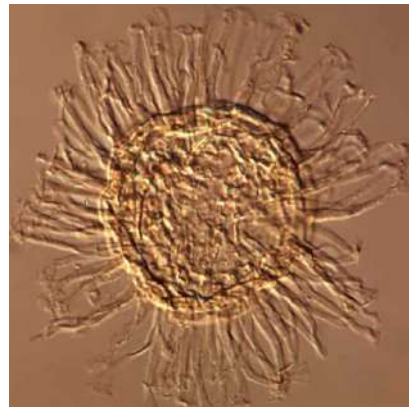


рвів. Окрім них, є членистоногі і деякі несистематизовані тварини (трибрахідіуми) (рис. 40b).

Різноманітна, раніше не відома фауна цього району отримала окрему назву – едіакарської (McIlroy et al. 1998). Згодом представники цієї фауни були знайдені в багатьох місцях земної кулі, зокрема у Північній і Південній Америці, в Африці, на Ньюфаундленді, в Україні – в каньйоні Дністра і на Літньому березі Білого моря, де відомі медузоїдні та інші форми. У свердловинах на Східноєвропейській платформі, приблизно в тих же горизонтах, знайдені своєрідні вендії і белтанелліформіси. Окремі знахідки представників едіакарської фауни віднайдені і в окремих регіонах Сибіру.



a



b

Рис. 41. Деякі виявлені організми протерозою – кнідарії (a); акрітархи (b)

Отже, представники едіакарської фауни відомі по всій Землі, тобто розвиток м'якотілих багатоклітинних тварин, що не мають мінерального скелета, таких як кнідарії (рис. 41a), кільчасті і плоскі черви, членистоногі і голкошкірі, був загальнопланетарним. Життєдіяльність тварин протерозойської ери виявлена у



слідях повзання, проїдання ґрунту, виритих нір та інших відбитків. Особливо вражають мікрофосілії. Вони представлені не лише бактеріями, ціанобіонтами, безхребетними тваринами, нитчастими водоростями, а й, очевидно, спорами мохів. Якщо це так, то першими наземними рослинами могли бути верхньопротерозойські мохи.

Звісно, наприкінці протерозою значного поширення зазнали і строматоліти, сформовані ціанобіонтами в симбіозі з бактеріями, що стали першими будівельниками рифів в історії Землі. Строматолітові споруди характерні для мілководних морів усього тодішнього світу. Проте приблизно 700 млн років тому їхнє різноманіття починає різко скорочуватись. За однією з теорій, причиною стали еукаріотні травоядні організми, діяльність яких ініціювала кремнеземну біомінералізацію.

Важливе значення для розподілу мезо- і неопротерозою мають мікрофітоліти, що являють собою різноманітні біогенні конкреції і згустки, приурочені до карбонатних порід. У відкладах також зустрічаються акритархи – дрібні тільця рослинного походження розміром 20–50 мкм, які мають певне стратиграфічне значення (рис. 41b).

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

Морські і континентальні відклади мезо- і неопротерозою поширені на всіх материках, хоча платформи в протерозої займали меншу площу, ніж в палеозої, особливо в Південній півкулі. На великих просторах плоских поверхонь платформ відбувався розмив нижньопротерозойських порід, складених гнейсами і гранітами. Продукти руйнування гірських порід накопичувалися в прогинах; так формувалися товщі кварцових і аркозових пісковиків на Східноєвропейській, Північноамериканській та деяких інших платформах. У зовнішніх прогинах геосинклінальних поясів поруч із піщаними породами відкладалися гли-



нисті товщі, карбонатні породи із строматолітами і, в окремих випадках, фліш⁵⁶.

В кінці протерозойської ери, в епоху байкальської складчатості на великих площах відклалися моласи⁵⁷.

До відкладів верхнього протерозою приурочені родовища залізних руд (Південний Урал, Єнісейський кряж, Тянь-Шань), фосфоритів (Західний Сибір, Прибайкалля). З карбонатними товщами пов'язані свинцево-цинкові родовища (Ангара).

В Екваторіальній Африці з породами протерозойської ери пов'язані багаті родовища мідних, кобальтових й уранових руд. Відклади термінального неопротерозою на Сибірській платформі включають газоконденсатні родовища (Іркутська область).

Протерозойський еон став винятково важливим часом історії Землі, адже саме тоді відбулись визначальні еволюційні зміни, що сформували сучасне обличчя нашої планети.

⁵⁶ **Фліш** – осадові породи, теригенна (іноді вулканогенно-теригенна) геологічна формація, яка характеризує певний період розвитку седиментаційного басейну.

⁵⁷ **Моласа** – потужна товща уламкових гірських порід (пісковиків, конгломератів, мергелів, глин).



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

66. Який суперконтинент сформувався у мезопротерозої?
67. Як називається стародавній грабен?
68. Які тварини належать до найдавніших знахідок?
69. Яку назву отримала фауна протерозою?
70. У якому періоді вся Земля вкрилася льодом?

ТЕСТ

66. На скільки ер поділяється протерозой?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

67. Збільшення кількості кисню в протерозойській атмосфері Називається...

- а) атмосферна катастрофа
б) киснева катастрофа
в) повітряна катастрофа
г) протерозойська катастрофа

68. Термін «Земля-сніжка» означає...

- а) всесвітнє зледеніння
б) довгі зими
в) потужні снігопади
г) великі айсберги

69. До едіакарської фауни належать...

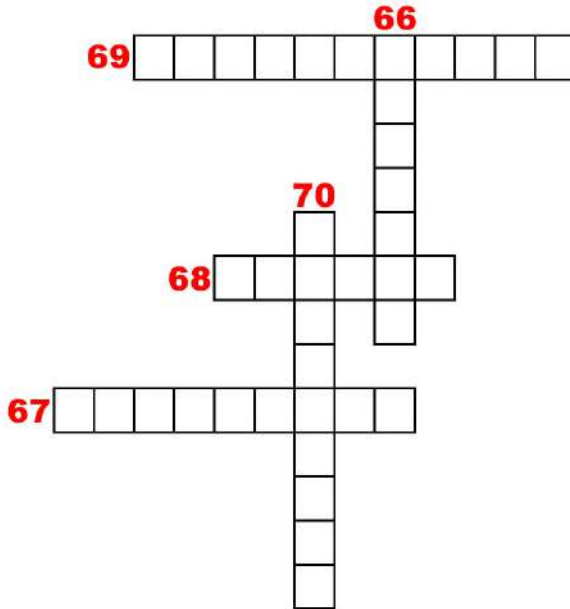
- а) чарнії, кнідарії, губки
б) чарнії, морські лілії, акрітархи
в) медузи, кнідарії, акрітархи
г) чарнії, кнідарії, акрітархи

70. Акрітархи більше схожі на...

- а) рослин
б) тварин
в) грибів
г) вірусів



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 66–70)





2.4. Кембрійський період

Як змінилася Земля в кембрійському періоді?

Cambrian Period

Phanerozoic	Erathem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago
Phanerozoic	Paleozoic	Cambrian ¹	Furongian	Stage 10	485.4 ± 1.9
				Jiangshanian	~489.5
				Paibian	~494.0
				Guzhangian	~497.0
				Drumian	~500.5
			Series 3	Stage 5	~504.5
				Stage 4	~509.0
			Series 2	Stage 3	~514.0
				Stage 2	~521.0
				Stage 1	~529.0
Terreneuvian	Fortunian		541.0 ± 1.0		

Рис. 42. Кембрійський період

Кембрійський період (кембрій) – перший геологічний період палеозойської ери і фанерозойського еону загалом. Почався $541,0 \pm 1,0$ млн років тому, а закінчився $485,4 \pm 1,9$ млн років тому. Отже, кембрій тривав приблизно 56 млн років (рис. 42).

У кембрії виділяють чотири епохи: Тереновіанську, так звану Епоху 2, Мьолінгіанську, або Епоху 3, і Фуронгійську (рис. 43).

ТЕКТОНІКА

На початку кембрійського періоду суперконтинент Родинія остаточно розпався і на його місці виник новий континент Гондвана у Південній півкулі. У цей час існували два великих океани – палео-Атлантичний і палео-Азіатський, в центральних частинах яких розташовувалися серединно-океанічні хребти. Велика частина Гондвани протягом майже всього кембрію залишалася сушею, в межах якої переважали височини, рівнини і гірські масиви. Море періодично наступало лише на крайні частини цього континенту.

Наприкінці кембрійського періоду розпочалися активні фази каледонської складчастості – Фінмаркська та Ємтландська. Каледонська складчастість особливо чітко проявилася у Великобританії, на Скандинавському півострові, Шпіцбергені, Ньюфаундленді, в Казахстані, Західних Саянах і Аппалачах.

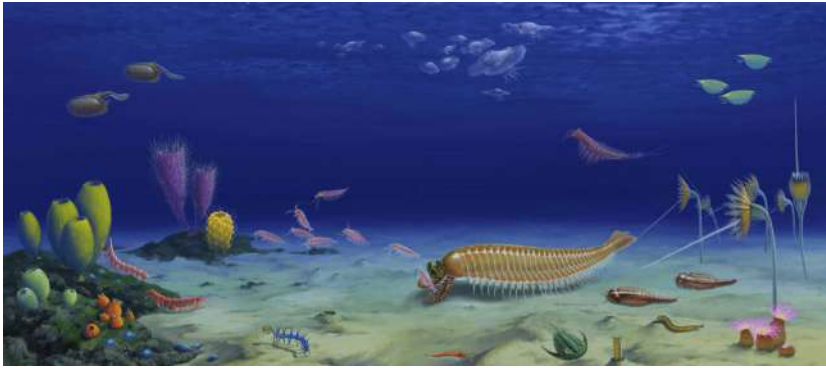


Рис. 43. Ландшафт Землі під час кембрійського періоду

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

З відступом протерозойських льодовиків клімат Землі поступово теплішав. Упродовж кембрію не виявлено суттєвих зледенень. Жоден з існуючих на той час материків не розташовувався поблизу полюсів, тому температура суші залишалася досить високою. Глобальний клімат був, імовірно, тепліший та однотипніший за сучасний. З відступом протерозойських льодовиків рівень моря значно піднявся. Низькі регіони, такі як Балтика, були затоплені, а значна частина світу охоплювалася мілкими епіконтинентальними морями. Відповідно, такі умови сприяли процвітанню та подальшій еволюції морських живих організмів. Хоча загалом кембрійський клімат і називають парниковим, проте упродовж нього відбувались коливання рівня океану, які пов'язують із циклами Міланковича та можливою динамікою Земної мантії (див § 1.10).

Під час кембрію океани поступово насичувались киснем. Незважаючи на те, що до початку періоду в атмосфері уже було досить багато кисню, лише в кембрії, коли значно зменшилась кількість аеробних бактерій, зріс рівень кисню в океанічних водах. Цей розчинений кисень, можливо, спровокував Кембрійський вибух.



ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

Так званий Кембрійський вибух, який відбувся на самому початку Кембрійського періоду – це раптова поява і швидке розселення форм з твердим мінеральним скелетом: фосфатним, вапняним, кремнієвим (Marshall 2006). До них належать хіоліти, акрітархи, хіолітельмінти, строматопороїдії, гастроподи, мохуватки, пелециподи (двостулкові), брахіоподи (плечоногі) і археоціати – найдавніші рифоформуючі організми, які повністю вимерли до кінця раннього кембрію.

У кембрії рослини були представлені здебільшого водоростями. Питання про існування вищих наземних рослин в цей час залишається відкритим: відомі нечисленні суперечливі залишки і відбитки, видова приналежність яких досі невизначена.

Головними представниками тваринного світу кембрійського моря були схожі на ракоподібних трилобіти (рис. 44а). Панцир трилобіта був поділений на три повздовжні та поперечні частини. Ротовий отвір містився на нижньому боці голови; на верхньому – розташовувалася пара очей. Трилобіти пересувалися морським дном, збираючи і поїдаючи дрібні організми та їхні рештки. Водночас із трилобітами стародавні моря заселяли примітивні плечоногі, голкошкірі, черв'яки, медузи та губки.

Перші праці, присвячені трилобітам, були переважно, описовими, але вже у ХІХ столітті з'являються спроби класифікувати цю групу тварин (Броньяр у 1822 році і Барранд у 1852 році). Трилобіти і зараз привертають увагу багатьох дослідників через важливе стратиграфічне значення, оскільки знахідки їхніх скам'янілостей в палеозойських відкладах надзвичайно часті (Красилов 1977).

На трилобітів полювали аномалокаріси – членистоногі з класу дінокарід, які використовували для плавання гнучкі бічні лопати (рис. 44б). Це найбільші тварини кембрійського періоду: довжина тіла зазвичай не перевищувала 60 см, але інколи досягала 2 метрів.



Судячи з будови ротової частини та наявності хапальних щупалець, аномалокаріси вели хижий спосіб життя, хоча здатність їхніх щелеп розгризати панцирі трилобітів і досі залишається дискусійним питанням – і це незважаючи на те, що сліди укусів аномалокарісів знайдені на відбитках трилобітів. Можливо, вони харчувалися «м'якими» трилобітами, які скинули панцир під час линьки, але помилково хапали і «твердих», які вже її закінчили.



a



b

Рис. 44. Деякі організми кембрійського періоду – трилобіт (a); аномалокаріс (b)

З боків тіла аномалокаріса були лопаті, що нагадують пароподії кільчастих червів, за допомогою яких він активно плавав. Мав віялоподібний хвіст. Для нього характерна велика голова, на якій розташовувалися великі очі діаметром близько 3 см, що забезпечували тварині відмінний зір.

Рештки аномалокаріса тривалий час не могли ідентифікувати – вчені ніяк не могли зрозуміти, як міг виглядати їхній власник. Але у 1892 році, коли були знайдені його довгі ротові придатки, палеонтологи вирішили, що вони, очевидно, належать якомусь примітивному представнику ракоподібних. Пізніше, у



1911 році, були виявлені частини кільцеподібного рота, які спочатку ідентифікували як рештки давньої медузи. І лише у 1980-х роках стало зрозуміло, що ротові придатки і пластини рота належать одній і тій самій тварині ([Whittington, Briggs 1985](#)). Скам'янілості аномалокаріса вперше були знайдені в XIX ст. в сланцях Берджес в Канаді. Відтоді у різних частинах світу (особливо в Китаї та Австралії) вчені знайшли кілька повних скам'янілостей цієї дивовижної тварини.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

Корисні копалини кембрійського періоду відносно бідні у порівнянні з іншими періодами. В кембрії сформувалися перші великі промислові родовища фосфоритів (Казахстан, Китай, Монголія). Відомі родовища вуглеводнів (Іркутський амфітеатр, балтійський регіон, Хассі-Месауд в Алжирі). Промислове значення мають родовища кам'яної солі на Сибірській платформі, в США, Пакистані, Індії. Відомі родовища колчеданно-поліметалічних руд (Сибір), свинцю – у Північній Африці, марганцю – в Кузнецькому Алатау і бокситів (Східний Сибір).



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

71. Які рослини типові для кембрійського періоду?
72. Які тварини найтиповіші для кембрійського періоду?
73. Який хижак кембрійського періоду був віднайдений в сланцях Берджес?
74. Який новий континент виник у кембрійському періоді?
75. Активна фаза якої складчастості розпочалася наприкінці кембрійського періоду?

ТЕСТ

71. На скільки епох поділяється кембрійський період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

72. Кембрійський вибух стався внаслідок...

- а) вибуху вулкана
б) вибуху від падіння астероїда
в) виникнення великої кількості нових живих організмів
г) вибуху від зіткнення континентів

73. Чи були великі зледеніння в кембрійському періоді?

- а) так, були
б) ні, не було
в) були, але не великі
г) нам про це нічого не відомо

74. Які перші промислові родовища сформувалися у кембрійському періоді?

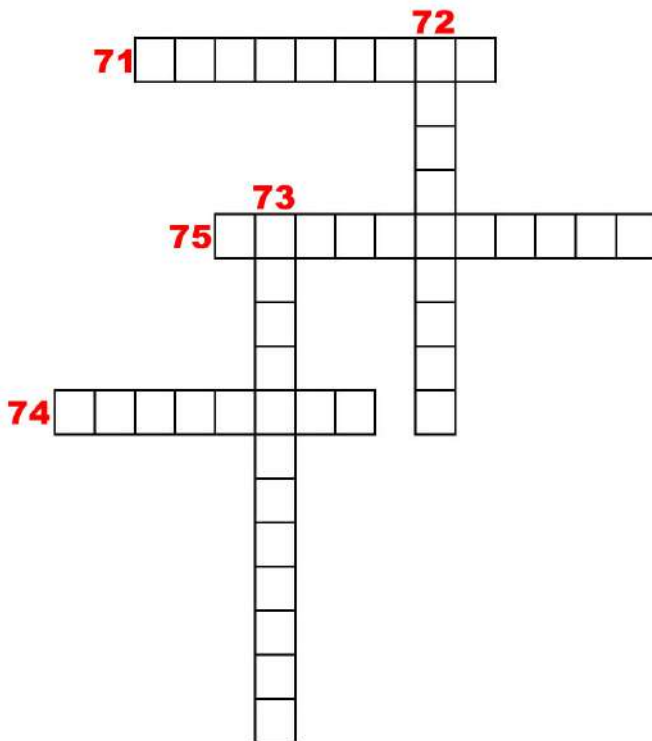
- а) фосфоритів
б) вуглеводнів
в) кам'яної солі
г) свинцю

75. Чи розташовувалися материки в кембрійському періоді поблизу полюсів?

- а) так
б) ні
в) лише біля Північного полюса
г) лише біля Південного полюса



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 71–75)





2.5. Ордовицький період

Чим особливий ордовицький період?

Eonothem/ Eon	Erathem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago		
Phanerozoic	Paleozoic	Ordovician	Upper	Hirnantian	443.8 ± 1.5		
				Katian	445.2 ± 1.4		
				Sandbian	453.0 ± 0.7		
			Middle	Darriwilian	458.4 ± 0.9		
				Dapingian	467.3 ± 1.1		
			Lower	Floian	470.0 ± 1.4		
				Tremadocian	477.7 ± 1.4		
							485.4 ± 1.9

Ордовицький період (ордовик) – другий геологічний період палеозойської ери тривалістю 42 млн років. Почався 485,4 ± 1,9 млн років тому, а закінчився 443,8 ± 1,5 млн років тому (рис. 45).

В ордовіку виділяють три епохи: Нижню, Середню і Верхню (рис. 46).

ТЕКТОНІКА

В ордовицькому періоді розміри багатьох континентів та їхнє положення на земній сфері зазнали істотних змін. Лише Гондвана в ранньому і середньому ордовіку зберегла колишні розміри і приблизно те саме розташування. Як і раніше, існували два великих океани – палео-Атлантичний і палео-Азіатський. У порівнянні з кембрієм збільшилися площі епіконтинентальних морів, які розташовувалися на території сучасної Австралії і Південної Америки (Goldman et al. 2020). У північній півкулі відбувалися зближення Сибірського і Китайського континентів, тимчасове замикання у південній частині палео-Атлантичного океану і формування океану палео-Тетіс. Останній відділяв молоду Лавразію від Гондвани. У пізньому ордовіку морські басейни, розташовані на периферії континентів, – зникли. У результаті регресії істотно збільшилася площа суші. Південний полюс у цей час розташовувався на південній околиці Гондвани.

Рис. 45. Ордовицький період



Характерною особливістю ордовицького періоду є різке зростання тектонічної і вулканічної діяльності. Інтенсивні підняття відбувалися на периферії платформних областей на межі ордовіка і силуру. В результаті потужних тектонічних рухів, викликаних зіткненням літосферних плит, на окраїнах платформ виникли складчасті споруди – так звані епікаледонські гірські споруди. У цей же час сформувалися стійкі, але невеликі за розмірами масиви (мікроконтиненти або мікроплити).

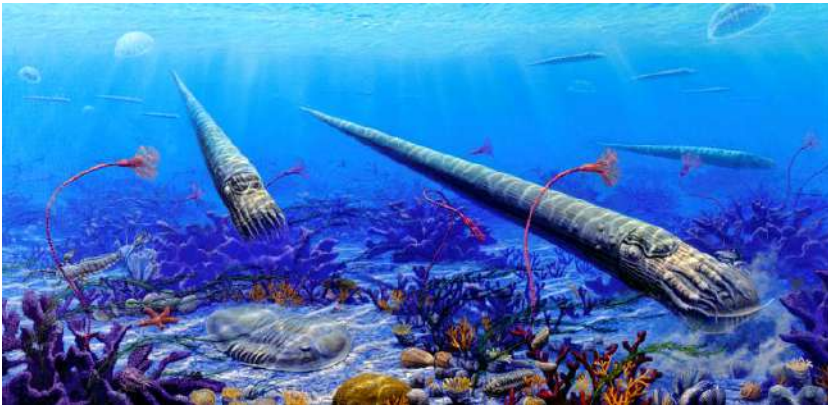


Рис. 46. Ландшафт Землі під час ордовицького періоду

Площа платформ збільшувалася завдяки приєднанню нових областей, які зазнали складчастості. Каледонський тектонічний етап супроводжувався інтенсивним магматизмом, утворенням величезних розломів земної кори і активними переміщеннями літосферних плит. У результаті таких зіткнень вони дробилися, відколювалися і насувалися одна на одну. Гірські масиви Скандинавії, півночі Британських островів, Шпіцбергена, Гренландії, Ньюфаундленду, приатлантичної частини Північної Америки утворилися завдяки інтенсивним здійсненням протягом всього ордовицького періоду. Каледонські складчасті структури відомі на Новій Землі, в



Центральному Казахстані, Північному Тянь-Шані, Алтаї, Саянах, Забайкаллі, Таймирі та в інших районах Землі.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

На початку ордовицького періоду клімат був дуже спекотним через високий рівень CO₂, що сприяв розвитку парникового ефекту. Реконструйовано температуру океанічних вод, яка сягала +45 °С, що загалом обмежувало диверсифікацію складних багатоклітинних організмів (Barnes et al. 1996). Та з часом клімат ставав прохолоднішим, і близько 460 мільйонів років тому температура океану знизилась до температури сучасних екваторіальних вод.

В ордовіку рівень океану був найвищий з-поміж інших періодів палеозою. Незначні висоти поверхні суші сприяли накопиченню шельфових відкладів мілководних морів. Рівень океану повільно, проте безперервно піднімався протягом усього раннього ордовіка із незначним зниженням у середині періоду. Регіонально відбувались регресії, та загалом на початку пізнього ордовіка підвищення рівня океану тривало. Далі рівень, як і температура океанічних вод, знижувалися протягом наступних 30-ти мільйонів років, що призвело до розвитку Гірнантійського зледеніння.

Упродовж Ордовицького періоду в межах Гондвани були поширені мілководні моря. Неглибокі, чисті водні простори сприяли росту організмів, які накопичували карбонати в своїх оболонках і твердих частинах тіла. На межі ордовіка і силуру почав формуватися океан Панталасса, який охоплював більшу частину Північної півкулі (Servais et al. 2023). Серед інших менших океанів вирізнялись палео-Тетіс, Хантійський океан, який пізніше був закритий океанами Япет і Рейським.

Збереглися свідчення про існування льодовиків на масивах суходолу в ордовицькому періоді, які ми тепер знаємо як Афри-



ка та Південна Америка. У той час ці частини суші, вкриті крижаними шапками, розташовувались на Південному полюсі.

Рештки тварин та відклади ордовіка свідчать про зміни клімату від прохолодного на початку періоду до теплого наприкінці.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

В ордовіку провідна роль належала безхребетним наутилоїдеям. Вони мали пряму, величезну багатокамерну раковину, розфарбовану строкатими яскравими малюнками. Вели активний придонний спосіб життя і були хижаками. Розмір їхніх раковин здебільшого не перевищував 2–3 м. Одними з наутилоїдей ордовіцького періоду були ендocerіди – головоногі молюски (рис. 47а). Найімовірніше, це найбільші мешканці морів того часу: їхні раковини досягали понад 5 метрів у довжину. Традиційно палеонтологи вважали, що ендocerіди – хижаки. Однак порівняння сучасних глибоководних восьминогів, які харчуються зоопланктоном, а також уважний аналіз будови ендocerід, у яких не вдається виявити адаптацій для хижацького способу життя, дають підстави припустити, що і вони були фільтраторами. Приклади вусатих китів і китової акули демонструють, що гігантизм серед тварин, які харчуються планктоном, – цілком нормальне явище.

Великими хижаками були й гігантські ракоскорпіони. Вони мали пласке тіло, що складалося з головогрудей і довгого дванадцятичленного черевця, яке закінчувалося шипом з отруйною залозою (рис. 47б). Від головогрудей відходили ротові і рухові кінцівки. Гігантські ракоскорпіони – найбільші водні членистоногі, які коли-небудь жили на Землі. Є вагомі підстави вважати їх взагалі найбільшими членистоногими в історії нашої планети (Lamsdell et al. 2013). Довжина тіла птериготуса – одного з найбільших ракоскорпіонів – досягала 2,5 м, а разом із клешнями усі 3 м! З шести пар членистих черевних кінцівок ракоскорпіонів найперша (хеліцери) розташовувалася біля ротового отвору. У гігант-



ського птериготуса хеліцери були довгими і закінчувалися страхітливими клешнями. З їхньою допомогою тварина хапала здобич. А ось задня пара кінцівок зовні нагадувала лопаті або весла і була пристосована для плавання. Довжина дорослих ракоскорпіонів зазвичай не перевищувала 3 м. Середовищем їхнього існування були численні в той час опріснені великі лагуни. У них жили трилобіти і різні види риб, на яких і полювали ці дивовижні тварини.

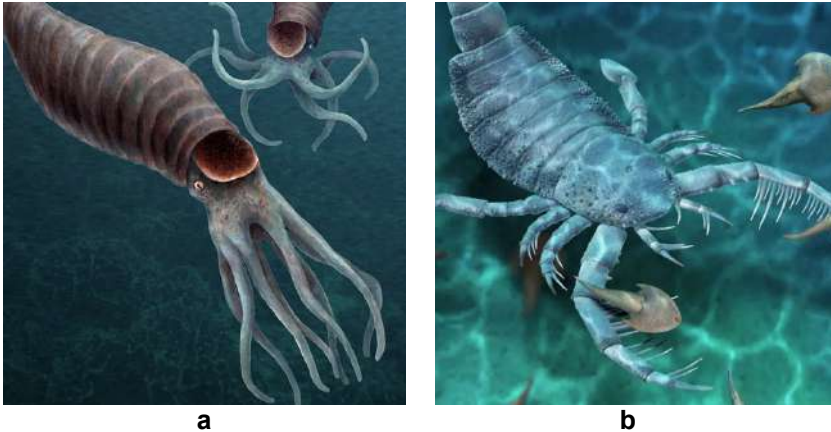


Рис. 47. Деякі організми ордовицького періоду – ендоцеріди (а); ракоскорпіони (b)

У морях з нормальною солоністю жили примітивні хребетні – безщелепні панцирні риби розміром від декількох десятків сантиметрів до 3 м (Sansom et al. 2001). Вони мали електричні органи, які ефективно виконували функції як захисту, так і нападу. В ордовицьких морях мешкали й інші групи організмів. До них належать вільно плаваючі й донні форамініфери, радіолярії, губки, черви, остракоди, морські їжаки і зірки, двостулкові моллюски і мохуватки, що разом із коралами і брахіоподами брали участь у побудові рифів. На суші з'явилися членистоногі – скорпіони і багатоніжки.



З середнім ордовиком пов'язана друга масова поява різноманітних багатоклітинних, що мали карбонатний скелет: кнідарії (строматопорати та корали), головоногі молюски, брахіоподи, голкошкірі. В ордовіку продовжувався розквіт трилобітів, з'явилися мечохвости та граптоліти. Строматорати та корали замінили археоціатів у рифовій екосистемі.

Перші ж хребетні тварини виникли на ранньому етапі ордовіцького періоду. В цей час вони не дуже різноманітні: представлені лише двома класами безщелепних рибоподібних істот з видовженим рилом (телодонти й гетеростраки). Наприкінці ордовіка відбувається масове вимирання багатьох древніх груп безхребетних.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

Ордовіцькі відклади обмежено поширені на заході України, де утворюють не дуже потужний чохол. Представлені теригенними і карбонатними утвореннями. У платформних осадових товщах на території Прибалтики поширені горючі сланці (кукерсіти). На Сибірській платформі і в Казахстані відомі невеликі родовища фосфоритів. У межах геосинклінальних вулканогенно-кременистих осадових товщ виявлені невеликі родовища залізних і марганцевих руд у Північній Америці, Західній Європі, Казахстані та Китаї. З ордовіцькими інтрузіями на території Казахстану пов'язані родовища золота. У Північній Америці в ордовіцьких відкладах відкриті родовища вуглеводнів.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 76. Чим супроводжувався каледонський тектонічний етап?
- 77. Яким був клімат на початку ордовицького періоду?
- 78. Як називаються найбільші хижаци ордовицького періоду?
- 79. Які риби заселяли моря з нормальною солоністю?
- 80. Які родовища пов'язані з ордовицькими інтрузіями на території Казахстану?

ТЕСТ

76. На скільки епох поділяється ордовицький період?

- а) 1
- б) 2
- в) 3
- г) 4

77. Палео-Тетіс відділяв Гондвану від молоді...

- а) Пангеї
- б) Родинії
- в) Лавразії
- г) Ваальбарі

78. Скільки пар черевних кінцівок було у птериготуса?

- а) чотири
- б) шість
- в) вісім
- г) десять

79. Чи мали панцирні риби ордовицького періоду електричні органи?

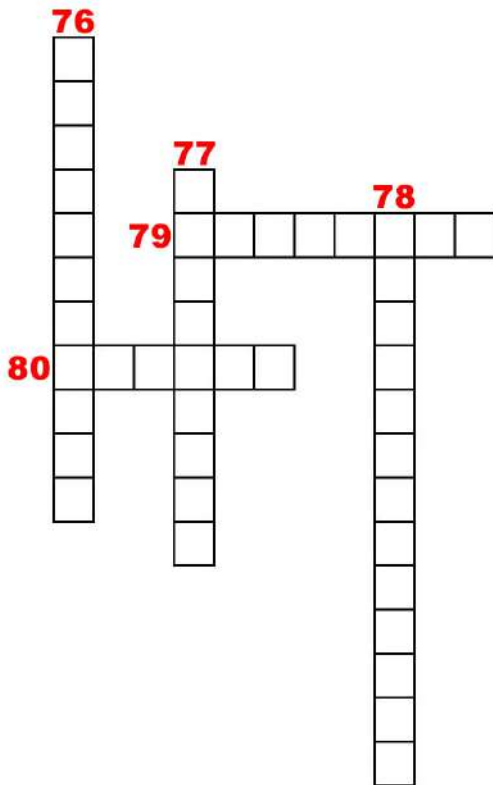
- а) мали
- б) не мали
- в) нам нічого про це не відомо
- г) мали, але не риби

80. Якого розміру сягали раковини наутилоїдей ордовицького періоду?

- а) до 3 м
- б) до 5 м
- в) до 6 м
- г) до 8 м



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 76–80)





2.6. Силурійський період Що відбувалось у силурійському періоді?

Silurian Period

Eonothem/ Eon	Erathem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago		
Phanerozoic	Paleozoic	Silurian	Pridoli		419.2 ± 3.2		
			Ludlow	Ludfordian	423.0 ± 2.3		
				Gorstian	427.4 ± 0.5		
			Wenlock	Homerian	430.5 ± 0.7		
				Sheinwoodian	433.4 ± 0.8		
			Llandovery	Telychian			
				Aeronian	438.5 ± 1.1		
				Rhuddanian	440.8 ± 1.2		
							443.8 ± 1.5

Силурійський період (силур) – третій геологічний період палеозойської ери тривалістю близько 42 млн років. Почався 443,8 ± 1,5 млн років тому, а закінчився 419,2 ± 3,2 млн років тому (рис. 48).

У силурі виділяють чотири епохи: Лландоверійську, Венлокську, Лудловську і Пржидолську (рис. 49).

Рис. 48. Силурійський період

ТЕКТОНІКА

Характерна особливість силурійського періоду – поступове опускання суші під воду. Моря розмивали більшість щойно сформованих гірських масивів і затопили величезні площі. Повільне занурення суші і опускання дна океану призвели до накопичення осадових порід-мергелів, пісковиків, доломітів, граптолітових сланців, брахіоподових і коралових вапняків.

Гігантський суперконтинент Гондвана (якому судилося розділитися сотні мільйонів років тому на Антарктиду, Австралію, Африку і Південну Америку) поступово перемістився у південну півкулю, тоді як менший континент Лаврентія (майбутня Північна Америка) зайняв екватор (Melchin et al. 2020).

В кінці силуру відбуваються горотворні процеси, завдяки яким сформувалися Скандинавські і Кембрійські гори, а також гори Південної Шотландії та Східної Гренландії. На місці Сибіру утворився великий материк Ангарида, частково сформували-



ся Кордильєри. Клімат протягом усього силурійського періоду, ймовірно, був теплим, вологим і лише в кінці силуру на півночі він став сухим і спекотним.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Силурійський період став часом, коли Земля зазнала значних змін, що мало важливі наслідки для навколишнього середовища та життя в ній. Одним із результатів цих змін стало танення великих льодовиків. Це сприяло значному підвищенню рівнів великих морів.



Рис. 49. Ландшафт Землі під час силурійського періоду

Силур став свідком відносної стабілізації глобального клімату, що завершила попередню нестабільність кліматичних коливань. Відповідно, ще на початку силурійського періоду на континентах, які перебували в середніх і високих широтах, продовжували панувати прохолодні умови – значна частина місцевих континентів була покрита льодовиками. Проте глобальна темпе-



ратура до кінця періоду підвищилася і становила близько +25 °С. У другій половині силурійського періоду в високих широтах клімат знову став помірно теплим, близьким до субтропічного (Elewa, Calner 2008). Широтні кліматичні відмінності були досить подібними до сучасних, льодовики переважно характерні для високих широт. Льодовикові утворення цього часу збереглися в межах сучасної Болівії, на півночі Аргентини і на сході Бразилії (Loydell 1998). Протягом усього силурійського періоду тропічні умови існували на значній частині майбутніх Північно-Американського і Євразійського континентів. Аридні регіони характерні в зоні між 40° пн. і пд. широти. Теплі мілкі моря охоплювали значну частину екваторіальних масивів суші.

Отже, загалом протягом силурійського періоду клімат був теплим і стабільним, на відміну від льодовикового періоду пізнього ордовіку та екстремальної спеки девону. Земля вступила в тривалу тепличну чи парникову фазу. Теплий, стабільний клімат посприяв одній з найбільш значущих подій силурійського періоду: появі перших рослин, які колонізували землю.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

У силурійському періоді життя проникає на суходіл. Перші наземні рослини, залишки яких знайдені в силурійських відкладах, отримали назву псилофітів, що означає безлисті – голі рослини. У висоту вони не перевищували й півметра. За зовнішнім виглядом ці рослини нагадували сучасні сфагнові мохи, однак мали більш просту організацію (Pšenička et al. 2021). За своєю будовою псилофіти найбільш схожі на бурі водорості, від яких вони, мабуть, і походять (рис. 50а). Росли псилофіти в зволжених місцях або в маленьких, мілководних водоймах.

Галуження у псилофітів було дихотомічним, тобто кожна гілка поділялася на дві. Їхній організм ще чітко не розподілявся на кореневу і стеблову частини. Замість коренів у них були відростки – ризоїди, якими вони кріпилися до ґрунту. Роль листя



виконували специфічні лусочки. На кінчиках їхніх гілок розташовувалися спорангії, в яких розвивалися спори.

Серед рослин силурійських водних басейнів переважали водорості: зелені, синьо-зелені, червоні, сифонові та бурі (рис. 50b), які майже не відрізнялися за своєю будовою від сучасних. Така схожість наштовхнула деяких дослідників на думку про те, що в окремих частинах сучасних океанів температура, солоність й інші особливості води збереглися такими ж, якими вони були в той далекий час.



a



b

**Рис. 50. Деякі організми силурійського періоду –
псилофіти (a); бурі водорості (b)**

Тваринний світ силурійського періоду представлений переважно тими ж типами безхребетних, які жили й в ордовіку. Досить поширеними були трилобіти (понад 80 видів), молюски (понад 760 видів), брахіоподи (понад 290 видів) і морські лілії, чашечки яких мали характерні для цистоїдей ромбічні пори (Chatterton et al. 1990). У пізньому силурі з'являються численні представники морських зірок і морських їжаків.



Серед силурійських двостулкових молюсків великого значення набувають таксодонти, гетеродонти і десмодонти (Siveter 1991). Характерною особливістю деяких з цих тварин були їхні стулки, що загиналися в протилежні сторони.

У солонуватоводних бухтах жило безліч тонкочерепашкових форм.

Черевоногі молюски силуру виділялися дуже цікавими особливостями. Переважна більшість мала закручену вправо черепашку. Крім того, деякі з них мали кулеподібну черепашку з розрізом посередині, який поступово заростав або перетворювався на ряд дірочок (Liljedahl 1994).

Поширилися в морях силурійського періоду й головоногі молюски. Представники невеликого роду ворбольтеля з роговою черепашкою, які жили в кембрійській і ордовицький періоди, дали численних нащадків (великих і малих) з округлими й гладенькими вапняковими черепашками. Це свідчить про їхню значну рухливість.

На відміну від черевоногих молюсків, тіло яких майже повністю заповнювало черепашку, головоногі жили в камері, яка була відділена від інших перетинкою (Holland 2014). Перетинки між нежилими камерами мали круглі отвори, через які проходила тканина у вигляді тяжа, так званий сифон.

До статевої зрілості тіло молюсків повністю заповнювало жилу камеру. Після відкладання яйця тіло стискувалося, і жила камера ставала надто великою для молюска; тоді й виникала перетинка, яка зменшувала її об'єм. Молюск знову ріс, збільшувалася і жила камера, а з часом виникала й нова перетинка,

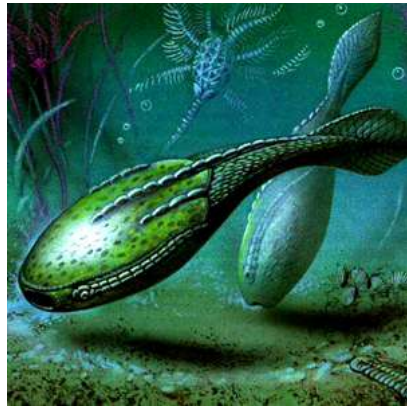
Найбільш відомими представниками головоногих були ортоцераси. Їхнє м'яке тіло нагадувало сучасних восьминогів, але на відміну від них, ортоцераси мали довгу пряму черепашку, яка нагадувала прямий ріг. Звідси й назва «ортоцераси», що в перекладі означає «прямий ріг». Завдовжки вони були до 1 метра. Ортоцераси плавали черепашкою вперед, а в спокійному стані



зависали за допомогою повітряних камер і хапальних щупалець, розпускаючи їх як парашути. Ортоцераси – предки всіх головоногих, що мали перетинки. Їхній нащадок – наутилус – живе і в наш час (Holland, Copper 2008).



a



b

**Рис. 51. Деякі організми силурійського періоду –
табуляти (a); силурійські риби (b)**

У силурійський період поряд із трилобітами продовжує розвиватися своєрідна група тварин, тіло яких було покрите міцним панциром з численними шипами і складалося із сегментів (5-ти головних, 7-ми грудних і 6-ти черевних) та овального хвостового плавця або кінцевої голки. Цих тварин називають ракоскорпіонами. Рухливі, добре озброєні, вони були справжніми володарями силурійських морів.

У пізньому силурі з’являються перші тварини, які дихали легенями. Це близькі родичі сучасних скорпіонів, однак вони мали багато спільного з ракоскорпіонами, тобто були перехідною групою від ракоскорпіонів до сучасних скорпіонів.

З представників коралів найпоширенішими були табуляти – червоподібні тварини з вапняковими трубочками, які жили ко-



лоніями (рис. 51a). Трубочки ділилися на камери перетинками. Іноді, крім перетинок, вони мали ще довгі ряди коротких шипів або поздовжніх ребер. У середньому силурі з'являються перші представники справжніх коралів. Вони жили окремими особинами. Їхня чашечка мала міцну зовнішню стінку і була заввишки до 20 см. Одні корали мали чітку чотирипроменеву будову, інші – двобічносиметричну, яка лежить в основі будови всіх коралів і спостерігається навіть у зародкових формах сучасних коралів. Від чотирьох рядів ордовицьких плаваючих остракод походять 23 роди силурійських, розмірами 22–80 мм (Abushik 2000). Серед голкошкірих у силурі з'являються справжні бластоїдеї, офіури, морські зірки, справжні морські їжаки.

Силурійські риби ще не мали внутрішнього кісткового скелета (рис. 51b). Їхнє тіло і ротова порожнина були щільно вкриті маленькими шкіряними зубчиками. Серед риб зустрічалися кістковощиткові, безщиткові й різнощиткові. У пізньому силурі з'являються справжні щелепні риби, які мали парні плавці й складний скелет.

У середньому силурі від Європи до Сибіру, від Канади до Аргентини поширилися конусоподібні, прямі або зігнуті в спіраль граптоліти. Наприкінці силуру вони майже повністю вимерли. Близькі родичі голкошкірих, граптоліти великими групами прикріплювалися до скель. Деякі граптоліти мали ніжні парашути, завдяки яким вільно плавали в морській воді. Їхні зовнішні скелети формувалися з хітиноподібної речовини. Жили ці тварини зазвичай поблизу низьких берегів, у лагунах, на невеликих глибинах, де відкладалися глинисті відклади, багаті на органічні речовини.

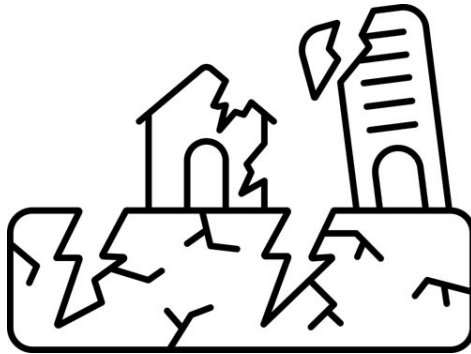
Коли в кінці силуру в результаті тектонічних рухів береги піднялися, біля них почав відкладатися грубоуламковий матеріал. Посилився прибій. Сформовані умови чинили негативний вплив на граптолітів, тому їхній життєвий ареал значно скоротився. Поблизу берегів стали з'являтися корали, брахіоподи, мо-



ховатки, для яких нові умови були надзвичайно сприятливими. Нові роди риб наутилоїдей харчувалися граптолітами, що також призвело до значного зменшення їхньої чисельності. На граптолітів полювали, ймовірно, і ракоскорпіони. Коли ж на початку девону з'явилося безліч хороших плавців – хребетних і амоноїдей, граптоліти зовсім зникли.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

Основні корисні копалини силурійського періоду: залізні руди, золото, мідь, горючі сланці, фосфорити і барит.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

81. Який континент зайняв екваторіальне положення в силурійському періоді?
82. Як називалися найпоширеніші корали силурійських морів?
83. Представники роду яких головоногі молюсків були з роговою черепашкою?
84. Які головоногі молюски мали госту раковину, схожу на ріг?
85. Які рослини першими оселилися на суші?

ТЕСТ

81. На скільки епох поділяється ордовіцький період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

82. Яким був клімат у силурійському періоді?

- а) теплим і стабільним
б) холодним і стабільним
в) теплим
г) спекотним

83. Предками головоногих молюсків є...

- а) ракоскорпіони
б) трилобіти
в) ортоцераси
г) граптоліти

84. Які тварини майже повністю вимерли в середньому силурі, й мали конусоподібні, прямі або зігнуті в спіраль форми?

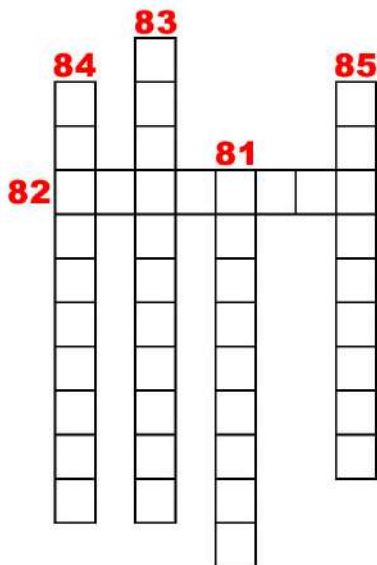
- а) ракоскорпіони
б) трилобіти
в) ортоцераси
г) граптоліти

85. Чи був характерним для силурійських риб внутрішній кістковий скелет?

- а) так
б) ні
в) нам про це нічого не відомо



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 81–85)





2.7. Девонський період

Чому девон називають періодом риб?

Epoch/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago			
Phanerozoic	Paleozoic	Devonian	Upper	Famennian	358.9 ± 0.4		
				Frasnian	372.2 ± 1.6		
			Middle	Givetian	382.7 ± 1.6		
				Eifelian	387.7 ± 0.8		
			Lower	Emsian	393.3 ± 1.2		
				Pragian	407.6 ± 2.6		
				Lochkovian	410.8 ± 2.8		
							419.2 ± 3.2

Рис. 52. Девонський період

Девонський період (девон) – четвертий геологічний період палеозойської ери тривалістю близько 55 млн років. Почався $419,2 \pm 3,2$ млн років тому, а закінчився $358,9 \pm 0,4$ млн років тому (рис 52).

У девоні виділяють три епохи: Верхню, Середню і Нижню (рис. 53).

ТЕКТОНІКА

Ранньодевонська епоха була вираженою геократичною епохою.

В цей період завершилися каледонські тектонічні рухи. Розпочалися значні регресії моря, що підсилювалися значними підняттями. Їхнім наслідком була інтенсифікація денудації суходолу, особливо у найбільш прогнугих ділянках платформ – наприклад на озерно-алювіальних внутрішньоматерикових низовинах або в межах великих дельт річок, де у великому обсязі відбувалося накопичення уламкових відкладів різної розмірності (Becker et al. 2020). Великі простори Північноамериканського і Східноєвропейського континентів займали мілководні моря з максимальною глибиною не більше 400 м. На завершальній стадії каледонського горотворення у результаті диференціації тектонічних рухів, а також їх значної амплітуди, в межах геосинклінальних поясів і на периферії більшості платформ, які зазнали значного підняття, утворилися міжгірські і передгірні прогини і



западни. Максимальна висота континентів в цей час не перевищувала 2000 м над рівнем моря.



Рис. 53. Ландшафт Землі під час девонського періоду

Морські ландшафти характеризувалися великою різноманітністю. Низинні та підвищені морські узбережжя були сильно порізані. Поряд із затоками існували лагуни і естуарії, часто відгороджені від моря піщаними косами, барами або ланцюжками берегових рифів. Від морського узбережжя в сторону моря далеко простягалися мілководні шельфові зони, які змінювалися материковими схилами, а далі глибоководними ділянками з глибинами понад 1500 м (Davies et al. 2021). В середині девону активність земної кори не знизилася, і цей процес супроводжувався інтенсивним підводним вулканізмом. У межах багатьох континентів і мікроконтинентів підняття нерідко змінювалися прогинами, і лише Китайський, Індостанський, Південноамериканський і Африканський континенти протягом всього девонського періоду зазнавали загального підняття, в результаті чого виник-



ли великі розломи земної кори. Переважання континентальних умов розвитку в девонського періоді на багатьох материках зумовило інтенсивну денудацію і поступове вирівнювання контрастного рельєфу, що виник під час каледонських тектонічних рухів.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Глобальний клімат у девонський період був напрочуд м'яким: середні температури океану становили $+25-0^{\circ}\text{C}$ (порівняно із $40-50^{\circ}\text{C}$ у попередні ордовицький та силурійський періоди) (Becker et al. 2016).

Північний та Південний полюси були лише незначно прохолоднішими, ніж райони, розташовані ближче до екватора, не було крижаних шапок; а льодовики формувались лише на вершинах високогірних хребтів. Відповідно тривалий час девон помилково вважався парниковим через географічну обмеженість викопних решток суперконтиненту Єврамерика, що вказували на тропічний клімат. Насправді ж клімат девону відрізнявся у часі та просторі. Наприклад, під час раннього девону посушливі умови характерні для переважаючої частини тодішнього світу, включаючи Сибір, Австралію, Північну Америку та Китай, а для Африки та Південної Америки характерний теплий помірний клімат. У пізньому девоні, навпаки, посушливі умови були менш поширеними у всьому світі, помірний ж клімат був домінуючим.

Під час девонського періоду продовжувалось зближення континентальних плит і закриття океанів з утворення гірських хребтів, наприклад Аппалачської гірської системи в Північній Америці. Відповідно домінували неглибокі моря, в яких накопичувалися товсті вапнякові товщі.

У девоні Земна атмосфера змінилася з тонкої повітряної плівки на газове середовище, де кисню було майже вдосталь. Натомість рівень вуглекислого газу різко знизився. Новоутворені ліси витягували вуглець з атмосфери, який потім акумулювали у відкладах (Le Hir et al. 2011). Такі процеси відобразились у



середньодевонському похолоданні десь на 5 °С. А от пізній девон нагрівся до рівнів, еквівалентних ранньому. На пізньодевонське потепління вказують особливості у поширенні тодішніх рослин.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

У девоні істотно змінилися фізико-географічні умови, які призвели до зміни флори і фауни.

У водах девонських морів і океанів жили численні водорості: сифонові, синьо-зелені, червоні, в лагунах – харові.

Псилофіти, що з'явилися в силурійський період у ранньому девоні, вже були організовані складніше. Їхнє тіло досить чітко ділилося на корінь, стебло та гілочки. Від них у середньому девоні виникли примітивні папороті. Вони вже мали дерев'янисте стебло. Гілки цих рослин починають виконувати різні функції, а їхні кінцеві частини поступово перетворюються на розсічені листки, за допомогою яких відбувався фотосинтез (Meyer-Berthaud et al. 2010). Ростуть і інші нащадки псилофітів: плаунові і членистостеблові, організовані значно складніше, ніж псилофіти. Вони поступово витісняють своїх предків, захоплюючи простори їхнього існування і розселяючись у вологих місцях, у мілких лагунах і болотах. У верхньому девоні псилофіти зникають. З'являються перші насінні папороті (рис. 54а), кордаїтові та справжні папороті.

Спорові псилофіти, примітивні папороті, плаунові, членистостеблові росли в зволжених і болотистих місцях, утворюючи густі зарості. Вони були до 30 м заввишки і до метра завтовшки. Розмножувалися спорами, які проростали в паросток лише у вологому середовищі.

Перші насінні рослини на верхівках спеціалізованих листків мали насінні зачатки, які лежали відкрито на листках. Тому ці рослини і названо голонасінними. Вони були вже справжніми деревами зі справжнім листям і органами розмноження у вигляді



шишок. Голонасінні могли розмножуватися безпосередньо на суші, бо для проростання насіння водне середовище не потрібне. Крім того, насіння – це багатоклітинний орган із значною кількістю запасних поживних речовин, які забезпечують зародок на початку його життя всім необхідним, а покрив насіння добре захищає його від несприятливих умов. Усе це дало можливість голонасінным широко розповсюдитись на суші. І хоча спорові рослини продовжують існувати, панівне становище серед рослин поступово займають голонасінні (рис. 54b).



а



b

Рис. 54. Деякі організми девонського періоду – кордаїти (а); голонасінні девону (b)

Сухий жаркий клімат на материках спричинив висихання багатьох річок, озер, боліт, лагун, мілких внутрішньоконтинентальних морів. З водяних тварин виживали лише ті, які, крім зябер, що давали їм змогу жити у воді, мали ще й легені. За допомогою легень вони могли дихати атмосферним повітрям, коли висихали водойми. До них відносять насамперед дводишних риб, які мали рогові зуби та гострі ребра. У 1870 р. в двох маленьких річках Австралії було виявлено живі екземпляри дводиш-



них риб. Будовою вони нагадували своїх викопних предків. Пізніше в Африці та Південній Америці також було знайдено двоцихрибних риб.

Крім них, у пересихаючих водоймах девонського періоду водилися кистепері риби. Завдяки плавцям, які нагадували кисть, кистепері риби могли повзати. Плавальний міхур у них був збагачений кровоносними судинами і відігравав роль легень. Отже, кистепері риби могли дихати повітрям і переповзати з лагуни в лагуну в пошуках їжі і води. Скелет кистеперих майже повністю окостенів. Череп складався з кісток, які є в черепах вищих хребетних тварин, що свідчить про те, що кистепері риби були предками всіх наземних хребетних, у тому числі й амфібій, які з'явилися у верхньому девоні. Це вже були справжні наземні тварини. Вони жили на суші, хоча й мали ще багато спільного з рибами – форму черепа, луску, зяброві кришки.

Іноді девонський період називають періодом риб. І справді, в морях і озерах девонського періоду жила величезна кількість їхніх представників (рис. 55а). Окрім кистеперих і двоцихрибних, до кінця палеозою жили ганоїдні риби, у яких луска мала ромбічну форму, була товстою і розміщувалася правильними косими рядами. Пізніше ганоїдних риб витіснили досконаліші форми. У морях з'явилось багато риб із твердим шкіряним скелетом, з панцирними щитками, шкіряними зубами. У ті далекі часи, коли хребетні лише досягали першого свого розквіту і дали численні відгалуження, існували форми і з примітивною внутрішньою організацією.

У девонських відкладах трапляються рештки форм швидко плаваючих маленьких гнучких акулоподібних рибок – предків акул. У відкладах великих внутрішніх морів девонського періоду знаходять представників і досить великих панцирних риб, які за формою нагадують трилобітів. Панцир деяких риб покривав не лише передню частину тіла, а й плавці. Рятуючи риб від нападу хижаків, він одночасно заважав їм і рухатись.



Найбільшого розповсюдження набули артродири та антиархи. У ході еволюції деякі артродири досягали справді велетенських розмірів. Довжина дунклеостевса, приміром, могла перевищувати 12 м, а довжина акулподібних, яких він переслідував, була близько 1,2 м (Young 2010).



a



b

Рис. 55. Деякі організми девонського періоду – дунклеостевс (a); стегоцефал (b)

Важливе місце серед безхребетних девонських морів океанів займали велетенські ракоскорпіони. Частина їх пристосувалася до умов життя в солонуватих і опріснених водоймах. Основною здобиччю ракоскорпіонів були трилобіти і риби.

Девонські комахи мали перетинчасті крила. Більшу частину свого життя вони проводили у воді.

У девонських морях уперше з'явилися хижі головоногі мольоски – амоноідеї. Їхня спіральна закручена черепашка мала перегородки.

Серед голкошкірих найбільш поширені в цей період морські лілії, морські зірки і морські їжаки.



У девонський період почалося вимирання багатьох силурійських форм: трилобітів, ракоскорпіонів, давніх голкошкірих.

Основні зміни фауни й флори відбувалися і на суші. У кінці девону на Землі росли ліси з папоротей, хвощів, плаунів. У цих лісах уже жили комахи і давні павуки. З'явилися перші земноводні тварини – стегоцефали (рис. 55b).

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

З девонськими відкладами пов'язана велика кількість корисних копалин: нафта, кам'яна сіль, горючі сланці, боксити, залізна руда, мідь, золото, марганцеві руди, фосфорити, гіпси, вапняки.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

86. Які групи рослин з'являються разом із папоротями?
87. Яку назву має найбільша риба девону?
88. Як називалися одні з перших земноводних?
89. Як називалися хижі головоногі молюски девону?
90. Які риби заселяли пересихаючі водойми девонського періоду?

ТЕСТ

86. На скільки епох поділяється девонський період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

87. На завершальній стадії каледонського горотворення максимальна висота континентів була...

- а) 1000 м
б) 2000 м
в) 3000 м
г) 4000 м

88. Чи було вдосталь кисню у девонській атмосфері?

- а) так
б) ні
в) було більше вуглекислого газу
г) нам про це нічого не відомо

89. Які тварини почали вимирати у девонському періоді?

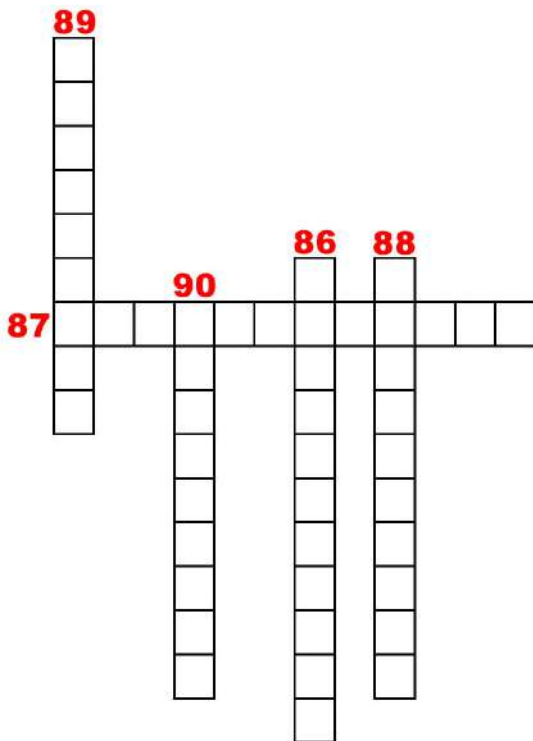
- а) трилобіти, стегоцефали
б) артродири, ракоскорпіони
в) трилобіти, антиархи
г) трилобіти, ракоскорпіони

90. Які крила, переважно, мали девонські комахи?

- а) перетинчасті
б) прямі
в) передні
г) задні



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 86–90)





2.8. Карбоновий (кам'яновугільний) період Чому карбоновий період називають кам'яновугільним?

Carboniferous Period

Epoch/ Eon	Erathem/ Era	System/ Period	Subperiod	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago
Phanerozoic	Paleozoic	Carboniferous	Pennsylvanian	Upper	Gzhelian	298.9 ± 0.2
					Kasimovian	303.7 ± 0.1
				Middle	Moscovian	307.0 ± 0.1
				Lower	Bashkirian	315.2 ± 0.2
Mississippian	Upper	Serpukhovian	323.2 ± 0.4			
	Middle	Visean	330.9 ± 0.2			
	Lower	Tournaisian	346.7 ± 0.4			
					358.9 ± 0.4	

Рис. 56. Карбоновий період

Кам'яновугільний період (карбон) – п'ятий геологічний період палеозойської ери тривалістю близько 60 млн років. Почався $358,9 \pm 0,4$ млн років тому, а закінчився $298,9 \pm 0,15$ млн років тому (рис. 56).

Кам'яновугільний період поділяється на два субперіоди – Міссісіпій і Пенсільваній, в кожному з яких виділяють епохи – нижню, середню і верхню (рис. 57).

ТЕКТОНІКА

На початку кам'яновугільного періоду значна частина земної суші була зібрана в два величезних суперматерик: Лавразію на півночі і Гондвану на півдні. Протягом пізнього карбону обидва суперматерик неухильно зближались один з одним (Aretz 2020). Цей рух призвів до формування нових гірських ланцюгів, які утворилися по периферії континентів і були буквально затоплені потоками лави, що виливалася з надр Землі. Клімат помітно охолов, і, поки Гондвана «перепливала» через Південний полюс, планета пережила щонайменше два періоди зледеніння (Golonka, Ford 2000).

Упродовж кам'яновугільного періоду кілька разів змінювались обриси материків і океанів, виникали нові гірські хребти, моря, острови. На початку карбону відбувалося значне опускан-



ня суші. Море затопило значні площі Атлантиї, Азії, Гондвани. Зменшилися площі великих островів. Зникли під водою пустині північного континенту. Клімат став дуже теплим і вологим.



Рис. 57. Ландшафт Землі під час карбонового періоду

У нижньому карбоні починається значний горотвірний процес: формуються Арденн, Гарц, Рудні гори, Судети, Атлаські гори, Австралійські Кордильєри, Західно-Сибірські гори. Характерна потужна регресія морів.

У середньому карбоні суша знову опускається, але значно менше, ніж у нижньому. У міжгірних улоговинах нагромаджуються потужні товщі континентальних відкладів. Формується Східний Урал, Пеннінські гори.

У верхньому карбоні море знову відступає. Значно зменшуються внутрішньоконтинентальні моря. На території Гондвани виникають великі льодовики, в Африці й Австралії – дещо менші. Наприкінці періоду формується Центральний Урал.



ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Кам'яновугільний період інколи називають періодом кисню, адже максимальна його концентрація в атмосфері Землі – до 35 % спостерігалася саме у карбоні.

Пересічні глобальні температури в ранньому карбоні були високими, складаючи приблизно +20 °С (для порівняння; сучасна складає +16 °С). Однак похолодання впродовж середнього карбону відобразилося у поступовому зниженні пересічної температури до +12 °С.

Посилена вулканічна діяльність у карбоні спричинила насичення атмосфери вуглекислим газом. Вулканічний попел, який є чудовим добривом, зробив родючими карбоніні грунти. Проте рівень діоксиду вуглецю в атмосфері впав протягом періоду карбону з приблизно 8-кратного перевищення поточного рівня до рівня, подібного до сьогодення в кінці карбону. Відсутність річних кілець скам'янілих дерев свідчить про відсутність сезонів тропічного клімату. Зледеніння Гондвани, спричинене її рухом на південь, продовжувались і у перському періоді, тому через відсутність чітких маркерів відклади цього льодовикового періоду за віком часто називають персько-карбоніні.

Охолодження та посухання клімату призвело до колапсу тропічних лісів пізнього карбону (CRC). Спочатку такі ліси займали окремі розрізнені ареали, а потім були врешті-решт спустошені зміною клімату (DiMichele 2001).

У кінці карбону в Європі й Північній Америці клімат змінюється, стає частково помірним, а подекуди жарким і сухим.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

Теплий і вологий клімат панував на материках тривалий час, що призвело до формування надзвичайно сприятливих умов для розвитку наземної флори. Серед вищих рослин кам'яновугільного періоду вже домінували кущі, дерева і



трав'янисті рослини, життя яких було ще тісно пов'язане з водою.

Великого розвитку в кам'яновугільний період досягли плауноподібні, членистостеблові й папоротеві, які дали велику кількість деревоподібних форм (Wilson et al. 2020).

Деревовидні плауноподібні сягали 2 м у діаметрі й до 40 м у висоту. У них ще не було річних кілець. Порожній стовбур з могутньою розгалуженою кроною надійно утримувався в пухкому ґрунті великим кореневищем, яке розгалужувалось на чотири головні гілки. Ці гілки в свою чергу дихотомічно ділилися на кореневі відростки. Їх листки, до метра завдовжки, густими пучками прикрашали кінці гілок. На кінцях листків були бруньки, в яких розвивалися спори. Стовбури плауноподібних були вкриті лускою – рубцями. До них кріпилися листки.

Росли вони переважно серед величезних боліт та озер, поблизу солонуватоводних лагун, на узбережжях морів, на вологому мулистому ґрунті. Способом життя нагадували сучасні мангрові, які ростуть на низинних берегах тропічних морів, у гирлах великих річок, у болотистих лагунах, піднімаючись вад водою на високих коренях – ходулях.

У цей період були поширені й гігантські плауноподібні – лепідодендрони з ромбічними рубцями на стовбурах і сигілярії з шестигранними рубцями. На відміну від більшості плауноподібних, для сигілярій був характерний майже не розгалужений стовбур, на якому виростали спорангії. Серед плауноподібних зазнали поширення й трав'янисті рослини, які повністю вимерли у пермський період.

Членистостеблові рослини діляться на дві групи: клинолисті й каламіти. Клинолисті були водяними рослинами. Вони мали довге, членисте, злегка ребристе стебло, до вузлів якого кільцями прикріплювалися листки. Брунькоподібні утвори містили спори. На воді клинолисті трималися довгими розгалуженими

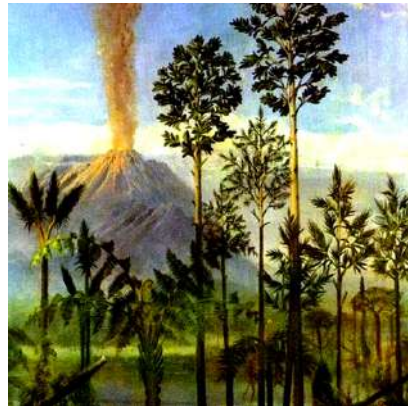


стеблами подібно до сучасного водяного жовтецю. Клинолисті з'явилися у середньому девоні й вимерли у пермський період.

Каламіти були деревоподібними рослинами до 30 м заввишки (рис. 58а). Вони утворювали болотяні ліси. Деякі види каламітів проникли далеко на материк. Їхні стародавні форми мали ще дихотомічні листки. Пізніше переважати стали форми з простими листками і річними кільцями. У цих рослин дуже розгалужене кореневище. Часто із стовбура виростало додаткове коріння й гілки, вкриті листками.



а



б

Рис. 58. Деякі організми карбонового періоду – каламіти (а); голонасінні карбону (б)

Наприкінці карбону з'являються перші представники хвощових – невеликі трав'янисті рослини. Серед карбонової флори визначну роль відігравали папороті, зокрема трав'янисті, що за будовою нагадували псилофітів, і справжні папороті – великі деревоподібні рослини, які кореневищем закріплювалися в м'якому ґрунті. Вони мали шершавий стовбур з численними гілками, на яких росло широке папоротеподібне листя.



Голонасінні карбонових лісів належать до підкласів насінних папоротей та стахіоспермід (рис. 58b). Їхні плоди розвивалися на листках, що є ознакою примітивної організації. Водночас лінійні або ланцетні листки голонасінних мали досить складне сітчасте жилкування.

Найдосконалішими рослинами карбону є кордаїтові. Їхні циліндричні безлисті стовбури до 40 м заввишки розгалужувалися на гілки, які мали на кінцях широкі лінійні або ланцетні листки із сітчастим жилкуванням. Чоловічі спорангії (мікроспорангії) мали вигляд бруньок. Із жіночих спорангіїв розвивалися горіхоподібні плоди. Результати мікроскопічного дослідження плодів показують, що ці рослини, подібні до цикадових, були перехідними формами до хвойних рослин.

У кам'яновугільних лісах з'являються перші гриби, мохоподібні рослини (наземні і прісноводні), які іноді утворювали колонії, і лишайники.

У морських і прісноводних басейнах продовжують існувати водорості: зелені, червоні й харові.

Розглядаючи кам'яновугільну флору в цілому, ми дивуємося різноманітності форм листків деревоподібних рослин. Рубці на стовбурах рослин протягом усього життя тримали довге, ланцетне листя. Кінці гілок були прикрашені велетенськими листяними кронами. Інколи листки росли по всій довжині гілок.

Друга характерна ознака кам'яновугільної флори – це розвиток підземної кореневої системи. Надзвичайно розгалужене коріння розросталося в мулистому ґрунті і з нього виростали нові пагони.

Поширення одних і тих самих кам'яновугільних рослин від Північної Америки до Шпіцбергену свідчить про те, що від тропіків до полюсів панував досить рівномірний теплий клімат, який у верхньому карбоні на півночі змінився досить прохолодним. У прохолодному кліматі росли голонасінні папороті й кордаїти. Ріст кам'яновугільних рослин майже не залежав від пір року. Він на-



гадував ріст прісноводних водоростей. Пори року, мабуть, мало відрізнялися одна від одної.

Вивчаючи кам'яновугільну флору, можна простежити еволюцію рослин. Схематично вона має такий вигляд: бурі водорості – псилофіти – папороті – птеридосперміди (насінні папороті) – хвойні.

Відмираючи, рослини кам'яновугільного періоду падали у воду, заносилися мулом і, пролежавши мільйони років, поступово перетворилися на вугілля. Кам'яне вугілля утворювалося з усіх частин рослини: деревини, кори, гілок, листків, плодів. На вугілля перетворювалися і тваринні рештки. Про це свідчить той факт, що рештки прісноводних і наземних тварин у карбонових відкладах зустрічаються порівняно рідко.

Морський тваринний світ карбону характеризувався різноманітністю видів. Надзвичайно поширені були форамініфери, зокрема фузулініди з веретеноподібними черепашками завбільшки із зернину.

У середньому карбоні з'являються швагерини. Їхня куляста черепашка була за розміром з невелику горошину. З черепашок форамініфер пізнього карбону регіонально утворилися поклади вапняків.

Серед коралів ще траплялися нечисленні роди табулят, але починали переважати хететиди. Поодинокі корали часто мали товсті вапнякові стінки. Колоніальні корали утворювали рифи.

У цей час інтенсивно розвиваються голкошкірі, зокрема морські лілії й морські їжаки. Численні колонії мохуваток іноді утворювали потужні вапнякові відклади.

Надзвичайно розвинулися плечоногі молюски, зокрема продуктуси, які за пристосуванням і географічним поширенням набагато перевищують усіх плечоногих на Землі. Розмір їхніх черепашок досягав 30 см у поперечнику. Одна стулка черепашки була опукла, друга – у формі плоскої кришечки. Прямий видовжений замковий край часто мав пустотілі шипи. У деяких



форм продуктів шиби були в чотири рази більші від діаметра черепашки. За допомогою цих шипів продукти трималися на листках водяних рослин, що переносили їх за течією. Інколи своїми шипами вони прикріплювалися до морських лілій або водоростей і жили біля них у завислому стані.

У кам'яновугільний період майже повністю вимирають наутилоїдеї, за винятком наутилусів, які дожили до наших часів. Продовжують існувати ортоцераси, черепашки яких мали різко виражену зовнішню будову. Рогоподібно зігнуті черепашки цитцерасів майже не відрізнялися від черепашок їхніх девонських предків. Амоніти представлені двома рядами – гоніатитами й агоніатитами, як і в девонському періоді; двостулкові молюски – одном'язові форми. Серед них багато прісноводних, які населяли карбоніві озера і болота.

З'являються перші наземні гастроподи, які дихали легенями.

Трилобіти досягли великого розквіту в ордовіцькій і силурійській періоди. У кам'яновугільний збереглися лише нечисленні їхні роди і види.

Наприкінці кам'яновугільного періоду трилобіти майже повністю вимерли. Цьому сприяло те, що головоногі молюски й риби харчувалися ними, а також складала конкуренцію і щодо їхньої кормової бази. Будова тіла трилобітів була недосконалою: панцир не захищав черева, кінцівки були невеликі і слабкі. Трилобіти не мали органів нападу. Деякий час вони могли захищатися від хижаків, згортаючись, як сучасні їжаки. Але в кінці карбону з'явилися риби з могутніми щелепами, які розгризали їхній панцир. Тому від численного типу в пермський період зберігся лише один рід.

У прісноводних озерах кам'яновугільного періоду з'являються ракоподібні, скорпіони, комахи (Garwood, Edgecombe 2020).

Справжнього розквіту комахи набули в кам'яновугільному періоді. Найменші з відомих видів були завдовжки 3 см, розмах



крил у найбільших (наприклад, у стенодіктії) досягав 70 см, у давньої бабки меганеври – 1 метра (рис. 59а). Тіло меганеври мало 21 сегмент. З них 6 складала голову, 3 – груди з чотирма крилами, 11 – черевце, кінцевий сегмент був схожий на шилувате продовження хвостового щита трилобітів. Численні пари кінцівок були почленовані. За їх допомогою тварина і ходила, і плавала. Молоді меганеври жили у воді, перетворюючись на дорослих комах внаслідок линянь (Ren et al. 2008). Меганеври мали міцні щелепи і складні очі.

У верхньому кам'яновугільному періоді давні комахи вимерли, їхні нащадки були більш пристосовані до нових умов життя. Прямокрилі в процесі еволюції дали термітів і бабок, евриптеруси – мурашок. Більшість стародавніх форм комах переходили до наземного способу життя лише у зрілому віці. Розмножувалися лише у воді. Отже, зміна вологого клімату на сухіший для багатьох давніх комах була катастрофою.

У кам'яновугільному періоді з'являється багато акул. Це ще були не справжні акули, які населяють сучасні океани, але порівняно з іншими групами риб вони були найдосконалішими хижакками. Їхні зуби і плавцеві шипи інколи переповнюють кам'яновугільні відклади (Feichtinger et al. 2021). Це свідчить про те, що карбонові акули жили в будь-якій воді. Зуби зазубрені, широкі, ріжучі, горбкуваті, бо акули живилися найрізноманітнішими тваринами.

Поступово вони знищили примітивних девонських риб. Ножеподібні зуби акул легко розгризали панцир трилобітів, широкі горбкуваті зубні пластинки добре подрібнювали товсті черепашки молюсків. Пилкоподібні, загострені ряди зубів давали можливість акулам житися колоніальними тваринами. Форми і розміри акул були також різноманітні, як і їхній спосіб живлення. Деякі з них оточували коралові рифи і з швидкістю блискавок переслідували свою здобич, інші неквапливо полювали на молюсків, трилобітів або заривалися в мул і підстерігали здобич.



Акули з пилкоподібним виступом на голові шукали жертв у заростях морських водоростей. Більші акули часто нападали на менших, тому в деяких з них для захисту у процесі еволюції виникли плавцеві шипи й нашкірні зуби.



a



b

Рис. 59. Деякі організми карбонового періоду – меганевра (a); едафозавр (b)

Акули інтенсивно розмножувалися. Це зрештою призвело до перенаселення моря тваринами. Було знищено багато форми амонітів, зникли поодинокі корали, які були для акул легкодоступною поживною їжею, значно зменшилась кількість трилобітів, загинули усі молюски, які мали тонку черепашку. Тільки товсті черепашки спіріферів не піддавалися хижакам. Збереглися і продукти. Вони захищалися від хижаків довгими шипами.

У прісноводних басейнах кам'яновугільного періоду жило дуже багато емалеволускатих риб. Деякі з них стрибали по мулистому березі, як сучасні риби-стрибуни. Щоб урятуватись від ворогів, комахи залишили водне середовище і заселили сушу спочатку поблизу боліт і озер, а потім – гори і височини, долини й пустині кам'яновугільних материків.



Серед комах кам'яновугільного періоду немає бджіл і метеликів. Це зрозуміло, бо тоді ще не було квіткових рослин, чиїм пилком і нектаром живляться ці комахи.

Тварини, які дихали легенями, вперше з'явилася на материках девонського періоду. Це були земноводні. Теплий вологий клімат карбону був надзвичайно сприятливим для розквіту земноводних. Скелети їх ще не зовсім закостеніли, щелепи мали ніжні зубчики. Шкіра була вкрита лускою. За низький дахоподібний череп уся група земноводних дістала назву стегоцефали (панцироголові).

Розміри тіла земноводних коливалися від 10 см до 5 м. Більшість з них мала чотири ноги з короткими пальцями. Деякі мали кігті, що давало їм можливість лазити по деревах. З'являються й безногі форми. Залежно від способу життя земноводні набули три-тоноподібної, змієподібної, саламандроподібної форм. У черепі земноводних було п'ять отворів: два носових, два очних й одне тім'яне око. В майбутньому це тім'яне око перетворилося на шишкоподібну залозу головного мозку ссавців. Спина у стегоцефалів була голою, а черево вкрите ніжною лускою. Населяли вони неглибокі озера і болотисті місця вздовж узбережжя.

Найхарактернішим представником перших плазунів був едафозавр (рис. 59b). Він нагадував величезну ящірку. На спині мав високий гребінь з довгих кістяних шипів, з'єднаних між собою шкірястою перетинкою. Едафозавр був трав'яним ящером і жив біля кам'яновугільних боліт.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

Морські осадові відклади кам'яновугільного періоду представлені переважно глинами, пісковиками, вапняками, сланцями і вулканогенними породами. Континентальні – вугіллям, глинами і пісками.

З кам'яновугільними відкладами пов'язані велика кількість кам'яновугільних басейнів, поклади нафти, заліза, марганцю, міді, вапняків.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

91. Які рослини заввишки 30 м утворювали болотні ліси?
92. Як називалася найбільша бабка карбонового періоду?
93. Як називався найтипівіший плазун карбону?
94. Як називалися найдосконаліші рослини карбону?
95. Яка корисна копалина сформувалася в карбоні у великій кількості?

ТЕСТ

91. На скільки епох поділяється карбоновий період?

- | | |
|------|------|
| а) 2 | в) 6 |
| б) 4 | г) 8 |

92. Яка максимальна концентрація кисню була в карбоновому періоді в атмосфері?

- | | |
|---------|---------|
| а) 15 % | в) 35 % |
| б) 25 % | г) 45 % |

93. Суша в карбоновому періоді була сконцентрована в материках...

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| а) Лавразія і Гондвана | в) Лаврентія і Гондвана |
| б) Лавразія і Пангея | г) Азія і Гондвана |

94. Які з наведених тварин практично повністю вимерли у карбоновому періоді?

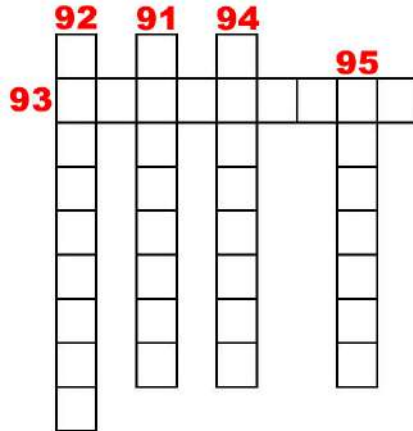
- | | |
|----------------|---------------|
| а) стегоцефали | в) едафозаври |
| б) трилобіти | г) голкошкірі |

95. Які риби вмів стрибати по мулистому березі?

- | | |
|----------------------|------------------------|
| а) риби-стрибуни | в) летючі риби |
| б) мулисті стрибунки | г) емалеволускаті риби |



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 91–95)





2.9. Пермський період Чому пермський період катастрофічний?

Permian Period						
Emphem/ Eon	Erathem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago	
Phanerozoic	Paleozoic	Permian	Lopingian	Changhsingian	251.902 ± 0.024	
				Wuchiapingian	254.14 ± 0.07	
			Guadalupian	Capitanian	259.1 ± 0.5	
				Wordian	265.1 ± 0.4	
				Roadian	268.8 ± 0.5	
			Cisuralian	Kungurian	272.95 ± 0.11	
					283.5 ± 0.6	
				Artinskian	290.1 ± 0.26	
				Sakmarian	295.0 ± 0.18	
				Asselian	298.9 ± 0.15	

Рис. 60. Пермський період

Пермський період – шостий геологічний період палеозойської ери тривалістю близько 47 млн років. Почався $298,9 \pm 0,15$ млн років тому, а закінчився $251,9 \pm 0,024$ млн років тому (рис. 60).

Пермський період поділяється на три епохи: Цисуралійську, Гваделупійську і Лопінгійську (рис. 61).

ТЕКТОНІКА

Тектонічна активність в пермському періоді сприяла виникненню динамічного і сильно розчленованого рельєфу. Найбільш складним і контрастним рельєф став у другій половині пермського періоду в північній півкулі, переважно в тих місцях, де завершувалися герцинські складкоформуючі рухи й активно протікали екзогенні процеси (Henderson et al. 2020).

На платформах розташовувалися слабко горбисті рівнини і низовини, розділені хвилястими і вирівняними височинами. Великі гірські споруди сягали висоти 2000–3000 м. На платформах у ранньому пермському періоді існувала доволі добре розвинена гідрографічна мережа. Області активізації платформ і каледонід являли собою вирівняні, проте піднесені поверхні з відносно глибоко врізаними долинами річок і розгалуженою яружно-балковою системою.



Високі хребти, гірські масиви і глибокі міжгірські та передгірні улоговини були характерні для областей активного здійснення в межах складчастих поясів, ускладнених процесами потужної денудації. У міжгірських улоговинах розташовувалися озера, а передгірні улоговини обрамлялися великими конусами виносу уламкових гірських порід. У межах Гондвани зазнали поширення поверхні та низовини з крутосхилими великими улоговинами (Ziegler 1990).



Рис. 61. Ландшафт Землі під час пермського періоду

Піднесений рельєф був характерний лише для районів зчленування платформ зі зростаючими герцинідами. Такі споруди концентрувалися на північному заході Африки, заході Антарктиди, заході і південному заході Південної Америки і сході Австралії. Під впливом значних змін природних умов у пермському періоді (скорочення акваторії морських басейнів, посилення континентальності, зміни температурних умов тощо), органічний світ став більш високоорганізованим і набув нових рис.



ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Клімат пермського періоду характеризувався різко вираженою зональністю і зростаючою з часом посушливістю. Зникає багато внутрішньоконтинентальних морів, озер, боліт. Високі гірські системи спричинили диференціацію кліматичних умов (Parrish 1995). У результаті діяльності численних вулканів сформувалися товщі вулканічних порід. Загалом клімат був досить близький сучасному. У будь-якому разі, у нього спостерігалось більше схожості з сучасним кліматом, ніж у наступних періодів мезозою.

Рослини і тварини з вапняковими черепашками поглинули з атмосфери кам'яновугільного періоду величезну кількість вуглекислого газу. Водночас рослини збагатили атмосферу вільним киснем. У пермському періоді склад атмосфери поступово наблизився до сучасного, і вперше в історії Землі виникли кліматичні зони. Чітко виокремився пояс вологого тропічного клімату, в межах якого розташовувався великий океан – Тетіс. На північ від нього перебував пояс жаркого і сухого клімату, завдяки якому набули поширення сучасні соленосні і червоноколірні відклади. Північніше розташовувався помірний пояс зі значною зволоженістю й інтенсивним накопиченням кам'яного вугілля. Південний ж помірний пояс характеризувався вугленосними відкладами Гондвани. Ще одним свідченням існування різних кліматичних зон є те, що плазуни різних і тих самих пермських материків істотно відрізнялися один від одного (Barron, Fawcett 1995).

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

Флора першої половини пермського періоду відрізняється від флори кам'яновугільного тим, що в цей час значно зменшилася кількість сигілярій, лепідодендронів і кордаїтів, а переважаючими формами стали папороті й нові групи голонасінних рослин. У болотах і мілких затоках, як і в кам'яновугільному



періоді, ще ростуть каламіти, а поблизу від них – деревоподібні й трав'янисті папороті.

Поширюються хвойні, гінкгові й саговникові. Своїм зовнішнім виглядом саговники нагадують пальми. З гінкгових до наших днів дожив лише один вид. Це велике дерево з лопатеподібними листками.

Особливого розвитку в пермський період досягли так звані язикові папороті. На пучку коріння, закріпленому в м'якому ґрунті численними відростками, підіймався жорсткий стовбур з гілками, на яких були широкі папоротеподібні листки. Серед язикових папоротей розрізняють кущові й деревоподібні форми. На поперечних розрізах деяких стовбурів скам'янілих дерев виявлено кільця, які свідчать про сезонні зміни клімату (LePage et al. 2003). Нерівномірність розвитку кілець деревини могла бути пов'язана як з холоднішою порою року, так і з посушливим сезоном протягом одного чи навіть кількох років.

Хвойні рослини своїм виглядом нагадували сучасні араукарії, які ростуть на островах поблизу Австралії. Поряд з ними росли кордаїти, схожі на сосну, рештки якої також трапляються у пермських відкладах. З цих рослин протягом пермського періоду по узбережжях, у долинах річок, у болотах й інших вологих місцях формувалися потужні товщі кам'яного вугілля.

Розквіт трав'янистої рослинності сприяв виникненню і розвитку трав'янистих форм тварин.

У прибережних районах Гондванського материка, який простягався від Бразилії впоперек Атлантичного океану, включаючи Африку і через Мадагаскар доходючи до Індії та Австралії, спостерігаються потужні товщі червоних і жовтих пісковиків з рештками морської фауни: губок, двостулкових, головоногих, черевоногих, плечоногих молюсків, голкошкірих. Однак морський тваринний світ пермського періоду набагато бідніший, ніж кам'яновугільного.



Форамініфери трапляються рідко, різко зменшується кількість губок, коралів, голкошкірих. Майже немає трилобітів. Наприкінці пермського періоду вимирають табуляти, давні їжаки.

Серед головоногих молюсків розвинулися нові форми амонітів. Взагалі головоногі молюски в пермських морях набувають дуже складної організації. З'являються нові наутилоїдеї. Виникають форми брахіопод, які і в наш час живуть в Індійському океані. У прісних і солонуватих водах трапляються двостулкові молюски. Серед червононогих розвинулися переважно передньо-зяброві. Продовжують існувати моховатки. Як і раніше вони утворюють рифи. Великого розвитку досягали рачки-остракоди і червоподібні.

Серед хребетних у пермських морях значне місце займали акулподібні – хрящові риби зі скрученими у спіраль зубами. З'являються і прісноводні акули. Стає менше кистеперих риб. З початком пермського періоду земноводні набули значної різноманітності. Невеликі форми (розміром кількох сантиметрів) жили поруч з гігантськими предками жаб, які досягали розмірів вола.

Земноводні різнилися не лише розмірами, а й способом життя. Жили вони і у воді, і на суші, живилися комахами і рибами, водоростями і папоротями. Пристосовуючись до наземних умов, вони дедалі менше часу проводили у воді.

Плазуни формою і будовою тіла нагадували стегоцефалів. Але найпримітивніші представники цього класу були вже значно краще пристосовані до умов життя на суші (мається на увазі спосіб розмноження і розвиток зародків). Тоді як земноводні, подібно до своїх предків – риб, розмножувалися відкладанням ікри у воду, плазуни стали відкладати яйця безпосередньо на суші. Більші за ікру яйця мали значний запас поживних речовин, що давало можливість зародкові розвиватися, мінаючи стадію личинки.

Маленькі плазуни відрізнялися від дорослих тільки розміром; личинки ж земноводних вели водний спосіб життя, будо-



вою відрізнялися від дорослих так, як сучасні пуголовки відрізняються від жаб. Відкладання яєць на суші сприяло утворенню у них кількох оболонок. Волокниста і вапнякова оболонки оберігали яйця від розтікання, механічних пошкоджень і проникнення бактерій. Білкова ж оболонка містила основні запаси води. Частина її виділялася внаслідок окислення жирів, частина надходила із зовнішньої оболонки. З розвитком зародка виникали й інші шари.

Еволюція плазунів відбувалася дуже швидко, бо на суші не було ще тварин, які могли б конкурувати з ними. Ще задовго до кінця пермського періоду плазуни витісняють стегоцефалів, Примітивні плазуни – котилозаври – дали численних нащадків, які пізніше захопили воду, сушу й повітря. Розміром від жаби до бегемота, вони ще мали чимало ознак стегоцефалів, зокрема зуби і ребра, які розміщувались від шиї до хвоста, короткі масивні кінцівки. Але будова черепа, хребців, шкіри вже була така, як у плазунів.

Складніше, ніж інші плазуни, були організовані парейазаври, розміри яких досягали 3 м (рис. 62а). Однак і вони мали у плечовому поясі шкіряні кістки, властиві риbam і земноводним. Череп парейазаврів був суцільною кістковою коробкою з отворами для очей, ніздрів і тім'яного органа (Lee 1997). Всі вони були травоядними і жили на берегах річок та озер.

У середині пермського періоду досягли розквіту котилозаври. На початку тріасу вони вимерли. Більш організовані й спеціалізовані плазуни – нащадки котилозаврів, з'явилися дещо пізніше і пристосовувалися до найрізноманітніших умов життя. Більшість груп тварин стали рухливішими, а їхні скелети легшими. Вони живилися різною їжею: рослинами, моллюсками, рибами.

З'являються і справжні хижаки – пелікозаври, на хребцях яких були високі гребні. У деяких плазунів кінцівки довшають, зникають шкіряні кістки. У скроневій ділянці черепа виникають



дуги, до яких кріпилася складна система м'язів. Зуби трав'юдних стають плоскими, а такий чотириметровий хижак, як іностраниця, мав уже справжні ікла.

Серед хижих плазунів з'являються форми, схожі на сучасних вовків, гієн, куниць. Це свідчить про те, що способи життя тодішніх тварин і сучасних були схожими.



a



b

Рис. 62. Деякі організми пермського періоду – парейазавр (a); звірозубі (b)

Серед пермських плазунів жили і звірозубі, зуби яких, як і зуби ссавців, відрізнялися формою. Вони мали різці, ікла і горбкуваті кутні зуби. Нижня щелепа була з однієї зубної кістки, а не з кількох, як у риб, земноводних і типових плазунів. Як і ссавці, звірозубі плазуни мали вторинне кісткове піднебіння, яке відділяло носоглотку від ротової порожнини (Rubidge, Sidor 2001). Це давало можливість тваринам жувати їжу. Звірозубі схожі на ссавців будовою лопаток і таза. Усе це свідчить про те, що звірозубі були предками ссавців (рис. 62b).

Закінчення пермського періоду і всієї палеозойської ери відзначається наймасштабнішим масовим вимиранням в історії



Землі. За цією подією проводиться межа між пермським і триасовим періодами.

Масове пермське вимирання – найбільше з п’яти масових вимирань фанерозою, яке призвело до зникнення 96 % всіх морських видів і 73 % наземних видів хребетних. Традиційно вважається, що це найбільша біосферна катастрофа в історії Землі сталася з геологічної точки зору практично «миттєво» – протягом 30–35 тис. років (Pfefferkorn, Wang 2016).

Основною причиною глобальних кліматичних змін, які призвели до масового вимирання в кінці пермського періоду, вважається неймовірно висока вулканічна активність на території нинішнього Сибіру, яка привела до формування найбільшої трапової провінції світу – Сибірських Трапів. Як наслідок, підвищилася температура атмосфери й океану, збільшилася концентрація CO₂ та інших вулканічних газів в атмосфері, а в морській воді істотно знизився вміст кисню.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

З пермським періодом пов’язані значні родовища вугілля, кам’яної та калійної солей, залізної руди, міді, кольорових металів, ртуті й нафти.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

96. Що в кліматі пермського періоду виражалось різко?
97. Які тварини досягли розвитку в середині пермського періоду?
98. Які тварини пермського періоду вважаються предками ссавців?
99. Що відбулося наприкінці пермського періоду?
100. Які хижі плазуни характерні для пермського періоду?

ТЕСТ

96. На скільки епох поділяється пермський період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

97. Якої висоти сягали гірські споруди в пермському періоді?

- а) 1000 – 2000 м
б) 2000 – 3000 м
в) 3000 – 4000 м
г) 4000 – 5000 м

98. Масове вимирання наприкінці пермського періоду викликане...

- а) вулканічною активністю
б) падінням астероїда
в) сильними землетрусами
г) зледенінням

99. Які з плазунів пермського періоду були організовані складніше і сягали 3 м?

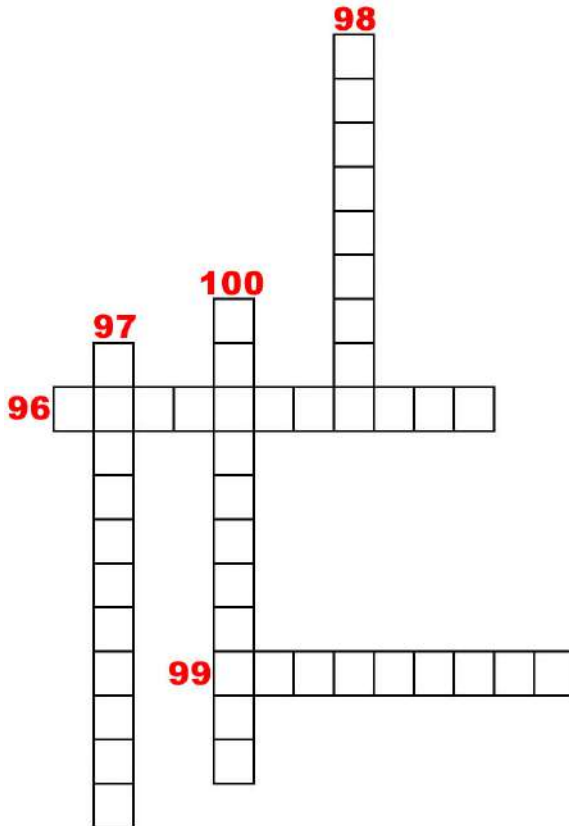
- а) стегоцефали
б) звірозубі
в) пелікозаври
г) парейзаври

100. Чому сприяло відкладання яєць на суші?

- а) утворенню оболонок
б) захисту від водних хижаків
в) вигріванню
г) утворенню хітинової шкарлупи



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 96–100)





2.10. Тріасовий період

Період, коли з'явилися динозаври...

Triassic Period		System/Period	Stage/Epoch	millions of years ago	
Phanerozoic	Mesozoic	Triassic	Upper	Rhaetian	201.3 ± 0.2
				Nonian	208.5
				Garnian	227
			Middle	Ladinian	237
				Anisian	242
				Olenekian	247.2
			Lower	Inchuan	251.2
					251.902 ± 0.024

Рис. 63. Тріасовий період

Тріасовий період – перший геологічний період мезозойської ери тривалістю близько 51 млн років. Почався $251,9 \pm 0,024$ млн років тому, а закінчився $201,3 \pm 0,2$ млн років тому (рис. 63).

Тріасовий період поділяється на три епохи: Нижню, Середню і Верхню (рис. 64).

ТЕКТОНІКА

Найбільш характерними відкладами тріасового періоду є континентальні піщано-глинисті породи (часто з лінзами вугілля); морські вапняки, глини, сланці; лагунні ангідрити, солі, гіпси (Ogg et al. 2020).

У тріасовому періоді Пангея поступово розділяється на Лавразію та Гондвану на півдні. Велика затока, що починалася на сході Гондвани, сягала аж до північного узбережжя сучасної Африки, потім повертала на південь, майже повністю відокремлюючи Африку від Гондвани. Із заходу простягалася довга затока, що відокремлювала західну частину Гондвани від Лавразії. На Гондвані сформувався чимало западин, які поступово заповнювалися континентальними відкладами.

У середньому тріасі посилилася діяльність вулканів. Внутрішньоконтинентальні моря поступово міліють, утворюються численні западини. Починається формування гірських хребтів Південного Китаю та Індонезії.



Рис. 64. Ландшафт Землі під час тріасового періоду

Поряд зі змінами у розподілі моря і суші, формуванням нових гірських масивів та вулканічних областей, інтенсивно відбувалася зміна одних тваринних і рослинних форм іншими. Лише небагато з них перейшли з палеозойської ери до мезозойської. Це дало підставу деяким дослідникам стверджувати про глобальні катастрофи, що сталися на межі палеозою і мезозою. Однак при дослідженні відкладів тріасового періоду можна легко переконатися, що різкої межі між ними та пермськими не існує, отже, одні форми рослин та тварин хоч і змінювалися іншими, та цей процес, очевидно, відбувався поступово. Головною причиною були не лише катастрофи про які йшлося у § 2.9, а й еволюційний процес: досконаліші форми поступово витісняли менш досконалі.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

На території сучасного Середземномор'я клімат був теплим і вологим. Прохолоднішим і вологішим він стає в тихоокеанській зоні. На території Гондвани і Лавразії панували пустелі.



Для північної частини Лавразії характерний холодний і сухий клімат.

Сезонна зміна температур тріасового періоду почала помітно впливати на рослинність і тварин. Окремі групи плазунів пристосувалися до холодних сезонів. Саме від цих груп у тріасі походять ссавці, а дещо пізніше – і птахи.

Похолодання у тріасовому періоді було незначним. Найсильніше воно проявилось у північних широтах. На решті території було досить тепло (Preto et al. 2010). Тому для плазунів у тріасовому періоді сформувалися комфортні умови. Різноманітні їх форми розселилися по всій поверхні Землі. Надзвичайному розквіту плазунів також сприяла багата рослинність тріасового періоду.

Склад атмосфери тріасового періоду проти пермського змінився мало. Клімат став більш вологим, проте пустелі у центрі континенту залишалися. Деякі рослини і тварини тріасового періоду дожили до наших днів. Це свідчить про те, що склад атмосфери та клімат окремих ділянок суші майже не змінилися протягом мезозойської і кайнозойської ер.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

У тріасовому періоді вимирають стегоцефали. Їх витіснили плазуни. Більш досконалі, рухливі, добре пристосовані до різноманітних умов життя. Вони харчувалися тією ж їжею, що й стегоцефали, селилися у тих же місцях, поїдали їхній молодняк і зрештою винищили їх.

У морях розвинулися велетенські форми головоногих молюсків. Діаметр раковин деяких з них сягав 5 м. Щоправда, і тепер у морях живуть велетенські головоногі молюски, наприклад кальмари, що досягають понад 10 м у довжину (разом з щупальцями), проте в мезозойську еру велетенських форм було значно більше.



Серед тріасової флори зрідка ще трапляються каламіти, насінневі папороті та кордаїти. Домінують справжні папороті, гінкгові, беннетитові, саговникові, хвойні (Kustatscher et al. 2018). Саговникові існують і в наш час на Малайському архіпелазі. Вони відомі під назвою сагових пальм. За своїм зовнішнім виглядом саговникові займають проміжне місце між пальмами і папоротями. Стовбур саговникових товстий, колоноподібний. Крона складається з жорсткого перистого листя, розташованого віночком. Розмножуються ці рослини з допомогою макро- та мікроспор.

Папороті тріасу являли собою прибережні трав'янисті рослини, що мали широке розсічене листя із сітчастим жилкуванням. З хвойних рослин добре вивчено вольтцію. Вона мала густу крону і подібні до сучасної ялини шишки.

Гінкгові тріасового періоду були доволі високими деревами, їхнє листя утворювало густі крони. Особливе місце серед тріасових голонасінних займали беннетити – дерева з великими складними листками, що нагадували листя саговників. Органи розмноження беннетитів займають проміжне місце між шишками саговників та квітками деяких квіткових рослин, зокрема магнолієвих. Можливо, саме беннетитів слід вважати предками квіткових рослин.

З безхребетних тріасового періоду відомі всі типи тварин, які існують і в наш час. Найхарактернішими морськими безхребетними були рифоутворюючі тварини та амоніти.

У палеозої вже існували тварини, які колоніями покривали дно моря, формуючи рифи, хоча й не дуже потужні. У тріасовому періоді, коли замість табулят з'являється багато колоніальних шестипроменевих коралів, починається формування рифів товщиною сотень метрів. Чашечки шестипроменевих коралів мали шість або дванадцять вапняних перегородок. Внаслідок масового розвитку та швидкого зростання коралів на дні тріасових морів формувалися справжні підводні ліси, в яких селилися



численні представники інших груп організмів. Частина з них брала участь у безпосередньому формуванні рифів. Зруйновані хвилями, вони утворювали як грубозернистий, так і дрібнозернистий пісок, що заповнював усі порожнечі коралів. Вимитий хвилями з цих порожнин, вапняний мул відкладався в бухтах та лагунах.

Характерні для тріасового періоду деякі двостулкові молюски. Їхні тонкі, як папір, раковини з крихкими ребрами утворюють в окремих регіонах цілі прошарки у відкладах цього періоду. Жили двостулкові молюски в мілководних мулистих лагунах, на рифах і між ними. У верхньотріасовому періоді з'являється безліч двостулкових молюсків із товстими стінками, які міцно кріпилися до вапнякових відкладів мілководних басейнів.

Наприкінці тріасу, у зв'язку з посиленням вулканічної діяльності, частина вапнякових відкладів перешарувалася товщами вулканічного попелу і лавами (Schmidt et al. 2012). Вулканічна активність сприяла й потраплянню на поверхню великої кількості різноманітних сполук, з яких поступово сформувалися родовища кольорових металів.

Типовими для тріасу були амоніти, мушлі яких в окремих місцях на планеті знаходять у великій кількості. З'явившись у силурійському періоді, вони, проте, протягом усієї палеозойської ери не відігравали великої ролі серед інших безхребетних. Амоніти не могли успішно конкурувати з наутилоїдеями, оскільки раковини амонітів формувалися з вапняних пластинок, що мали товщину цигаркового паперу і тому практично не захищали м'яке тіло молюска. Тільки коли їх перегородки зігнулися в численні складки, раковини амонітів набули міцності і перетворилися на справжнє укриття від хижаків. З ускладненням перегородок раковини стали ще міцнішими, а специфічна зовнішня будова дозволила пристосуватися до найрізноманітніших умов життя.



Представниками голкошкірих були морські їжаки, лілії і зірки. На верхньому кінці тіла морських лілій розташовувалася схожа на квітку основна частина. У ній розрізняють віночок та хапальні органи – «руки». Між «руками» у віночку знаходилися ротові та анальні отвори. «Руками» морська лілія закріпляла у ротовий отвір воду, а разом із нею і морських тварин, якими харчувалася. Стебло багатьох тріасових морських лілій було спіральним.

Тріасові моря заселяли губки, мохуватки, листоногі раки, остракоди. Типовими рибами були акули. З'являються перші примітивні костисті риби. Потужні плавці, добре розвинений зубний апарат, досконала форма, міцний і легкий скелет – все це сприяло швидкому поширенню кісткових риб у морях нашої планети.



а



б

Рис. 65. Деякі організми тріасового періоду – лабіринтодони (а); плезіозавр (б)

Типовими земноводними тріасу були лабіринтодони – малорухливі тварини з невеликим тулубом, маленькими кінцівками і великою головою (рис. 65а). Вони лежали у воді в очіку-



ванні здобичі, і коли дрібніша, необережна тварина наближалася, хапали її. Їхні зуби мали складну лабіринтоподібну складчасту емаль, саме тому їх і назвали лабіринтодонтами (Cosgriff 1984). Шкіра зволожувалася слизовими залозами. Інші амфібії часто виходили на сушу і полювали на комах. Найхарактерніші представники лабіринтодонтів – мастодонзаври. Ці тварини, черепа яких сягали одного метра завдовжки, на вигляд нагадували величезних жаб. Вони полювали на рибу, і тому рідко залишали водне середовище.

Боліт ставало менше, і мастодонзаври були змушені заселити дедалі глибші місця, часто скупчуючись у великій кількості на малій площі. Саме тому багато їхніх скелетів знаходять на невеликих ділянках.

Плазуни в тріасі набувають значного розмаїття. З'являються їх нові групи. З котилозаврів залишаються лише проколофони – невеликі тварини, які харчувалися комахами. Надзвичайно цікаву групу плазунів представляли архозаври, до яких належали текодонти, предки крокодилів – псевдозухії і динозаври.

Серед динозаврів з'являються тероподи та прозавроподи. Тероподи пересувалися на добре розвинених задніх кінцівках, мали важкий хвіст, потужні щелепи, невеликі та слабкі передні кінцівки. За величиною ці тварини були від кількох сантиметрів до 15 м. Усі вони належали до хижаків.

Прозавроподи харчувалися, як правило, рослинами. Деякі з них були всеїдними тваринами. Ходили на чотирьох ногах. Мали невелику голову, довгу шию і хвіст.

Представники синаптозаврів вели найрізноманітніший спосіб життя (Demar, Bolt 1984). Трилофозавр лазив деревами і харчувався рослинною їжею.

Тюленеподібні плазуни водилися біля узбережжя, і харчувалися здебільшого молюсками. Плезіозаври населяли моря, але



іноді виходили на берег, щоб відкласти яйця (рис. 65b). Вони досягали 15 м. Харчувалися рибою.

В окремих шарах тріасового періоду часто знаходять відбитки стоп великої тварини, що ходила на чотирьох ногах. Її назвали хіротерієм. За збереженими відбитками можна уявити будову ступні цієї тварини (Colbert 1958). Чотири незграбні пальці оточували товсту м'ясисту подошву. На трьох із них були пазури. Передні кінцівки хіротерія виявилися майже втричі меншими від задніх. На вологому піску тварина залишала глибокі сліди. При нашаруванні нових пластів сліди поступово кам'яніли. Пізніше сушу зайняло море, що приховало сліди, і з плином часу вони опинилися під товщами морських відкладів.

Отже, у той час море неодноразово наступало на сушу. Острови та деякі частини тодішніх материків опускалися нижче рівня моря, і тварини, які жили на них, змушені були пристосовуватися до нових умов. У морях з'являється багато плазунів, які, безсумнівно, походять від материкових предків. Швидко розвинулися черепахи з широким кістяним панциром, дельфіноподібні іхтіозаври – рибоящери і велетенські плезіозаври з маленькою головою на довгій шії.

Іхтіозавр мав ряд однорідних зубів. Їхні п'ятипалі кінцівки перетворюються на добре пристосовані для плавання ласти, у яких важко розрізнити плече, передпліччя, зап'ястя та кістки пальців (Massare, Callaway 1990).

Починаючи з тріасового періоду, плазуни, що перейшли жити в море, поступово заселяють практично всі простори океану.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

З відкладами тріасового періоду пов'язані родовища нафти і газу, бурого та кам'яного вугілля, залізної і мідної руд, кам'яної солі.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

101. Який материк у тріасовому періоді починає розпадатися на Гондвану і Лавразію?
102. Які земноводні були типовими в тріасовому періоду?
103. Які морські плазуни жили в морях, але виходили на берег для відкладання яєць?
104. Яка група котилозаврів залишається у тріасі?
105. Як називаються предки крокодилів?

ТЕСТ

101. На скільки епох поділяється тріасовий період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

102. Чи змінився склад тріасової атмосфери у порівнянні із пермською?

- а) так
б) ні
в) незначно
г) істотно

103. Яким було похолодання у тріасовому періоді?

- а) значним
б) незначним
в) клімат був стабільним
г) насправді було потепління

104. Найхарактернішими представниками лабіринтодонтів були...

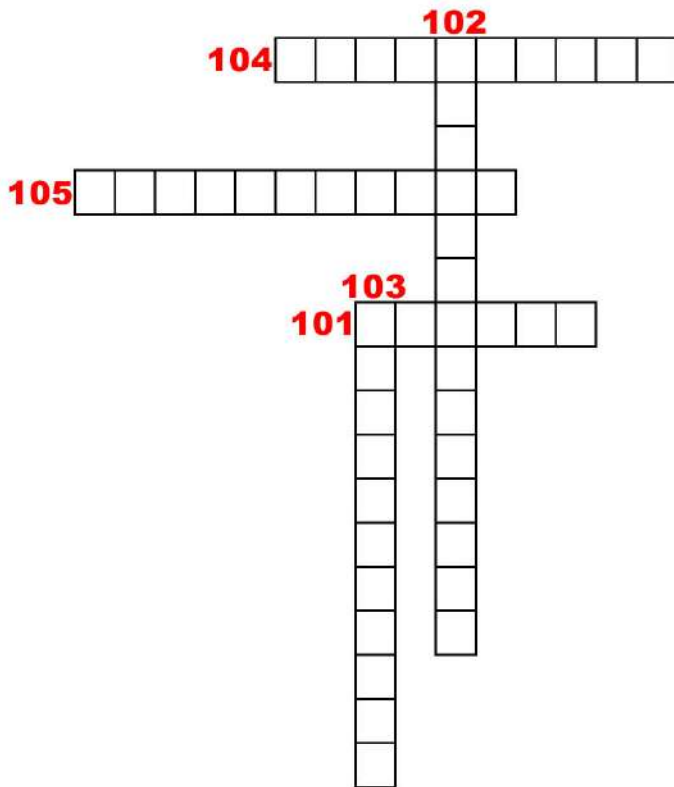
- а) мастодонзаври
б) котилозаври
в) тероподи
г) прозауроподи

105. Архозаври включають...

- а) текодонти, псевдозухії, лабіринтодонти
б) текодонти, псевдозухії, динозаври
в) текодонти, акули, динозаври
г) амоніти, псевдозухії, динозаври



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 101–105)





2.11. Юрський період Період гігантських плазунів...

Jurassic Period

eonothem/ Eon	erathem/ Era	system/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago
Phanerozoic	Mesozoic	Jurassic	Upper	Tithonian	-145
				Kimmeridgian	149.2 ± 0.7
				Oxfordian	154.8 ± 0.8
			Middle	Callovian	161.5 ± 1
				Bathonian	165.3 ± 1.1
				Bajocian	168.2 ± 1.2
				Aalenian	170.9 ± 0.8
			Lower	Toarcian	174.7 ± 0.8
					184.2 ± 0.3
				Pliensbachian	192.9 ± 0.3
				Sinemurian	199.5 ± 0.3
				Hettangian	201.4 ± 0.2

Рис. 66. Юрський період

Франції), від яких і походить назва періоду (Hesselbo et al. 2020).

Відклади юрського періоду надзвичайно багаті. Здебільшого це вапняки, уламкові гірські породи, сланці, магматичні породи, різні глини, піски, конгломерати, які формувалися в різноманітних умовах. Серед них поширені й осадові породи, що містять численних представників тодішньої фауни та флори.

Інтенсивні тектонічні рухи наприкінці тріасового і на початку юрського періодів призвели до збільшення великих заток (морів), поступово відокремивши Африку і Австралію від Гондвани (Hallam 1969). Сформувалися численні нові западини, такі як Німецька, Англо-Паризька, Західносибірська. Арктичний океан поступово затоплював північне узбережжя Лавразії.

Юрський період – другий геологічний період мезозойської ери тривалістю приблизно 56,3 млн років: від 201,3 ± 0,2 до приблизно 145,0 млн років тому (рис. 66).

Юрський період поділяється на три епохи: Лейяську, Доггерську і Мальмську (рис. 67).

ТЕКТОНІКА

Вперше відкладення цього періоду були знайдені в Юрі (гори в Швейцарії і



Інтенсивний вулканізм і горотвірні процеси призвели до формування Верхоянської складчастої системи. Тривало формування Анд і Кордильєр.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Теплі морські течії протягом всього юрського періоду досягли арктичних широт. Клімат став теплим і вологим практично на всій планеті. Свідченням цього є значне поширення коралових вапняків і залишків теплолюбної фауни і флори. Надзвичайно мало трапляється відкладів, притаманних сухому клімату: лагунних гіпсів, ангідритів, солей і червоних пісковиків. Цікаво, що проявляв себе прохолодний період року, проте він, очевидно, відзначався лише незначним зниженням температури. Сніг був неабиякою рідкістю.



Рис. 67. Ландшафт Землі під час юрського періоду

Клімат юрського періоду залежав не лише від кількості сонячної радіації. Багато вулканів, постійні виливи магми в ложах



океанів підігрівали воду й атмосферу, насичували повітря водяною паром, яка підтримувала парниковий ефект, що підтверджується поширеними прісноводними відкладами – переважно білими пісковиками і темними глинами.

Теплий і вологий клімат сприяв розквіту рослинного світу. Папоротеподібні рослини, саговникові і хвойні (араукарієві) формували великі лісові заболочені природні зони. Папороті і хвощі формували підлісок у цих лісах (Hallam 1982). В нижній юрі на всій території північної півкулі рослинність була доволі одноманітною. Проте, починаючи з середньої юри, формуються чіткі два рослинні пояси: північний, де переважали гінкго і трав'янисті папороті, і південний з беннетитами, саговниками, араукаріями та деревоподібними папоротями.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

Характерними папоротями юрського періоду були матонії, які досі збереглися на Малайському архіпелазі (Seward 1935). Хвощі та плауни майже не відрізнялися від сучасних. Місце вимерлих насінних папоротників і кордаїтів поступово займають саговники, які успішно ростуть і тепер у тропічних лісах.

До представників юрських хвойних рослин належить і секвойя. В наш час секвої збереглися лише на Тихоокеанському узбережжі Північної Америки (Yao 1992).

Багата рослинність юрського періоду сприяла поширенню численних плазунів. Продовжували розвиватися динозаври. Серед них виділяються ящеротазові і птахотазові. Ящеротазові переміщалися на чотирьох кінцівках, мали на ступнях по п'ять пальців і харчувалися рослинами. Більшість з них були довгошиїми, з маленькою головою і довгим хвостом.

Найбільшим серед юрських динозаврів був брахіозавр, який сягав довжини 26 метрів і важив близько 50 тонн. Диплодок – динозавр з довжиною тіла 28 метрів. У нього була довга, тонка шия і надзвичайно видовжений та товстий хвіст. Бронтос



завр, довжиною до 18 метрів, був відносно високим, мав великий горб на спині і товстий хвіст (Irmis 2010).

Птахотазові динозаври поділяються на двоногих і чотириногих. Різні за розміром і зовнішнім виглядом, вони здебільшого харчувалися рослинами, проте серед них з'являються хижаки.

До травоядних динозаврів юрського періоду належали і стегозаври (рис. 68а). У них було два ряди великих пластин на спині і гострі шипи на хвості, які захищали тварину від хижаків. Виникають лепідозаври – невеликі хижаки із дзьобоподібними щелепами.



а



б

Рис. 68. Деякі організми юрського періоду – стегозавр (а); птеродактиль (б)

У юрський період з'явилися летючі ящери. Вони літали завдяки шкірястому покриву, який був натягнутий між довгим пальцем кисті та кістками передпліччя (Bertozzo et al. 2021). Ці тварини були добре пристосовані до польоту. У них, як і у сучасних птахів, були легкі трубчасті кістки. Типовими представниками летючих ящерів були птеродактиль і рамфоринх.

Птеродактилі переважно були безхвостими, з варіаціями розмірів. У них були широкі крила і витягнутий уперед вузький



череп (рис. 68b). Птеродактилі жили великими колоніями на узбережжях лагун пізньоюрських морів. Вдень вони полювали, а вночі ховалися в кронах дерев або в тріщинах скель. Шкіра птеродактилів була зморшкуватою і голою. Харчувалися здебільшого рибою, іноді морськими тваринами: ліліями і молюсками, а також комахами.

Рамфоринхи мали довгі хвости, видовжені вузькі крила, великий череп. Довгі зуби різного розміру вигиналися вперед. Хвіст ящера закінчувався лопаттю, яка служила рулем (Frey, Tischlinger 2012). Вони оселялися на узбережжях рік, озер і морів, харчувалися подібно до птеродактилів – комахами і рибою.

Летючі ящірки існували лише в мезозойську еру, причому їхній розквіт припадав на пізньоюрський період. Їхніми предками, мабуть були вимерлі псевдозухії. Наприкінці юрського періоду вони вимерли.

Моря юрського періоду населяли дельфіноподібні ящери – іхтіозаври. Вони мали довгу голову, гострі зуби, великі очі, оточені специфічним кістковим кільцем. Довжина черепа деяких з них сягала 3 метрів, а тіла – 12. Кінцівки іхтіозаврів склалися з кісткових пластинок. Іхтіозаври народжували повністю сформованих живих дитинчат. Разом з іхтіозаврами моря населяли плезіозаври. У них був товстий тулуб, з чотирма ластоподібними кінцівками, довга змієподібна шия і маленька голова.

З'являються нові роди черепах, а в кінці періоду сучасні черепахи. Безхвості земноводні, схожі на жаб, жили в прісних водоймах. В юрських морях було багато риб: кісткових, хрящових і ганоїдних.

В юрських морях продовжують еволюціонувати безхребетні: амоніти, белемніти і морські лілії. Проте видове різноманіття амонітів юрського періоду значно менше, ніж в тріасовому. Юрські амоніти відрізнялися від тріасових насамперед своєю будовою, окрім філоцераса, який практично не змінився з часів тріасу. Частина амонітів зберегла перламутр.



В морях юрського періоду процвітали двостулкові молюски, особливо різноманітні устрицеві. Вони починають формувати гігантські устричні банки на мілководдях.

Морські їжаки також пройшли значні зміни і оселилися на рифах. Окрім круглих форм, які дожили до наших днів, існували двосторонньо-симетричні їжаки неправильної форми. Їх тіло було витягнуте в одному напрямку. Деякі з них мали доволі розвинутий щелепний апарат. З'явилось багато ракоподібних: десятиногі, вусоногі і ластоногі раки, прісноводні губки. Збільшується видове різноманіття комах.

У юрському періоді з'являються перші птахи (Brodkorb 1971). Їхніми предками були ті самі псевдозухії, які дали початок динозаврам і крокодилам. Типовими представниками були орнітозухи. Вони, подібно до птахів, пересувалися на задніх ногах, мали міцний таз і були вкриті схожою на пір'я лускою.

У пізньому юрському періоді з'являються археоптерикси, які вважаються одними з найдавніших відомих птахів. Схоже, що археоптерикси були проміжними формами між плазунами і сучасними птахами. Вони мають низку характерних ознак, які свідчать на користь їхнього походження від плазунів, наприклад зуби. З іншого боку, вони вже мали деякі класичні ознаки птахів, такі як махові пера, крила і здатність літати.

З появою хижих ссавців у юрському періоді починає формуватися нова ланка харчового ланцюгу. Ці, ще маленькі хижаки, повсюдно полювали на дрібних ящерів й інших, не таких численних ссавців. Цей важливий крок в еволюції мав глибокий вплив на розподіл видів і харчові відносини серед тодішніх ссавців.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

Мінеральні ресурси, які сформувалися в юрському періоді, включають кам'яне вугілля, гіпс, нафту, сіль, нікель і кобальт. Ці корисні копалини мають важливе значення для промисловості багатьох країн.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

106. Який юрський динозавр мав два ряди великих пластин на спині?
107. Який літаючий ящер був типовим для юрського періоду?
108. Як називалися дельфіноподібні морські ящери?
109. Як називався типовий, один з перших, юрський птах?
110. Який юрський динозавр був найбільшим?

ТЕСТ

106. На скільки епох поділяється юрський період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

107. Яким був клімат в юрському періоді?

- а) теплим і вологим
б) теплим і сухим
в) прохолодним і вологим
г) холодним і сухим

108. Як розмножувалися іхтіозари?

- а) відкладали яйця
б) народжували сформованих дитинчат
в) відкладали яйця і вигодовували їх молоком
г) народжували сформованих дитинчат і вигодовували їх молоком

109. У якого юрського динозавра була найдовша шия?

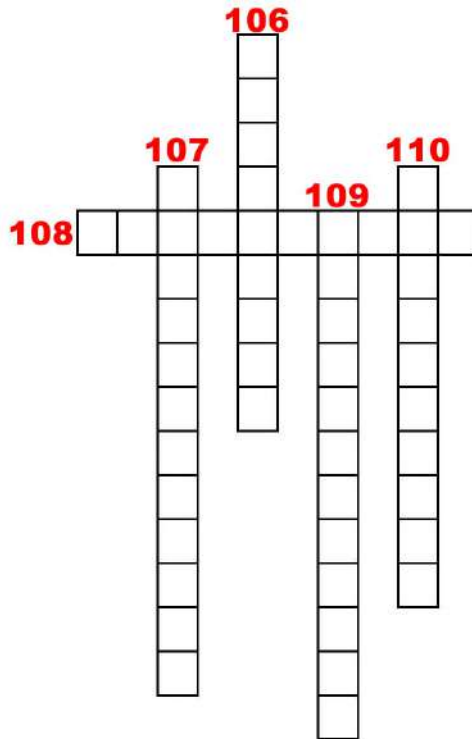
- а) брахіозавра
б) стегозавра
в) бронтозавр
г) диплодока

110. Предками перших птахів були...

- а) динозаври
б) псевдозухії
в) тероподи
г) текодонти



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 106–110)





2.12. Крейдовий період

Період, в якому жили найбільші хижаки на Землі...

Cretaceous Period

eonothem/ Eon	era/ Eratem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago
Phanerozoic	Mesozoic	Cretaceous	Upper	Maastrichtian	66
					72.1 ± 0.2
				Campanian	
					83.6 ± 0.2
				Santonian	86.3 ± 0.5
				Coniacian	89.8 ± 0.3
				Turonian	93.9
				100.5	
			Lower	Albian	
					113
				Aptian	
					121.4
				Barremian	129.4
				Hauterivian	132.6
Valanginian	139.8				
Berriasian	145				

Рис. 69. Крейдовий період

Інтенсивні процеси горотворення наприкінці юрського періоду істотно змінили як контури материків і океанів, так і їх конфігурацію. Північна Америка, раніше відокремлена від великого Азійського материка, об'єдналася з Європою. На сході Азія з'єдналася із Америкою. Південна Америка повністю відділилася від Африки. Австралія розташовувалася приблизно там, де і зараз, проте була значно менших розмірів (Gale et al. 2020). Продовжується формування Анд та Кордильєр, а також окремих гір Далекого Сходу.

У верхньому крейдовому періоді шельфові моря займають великі території північних материків. Під водою перебували Західний Сибір і Східна Європа, більша частина території сучасної Канади і Аравія. Накопичуються потужні шари вапняку, піску і мергелю.

Крейдовий період – останній період мезозойської ери. Тривав приблизно 79 млн років (від 145 млн років тому до 66 млн). Одержав свою назву завдяки потужним відкладам вапняку, які пов'язані з ним (рис. 69).

Крейдовий період поділяється на дві епохи: Нижню і Верхню (рис. 70).

ТЕКТОНІКА

Інтенсивні процеси горотворення наприкінці юрського періоду істотно змінили як контури материків і океанів, так і їх конфігурацію.



Наприкінці крейдового періоду горотвірні процеси активізуються з новою силою, що приводить до початку формування таких утворень як Сибірські гори, Анди, Кордильєри і гірські хребти Монголії.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Клімат також зазнав змін. На півночі у високих широтах в крейдовому періоді вже існувала справжня зима зі снігом. У межах сучасної помірної зони деякі види дерев (горіх, ясен, бук) мало чим відрізнялись від сучасних (Föllmi 2012). Листя цих дерев відпадало на зиму, але загалом клімат був набагато тепліший, ніж сучасний. Росли ферни, саговники, гінкгові, беннетити, хвойні рослини, такі як секвоя, тис, сосна, кипариси та ялини.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

У середині крейдового періоду квіткові рослини починають домінувати, поступово витісняючи представників найдавнішої флори – спорових і голонасінних рослин.

З появою квітів світ комах також зазнав змін. Серед них з'явилися комахи, які зовсім не могли існувати без квітів: метелики, бджоли.

Квіткові рослини розповсюдились в Гренландії та островах Північного Льодовитого океану, де було відносно тепло (Wing, Boucher 1998). Наприкінці крейдового періоду зі зниженням температури почали з'являтися морозостійкі рослини, такі як верба, тополя, береза, дуб, калина, які є характерними і для сучасної флори.

Розвиток квіткових рослин супроводжував вимирання бенетитів і переважної більшості саговникових, видове різноманіття гінкгових і папоротей теж істотно зменшилося. Разом зі змінами в рослинності трансформувалася і тваринний світ.



Масово розповсюдилися форамініфери, черепашки яких сформували потужні крейдові відклади. З'явилися перші нумуліти.

Зникають амоніти, чому сприяла різка зміна фізико-географічних умов у крейдовому періоді. Повністю вимирають і белемніти.

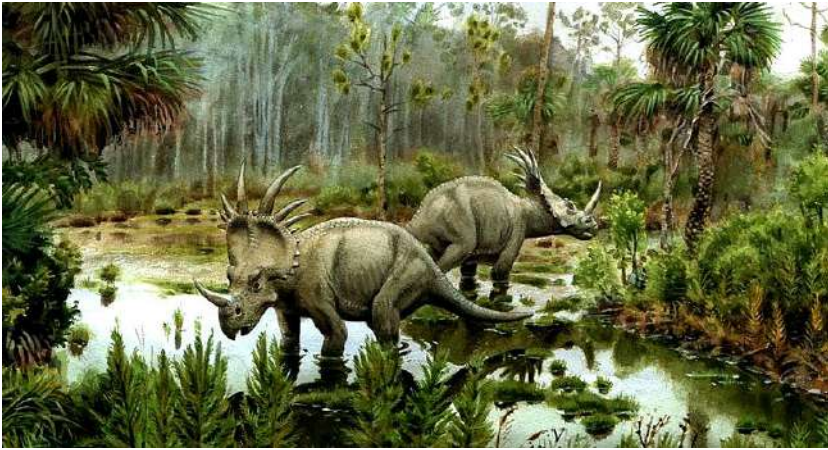


Рис. 70. Ландшафт Землі під час крейдового періоду

У крейдовий період з'являється багато нових видів червононогих молюсків. Серед морських їжаків збільшується кількість неправильних серцеподібних форм. А серед морських лілій з'являються види, які не мають стебла і які вільно плавають в воді завдяки довгим перистим «рукам».

Поступово вимирають ганоїдні риби. Збільшується кількість кісткових риб (чимало з них існують й у наш час). Акули набувають сучасного вигляду.

Потомки вимерлих на початку крейдового періоду іхтіозаврів досягали довжини 20 метрів і мали по дві пари коротких ластів. З'являються нові форми плезіозаврів і пліозаври,



які жили у відкритому морі. Крокодили і черепахи населяли прісноводні та солоноводні басейни.

З середньокрейдових земноводних найбільш характерними були гадрозаври, які пересувалися як на двох, так і на чотирьох ногах.



a



b

Рис. 71. Деякі організми крейдовго періоду – тиранозавр (a); гесперорніс (b)

Стиракозаври мали роги на носі та шість рогових шипів на задньому краї кісткового щита (Senter, Mackey 2023). Їхні голови сягали довжини у два метри. Ці шипи та роги робили стиракозаврів небезпечними для багатьох хижаків.

Найлютішим хижим динозавром був тиранозавр (рис. 71a). Він досягав довжини 14 метрів. Його череп, довжиною понад метр, мав великі гострі зуби (Horner et al. 2011). Тиранозавр пересувався на міцних задніх ногах, опираючись на товстий хвіст. Його передні кінцівки були маленькими і слабкими.

Ще одні хижаки – цератозаври – були відносно невеликими, але швидкими хижаками. На голові мали маленький ріг, а на спині – кістковий гребінь (Yun 2019). Цератозавр, як і тирано-



завр, пересувався на задніх ногах, на яких було по три пальці з великими кігтями.

Схожий на тиранозавра тарбозавр був дуже незграбним і полював, переважно, на малорухливих сколозаврів, що нагадували за зовнішнім виглядом сучасних броненосців (Owoccki et al. 2020). Завдяки потужним щелепам і міцним зубам, тарбозаври легко розгризали їхній товстий кістковий панцир.

Величезні птеранодони, розмах крил яких сягав 10 метрів, мали великий череп з довгим кістяним гребенем і довгий беззубий дзьоб. Тіло цієї тварини було відносно невеликим. Харчувалися птеранодони рибою.

З'являються птахи, які добре літати. Археоптерикси повністю вимерли. Однак деякі птахи крейдового періоду мали зуби (Elzanowski 1983).

Гесперорніс, водолубний птах, мав довгий палець на задніх кінцівках, який з'єднувався з трьома іншими короткими плавальними перетинками (рис. 71b). На всіх пальцях були кігті. З передніх кінцівок залишилися лише слабкі плечові кістки у вигляді тонкої палички. У гесперорніса було 96 зубів. По суші птах пересувався вкрай важко. Піднімаючи передню частину тіла і відштовхуючись від землі ногами, гесперорніс пересувався невеликими стрибками. Проте у воді він відчував себе вільно – добре пірнав і швидко плавав.

Іхтіорніси, сучасники гесперорнісів, були невеликими птахами. Вони чудово літали. Їх крила були добре розвинутими, а грудна кістка мала високий кіль, до якого кріпилися міцні грудні м'язи. На дзьобі іхтіорніса було багато дрібних зубів, які були вигнуті назад.

У пізньому крейдовому періоді з'являються численні беззубі птахи.

Земноводні практично не відрізняються від сучасних. Серед ссавців набувають поширення хижакі і травоядні, сумчасті і плацентарні. Вони ще не виконують істотну роль в природі,



проте наприкінці крейдового періоду і на початку кайнозойської ери, коли вимирають динозаври, ссавці розповсюджуються по всій планеті.

Деякі вчені вважають, що головною причиною вимирання динозаврів були саме ссавці, які з'явилися наприкінці крейдового періоду. Хижі ссавці полювали на динозаврів, а травоядні конкурували за рослинну їжу. Деякі існували за рахунок яєць динозаврів. Інші ж дослідники переконані, що головною причиною масового вимирання динозаврів була різка зміна фізико-географічних умов у кінці крейдового періоду, викликаних в тому числі і падінням гігантського астероїда. Похолодання і посухи призвели до різкого зменшення кількості рослин на Землі, через що великі травоядні динозаври втратили харчову базу. Натомість, ссавці мали переваги завдяки постійній температурі тіла, наявності шерсті та здатності годувати своїх дитинчат молоком. Ці фактори надавали їм конкурентну перевагу над динозаврами.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

З відкладами крейдового періоду пов'язані великі родовища крейди, вугілля, нафти і газу, мергелю, пісковиків і бокситів.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

111. Які нові рослини з'являються в крейдовому періоді?
112. Який хижий динозавр був найлютішим?
113. Який птах мав довгий палець на задніх кінцівках і добре плавав?
114. Яку групу тварин вважають основною причиною вимирання динозаврів?
115. Які динозаври мали роги на носі та шість рогових шипів на задньому краї кісткового щита?

ТЕСТ

111. На скільки епох поділяється крейдовий період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

112. Чи була у крейдовому періоді зима?

- а) так, була зі снігом
б) ні, не було
в) була лише періодично
г) була, але без снігу

113. Які перешкоди вдалося відділити в земних лабораторіях на марсіанських сейсмограмах?

- а) ганоїдні
б) кісткові
в) акули
г) хрящові

114. Виберіть групу, де є лише хижі динозаври...

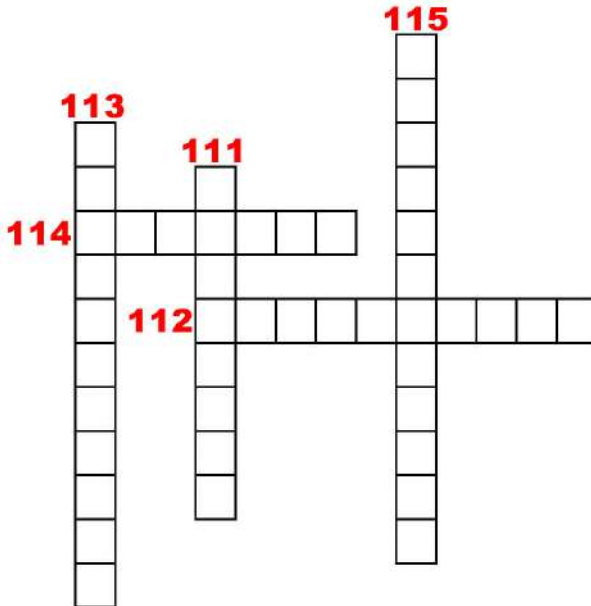
- а) тиранозавр, стегозавр, тарбозавр
б) тиранозавр, цератозавр, стиракозавр
в) тиранозавр, цератозавр, диплодоки
г) тиранозавр, цератозавр, тарбозавр

115. Які з птахів були чудовими літунами у юрському періоді?

- а) гесперорніси
б) іхтіорніси
в) археоптерикси
г) беззубі птахи



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 111–115)





2.13. Палеогеновий період Коли почали домінувати ссавці?

Paleogene Period						
Phanerozoic	Cenozoic	Paleogene	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago	
↑	↑	↑	Oligocene	Chattian	23.03	
				Rupelian	27.82	
			Eocene	Priabonian	33.9	
				Bartonian	37.71	
				Lutetian	41.2	
				Ypresian	47.8	
				Thanetian	56	
				Selandian	59.2	
			Paleocene	Danian	61.6	
					66	

Рис. 72. Палеогеновий період

Мадагаскар; на місці її північної частини розташовувалися великі і маленькі острови. Індія, ще у формі острова, впритул наблизилася до Азії. На початку палеогенового періоду суша зазнала істотних трансгресій, що призвело до зайняття морем значних територій.

У еоцені та олігоцені відбуваються горотвірні процеси (альпійський орогенез), які привели до утворення Альп, Піренеїв, Карпат (Speijer et al. 2020). Продовжується формування Кордильєр, Анд, Гімалаїв, гір Центральної і Південної Азії. На континентах утворюються потужні вугільні пласти. Серед морських відкладів переважають піски, глини, мергелі та вулканічні породи.

Палеогеновий період – перший період кайнозойської ери. Почався 66,0 та закінчився 23,03 млн років тому (рис. 72).

Палеогеновий період поділяється на три епохи: Палеоценову, Еоценову та Олігоценову (рис. 73).

ТЕКТОНІКА

Австралія і Південна Америка загалом вже набули сучасних форм. Утворилася Південна Африка з островом

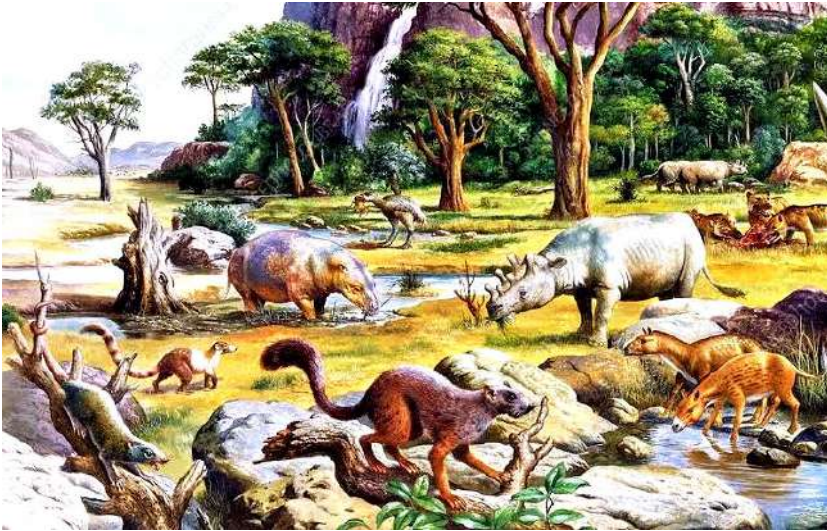


Рис. 73. Ландшафт Землі під час палеогенового періоду

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Клімат палеогенового періоду зазнав значних змін: від теплого та вологого до сухого і прохолодного. У північній півкулі випадав сніг. Були чітко виділені кліматичні зони, існували чітко виражені пори року (Zachos et al. 1993).

Неглибокі, шельфові моря палеогенового періоду населяли різноманітні нумуліти. Головоногих молюсків було відносно мало. З численних родів залишилося лише кілька, які здебільшого існують і в наш час. Було багато також червононогих молюсків, радіолярій і губок. Загалом більшість безхребетних того періоду відрізнялися від тих, що живуть у сучасних морях.



ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

На початку палеогенового періоду значного поширення зазнали сумчасті ссавці. Вони мали багато спільних рис з рептиліями: відкладали яйця, іноді їх тіло було вкрите лускою, а будова черепа нагадувала будову черепа рептилій (Goin, Candela 2004). Проте, на відміну від більшості рептилій, сумчасті мали постійну температуру тіла і годували своїх дитинчат молоком.

Серед сумчастих ссавців переважали травоядні. Вони нагадували сучасних кенгуру і сумчастих ведмедів. Були також й хижаки: сумчастий вовк і тигр. Сумчасті народжували недорозвинених дитинчат, яких тривалий час виношували в шкіряних кишнях на животі (Korth 2018).

Багато сумчастих були монофагами, наприклад, сучасна коала харчується лише листям евкالیптів. Усе це, разом із іншими примітивними ознаками організації, призвело до значного вимирання сумчастих. Лише в Австралії, яка рано відокремилася від інших материків, процес еволюції ніби «призупинився», і велика кількість сумчастих збереглася до наших днів.

У еоцені з'явилися еогіпуси, або гіракотерії (вважаються одними з предків сучасних коней) – маленькі тварини, які жили в лісах біля боліт (рис. 74а). У них на передніх ногах було по п'ять пальців і населяли переважно болотисті заліснені рівнини (MacFadden 1986).

З часом клімат змінився, і на місці болотистих лісів сформувалися сухі степи з жорсткою травою.

Потомки еогіпусів, відомі як орогіпуси, за розміром майже не відрізнялися від них, але мали високі чотиригранні кореневі зуби, які дозволяли їм подрібнювати жорстку рослинність. Череп у орогіпусів вже був більше схожим на череп сучасного коня, ніж у еогіпусів.



Потомки орогіпусів, відомі як мезогіпуси, адаптувалися до нових умов життя. На їх передніх і задніх ногах залишилося по три пальці, середні були більшими та довгими, ніж бокові. Це дозволяло тваринам швидко бігати по твердій поверхні. Маленькі м'які копитця еогіпусів, пристосовані до м'яких болотистих ґрунтів, перетворилися на справжні копита. Мезогіпуси були розміром з сучасного вовка. Вони збиралися у великі стада і населяли олігоценові степи. Потомки мезогіпусів, відомі як меригіпуси, вже сягали розмірів віслюка.

У еоцені з'явилися предки носорогів – великі безрогі тварини. В кінці еоцену від них виникли уїнтатерії (рис. 74b). У них було по три пари рогів, кинжалоподібні довгі ікла і дуже маленький мозок.



а



б

Рис. 74. Деякі організми палеогенового періоду – еогіпус (а); уїнтатерій (б)

Титанотерії, розміром із сучасних слонів, мали великі роги з численними розгалуженнями. Зуби титанотеріїв були невеликі, ймовірно, ці тварини харчувалися м'якою рослинністю (Turnbull, Martill 1988). Жили на луках поблизу річок і озер.



На території центральної Азії в олігоценний період, коли клімат був теплим і вологим, у лісах і степах жило багато безрогих оленів. Тут також траплялися довгоногі індрикотерії. Довжина їхнього тіла сягала 8 метрів, а висота 6 метрів. Індрикотерії харчувалися м'якою рослинністю. Коли клімат став сухим, вони вимерли через втрату харчової бази.

У еоценовий період з'явилися предки сучасних хоботних тварин – тварини з розмірами сучасного тапіра. В них були невеликі бивні, а хобот являв собою витягнуту верхню губу. Від них виникли динотерії, нижня щелепа яких опускалась вниз під прямим кутом. Динотерії вже мали справжні хоботи і жили у вологих лісах з густою рослинністю.

Наприкінці еоцену з'явилися перші представники слонів – палеомастодонти, а також перші представники зубатих і беззубих китів, а також сиренові.

Деякі предки мавп і лемурів жили на деревах, харчувалися фруктами та комахами. У них були довгі хвости, які допомагали лазити по деревах, кінцівки з добре розвинутими пальцями.

У еоцені виникли перші свині, бобри, хом'яки, їжаки, карликові безгорбі верблюди, перші летючі миші, широконосі мавпи, а в Африці – перші гомініди.

Хижі креодонти, невеликі тварини, були схожі на сучасних вовків. Вони ще не мали справжніх «хижих» зубів. Їхні зуби були майже однакового розміру, а скелет мав примітивну будову. У еоцені від них виникли справжні хижаки з різними формами зубів. Саме від них походять усі представники сучасних собачих і котячих.

Палеогеновий період відзначався нерівномірним розподілом фауни на материках. Тапіри і титанотерії здебільшого розвивалися в Америці, хоботні і хижаки – в Африці. В Австралії продовжували жити сумчасті. Отже, поступово фауна кожного материка набувала індивідуального характеру.



З'явилося багато беззубих птахів, які характерні і для нашого часу. Проте поряд із ними жили великі нелітаючі птахи, які повністю вимерли в палеогені, – діатрима та фороракос (Martin 2010).

У палеогеновий період змінюється рослинний покрив Землі. З'являється багато нових родів квіткових рослин. Сформувалися дві рослинні області. Перша (тропічна область) охоплювала Мексику, Західну Європу і Північну Азію. В ній переважали вічнозелені лаври, пальми, мирти, гігантські секвої, тропічні дуби і деревоподібні папороті. На території сучасної Європи росли каштани, дуби, лаври, камфорні дерева, магнолії, хлібні дерева, пальми, туї, араукарії, виноград, бамбук.

У еоцені клімат став ще теплішим. З'явилося багато сандалових і мильних дерев, евкаліптів. Наприкінці еоцену клімат став дещо холоднішим, що привело до появи тополі, дуба і клена.

Друга рослинна область охоплювала Північну Азію, Америку і сучасну Арктику (помірна область). Тут росли дуби, каштани, магнолії, буки, берези, тополі, калина. Іноді траплялися пальми і ялини.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

У палеогеновий період утворилося багато родовищ коричневого вугілля, нафти, газу, марганцевих руд, ільменіту, фосфоритів, скляних пісків, оолітових залізних руд.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

116. Які ссавці зазнають поширення у палеогеновому періоді?
117. Яка тварина вважається предком коня?
118. Яка тварина вважається предком носорога?
119. Як називався предок сучасних слонів?
120. Від яких тварин походять сучасні собачі і котячі?

ТЕСТ

116. На скільки епох поділяється палеогеновий період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

117. Які тварини мали великі роги з численними розгалуженнями і були розмірами, близькими до сучасних слонів?

- а) палеомастодонти
б) уїнтатерії
в) титанотерії
г) креодонти

118. Палеогеновий період відзначався...

- а) рівномірним розподілом фауни на материках
б) нерівномірним розподілом фауни на материках
в) стрічкоподібним розподілом фауни на материках
г) довготним розподілом фауни на материках

119. Скільки рослинних зон було характерно для палеогенового періоду?

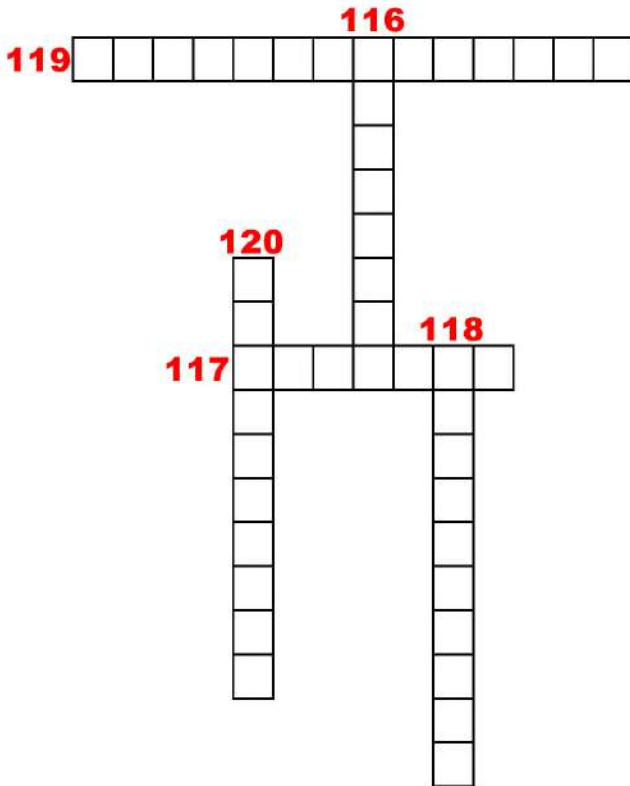
- а) 1
б) 2
в) 4
г) 6

120. У яких тварин хобот являв собою витягнуту верхню губу?

- а) динотерії
б) уїнтатерії
в) титанотерії
г) палеомастодонти



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 116–120)





2.14. Неогеновий період

Неогеновий період – колиска сучасної природи

Neogene Period						
Eonothem/ Eon	Erathem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago	
Phanerozoic	Cenozoic	Neogene	Miocene	Pliocene	Placenzian	2.58
				Zanclean	3.600	
				Messinian	5.333	
				Tortonian	7.246	
				Serravalian	11.63	
				Langhian	13.82	
				Burdigalian	15.97	
				Aquitarian	20.44	
					23.03	

Рис. 75. Неогеновий період

Неогеновий період – другий період кайнозойської ери. Тривав від 23,03 до 2,588 млн років тому (рис. 75).

Неогеновий період поділяється на дві епохи: Міоценову та Пліоценову (рис. 76).

ТЕКТОНІКА

Протягом періоду Європа з'єднується з Азією. Дві глибоких затоки, які виникли на території Атлантики, в подальшому відокремили

Європу від Північної Америки. Африка повністю сформувалася, триває формування Азії. На місці сучасної Берингової протоки продовжує існувати зв'язок між Північно-Східною Азією і Північною Америкою (Raffi et al. 2020). Час від часу це перехрестя, сухопутний коридор, зазнає морських трансгресій. Океани набули сучасних контурів. Остаточо формуються Альпи, Гімалаї, Кордильєри, східноазіатські хребти. Поблизу їхніх підніжжів утворюються впадини, де відкладаються потужні товщі осадових і вулканічних гірських порід.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА

Наприкінці неогену більша частина материків звільнилася від моря. Клімат неогенового періоду був достатньо теплим і вологим, проте дещо прохолоднішим у порівнянні з кліматом па-



леогенового періоду (Is'hakov 2022). Наприкінці неогену він набуває сучасних рис.

ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

Схожим із сучасним стає і органічний світ. Примітивних креодонтів витіснили ведмеді, гієни, куниці, борсуки. Будучи більш рухливими і маючи складнішу організацію, вони пристосувалися до різноманітних умов життя.



Рис. 76. Ландшафт Землі під час неогенового періоду

Поряд із видами, які, змінившись, дожили до наших часів, з'явилися види хижаків, які вимерли в неогені (Morgan et al. 1995). До них насамперед належить шаблезубий тигр. Його назвали так через те, що його верхні ікла сягали в довжину 15 см.

Потомки палеогенових меригіпусів – гіпаріони, мали вже зуби, подібні до сучасних коней. Їхні невеликі бічні копита не торкалися землі. Копита на середніх пальцях ставали більшими і ширшими. Вони добре утримували тварин на твердій поверхні, давали можливість розгортати сніг, щоб видобути з-під нього їжу та захищатися від хижаків.



Поруч із північноамериканським центром розвитку коней існував європейський. Проте в Європі давні коні вимерли на початку олігоцену, не залишивши нащадків. Імовірно, їх винищили численні місцеві хижаки (Golikov, Scarlato 1989). В Америці ж древні коні продовжували розвиватися. Пізніше від них утворилися справжні коні, які через Беринговий «міст» проникли в Європу та Азію.



а



б

Рис. 77. Деякі організми неогенового періоду – мегатерій (а); мегалоцерос (б)

У Південній Америці жили велетенські лінивці – мегатерії з довжиною тіла до 8 м (рис. 77а). Стоячи на задніх ногах, вони поїдали листя дерев. Їхні передні лапи були набагато коротшими за задні. Тварини були незграбними, тому легко ставали здобиччю для хижаків, що, врешті, спричинило їхнє вимирання.

Зміна кліматичних умов призвела до виникнення великих степів, що сприяло розвитку копитних тварин. Від невеликих безрогих оленів, які жили на болотяних проторах, походять численні парнокопитні – антилопи, бізони, газелі, які мали міцні копита, добре пристосовані для швидкого бігу по степах. Коли кількість пар-



нокопитних стала настільки великою, що почалася нестача їжі, деякі з них адаптувалися до нових місць проживання: скелясті гірські місцевості, лісостепа, пустелі. Від жирафоподібних верблюдів, які жили в Африці, походять справжні верблюди, які заселили пустелі та напівпустелі в Європі та Азії.

Ліси населяли справжні олені, серед яких деякі види трапляються й тепер, а інші, такі як мегалоцероси (рис. 77b), що були набагато більшими за звичайних оленів, повністю вимерли.

У лісостепових зонах водилися жирафи, біля озер і боліт – бегемоти, свині, тапіри; в густих чагарникових заростях – носороги, мурахоїди. Серед хоботних з'являються мастодонти з прямими довгими бивнями і справжні слони (Smith, DeSantis 2020).

На деревах лазили лемури, мавпи, серед яких були й антропоморфні. Деякі лемури перейшли до наземного способу життя і пересувалися на задніх лапах. Вони сягали 1,5 метра у висоту і, переважно, харчувалися фруктами та комахами.

Гігантська птаха дінорніс (моа), яка жила в Новій Зеландії і сягала 3,5 метра у висоту, дожила до четвертинного періоду, проте була знищена людьми.

У неогеновому періоді з'явилися дельфіни, тюлені, моржі – серед них види, які живуть і тепер.

На початку неогенового періоду в Європі та Азії було багато хижих тварин: шаблезубі тигри, гієни. Серед трав'яних переважають мастодонти, олені та однорогі носороги.

У Північній Америці хижаки були представлені шаблезубими тиграми, а трав'яні – титанотеріями, конями та оленями. У фауні Південної Америки домінували сумчасті, мегатерії, лінивці, броненосці, широконосі мавпи. У верхньому міоценовому періоді між Північною Америкою та Євразією відбувається обмін фауною. У Північну Америку потрапили мастодонти, носороги, деякі хижаки, а в Європу й Азію – коні.

З початком пліоцену в Азії, Африці та Європі розселилися безрогі носороги, мастодонти, антилопи, газелі, свині, тапіри,



жирафи, шаблезубі тигри, ведмеді. Однак у другій половині пліоцену клімат на Землі став прохолодним, і мастодонти, тапіри, жирафи, мігрували на південь, а на їхнє місце прийшли бізони, олені, ведмеді. У пліоцені «міст» між Америкою та Азією зник. У той самий час відновився зв'язок між Північною і Південною Америкою. Північноамериканська фауна поширилася в Південну Америку і поступово витіснила місцеву фауну. Залишилися лише броненосці, лінивці та мурахоїди (Lee et al. 2018).

Ізоляція Австралії, що продовжувалася, сприяла збереженню давньої фауни.

Серед морських безхребетних у цей час переважали двостулкові та черевоногі молюски, морські їжаки.

Прохолодний клімат призвів до поступового зникнення тропічних форм. Вже чітко відстежується кліматична зональність.

У середині міоцену в південних широтах Північної півкулі вже ростуть пальми і лаври, в середніх переважають хвойні дерева, дуби, клени, тополі, граби, ясени, каштани, берези. На півночі ростуть ялини, сосни, берези, граби, верби, буки, дуби та клени.

У пліоценовий період на півдні Європи ще залишилися лаври, пальми і південні дуби. Проте вони почали витіснятися ясенем і тополею. На півночі Європи теплолюбні рослини зникли, а на їх місці з'явилися сосни, ялини, берези, граби і верби.

У Північній Америці протягом міоцену теплолюбні види поступово витіснялися широколистяними і хвойними лісами. Наприкінці пліоцену на півночі Північної Америки і Євразії існувала тундра.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

У відкладах неогенового періоду трапляються родовища нафти, природного газу, сірки, гіпсу, вугілля, залізних руд та кам'яної солі.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

121. Яка точна назва гігантського лінивця?
122. У якого оленя були гігантські роги?
123. Яка гігантська птаха жила в Новій Зеландії?
124. Який тигр з'являється в неогені?
125. Який «міст» з'єднавав Азію і Північну Америку?

ТЕСТ

121. На скільки епох поділяється неогеновий період?

- | | |
|------|------|
| а) 1 | в) 3 |
| б) 2 | г) 4 |

122. Поруч із північноамериканським центром розвитку коней існував ... центр.

- | | |
|-------------------|-----------------|
| а) азіатський | в) європейський |
| б) австралійський | г) азіатський |

123. Збереженню давньої фауни в Австралії сприяла...

- | | |
|------------------------------------|--|
| а) ізоляція материка | в) зв'язок Австралії з Африкою |
| б) зв'язок Австралії з Антарктидою | г) зв'язок Австралії з Новою Зеландією |

124. Хто був потомками палеогенових меригіпусів?

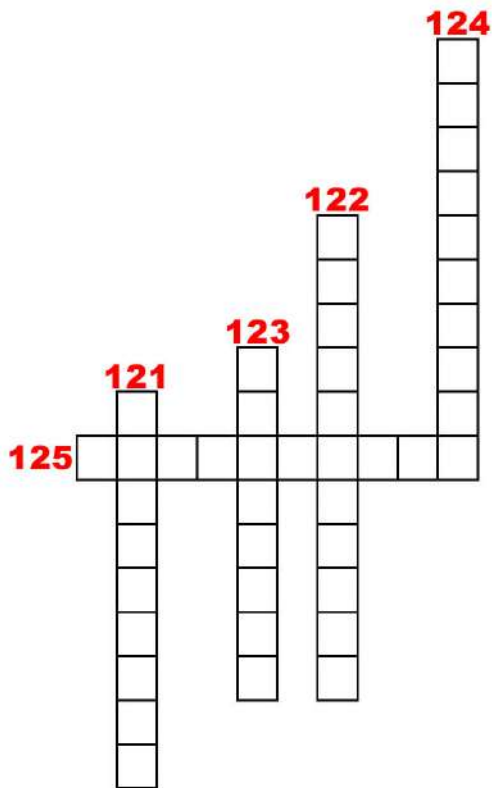
- | | |
|--------------|-----------------|
| а) еогіпуси | в) мустанги |
| б) гіпаріони | г) мегалоцероси |

125. Виберіть групу травоядних Північної Америки в неогені.

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| а) титанотерії, коні, дінорніси | в) лемури, коні, олені |
| б) титанотерії, мегатерії, олені | г) титанотерії, коні, олені |



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 121–125)





2.15. Четвертинний період

Період, коли з'явилася сучасна людина...

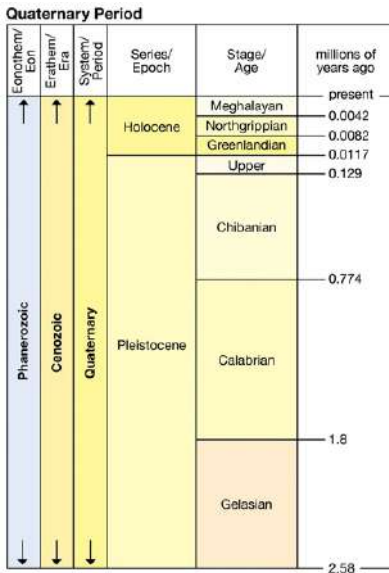


Рис. 78. Четвертинний період

Четвертинний період – останній період кайнозойської ери, який триває і тепер. Розпочався 2,588 млн років (рис. 78).

Четвертий період поділяється на дві епохи: Плейстоценову та Голоценову. У четвертому періоді відбулися чотири потужних зледеніння: Гюнцьке, Міндельське, Риське та Вюрмське (рис. 79).

ТЕКТОНІКА

Протягом четвертого періоду материки та океани остаточно набули сучасних контурів. Клімат постійно змінювався. У початковий

період пліоцену відбулося загальне підняття материків. Великий льодовик під час гюнцького зледеніння рухався з півночі, несучи велику кількість уламкового матеріалу. Товщина цього льодовика сягала приблизно 800 метрів. Льодами вкрилася значна частина Північної Америки і альпійська область Європи (Keller, Rockwell 1984). Під льодовиком розташовувалася Гренландія. Пізніше льодовик розтанув, а уламковий матеріал (морена, валуни, піски) залишився на поверхні. Коли клімат став відносно теплим і вологим, острови Великобританії відокремилися від Франції річковою долиною, а сама річка Темза була притокою



Рейну. Чорне та Азовське моря були значно більшими, ніж сучасні, а Каспійське море – глибшим.

ГІДРОСФЕРА Й АТМОСФЕРА ТА ОРГАНІЧНИЙ СВІТ

На Заході Європи жили бегемоти, носороги та коні. Слони висотою до 4 метрів населяли територію сучасної Франції. У Європі та Азії мешкали леви, тигри, вовки і гієни. Найбільшим хижаком того часу був печерний ведмідь, який практично на третину був більшим від сучасних ведмедів.



Рис. 79. Ландшафт Землі під час четвертинного періоду

У тундрі і степах Євразії та Північної Америки жили мамонти, які сягали 3,5 метра у висоту. У них був великий горб на спині з жировим запасом, що допомагав пережити тривалі періоди, коли не вдавалося відшукати їжу. Густа шерсть і товстий підшкірний жир служили мамонтам і захистом від холоду.

Рослинність на початку плейстоцену складалася, насамперед, з кленів, беріз, ялиць та дубів. Тропічна ж рослинність практично не відрізнялася від сучасної.



Міндельський льодовик покрив Північний Урал, верхів'я річки Ельби та частину Карпат.

В Північній Америці льодовик розповсюдився на більшу частину Канади і північну частину США. Потужність льодовика сягала 1000 метрів. Пізніше льодовик розтанув, залишивши велику кількість льодовикового матеріалу на поверхні землі. Вітер розносив цей матеріал, текучі води його транспортували, поступово утворюючи могутні шари лесу. Рівень морів значно піднявся.

У Західній Європі росли густі ліси, в яких переважали дуби, тиси і буки. Траплялися рододендрони, інжир і самшит, що є свідченням значно теплішого клімату, у порівнянні із сучасним (Delcourt, Delcourt 1988).

Типова полярна фауна: лисиці, полярні ведмеді та північні олені, переселилися в північну тундру. Разом із ними територію ділили мамонти (рис. 80a), шерстисті носороги (рис. 80b) і великорогі олені. Шерстистий носоріг був повністю покритий густою довгою шерстю, досягав 1,6 метра у висоту і близько 4 метрів у довжину (Woodman et al. 1997).

Великорогий олень мав великі роги, що нагадували за своєю формою роги сучасного лося. Відстань між кінцями рогів досягала 3 метрів, вони важили близько 40 кілограмів. Великорогі олені поширилися на території Європи та Азії і дожили до голоцену.

Південніше тундри мешкали бізони, коні, олені, сайгаки, печерні ведмеді, вовки, лисиці, носороги, печерні та звичайні леви. Печерні леви були майже на третину більшими від звичайних. У них була густа шерсть і довга розпушена грива. Доповнювали фауну печерні гієни, які були майже вдвічі більшими від сучасних гієн. На півдні Європи поширювалися бегемоти.

Риське зледеніння покрило могутнім льодовим шаром, висотою до 3000 метрів, північну частину Західної Європи, двома довгими льодовиковими язиками сягло території сучасного м. Дніпра.

Льодом була вкрита вся північна частина Північної Америки.



На льодовиковій периферії жили мамонти, північні олені, лисиці, куріпки, бізони, вовки, лисиці, бурі ведмеді, зайці, вівцебики. Мамонти та шерстисті носороги поширилися до Апеннінського півострова, оселилися на території сучасної Англії і в Сибіру.



a



b

Рис. 80. Деякі організми четвертинного періоду – мамонт (a); шерстистий носоріг (b)

Льодовик розтанув, і рівень моря знову піднявся, внаслідок чого воно затопило північне узбережжя Західної Європи і Північної Америки.

Клімат залишався вологим і прохолодним. Збільшувались площі лісів, в яких росли ялини, граби, вільхи, берези, сосни і клени (Höttl, Zötl 1978). У лісах мешкали тури, олені, рисі, вовки, лисиці, зайці, косулі, дикі кабани, ведмеді. У лісостеповій зоні ще траплялися носороги. У південних степах типовими були стада бізонів, зубрів, коней, сайгаків і страусів. На них полювали вовки леви і гієни.

Вюрмське зледеніння вкрило покривним льодовиком практичну всю Європу, крім її південної частини. Окремими льодо-



виками була вкрита північна частина Канади. Потужність льодовика сягала 300–500 метрів (Hewitt 2000). Його кінцеві і донні морени утворили сучасний моренний ландшафт. Поблизу льодовиків виникли холодні та сухі степи. Там росли карликові берези і верби. На південь поширювалася тайга, де росли ялини, сосни і ялиці. В тундрі жили мамонти, шерстисті носороги, вівцебики, лисиці, північні олені, куріпки і зайці; в степовій зоні – коні, носороги, сайгаки, буйволи, печерні леви, гієни, вовки, а в лісах – олені, рисі, вовки, лисиці, бобри, ведмеді, тури.

Вюрмський льодовик поступово відступав. Досягнувши Балтійського моря, він зупинився. Поблизу утворилося багато озер, де відкладалися так звані стрічкові глини (товщі порід в яких перешаровується пісок і глини). Піщані шари відкладалися влітку, коли через інтенсивне танення льоду формувалися бурхливі потоки. Взимку води було менше, потік річок слабшав, і вода могла переносити та відкладати лише дрібні фракції, з яких формувалися глиняні прошарки.

Фінляндія в той час мала вигляд архіпелагу. Балтійське море сполучалося широкою протокою з Північним Льодовитим океаном.

Пізніше льодовик відступив до центральної частини Скандинавії, на півночі утворилася тундра, а потім тайга. Носороги і мамонти вимерли. Полярні форми тварин мігрували на північ. Фауна поступово набула сучасного вигляду.

У саванах Європи жили леви, гієни, і час від часу туди потрапляли тигри.

У четвертинному періоді остаточно формується сучасна людина *Homo sapiens*.

КОРИСНІ КОПАЛИНИ

З четвертинним періодом пов'язані родовища золота, платини, алмазів, ізумрудів, сапфірів, а також формування заліза, піску, глини та льоду.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

126. Як називається перше велике зледеніння четвертинного періоду?

127. Як називається останнє велике зледеніння четвертинного періоду?

128. У вигляді чого була сучасна Фінляндія під час вюрмського зледеніння?

129. Хто остаточно формується як розумний вид у четвертинному періоді?

130. Яку тварину четвертинного періоду називають шерстистим ...?

ТЕСТ

126. На скільки епох поділяється четвертинний період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

127. Скільки зледенінь відбулося в четвертинний період?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

128. Якої потужності сягав льодовик під час гюнцького зледеніння?

- а) 400 м
б) 600 м
в) 800 м
г) 1000 м

129. Якої потужності сягав льодовик під час міндельського зледеніння?

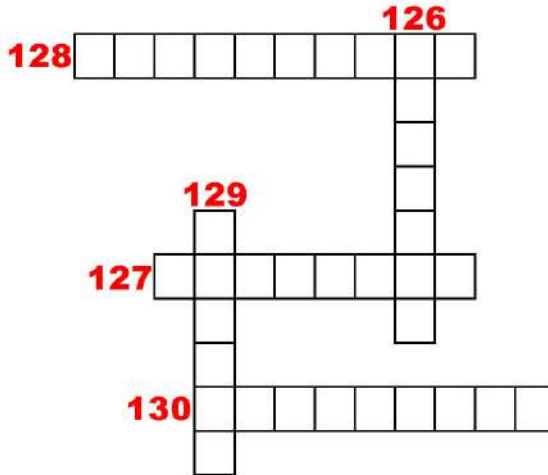
- а) 400 м
б) 600 м
в) 800 м
г) 1000 м

130. Чи були сформовані сучасні природні зони в четвертинному періоді?

- а) так
б) ні
в) лише у Північній півкулі
г) лише у Південній півкулі



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 126–130)



ЧАСТИНА 2
ЗЕМЛЕТРУСИ



РОЗДІЛ 3 СЕЙСМОЛОГІЯ І СЕЙСМОМЕТРІЯ

3.1. Коротка історія сейсмології *Як засвідчити земний неспокій?*

Як часто ви відчували й помічали землетруси? Будинки Чернівців – мовчазні свідки плеяди землетрусів з віком понад наші життя. Більше сторіччя тому у стінах ІІ корпусу Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича встановлена перша сейсмічна станція університету як відгомін налагодження роботи сейсмічної служби Віденської академії наук після сильного землетрусу у Любляні у 1895 р. На початку ХХ ст. – це була одна із 67 сейсмічних станцій світу, дані яких використовувалися для вивчення і прогнозування землетрусів по всьому світу.

Землетруси фіксували і значно раніше, використовуючи найрізноманітніші конструкції – сейсмоскопи⁵⁸ та сейсмографи. Найдавніший сейсмоскоп винайдений китайським філософом Чжан Хеном у 132. р. н.е (рис. 81a). Це була велика чаша, на зовнішній стороні якої закріплені вісім голів дракона, спрямованих на головні напрямки горизонту. Під кожною головою дракона розташовувалась жаба з ротом, відкритим до дракона. Коли відбувався землетрус, одна чи кілька з восьми пащ драконів випускали кульку у відкритий рот жаби, що перебувала внизу. Напрямок струсу визначався за випущеною кулькою з голови того чи іншого дракона (рис. 81b). У хроніках знаходимо повідомлення, що прилад виявив землетрус за 400 миль, який не відчу-

⁵⁸ **Сейсмоскоп** – прилад, що вказує напрямлення на епіцентр землетрусу.



вався в місці розташування сейсмокопа. Оскільки такі прилади не збережені, лише припускають, що всередині чаші функціонував якийсь маятник, що активував драконів.

Історія запису землетрусів не є лінійним або постійним прогресом. Подібні прилади для виявлення руху землі були добре відомі і використовувались як в античності, так і у середньовіччі. Наприклад, примітивний сейсмокоп побудований за часів римського імператора Адріана⁵⁹ – лише через півстоліття після виверження Везувію, яке зруйнувало Помпеї. Подібний пристрій використаний і під час облоги Ексетера⁶⁰ в 1549 р. Він застосовувався, щоб визначити місце розташування ворогів, які копали підземні тунелі.



а



б

Рис. 81. Чжан Хен (78–139) – китайський вчений-полімастик і державний діяч з Наньяна, який жив за часів Династії Хань. (а);

⁵⁹ **Адріан** – римський імператор (117–138). Представник дому Антонінів. Народився в Іспанії. Виріс при дворі свого родича імператора Траяна, спадкоємцем якого став (усиновлений в 117 році).

⁶⁰ **Ексетер** – місто та адміністративний центр графства Девон, Англія. Розташоване на березі річки Екс, найближчі великі міста – Плімут та Брістоль.



сейсмоскоп Чанг Хенга (b)

Так, у документі того часу читаємо: «Почувши шум під землею, він бере посудину з водою і, переносючи її з місця на місце, нарешті знаходить, де копають тунель». Однак жодне застосування подібних конструкцій для запису чи вивчення безпосередньо землетрусу не відоме від епохи Відродження до XVIII ст. Насправді теоретичні та технічні питання на той час були недостатньо розроблені, щоб уможливити запис руху земної поверхні. З цих причин історія розвитку ранніх інструментів запису землетрусів – це накопичення емпіричних знань шляхом численних спроб і помилок.

До середини XIX ст. сейсмоскопи стали поширеними по всьому світу. Їхнє використання, крім Італії та Великобританії, задокументовано:

- в Цинциннаті, США;
- з причин землетрусів у Новому Мадриді 1811 та 1812 років;
- в Тебрізі, Ірані, через землетрус у 4 жовтня 1856 р.;
- у Манілі, Філіппіни, завдяки події 20 червня 1857 р.;
- в кількох місцях у Німеччині 24 червня 1877 р. у зв'язку із землетрусом у Герцогенрат.

Однак сейсмоскопи не дають достатньо інформації про природу землетрусів, і в цьому полягає найбільш імовірна причина сучасної низької актуальності сейсмокопічних спостережень, оскільки коливання земної кори під час землетрусів приладами не фіксувалися, як і характеристики поширення хвиль на далекі відстані.

Лише наприкінці дев'ятнадцятого століття розв'язані ключові проблеми щодо записів поштовхів, а також технології інструментального запису внутрішніх рухів Землі, оскільки до цього часу землетруси безпосередньо не фіксували, а лише кон-



статували факт, що стався землетрус. Мова йде про три компоненти, що давали змогу не лише виявляти землетрус, але й записувати самі поштовхи. Перший елемент – перетворювач – пристрій, який трансформує коливання земної кори в якусь іншу змінну (наприклад, напругу), яку можна записати. Другий – це сама система запису – пристрій, що дає змогу візуалізувати і зберігати трансформовані дані для їх подальшої перевірки та аналізу. Нарешті – третій елемент – це система посилення і попередньої обробки сигналу. Перший такий прилад – сейсмограф – сконструйований у 1875 році.



а



б

Рис. 82. Філіппо Чеккі (1822–1887) – після навчання у Скуоле Пай у Флоренції Філіппо Чеккі вступив до ордену піаристів, вивчав фізичні науки та математику у флорентійському коледжі Сан-Джованніно (а);
Сейсмограф Чеккі (б)

Однак у той час винахід залишився непоміченим. На відміну від будь-якого з розглянутих інструментів до цього, очікувалося, що сейсмограф Чеккі зафіксує рух маятника відносно земної поверхні як функцію часу (рис. 82а). Він базувався на принципі інерції. Два загальних маятники використовувались для за-



пису горизонтальних коливань, вони рухалися у протилежних напрямках і розміщувалися перпендикулярно один одному. Маса, утримувана на спіральній пружині, використовувалася для запису вертикального руху. Прилад не був розроблений для безперервного запису, і Чеккі влаштував так, що сейсмограф запускав годинник і приводив у рух поверхню для запису, копчену скляну пластинку, під час проходження землетрусу (рис. 82b). Поверхня запису рухалася під голками зі швидкістю один сантиметр на секунду. Проте, як виявилось, тертя самої системи запису було надто сильним, щоб зареєструвати віддалені землетруси, тому, мабуть, і винахід не зазнав поширення (Batllo 2014).

Відтоді можна виділити три основні групи або «школи» дизайнерів сейсмографів і навіть присвоїти кожній з них національність:

- італійці, зі своїми вже давніми традиціями експериментів, де Пальмієрі та Чеккі можна назвати найкращими представниками;
- англо-японці, зі швидко прогресуючим тріо Мілн–Юінг–Грей;
- німці Ребер–Пашиці з досвідом фіксації слабких землетрусів у власній країні.

Останні зосередились на виявленні мікросейсм⁶¹ на низьких частотах.

Незважаючи на різні підходи, очевидно, що всі винахідники прийняли принцип інерції для конструкції основного інструмента. Були випробувані всі види маятників. Десь у ті часи (можливо, італійський винахід) вже здійснювався аналоговий без-

⁶¹ **Мікросейсм** – визначається як слабкий тремор Землі, спричинений низкою природних явищ.



перервний сейсмічний запис. Елемент запису складався зі спіральної лінії, нанесеної на папір, поміщений на барабан, що обертався гвинтом. У такий спосіб стало можливим отримати 24-годинний запис на унікальному аркуші паперу з визначеними розмірами.

Відповідно подальші удосконалення стосуються конструкцій маятників, противаг для подолання тертя підсилювача і механізму запису.



Рис. 83. Віктор Конрад

Віктор Конрад (1876–1962) – австрійський геофізик, сейсмолог, метеоролог, ім'я якого увічнене у понятті поверхні Конрада.

А тепер повернемося до Австро-Угорської монархії на початку ХХ ст. і познайомимось з Віктором Конрадом, який у 1904 році стає відповідальним за сейсмічний моніторинг на теренах всієї монархії (рис. 83). У 1911 р. його запрошено очолити кафедру космічної фізики у Чернівцях. Дбаючи про розбудову нової кафедри, Віктор Конрад у листах до Міністерства віровизнань та освіти переконливо обґрунтовує необхідність додаткових субсидій для створення сейсмічної станції в університеті Чернівців (Сергеева 2015). Дуже зворушливими в цих листах є рядки з побажанням «відчути даровану підвищену увагу новоствореному інституту космічної фізики на далекому сході монархії». І спра-



вді субсидії, які давали змогу замовляти обладнання безпосередньо у виробника – були, і це зважаючи на те, що асистент на станції отримував річну виплату собівартістю пів кілограма золота (Hammerl, Lenhardt 2003).

Звернемо увагу на обладнання. У той час Конраду вдалося встановити на станції один із найпрогресивніших сейсмографів того часу – біфілярний горизонтальний двокомпонентний сейсмограф з реєстрацією коливань земної поверхні на закопчений папір за авторством Карла Майнка (Rosner 2009). Такими сейсмографами було обладнано чимало обсерваторій світу. Виготовлялися вони відомим підприємством з дизайну і виробництва І.А. Бош у Страсбурзі – тодішньому центрі сейсмології Німеччини. Сейсмограф Майнка впродовж десятиліть використовувався для вивчення землетрусів в університеті Чернівців у різні періоди – австрійський, румунський, радянський (рис. 84а). І так, він досі зберігається у навчально-науковій геофізичній обсерваторії географічного факультету. Цікаво, що водночас із ним використовувався і сейсмограф власної конструкції Віктора Конрада – маятник Конрада, що розрахований на реєстрацію сильних коливань земної поверхні, проте, на жаль, втрачений у роки Другої світової війни.

Згадаємо і те, що за румунського часу сейсмічну станцію було обладнано ще одним інноваційним приладом – вертикальним сейсмографом Віхерта. Астатичний маятник Віхерта став еталонним інструментом на довгі роки. Кілька виробників комерціалізували різні версії інструмента і до початку Другої світової війни, понад 100 сейсмічних станцій по всьому світу використовували подібні інструменти. Декілька все ще експлуатуються і використовуються як еталонні прилади. На його сейсмограмах уже чітко можна вирізнити поперечні і поздовжні хвилі. Швидкість поперечних хвиль в товщах порід земної кори змінюється від 200 м/с до 1000 м/с, поздовжніх – від 1500 м/с (вода), 2000–2500 м/с (суглинки, глини) до 5000–7000 м/с (кристалічні поро-

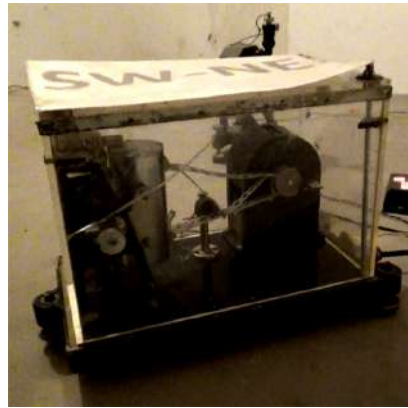


ди). Така специфіка хвиль дала змогу сейсмологу Андрію Моховичичу визначити межу між шарами земної кори та мантиї за різницею швидкостей сейсмічних хвиль у кожному шарі після землетрусу 8 жовтня 1908 року поблизу Загреба. Відповідно цю межу назвали за прізвищем автора «Мохо».

Подібно до Віхерта, російський князь Борис Голіцин, який керував сейсмічною станцією у Пулково біля Санкт-Петербурга, був глибоко зацікавлений у вдосконаленні сейсмоскопу. Саме йому належить винахід електромагнітного сейсмографа у 1905 році, в якому замість механічного перетворювача, що підсилює рух земної поверхні за допомогою важелів, застосовується вже електромагнітний. Отже, рухи земної поверхні приладом трансформувалися на електричний струм і оптично реєструвалися за допомогою гальванометра на фотопері.



a



b

Рис. 84. Сейсмічна станція геофізичної обсерваторії ЧНУ ім. Ю. Федьковича – сейсмограф Карла Майнка (a); Сучасні сейсмографи (b)

У геофізичній обсерваторії Чернівецького національного університету сьогодні використовується нащадок цього приладу



– сейсмограф системи Кірноса. Його основне призначення – реєстрація віддалених землетрусів. Він впевнено приймає землетруси Америки, Африки, Океанії, але геологічна будова території не дає нам змоги реєструвати землетруси, які відбуваються у Західній Європі. У підвальному приміщенні встановлений також менший сейсмограф для реєстрації місцевих землетрусів, які мають інші частоти і магнітуду (рис. 84b).

Сильні землетруси із магнітудою більше 5 у Чернівцях фіксують десь раз у 40 років. Натомість лише у 2020 році у світі зареєстровано понад 1 800 сильних землетрусів. Так, лише за тиждень в Ісландії можуть фіксувати близько 18 000 землетрусів різної сили, що, на думку місцевих геофізиків, може свідчити про новий період тектонічної і вулканічної активності.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

131. Назвіть країну, в якій був винайдений сейсмоскоп?
132. Раз на скільки років у Чернівцях фіксують землетруси із магнітудою понад 5?
133. Хто очолив кафедру космічної фізики в Чернівцях у 1911 р.?
134. Хто сконструював перший сейсмограф?
135. Як називається найдавніший прилад для фіксації землетрусів?

ТЕСТ

131. Найдавніший сейсмоскоп був винайдений...

- а) Філіппо Чеккі
б) Віктором Конрадом
в) Чжаном Хеном
г) Карлом Майнком

132. У якому столітті винайшли сейсмограф?

- а) XX ст.
б) XIX ст.
в) XVIII ст.
г) XXI ст.

133. Який сейсмограф було встановлено в Чернівцях?

- а) Чеккі
б) Конрада
в) Карла Майнка
г) Віхерта

134. Хто винайшов електромагнітний сейсмограф?

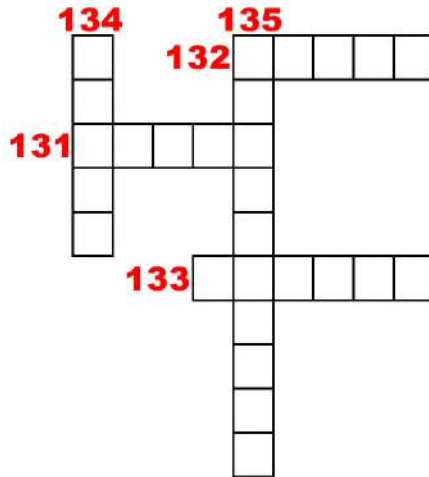
- а) Голцін
б) Конрад
в) Чеккі
г) Віхерт

135. Який сейсмограф використовується наразі в геофізичній обсерваторії ЧНУ?

- а) Голціна
б) Конрада
в) Віхерта
г) Кірноса



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 131–135)





3.2. Землетруси. Сейсмічні шкали *Які інтенсивність та енергія землетрусів?*

Основні параметри, які характеризують землетруси, – це сила або інтенсивність сейсмічного ефекту, який виражається в балах, і магнітуда, що оцінюється по кількості виділеної з вогнища землетрусу енергії. Під час визначення бальності землетрусів за шкалою інтенсивності враховується сукупність багатьох ознак, у тому числі показників сейсмічних станцій, характер пошкоджень будівель і конструкцій, залишкові явища в ґрунтах, зміна режиму підземних та поверхневих вод, а також суб'єктивні відчуття поштовхів і коливань людьми.

Перша шкала інтенсивності була розроблена Мікеле Стефано де Россі в Італії (рис. 85а) і Франсуа-Альфонсом Форелем в Швейцарії наприкінці XIX ст. (рис. 85b). Шкала землетрусів Россі–Фореля розподілена на 10 балів (Silva et al. 2015). У деяких країнах дотепер використовується 10-бальна шкала ранжування землетрусів.

Дещо досконаліша 12-бальна шкала була розроблена в 1902 році італійським сейсмологом і вулканологом Джузеппе Меркаллі й удосконалена в 1956 році Гаррі Вудом і Френком Нойманом у ключі застосування до умов Каліфорнії та загалом території США (Dowrick 1996). Модифіковану шкалу інтенсивності Меркаллі використовують в США дотепер.

В одному з найбільш сейсмоактивних регіонів нашої планети – Японії, на яку припадає майже 10 % загальної сейсмічної активності нашої планети, використовується власна шкала інтенсивності.

Відмінність шкал, що використовуються, пояснюється різними геологічними, ґрунтовими, приповерхневими умовами сейсмогенних областей. Власне, ці шкали мають описовий характер, оскільки базовані не на вимірах коливань ґрунту з допомогою відповідних інструментів, а на очевидних спостереженнях



дії землетрусу в плейстосейстовій області⁶², тобто в зоні сильних коливань і масових руйнуваннях під час землетрусу.

Оцінюючи шкалу інтенсивності землетрусів у балах (12-бальна), класифікувати землетруси за інтенсивністю, або силою, можна так (таблиця 1):

1–3 бали – слабкі;

4–5 балів – відчутні;

6–7 балів – сильні, руйнують старі будівлі;

8 балів – руйнівні, при яких падають фабричні і заводські труби, частково руйнуються міцні будівлі;

9 балів – спустошуючі, які руйнують більшість будівель;

10 балів – знищуючі, руйнують мости, активізують геодинамічні процеси (зсуви, осипи тощо);

11 балів – катастрофічні, спричиняють руйнування всіх споруд і трансформацію ландшафтів;

12 балів – катастрофи, викликають значні зміни рельєфу на великих просторах.

Проте часто доводиться порівнювати землетруси, що відбуваються в різних районах земної кулі. Така потреба стала стимулом до виникнення шкали, що оцінює величину землетрусу, що залежить від початкової енергії, а не від того, як вони проявляються в кожному пункті спостережень. Автор цієї шкали Чарльз Френсіс Ріхтер назвав шкалою магнітуди (**Richter 1935; Voore 1989**) (рис. 86).

Магнітуда (M) землетрусу визначається як логарифм⁶³ відношення максимальних амплітуд конкретного землетрусу до

⁶² **Плейстосейстова область** – місце на поверхні Землі, розташоване безпосередньо над гіпоцентром, чи осередком землетрусу, тобто це ніби проєкція вогнища землетрусу на поверхню. Природно, що інтенсивність землетрусу зменшується у бік плейстосейстової області.



амплітуди таких же хвиль деякого стандартного (референтного) землетрусу (Gutenberg, Richter 1955; Papazachos et al. 2004).

Таблиця 1. Оцінка інтенсивності землетрусу

Енергія E , Дж	Магнітуда по Ріхтеру, M	Основні ознаки землетрусу	Шкала бальності				
			Міжнародна (MSK-64)	Європейська (1917) Американська (1931)	Японська (1950)	Росії-Фореля (1883), Голціна (1911)	
10^6 – 10^7	1,6–2,2	Реєструються лише сейсмічними приладами	1	I	1	I	
10^7 – 10^8	2,2–2,8	Відчуваються окремими людьми, що перебувають у стані повного спокою	2	II		II	
10^8 – 10^9	2,8–3,4	Відчуваються лише незначною частиною населення	3	III	2	III	
10^9 – 10^{10}	3,4–4,0	Відчуваються багатьма, помітні коливання висячих предметів, дренчання посуду і віконного скла	4	IV		IV	
10^{10} – 10^{11}	4,0–4,6	Відчуваються практично всіма людьми. Люди, які сплять – прокидаються. Загальний струс будинків, переміщення меблів, тріщини в штукатурці й віконному склі	5	V	3	V–VI	
10^{11} – 10^{12}	4,6–5,2	Загальний переляк, більшість людей вибігає на вулицю, відколюються шматки штукатурки, легке пошкодження будинків	6	VI	4	VII	
10^{12} – 10^{13}	5,2–5,8	Паніка, всі вибігають з будинків, на вулиці втрачають рівновагу, тріщини в стінах кам'яних будинків і пошкодження більшості інших будівель, частина населення травмується	7	VII		VIII	

⁶³ **Логарифм** – це показник степеня якогось визначеного числа, що називається основою логарифма, яку потрібно піднести, щоб отримати дане число. Наприклад, Log_{10} при основі 10 є 2, оскільки $100 = 10^2$ і записується як $\text{Log}_{10} 100 = 2$.



продовження таблиці 1

10^{13} – 10^{14}	5,8–6,4	Наскрізнi тріщини в стінах, падіння карнизів, димових труб, тріщини на поверхні землі, багато пораних, окремі жертви	8	VIII	5	IX
10^{14} – 10^{15}	6,4–7,0	Сильне пошкодження кам'яних будинків, окремі будинки руйнуються до основи, кількість жертв зростає	9	IX	6	X
10^{15} – 10^{16}	7,0–7,6	Великі тріщини на поверхні землі, зсуви й обвали, викривлення залізничних колій, руйнування кам'яних будівель, в населених пунктах багато жертв	10	X		
10^{16} – 10^{17}	7,6–8,2	Численні зсуви й обвали, широкі тріщини на поверхні землі, кам'яні будинки повністю руйнуються, численні жертви	11	XI	7	X
10^{17} – 10^{18}	8,2–8,8	Катастрофічні руйнування і жертви, жодна будівля не залишається цілою, зміни поверхні сягають значних масштабів, повені, відхилення течії річок, значні порушення рельєфу	12	XII		

Існують відмінності під час визначення амплітуд для близьких, віддалених і глибокофокусних землетрусів, які залежать від використання дослідниками сейсмічних хвиль, саме тому на сейсмічних станціях використовують дві шкали амплітуд. До того ж вони відрізняються від першопочаткової шкали, яку запропонував Ч. Ф. Ріхтер в 1935 році і яку він із послідовниками удосконалив з часом. Здебільшого розрізняють три види магнітуди:

- *ріхтерівську (локальну) магнітуду ML*,
- *магнітуду по об'ємних поздовжніх хвилях mb*;
- *магнітуду по поверхневих хвилях MS*.

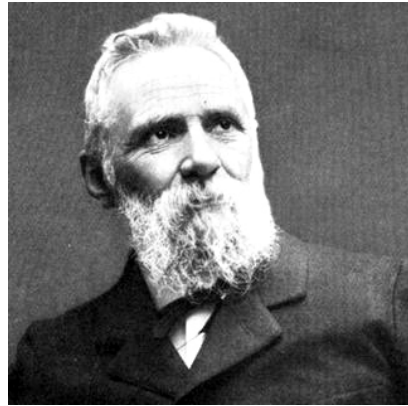
Особливого значення останні дві шкали магнітуд набули в час винайдення і випробовування ядерної зброї, оскільки виникла життєва необхідність розпізнавати ядерні вибухи і землетруси. Зістав-



лення записів ядерних вибухів і землетрусів показало, що вони майже не різняться між собою, і найкращим способом розрізнити їх виявилось порівняння поверхневих і об'ємних хвиль, а відповідно, між відношенням магнітуд ядерних вибухів і землетрусів існує різниця Тому, застосовуючи в єдиному комплексі всі наявні методи, вдалося повністю виключити можливість помилки під час розпізнавання ядерних вибухів і землетрусів.



a



b

Рис. 85. Мікеле Стефано де Россі (1834–1898) – італійський сейсмолог. Молодший брат археолога Джованні Баттіста де Россі (1822–1894) (**a**);

Франсуа-Альфонс Форель (1841–1912) – швейцарський вчений, який керував дослідженням озер, вважається засновником лімнології (**b**)

Сейсмологи вважають, що шкала магнітуд не має ні верхньої, ні нижньої межі, хоча сама величина землетрусу беззаперечно обмежена зверху кінцевим значенням. За Ріхтером, верхня межа шкали в початковому варіанті дорівнювала 10. У минулому столітті, коли була отримана можливість інструментально оцінювати цю величину, зареєстровано лише два землетруси з магнітудою 8,9 балів. Американський сейсмолог Брюс Болт



вважав, що високочутливі сейсмографи можуть записувати землетруси з магнітудою нижче -2 , при яких виділяється стільки ж енергії, як при падінні на землю цеглини з висоти одного метра.



Рис. 86. Чарльз Френсіс Ріхтер

Чарльз Френсіс Ріхтер (1900–1985) – американський сейсмолог, який 1935 року запропонував шкалу для оцінки сили землетрусів у його осередку. Свою шкалу (шкалу Ріхтера) він теоретично обґрунтував спільно з американським сейсмологом Бено Гутенбергом у 1941–1945 роках, після чого шкала отримала визнання у всьому світі.

Спрощено характеризуючи землетруси різних магнітуд, можна відзначити, що 0 – найменший поштовх, зареєстрований чутливим приладом поблизу епіцентру (умовної точки на поверхні Землі, розташованої безпосередньо над фокусом (гіпоцентром) землетрусу). Землетрус із магнітудою 5 супроводжується невеликими руйнуваннями. 7 – сильний землетрус, $8,5$ – $8,9$ – найсильніші із зареєстрованих.

У принципі, знаючи один з головних параметрів землетрусу – інтенсивність (бальність) або магнітуду, можна визначити інший, оскільки існує наближена формула, яка пов'язує інтенсивність (J_0) в епіцентрі з магнітудою землетрусу:

$$J_0 = -2,2 + 1,7 M \quad (1)$$



Як приклад можна навести Ашгабатський землетрус 6 жовтня 1948 року, який мав магнітуду 7,3 (Sidorin 2019). Підставивши це значення у формулу, одержимо інтенсивність, виражену в балах, що дорівнювало в епіцентрі приблизно 10, й відповідало дійсному ефекту від цього землетрусу.

Однак в деяких дуже рідкісних випадках, коли вогнище розташовується близько до поверхні, землетруси навіть з порівняно невеликою магнітудою можуть на поверхні виражатися поштовхами з більшою, ніж за розрахунковими даними, інтенсивністю. Приклад такого винятку – Ташкентський землетрус 25 квітня 1966 року, який при магнітуді 5,1 проявився в епіцентральної зоні інтенсивністю 7–8 балів, оскільки вогнище землетрусу розташовувалося неглибоко безпосередньо під містом (8 км) (Raab 2014). Розрахована ж інтенсивність при згаданій магнітуді мала б складати близько 6,5 бала.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

136. Ким була розроблена перша 12-бальна шкала інтенсивності землетрусів?

137. Яку кількість магнітуд розрізняють?

138. Як називається область, розташована безпосередньо над гіпоцентром, чи осередком землетрусу?

139. Хто вважав, що високочутливі сейсмографи можуть записувати землетруси з магнітудою нижче -2 ?

140. Хто запропонував шкалу для оцінки сили землетрусів у його осередку?

ТЕСТ

136. Чи має шкала магнітуд, за словами сейсмологів, верхню і нижню межі?

а) так

в) тільки верхня

б) ні

г) тільки нижня

137. Яку магнітуду мав Ашгабадський землетрус 1948 року?

а) 5,3

в) 7,3

б) 6,3

г) 8,3

138. Яку магнітуду мав Ташкенський землетрус 1966 року?

а) 4,1

в) 6,1

б) 5,1

г) 7,1

139. Хто запропонував першу шкалу інтенсивності землетрусів?

а) Мікеле Стефано де Россі і Чарльз Френсіс Ріхтер

в) Мікеле Стефано де Россі і Франсуа-Альфонс Форель

б) Брюс Болт і Франсуа-Альфонс Форель

г) Мікеле Стефано де Россі і Джузеппе Меркаллі

140. Землетруси вважають відчутними при...

а) 1 – 3 бали

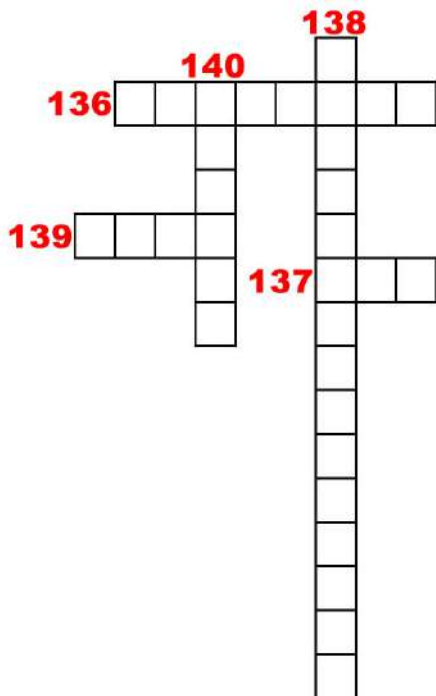
в) 6 – 7 бали

б) 4 – 5 бали

г) 8 балів і більше



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 136–140)





3.3. Загальна модель виникнення землетрусу *Які механізми призводять до землетрусів?*

Дуже часто, вивчаючи природу і механізми більшості природних явищ, доводиться виконувати зворотні завдання: і від кінцевого результату конкретного ефекту відновлювати початкову модель. Саме цими обставинами зумовлена наявність різних, іноді сповнених суперечностей моделей підготовки до землетрусів. Проте очевидно, що повинна існувати єдина загальна модель підготовки до землетрусів, іншими словами, загальна теорія, яка логічно включає в себе кілька окремих моделей (теорій), які не суперечать одна одній, а навпаки, доповнюють одна одну. Різноманіття існуючих моделей об'єктивно відображає надзвичайну складність розв'язання цієї проблеми, а суб'єктивізм в розумінні причинно-наслідкових явищ ще більше ускладнює це становище.

На сьогоднішній день сформульовано кілька загальних моделей підготовки до землетрусів. Вони базуються або на вивченні конкретних землетрусів, або на окремих параметрах геологічного середовища з урахуванням досягнень науки того часу.

Перша модель виникла в результаті творчої співпраці геолога Ендрю Лоусона та інженера-будівельника Гаррі Рейда. Вона відома як модель Рейда і була опублікована в 1910 році на основі вивчення Каліфорнійського землетрусу 18 квітня 1906 року (Lawson et al. 1906). Суть моделі така: земна кора постійно рухається; під час підготовки до землетрусу виникає перешкода для цього руху. Ця перешкода обмежена, і деформації, які вона викликає, зменшуються з віддаленням від неї. В останній момент перешкода руйнується, і виникає джерело сейсмічних хвиль, тобто вогнище землетрусу. Отже, в моделі Рейда можна виділити три етапи: нагромадження еластичної енергії, порушення нормального руху земної кори на місцевій ділянці, що



виражається у виникненні перешкоди цьому постійному руху, і руйнування перешкоди, тобто виникнення землетрусу.



Рис. 87. Юрій Володимирович Ризниченко

Юрій Ризниченко (1911–1981) – радянський геофізик, сейсмолог. Віцепрезидент Міжнародної асоціації сейсмології та фізики надр Землі (1957–1961).

У енергетичній моделі сейсмічного режиму, яку запропонував відомий сейсмолог **Ризниченко (1968)**, розглядаються процеси, які складають сейсмічний режим для великого обсягу земної кори та значного періоду часу, без опису підготовки окремого вогнища землетрусу (**рис. 87**). Головну роль у процесі підготовки до землетрусу відіграють запасена середовищем пружна потенційна енергія та змінна в часі міцність гірських порід, яка також визначається енергетичним показником. При цьому землетрус пов'язаний з ефектом зменшення міцності середовища, що зумовлено утворенням, зростанням та злиттям мікротріщин або локальних зон підвищеної пластичності.

Отже, в моделі Ризниченко можна логічно виділити два етапи: нагромадження пружної потенційної енергії у великому обсязі земної кори та протяжному часовому інтервалі, і змен-



шення міцності гірських порід в обмеженому обсязі середовища, що призводить до великого землетрусу.

Досить успішною моделлю сейсмічного циклу є запропонована К.Х. Шольцем в 1972 році, в якій він, розглядаючи деформації гірських порід, виділяє чотири стадії: столітні деформації; прискорені деформації під час підготовки до землетрусу; землетрус; деформації після землетрусу.

В загальній моделі І.П. Добровольського (1980) підготовка до землетрусу розглядається як процес виникнення і розвитку певної нерівності (включення) фізико-хімічних властивостей середовища, які локалізовані поблизу вогнища майбутнього землетрусу (перший етап), розпад цієї нерівності (другий етап), який виникає наприкінці першого етапу (Добровольський 2004). Коли нерівність досягає критичного нестійкого стану, починається її розпад зі зменшенням нагромадженої потенційної еластичної енергії і поверненням середовища до стану, близького до початкового. Другий етап у цій моделі поділяється на дві стадії – форшокову⁶⁴ і афтершокову⁶⁵, які відокремлені моментом землетрусу. Нарешті, третій етап (етап спокою) – період фонового стану, який відрізняється спокійним характером сейсмічних процесів. При цьому в деяких умовах в моделі Добровольського стадія афтершоків одразу переходить до підготовки нового землетрусу, і тоді третій етап відсутній.

Крім того, для окремих етапів характерна тривалість їх прояву. Так, на першому етапі вона може бути в декілька разів більшою, ніж емпірично визначений деякими дослідниками час

⁶⁴ **Форшок** – слабкі підземні поштовхи, які іноді передують сильному землетрусу. Форшокова активність помічена приблизно в 40 % усіх середніх і в 70 % усіх великих ($M > 7.0$) землетрусів. Вони відбуваються за хвилини, дні чи великі проміжки часу до основного поштовху.

⁶⁵ **Афтершок** – підземні поштовхи, які йдуть за землетрусом і генетично з ним пов'язані. Кількість афтершоків зростає залежно від енергії землетрусу.



прояву передвісників, а передвісники на цьому етапі є довгостроковими і свідчать лише про виникнення певної нерівності. Стадія форшоку, яка належить до першої частини другого етапу, за тривалістю в десятки разів менша, ніж перший етап, передвісники на ній короткострокові і є результатом уже розпочатого розпаду нерівності.

Виявлена пізніше закономірність послідовності прояву повторних корових землетрусів вказує на те, що модель, в якій форшоки є обов'язковим елементом, всього лише одна з багатьох окремих моделей.

Отже, огляд загальних моделей підготовки до землетрусів свідчить про значну різницю у підходах дослідників до розв'язання цієї проблеми, що об'єктивно є наслідком незнання механізму та природи процесів, що відбуваються у вогнищі землетрусу. Тому найбільш гіпотетичною частиною всіх існуючих моделей є уявлення про перший етап (або фазу) підготовки до землетрусу. Саме з цієї причини на сучасному рівні наявних даних аналіз процесу підготовки до землетрусів, тобто опис загальної моделі цього процесу, слід вважати зворотною задачею геотектоніки, а прогноз землетрусів на підставі передвісників – прямою. Проте, не маючи достовірної інформації про процеси, які відбуваються на першому етапі у вогнищі землетрусу, ми тепер досить добре знаємо про всі інші наступні етапи. Це дозволило розробити загальну модель процесу виникнення землетрусу і встановити місце передвісників землетрусу в цій моделі на новому якісному рівні, заснованому на виявленому класі тектонічних рухів в земній корі (Одеков 1984).

У працях багатьох вчених було виявлено зв'язок між землетрусами і швидкими рухами обмежених ділянок земної кори, або коливаннями Землі, викликаними раптовим вивільненням потенційної енергії з надр Землі. У всіх випадках, коли мова йде про землетруси тектонічного походження (95 % від загальної кількості землетрусів), різні автори пов'язують їх з рухами



вздовж розломів або стрибкоподібним прискореним зростанням антиклінальних складок, і в зв'язку з цим виділяють сейсмогенні розломи та зони.

Суть цього ефекту полягає в тому, що в земній корі та верхній мантії одночасно діють вертикальні та горизонтальні тектонічні рухи, зумовлені силами розтягнення та стискання, що спричиняють рухи земної поверхні в періоди, що передують землетрусам, і безпосередньо в момент землетрусів.

Підготовка до землетрусу відбувається в надрах Землі протягом тривалого часу, і у вогнищі майбутнього землетрусу спостерігається збільшення напруження гірських порід. Це напруження зростає не лише у вогнищі землетрусів, але і в епіцентрі, і в майбутній епіцентральної і (або) плейстосейстовій зоні. При цьому чим ближче вогнище до поверхні Землі і чим більша енергія майбутнього землетрусу, тим вище напруження гірських порід і спричинені ними спільні синхронні аномальні відхилення вертикальних і горизонтальних тектонічних рухів в епіцентрі, епіцентральної і (або) плейстосейстових зонах майбутнього землетрусу в періоди, що передують землетрусу, і в момент його виникнення. Іншими словами, збільшення напруження гірських порід в земній корі та верхній мантії спричиняє утворення сейсмогенеруючих тектонічних рухів.

Сейсмогенеруючі тектонічні рухи – особливий клас тектонічних рухів, що виникають в земній корі та верхній мантії в періоди, що передують землетрусам, і в моменти самих землетрусів. Вони зумовлені спільним впливом сил розтягування і стискання, і характеризуються великою амплітудою і короткими періодами прояву в часі. Сейсмогенеруючі тектонічні рухи на тлі сучасних повільних вікових рухів земної кори відзначаються різким підвищенням амплітуди (за модулем) спочатку в 5–6 разів, а в момент землетрусу – в декілька десятків разів і більше. Іншою суттєвою особливістю сейсмогенеруючих тектонічних рухів є обов'язковий спільний синхронний прояв як верти-



кальної, так і горизонтальної складової тектонічних рухів перед землетрусом.

Отже, загальна модель процесу виникнення землетрусів – це модель підготовки та прояву сейсмогенеруючих тектонічних рухів. У ній знайшли логічне місце більшість відомих основних явищ, розглянутих, проте, з нового погляду і без істотних суперечностей із раніше встановленими фактами. Загальна модель підготовки, хоч і не використовується для передбачення конкретних землетрусів, все ж повинна мати певний прогностичний характер, оскільки в ній має бути вказано місце кожного з передвісників, за допомогою яких можна вже задалегідь передбачити землетруси. Цій вимозі відповідає модель, яка включає чотири фази.

1-ша фаза підготовки до землетрусу – конструктивна та еволюційна. Час її протікання на порядок, інколи більше, перевищує час прояву всіх наступних фаз разом взятих. Як уже зазначалося, уявлення про підготовку до землетрусу є найбільш гіпотетичною частиною запропонованої моделі. Проте дані, отримані протягом останніх двох десятиліть про глибинну будову земної кори в окремих регіонах Землі, дозволяють висловити зовсім нові думки щодо природи землетрусів.

Під час вивчення глибинної будови тектонічно активних районів Туркменістану на межі «граніту–базальту» було виявлено існування тонких шарів з аномальною швидкістю поширення хвиль. Виявилось, що глибини вогнищ сильних землетрусів Ашхабадського сейсмонебезпечного району збігаються з глибинами розташування цих шарів. Ця обставина дозволила вченим висловити думку, що ці шари перебувають в напруженому стані і є джерелами виникнення землетрусів.

Ще в травні 1914 року академік Б. Голіцин повідомив про наявність у верхній мантії Землі зони, де швидкість поширення сейсмічних хвиль менша, ніж у вищерозташованих зонах. Це свідчить про розрідження речовини мантії. Пізніше, у 1924 році, американський геофізик Б. Гутенберг, який досліджував чис-



ленні сейсмічні дані з різних регіонів, підтвердив наявність у верхній мантії пластичного хвилепровідника, який розташований на різних глибинах під океанами і континентами. Пізніше, в 1955 році, він вказав на існування в нижніх частинах гранітного і базальтового шарів земної кори відносно тонких прошарків із зниженою швидкістю поширення поздовжніх хвиль.

Крім того, під час аналізу даних сейсмічних методів геофізики вказували на наявність шарів із аномально зниженою швидкістю окремих ділянок в земній корі. Наявність таких шарів була підтверджена сейсмологічними даними та результатами буріння глибоких свердловин.

У наш час було доведено, що земна кора має неоднорідну будову, в ній існують шари з аномально низькою швидкістю хвиль у порівнянні з покривними і підстильними шарами із нормальною швидкістю.

Порівнюючи ці факти з даними про розташування вогнищ землетрусів із шарами з аномально низькими швидкостями, можна припустити, що в них відбуваються поки що невідомі фізико-хімічні процеси, які у підсумку призводять до виникнення землетрусів. Імовірно, ці шари перебувають у стані нестійкої рівноваги, порушення якої і спричиняє землетруси. Наприклад, в певних термобаричних умовах граніти втрачають кристалізаційну воду і наближаються за щільністю до базальтів, зберігаючи свій первісний хімічний склад. Такі породи називають гранулітами⁶⁶ і вони представляють іншу, ніж граніти, стадію метаморфізму. Подібні процеси можуть бути одним із можливих механізмів виникнення землетрусів на межі «граніт–базальт».

На цій фазі важко говорити про прояв будь-яких конкретних передвісників, за винятком завершальних етапів цієї фази, на якій

⁶⁶ **Грануліт** – метаморфічна гірська порода гнейсоподібної текстури, що сформувалася в умовах високих температур і тиску.



можливий плавний або різкий перехід до 2-ї фази підготовки землетрусу і початок прояву деяких конкретних передвісників.

2-га фаза – реконструктивна, проміжна. Існує поширена думка, що сильні землетруси готуються і відбуваються не так, як слабкі. Ця точка зору правильна, якщо йдеться про тривалість та масштаби прояву передвісників землетрусів. Наприклад, тривалість прояву в часі сейсмогенеруючих тектонічних рухів залежить від інтенсивності майбутнього землетрусу і складає від десятків днів (3–4-бальні землетруси) до десятків місяців (8–12 бальні землетруси).

2-га фаза підготовки землетрусів – основна щодо прояву передвісників. На цій фазі для сильних і катастрофічних землетрусів можна виділити кілька часових категорій передвісників. При цьому сейсмогенеруючі тектонічні рухи проявляються в усіх часових інтервалах, але з різною інтенсивністю в залежності від сили землетрусу, що готується та відстані від його епіцентру. Іншими словами, сейсмогенеруючі тектонічні рухи – універсальні передвісники землетрусів за часом.

На другому етапі можна виділити чотири категорії часових передвісників землетрусів: довгострокові, середньострокові, короткострокові та оперативні. Крім того, за просторовим проявом або дією віддаленості, аналогічно до часової класифікації, передвісники сильних та катастрофічних землетрусів також можуть бути розділені на чотири категорії: широкомасштабні, середньомасштабні, дрібномасштабні та локальні. Такі сейсмогенеруючі тектонічні рухи фіксуються в усьому просторовому діапазоні і є універсальними передвісниками і в цьому змісті.

Для відчутних (6–7 балів) і слабких (4–5 балів) землетрусів ранжування просторових і часових передвісників буде різним: у першому випадку очевидна відсутність першої групи просторово-часових передвісників – широкомасштабних і довгострокових, у другому – вже дві перші категорії передвісників – широко-, середньомасштабні і довгострокові середньострокові.



Поділ передвісників за масштабами проявів (у просторі або за дією на певну відстань) та за часом дозволяє чітко визначити місце кожного передвісника в загальному списку і визначити, які з них мають фундаментальне та практичне значення, а які мають лише теоретичне, наукове значення, не будучи при цьому самостійними засобами прогнозу землетрусів.

Крім того, така класифікація дозволяє визначити, які з передвісників – безпосереднє відображення процесу підготовки землетрусу, а які зумовлені наступними причинними явищами. Іншими словами, потрібно визначити як прості, так і складні причинно-наслідкові зв'язки, і тільки після цього чітко визначити позицію кожного передвісника землетрусу та його реальні можливості для прогнозування. Це завдання детальніше розв'язується на основі створення вже конкретних моделей підготовки землетрусу.

В світовій практиці існує лише декілька випадків успішного прогнозування землетрусів, тому більшість відомих передвісників були визначені не на основі конкретних випадків передбачення землетрусів, а вивчалися постфактум. Можна виділити приблизно двадцять передвісників, з яких 15 були класифіковані ще [Rikitake \(1979\)](#) за методами спостережень, а інші були додані на основі винаходів і відкриттів у цій області, зареєстрованих пізніше і, відповідно, не включених в його класифікацію ([рис. 88](#)). Аналіз деяких передвісників з погляду прояву сейсмогенеруючих тектонічних рухів і причинно-наслідкових зв'язків з цим класом тектонічних рухів показує, що нахили, припливи моря, опускання та підйоми, зафіксовані ювелірними спостереженнями і пов'язані з землетрусами, подібно до ефектів ГГД⁶⁷, є наслідком прояву одного з компонентів (вертикальних) сейсмогенеруючих тектонічних рухів. Деформації розтягування та стиснення, зафіксовані деформогра-

⁶⁷ ГГД – ефект гідрогеодеформаційного поля Землі.



фами, розтягування, виявлені геодиметричними спостереженнями, – все це є наслідком прояву другого компоненту (горизонтальних) сейсмогенеруючих тектонічних рухів.



Рис. 88. Цунедзі Рікітаке

Цунедзі Рікітаке (1921–2004) – почесний професор Токійського університету та Токійського технологічного інституту, зробив великий внесок у розвиток наступних напрямків геомагнетизму завдяки своїй великій дослідницькій діяльності, переважно в Інституті дослідження землетрусів Університету Токіо, Японія.

Зміни у геомагнітному полі, що проявляються у зменшенні його напруги та магнетизму, є наслідком стиснення (Rikitake 1979). Однак всі вищезазначені так звані передвісники можуть і не бути такими і, подібно до ГГД-ефектів, бути наслідком асейсмічних процесів (рухи вздовж розломів, включаючи тип кріп⁶⁸, обвальні процеси, асейсмічні нахили тощо). Отже, зміна будь-якого з цих параметрів не завжди свідчить про наближення землетрусу. Саме через це в обмеженому списку вдало передбачених землетрусів немає жодного землетрусу, який був би передбачений лише одним із названих передвісників. Визначаючи місце інших передвісників у процесі 2-ї фази виникнення землетрусів, можна сказати, що деякі з них за просторовим проявом є дрібномасштабними і локальними (геохімічні, гравіметричні, електричні, деформаційні, акус-

⁶⁸ **Кріп** – повільне зміщення пухких, переважно глинистих порід вниз по схилу під впливом періодичної зміни об'єму їх частинок.



тичні тощо). За часом прояву деякі передвісники належать до короткострокових (форшоки) або оперативних, тобто проявляються протягом декількох діб (наприклад, акустичні) і годин (біологічні). Крім того, в більшості відомих методів передбачення не враховується міграція вогнищ землетрусів в просторі і часі, тому використання їх неможливе, оскільки параметри передвісників проявляються лише над вогнищами землетрусів, і спостереження зазвичай проводяться над вогнищами попередніх землетрусів. Більше того, використання деяких передвісників практично неможливе із суто технічних й економічних причин – через необхідність безперервних цілодобових вимірювань або неможливість автоматизації процесу вимірювань і, як наслідок, отримання актуальної поточної інформації.

Отже, більшість передвісників, які використовуються тепер, не мають практичної цінності для передбачення землетрусів.

Метод передбачення землетрусів на основі реєстрації класу сейсмогенеруючих тектонічних рухів позбавлений усіх зазначених недоліків – він є універсальним. Така заява звучала б безпідставною декларацією, якби її не було підтверджено практично, оскільки саме практика є критерієм істинності. Підтвердженням є прогноз кількох слабких і порівняно сильних землетрусів, які сталися в різних сейсмоактивних областях, коли на різних відстанях від епіцентру спостерігалось аномальне одночасне підвищення до загального фону вертикальних і горизонтальних компонентів тектонічних рухів, які передували цим землетрусам.

Отже, друга фаза процесу виникнення землетрусів є основною у виявленні передвісників.

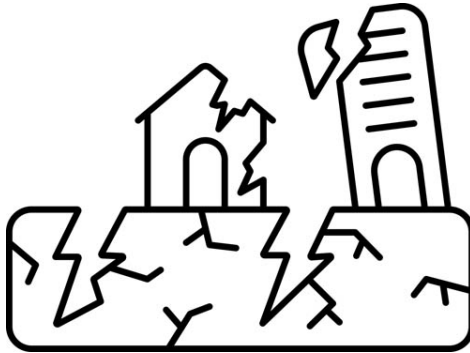
3-тя фаза – деструктивна, революційна, яка виражається землетрусом. Ця фаза триває миттєво (від секунд до кількох хвилин) і охоплює територію поширення сейсмогенеруючих тектонічних рухів.



В момент землетрусу сейсмогенеруючі тектонічні рухи відзначаються різким підвищенням амплітуди (за модулем), перевищуючи в декілька десятків разів їх фонові значення.

4-ту фазу називають релаксаційною, або заключною, і в разі катастрофічних, сильних, відчутних і навіть слабких (5 балів) землетрусів вона проявляється афтершоками. Механізм виникнення афтершоків сильних землетрусів, послідовності та інтенсивності їхнього виявлення, було досить добре вивчено вченими. У кожній серії афтершоків енергія найсильнішого поштовху менша на 2–3 порядки, ніж головний поштовх, і навіть загальна енергія серії афтершоків становить лише 10 % енергії головного поштовху.

Отже, на четвертій заключній фазі, настає остаточне спадання напруг, яке проявляється афтершоками. Тривалість цієї фази залежить від інтенсивності та сили головного землетрусу і може становити від кількох днів до кількох років.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

141. Як називається перша фаза підготовки до землетрису?

142. Як називається друга фаза підготовки до землетрису?

143. Як називається третя фаза підготовки до землетрису?

144. Як називається четверта фаза підготовки до землетрису?

145. Як називається перша модель підготовки до землетрису?

ТЕСТ

141. Скільки фаз розрізняють у підготовці землетрусу?

а) 1

в) 3

б) 2

г) 4

142. Хто класифікував більшість передвісників землетрусів?

а) Ризниченко

в) Добровольський

б) Рікітаке

г) Шольц.

143. Яка фаза підготовки до землетрусу вважається головною?

а) 1-ша

в) 3-тя

б) 2-га

г) 4-та

144. Яка фаза підготовки до землетрусу відбувається миттєво?

а) 1-ша

в) 3-тя

б) 2-га

г) 4-та

145. Яка фаза підготовки до землетрусу має найменшу кількість передвісників?

а) 1-ша

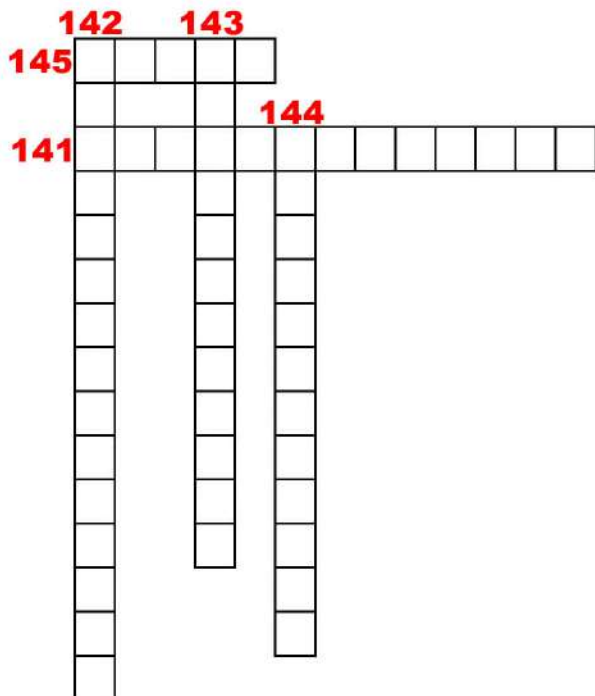
в) 3-тя

б) 2-га

г) 4-та



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 141–145)





3.4. Дослідження форшоків

Чи допомагає статистика землетрусів їх прогнозувати?

Відстеження статистики повторних землетрусів, які відбулися в різних сейсмогенних районах нашої планети, чітко показує такий закон: після першого землетрусу другий та всі наступні (якщо вони виникають), які відбуваються протягом певного періоду часу, зазвичай мають меншу силу та інтенсивність, ніж перший удар. Це правило можна порівняти з рухом математичного маятника: амплітуда першого відхилення маятника в одному напрямку майже відповідає відхиленням в іншому, поступово зменшуючись в подальшому.

Дослідження форшоків сильних землетрусів у різних регіонах Землі дозволяють зробити висновок, який чітко сформульовано Т. Рікітаке. Він, зокрема, писав, що визначення форшоків досить випадкове як у часі, так і у просторі, і більшість сейсмологів говорять про форшоки, відбираючи землетруси, які відбуваються неподалік від основного удару або в області, де спостерігається пов'язана з ним сейсмічна активність (Рикитаки 1979). Проте існують випадки, які вказують на передсейсмічну активність на відстані кількох сотень кілометрів від місця основного удару.

Цікаве також висловлювання Чарльза Ріхтера про те, що форшоки рідко дозволяють передбачати сильні землетруси, оскільки вони не відрізняються від звичайних слабких землетрусів.

Статистика форшоків свідчить, що ними передують лише деякі землетруси (Gulia, Wiemer 2019). Наприклад, за даними К. Могі, серед 1 500 землетрусів з магнітудою 4 і вище, які відбулися в Японії та сусідніх територіях з 1926 по 1961 роки, лише у 60 випадках (4 %) основним ударами передували форшоки. При цьому інтервал часу між форшоком та основним землетрусом коливається від кількох хвилин до кількох сотень днів (Reasenberг 1999).



Подібні дослідження на сході Ірану за останні півтора століття показали, що лише деяким сильним землетрусам передували форшоки. На прилеглий до сходу Ірану території Західного Туркменістану приблизно за цей самий період було зафіксовано 274 сильних землетруси. Проте форшоки передували лише 10 із них.

Отже, навіть наведені дані свідчать про те, що форшоки рідко передують сильним землетрусам.

Прогнозування магнітуди землетрусів є предметом досліджень багатьох вчених. Наприклад, Т. Рікітаке запропонував метод прогнозу, який ґрунтується насамперед на статистичних дослідженнях землетрусів в певному регіоні, де виділяють частоту виникнення сейсмічних подій різної амплітуди і потім розраховують ймовірність виникнення землетрусу.

Пізніше був виявлений зв'язок між магнітудою корових тектонічних землетрусів та розмірами і типами сейсмогенних тектонічних структур. Так, різке зсування блока довжиною 60–75 км вздовж глибокого розлому призводить до можливого максимального поштовху приблизно з магнітудою $M = 7,5$. Крім того, існує ряд праць, в яких аналізується залежність розмірів зони прояву передвісників від магнітуди землетрусу тощо.

Тим часом ретроспективний статистичний аналіз сильних корових землетрусів, які сталися в різних сейсмоактивних районах, однозначно підтверджує існування вищезгаданої закономірності: після першого землетрусу другий та всі подальші (якщо вони відбуваються) за інтенсивністю зазвичай не сильніші, а навіть слабші, ніж перший поштовх. Для підтвердження цього положення було розглянуто та досліджено великий обсяг даних, які безпосередньо або опосередковано свідчать на користь такого твердження. Закономірність поширюється майже на всі повторні землетруси, магнітуда першого удару яких не менше п'яти. При цьому встановлений часовий інтервал, протягом якого може статися повторний поштовх – 200 діб.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

146. Кому належить вислів, що форшоки рідко дозволяють передбачати сильні землетруси?

147. Хто запропонував метод прогнозу, який ґрунтується на статистичних дослідженнях землетрусів?

148. Як називається землетрус, який відбувається перед сильнішим?

149. Предметом досліджень багатьох вчених є прогноз ...?

150. Який вчений проаналізував понад 1 500 землетрусів щодо наявності форшоків?

ТЕСТ

146. Чи форшоки дозволяють передбачити сильні землетруси?

- а) так
б) ні
в) рідко
г) ніколи

147. Яку силу зазвичай мають повторні землетруси?

- а) меншу
б) більшу
в) таку ж
г) постійно різну

148. Чи існує зв'язок між магнітудою корових тектонічних землетрусів та розмірами і типами сейсмогенних тектонічних структур?

- а) так
б) ні
в) дуже слабкий
г) існує лише в окремих випадках

149. Скільком добам рівний прийнятий часовий інтервал, протягом якого може статися повторний поштовх?

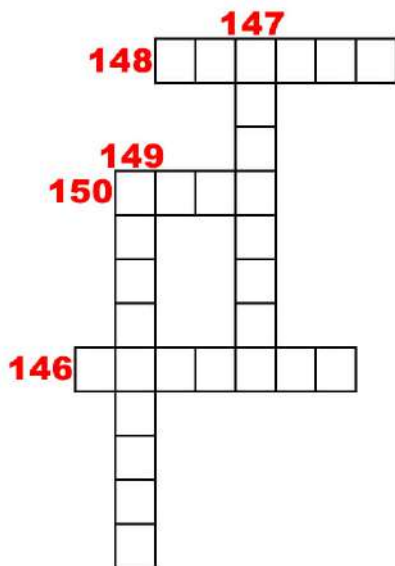
- а) 50 діб
б) 100 діб
в) 150 діб
г) 200 діб

150. Чи часто форшоки передують сильним землетрусам?

- а) так
б) ні
в) рідко
г) ніколи



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 146–150)





3.5. Вогнище і макросейсмічне поле «Точка», де народжується землетрус

По периферії океанів, уздовж їхніх осьових зон, через з'єднання континентів простягаються смуги епіцентрів землетрусів. Та чи дійсно це смуги?! Професійний геолог сказав би «лінеamenti⁶⁹». Чому б вогнищам землетрусів не групувалися гніздами? Так, зрідка є і гнізда (Гіндукуш, Карпати), але переважно і майже скрізь – це смуги. Що може підтримувати режим безперервного руху і трансформації вздовж вузьких (іноді не більше 30 кілометрів), розташованих близько до поверхні (зазвичай до 50–80 км, рідше до 200, лише в окремих випадках до 700 км) і дуже довгих (тисячі кілометрів) зон? Які сили підтримують однорідність і однотипність такого тут режиму? Є два можливі варіанти. Перший – вздовж усієї смуги діє якась регулююча сила, щось на зразок зворотного зв'язку. Другий – вузька смуга не є самостійним, закритим об'єктом. Це – край, фронт зіткнення якихось величезних планетарних процесів. Тут зупинимося на тектоніці плит, оскільки є всі підстави вважати, що землетрус – це, як каже поет, «зіткнення скель, що скригочуть». Гірська система – це як миттєва фотографія тектонічної грози. Якщо борти «скель, що зіштовхуються» рухаються один на одного – здіймаються високі Гімалаї, матеріал земної кори віджимається і вгору, і вниз. Якщо ж брили обертаються в різні напрямки – виникають не менш потужні дотичні процеси, завихрення і розриви ([Ostříhanský 2012](#)). І все це відбувається настільки повільно, що висока температура, тиск і відклади з гарячих розчинів безперервно загоюють рвані рани Землі...

⁶⁹ **Лінеамент** – регіональний, лінійно орієнтований елемент структури і рельєфу земної кори, довжина якого у багато разів перевищує ширину.



Отже, ми дійшли до основного: внаслідок зовнішніх впливів десь у місці майбутнього землетрусу існують дотичні напруги – іншими словами, можна провести площину, де маси прагнуть рухатися в різних напрямках. Протягом багатьох років породи у цих місцях деформуються, стискаються або навпаки – розтягуються. В майбутній зоні землетрусів та її навколишніх ділянках, де діють тектонічні сили, нагромаджується потенційна (еластична) енергія (Zahradnik 1989). Але земна кора – неоднорідна. Кожна неоднорідність створює поле нагромадженої енергії, і в глибинах землі виникає дуже складна за своєю структурою напружена зона. То тут, то там матеріал не витримує. Невеликі тріщини, які виникають в найслабших місцях, ніби тестують середовище, перевіряють – готове воно до великого розриву чи ні? Одна тріщина може бути більшою за інші, і чим вона довша, тим менш вірогідно, що така подія відбудеться (отже, це своєрідний закон повторюваності землетрусів).

Поступове збільшення активності поступово переходить у фазу відносного спокою: всі критичні дефекти вже виявились і спрацювали. Настає затишшя перед бурею. В цей момент середовище вже «знає», де відбудеться основний розрив: зона нагромадження напруги звузилася, вона вже визначена. Важливо відзначити, що чимало методів прогнозування землетрусів базуються саме на визначенні цього періоду перед катастрофою (див. розділ 4). Тепер починається період невизначеності, коли будь-яке невелике порушення в площині майбутнього вогнища може «запалити» його: для цього досить того, щоб збільшення надлишкової напруги, яке рухається перед краєм «тріщини», не зупинилося перед випадковою ділянкою підвищеної міцності. Так, ось один із парадоксів сейсмічного вогнища: ми часто вже можемо сказати, де почнеться розрив, але ми нічого не знаємо про те, де це зупиниться.

Та ось настав цей випадковий момент. Одна з «тріщин», найбільш успішна, проникла в глибину, без обмежень пошири-



лася вперед і в ширину, розірвала велику ділянку земної кори на десятки кілометрів.

Народилося сейсмічне вогнище. Протилежні краї «тріщини» – «крила» – в один момент звільнились одне від одного. Нічим не обмежені (крім тертя), вони порівняно швидко розійшлися в протилежних напрямках. Так, «тріщина» ще не визначала напряму: вона дала можливість гірським масам рухатися – і рух почався. Потенційна енергія спотворених напругою гірських мас перетворилася на кінетичну енергію їхнього руху (Madariaga 2007). Саме цей раптовий рух породив і сейсмічні хвилі!

Зрозуміло, що сама «тріщина» була свого роду перетворювачем енергії: чим вона довша, чим тривалішою вона була в русі, тим більший відсоток накопиченої пружної енергії перетворився на сейсмічні хвилі.

Але ось – ще одна складність, ще один парадокс. Чим довша «тріщина», тим довша сейсмічна хвиля, що випроменилася, і тим більший її період. Справді, вогнища довжиною в сотні кілометрів випромінюють сейсмічні хвилі з періодом до 50–100 секунд. Але тоді звідки беруться небезпечні періоди від 0,1 до 2 секунд під час сильних землетрусів? Легко підрахувати, що такі періоди мають випромінювати вогнища довжиною сотні метрів, принаймні не більше перших кілометрів!

Варто пам'ятати, що основна «тріщина» прокладається через надзвичайно неоднорідне середовище. Поблизу її країв неминуче утворюється ціла система вторинних тріщин. Крім того, площина головної «тріщини» не може бути абсолютно плоскою і згладженою – на ній завжди є згини і виступи, і цими виступами рухаються в різні боки «крила тріщини», які віддалено розташовані одне від одного.

Отже, основне випромінювання вогнища відбувається на дуже низьких і безпечних частотах, а найпотужніший і найнебезпечніший для людини – короткоперіодний компонент сейсмічного випромінювання – всього лише побічний продукт вогнища!



Багато джерел небезпечних коливань розташовані по всьому вогнищу, здебільшого в його периферійних частинах.

Тепер стає зрозумілим, чому так важко перейти від параметрів вогнища до розрахунку його впливу на будівлю, адже кількість, просторовий розподіл, спектральні особливості вторинних джерел небезпечних коливань залежать від тисячі випадковостей!

Що вам відомо про зв'язок властивостей вогнища і ефектів на земній поверхні? Область земної поверхні, де існують такі ефекти, називають макросейсмічним полем. Найпростіша і вже відома вам характеристика макросейсмічного поля – це інтенсивність землетрусу.

Цікаво, що структура бальності викликала свого часу велику кількість суперечок. Зазвичай вважається, що найкраще відповідає бальності логарифм сейсмічного прискорення (Denny, Johnson 1991). Проте часто доводиться відмовлятися від такого звичного підходу, зважаючи, що головну роль у сейсмічному впливі відіграють амплітуда і тривалість коливань.

Зі збільшенням відстані від вогнища амплітуда коливань зменшується (через розходження хвилі та поглинання коливань в глибині Землі), період збільшується (точніше, через підвищене поглинання короткоперіодних коливань збільшується відносна частина довгоперіодних коливань), тривалість дещо зростає (через розтягнення фронту хвиль під час проходження різних неоднорідностей в товщі Землі). Загалом, зменшення інтенсивності коливань на 1 бал призводить до подвоєння відстані.

Вченими було знайдено загальне рівняння макросейсмічного поля (Zhu et al. 2019):

$$I = 1,5M - 3,51g\sqrt{\Delta^2 + h^2} + 3, \quad (2)$$

де M – магнітуда; I – бальність; h – глибина вогнища; Δ – епіцентральна відстань.



Величини числових коефіцієнтів можуть слабо змінюватися від регіону до регіону. З цього рівняння легко виводиться важливе співвідношення між магнітудою і бальністю землетрусу в епіцентрі I_0 :

$$I_0 = 1,5M - 3,5 \lg h + 3, \quad (3)$$

а також рівняння ізосейст⁷⁰: радіус ізосейсти одного бала дорівнює

$$\Delta = h \sqrt{10^{0,57(I_0 - I_i)} - 1}, \quad (4)$$

Обидва ці рівняння дуже корисні: якщо у наявності карта ізосейст (рис. 89), навіть для старого землетрусу з допомогою іншої з цих формул можна легко розрахувати глибину вогнища (Као, Шан 2004). Перше рівняння дозволяє знайти глибину вогнища, якщо відомі магнітуда і бальність в епіцентрі. Для старих землетрусів його можна використовувати навіть інакше: за ізосейстами визначити глибину вогнища, а за глибиною вогнища і бальністю в епіцентрі розрахувати магнітуду. Отже, навіть для старих землетрусів можна отримати сучасні сейсмічні характеристики та використовувати їх для розрахунку сейсмічної небезпеки.

Чим ближче наближаємося до вогнища землетрусу, тим сильніше проявляються його розміри. Це означає, що інтенсивність землетрусу, як ми вже знаємо, породжує вторинні джерела, які розташовані на периферії вогнища. Наприклад, якщо верхня частина вогнища наближається до земної поверхні, це може призвести до локальних спотворень макросейсмічного поля. Де-

⁷⁰ **Ізосейсти** – ізолінії інтенсивності землетрусів; розділяють області з різним рівнем інтенсивності.



тальний аналіз таких спотворень дозволяє використовувати карту ізосейст за цілком несподіваним сценарієм – визначити розміри та положення вогнища землетрусу (Mäntyniemi et al. 2017). Порівняння з іншими методами показало, що у такий спосіб можна одержати напорчуд достовірні результати.

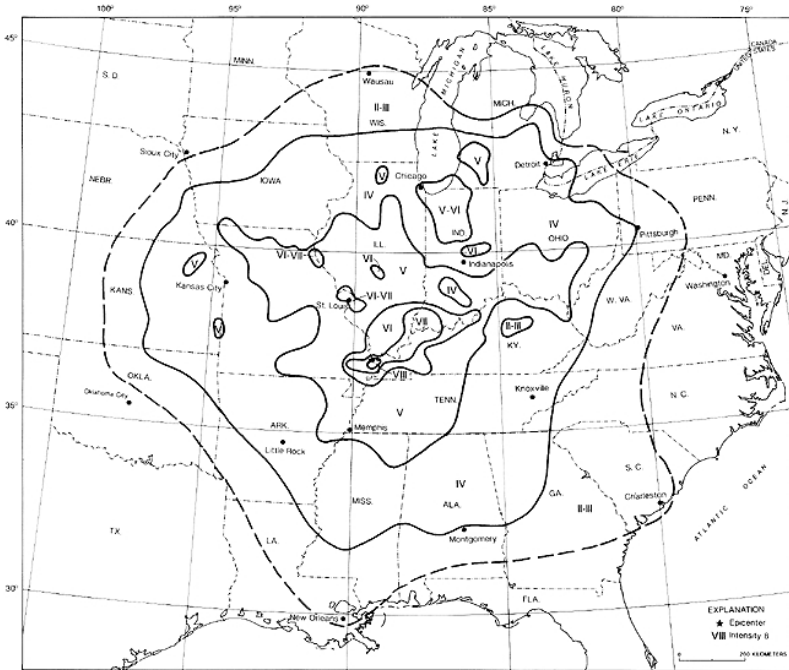


Рис. 89. Карта ізосейст землетрусу в США



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

151. Як називаються умовні лінії на поверхні, які розділяють області з різною інтенсивністю прояву землетрусу?

152. Як називається виразна «лінія» на поверхні Землі, що може спостерігатися на аеро- і космоснімках?

153. Як називається умовна точка, де відбувається землетрус?

154. Як називається поле, в межах якого існує зв'язок між властивостями вогнища і ефектами на земній поверхні?

155. Яка енергія накопичується в майбутній зоні землетрусу та навколишніх ділянках?

ТЕСТ

151. Основне випромінювання вогнища відбувається на...

- а) низьких і безпечних частотах в) низьких і високих частотах
б) високих і небезпечних частотах г) тільки на високих частотах

152. Зі збільшенням відстані від вогнища амплітуда коливань...

- а) зменшується в) залишається сталою
б) збільшується г) зростає стрибкоподібно

153. Головною характеристикою макросейсмічного поля є...

- а) глибина вогнища землетрусу в) інтенсивність землетрусу
б) радіус ізосейст г) кількість лінеаментів

154. Головну роль у сейсмічному впливі відіграє...

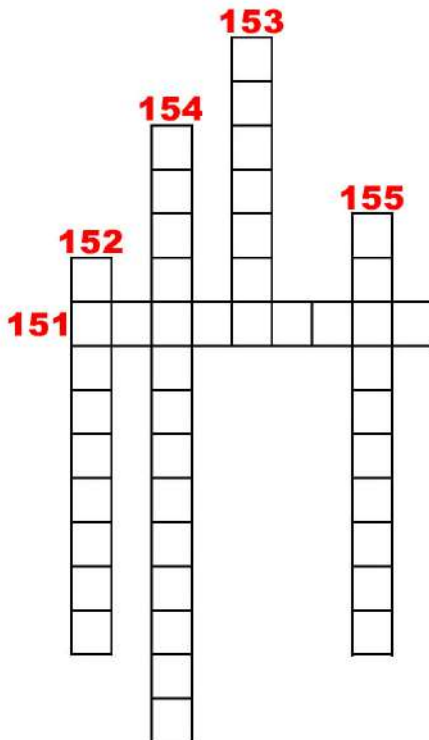
- а) глибина вогнища землетрусу в) макросейсмічне поле
б) інтенсивність землетрусу г) амплітуда і тривалість коливань

155. Чи можна за картою ізосейст визначити глибину вогнища?

- а) так в) тільки коли відома магнітуда
б) ні г) тільки коли відома інтенсивність



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 151–155)





3.6. Сейсмічні хвилі

Що собою являють сейсмічні хвилі?

При розв'язанні багатьох задач щодо поширення сейсмічних хвиль Землю можна розглядати, в межах усіх її внутрішніх шарів, як ізотропну⁷¹, тобто її пружні властивості однакові у різних напрямках. Навіть у випадку кристалічних гірських порід у середньому осі симетрії кристалів розташовані рівномірно у всіх можливих напрямках в просторі, і таке середовище можна вважати квазіізотропним⁷². Крім того, сейсмічні хвилі мають досить велику довжину, і відмінності фізичних властивостей, які спостерігаються на окремих ділянках гірських порід у різних напрямках, часто можуть не враховуватися.

У ізотропному твердому середовищі, через яке поширюються еластичні деформації від джерела сейсмічних коливань, існують два види опору зовнішнім механічним впливам: опір зміні об'єму (розмірів) елементів середовища і опір зсувам. Переміщення точок, спричинені локальною зміною об'єму елемента середовища, поширюються і утворюють поздовжню (*P*) хвилю (Roux et al. 2005). Це послідовні деформації стиснення і розтягнення, подібні до того, як це відбувається у гумовій стрічці, коли чергуються напруження і розслаблення. Середня швидкість поширення поздовжніх хвиль становить приблизно 8 км/с. Ці хвилі поширюються найшвидше і першими доходять до пункту реєстрації на поверхні Землі, тому їх позначають літерою *P*, яка походить від першої літери латинського слова «*primae*» (перші) (рис. 90).

⁷¹ **Ізотропія** – рівномірність (однаковість) в усіх напрямках.

⁷² **Квазіізотропія** – ізотропія, що проявляється тільки в областях гірських порід, що містять досить велику кількість структурних елементів, орієнтованих у всіх напрямках.



Коливання частинок у хвилі збігаються з напрямком поширення хвилі.

Поздовжні хвилі схожі на звукові і можуть поширюватися у всіх середовищах: твердих тілах, рідинах і в повітрі. Переміщення точок, спричинені лише обертанням елементів середовища (зсувними деформаціями), поширюються і утворюють поперечну (*S*) хвилю (Devaney, Oristaglio 1986). Коливання частинок у хвилі перпендикулярні напрямку її поширення, як у каната, що закріплений одним кінцем і гоїдається вліво та вправо в напрямку іншого кінця. Ці хвилі змінюють лише форму елемента середовища, не змінюючи його об'єму. Поперечні хвилі мають меншу швидкість, ніж *P*-хвилі (середня швидкість приблизно 5 км/с), тому вони доходять до пункту реєстрації другими. Їх позначають літерою *S* – першою літерою латинського слова «*secundae*» (другі) (рис. 90). Швидкість поширення поздовжньої хвилі в гірських породах перевищує швидкість поширення поперечних хвиль приблизно в 3 рази, тому зі збільшенням відстані від джерела поперечна хвиля істотно відстає від поздовжньої.

Амплітуди зсувів і прискорень частинок ґрунту, які викликаються поперечними хвилями, більші, ніж ті, які викликаються поздовжніми хвилями, тому *S*-хвилі особливо небезпечні для споруд. Оскільки у фронті поперечної хвилі частинка може коливатися в будь-якому напрямку в площині, перпендикулярній лінії поширення хвилі, то часто враховують хвилі *SV* і *SH*, які відповідають проєкціям фронту *S*-хвилі на вертикальну і горизонтальну площини. Поперечні хвилі не поширюються в рідинах і газах, оскільки останні мають незначне внутрішнє тертя і деформації зсуву в них практично відсутні.

Коли поздовжні і поперечні хвилі наближаються до поверхні Землі, виникають так звані поверхневі, або *L*-хвилі (буква *L* є першою буквою англійського слова «*long*» – довгі). Ці хвилі викликають найбільше зміщення, але не створюють суттєвих прискорень. Вони мають великі періоди (від 10 до 400 с) і поширю-



ються в основному вздовж поверхні Землі. Розрізняють два типи L -хвиль: хвилі Релея (LK) і хвилі Лява (LQ).

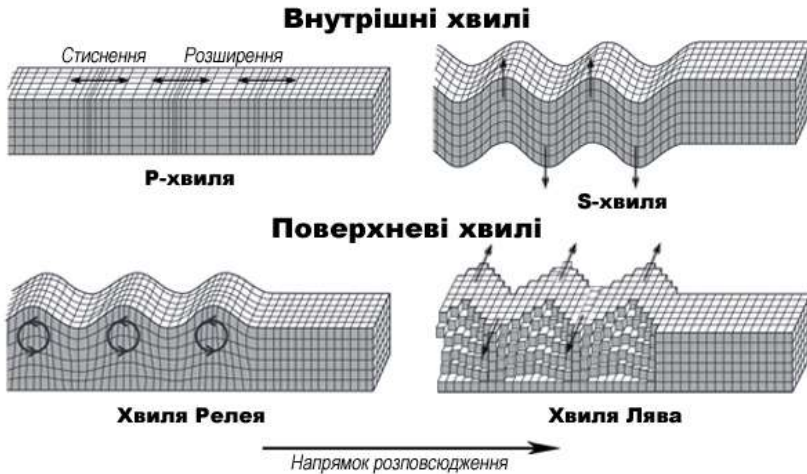


Рис. 90. Типи сейсмічних хвиль

Щоб зрозуміти природу цих хвиль, спочатку варто розглянути відбиття і відхилення хвиль на границях розділу середовищ з різними пружними властивостями. У першому середовищі хвилі P і S поширюються в однаковому вимірі в усіх напрямках від джерела. Фронт (поверхня, що обмежує шар, де існують збурення зовні), а також зворотні хвилі (поверхня, що обмежує цей шар зсередини) є сферами, перпендикулярними до напрямку поширення і з центрами у джерелі (сферичні хвилі). На великій відстані від джерела фронти хвиль можна вважати приблизно плоскими (плоскі хвилі).

Якщо фронт хвилі переходить межу відмінного середовища з іншими пружними властивостями, виникають відбита та заломлена хвилі. Кут відбиття α_3 дорівнює куту падіння α_1 , а кут



заломлення α_2 пов'язаний з α_1 наступною залежністю (закон Снеліуса⁷³):

$$\sin \alpha_2 = (v_2 / v_1) \sin \alpha_1, \quad (5)$$

де v_1 та v_2 – швидкості поширення хвиль у першому та другому середовищах відповідно. Коли хвильовий промінь входить у середовище з більшою швидкістю, він відхиляється від нормалі. Відносні амплітуди відбитої та заломленої хвиль залежать від щільності та швидкості в обох середовищах.

Закон Снелліуса показує, що коли $\sin(\alpha_1) = v_1/v_2$, тоді $\alpha_2 = 90^\circ$, і хвиля, яка падає під критичним кутом α_k (де $\alpha_k = \arcsin(v_1/v_2)$), не проникає в друге середовище, а рухається вздовж його межі (Stigloher et al. 2016). Якщо кут падіння більший ніж α_k , то хвиля взагалі не проникає в середовище і відбувається її повне внутрішнє відбиття.

Справжнє явище складніше, ніж описане вище, оскільки будь-яка P - або S -хвиля, яка падає на межу під кутом, створює дві відбиті (P і S) та дві заломлені (P і S) хвилі. Рівність кутів падіння і відбиття виконується лише тоді, коли падаюча і відбита хвилі належать до одного типу. Кут α_3 , під яким відбивається S -хвиля від падаючої P -хвилі, визначається за формулою:

$$\sin \alpha_3 = (v_s^1 / v_p) \sin \alpha_1, \quad (6)$$

де v_s^1 і v_p^1 відповідно швидкості хвиль S і P в першому середовищі.

Коли поздовжні і поперечні хвилі наближаються до поверхні Землі, виникають так звані хвилі Релея. Ці хвилі дещо схожі на

⁷³ **Закон Снеліуса** – визначає напрям розповсюдження променя світла, який падає на плоску границю розділу двох середовищ.



хвилі на поверхні моря, але коливання вільної поверхні Землі відбуваються внаслідок взаємодії сил інерції і сил пружності, на відміну від гравітаційних сил у рідині (Shapiro, Campillo 2004). Отже, хвиля Релея, хоча й має самостійний характер, не є справжньою новою хвилею, а являє собою суперпозицію⁷⁴ коливань тих самих поздовжніх і поперечних хвиль. Вона поширюється вздовж вільної поверхні, здійснюючи одночасно деформації об'єму і зсуви, при цьому частки рухаються на глибину приблизно рівну довжині хвилі вздовж еліптичних траєкторій у вертикальній площині в напрямку променя, в передній частині – до поверхні Землі, в задній – від неї. Амплітуда хвилі зменшується з глибиною, так що вона практично існує лише в певному шарі, який прилягає до вільної поверхні. Швидкість хвилі Релея $v_r \sim 0,9 v_s$ і в однорідному середовищі не залежить від довжини (частоти) хвилі, або, як кажуть, в цьому випадку не виникає дисперсії швидкості.

Хвилі Релея виникають не лише на вільній поверхні, але і в шарі, і у цьому випадку їх часто називають псевдорелеєвськими хвилями. При цьому вони мають нову властивість – дисперсію швидкості. Для шаруватої Землі зазвичай швидкість збільшується з глибиною, і більш довгі хвилі, які, крім того, проникають глибше, поширюються швидше і приходять першими. Формування хвиль Релея в шарі відбувається завдяки взаємодії при повному внутрішньому відбитті від межі шару поздовжніх хвиль P і поперечних SV . Енергія коливань рухається вздовж шару, при цьому зсуви частинок лежать у вертикальній площині.

В тих самих умовах зі зростанням швидкості з глибиною виникають хвилі Лява, які поширюються вздовж поверхні шару.

⁷⁴ **Суперпозиція** – лінійна комбінація складових полів. Окремий випадок суперпозиції хвиль — інтерференція їх (суперпозиція хвиль із різними частотами). У лінійних середовищах хвилі з різними частотами можуть розповсюджуватися незалежно, не впливаючи одна на одну, а тому їхня дія є сумою (суперпозицією) дій окремих хвиль.



Вони формуються завдяки повному відбиттю від поверхні та підшви шару поперечних хвиль SH (Pan et al. 2016). Хвилі Лява завжди диспергуються. Рух частинок в хвилі Лява перпендикулярний напрямку поширення і лежить в горизонтальній площині, паралельно межах шару. Тому хвилі Лява часто називають поперечними поверхневими хвилями (рис. 90).

Хвилі P і S поширюються з джерела всередині Землі і їх амплітуда в однорідному й ізотропному середовищі зменшується обернено пропорційно відстані R . Поверхневі хвилі L_R і L_Q рухаються вздовж поверхні Землі і мають амплітуду, яка зменшується обернено пропорційно \sqrt{R} . Тому в коливаннях, викликаних віддаленими землетрусами, переважають поверхневі хвилі, серед яких найбільшою амплітудою володіє хвиля L_Q . Під час оцінки стійкості споруд необхідно враховувати вплив поверхневих хвиль, які, проходячи після хвиль P і S , діють на вже послаблені конструкції. Крім того, потрібно враховувати спектр коливань сейсмічних хвиль. Тріщини, що виникають навколо вогнища землетрусу, мають різні розміри і випромінюють різні хвилі, довжина яких зменшується зі зменшенням довжини тріщини. Наявність різних за потужністю тріщин у вогнищі призводить до утворення різноманітних за частотами спектра коливань. Кожен тип сейсмічних хвиль поширює з вогнища певну частину виділеної у ньому пружної енергії. Поглинання енергії в Землі зростає зі збільшенням частоти коливань. Тому роль височастотних коливань зменшується в загальному спектрі зі збільшенням відстані від вогнища до розглянутої точки. Оскільки кожна будівля має власний період та частоту коливань, під час оцінки стійкості слід порівнювати їх із переважаючими частотами в спектрі сейсмічної хвилі.

Зі збільшенням глибини сейсмічні промені зазнають постійного зламу, проходячи через різні шари Землі, і стають криволінійними, спрямованими опуклістю до центру Землі (явище рефракції). У такий момент спостережувана на поверхні Землі швидкість поширення сейсмічних хвиль (так звана позірна швидкість) збіль-



шується зі збільшенням відстані від епіцентру до пункту спостереження. Це явище виявляється на годографах сейсмічних хвиль, які виражають залежність часу проходження сейсмічних хвиль від відстані між епіцентром і пунктом спостереження. Найпоширеніші годографи, що застосовуються на практиці, – це годографи Джефрі–Буллена. На **рис. 91** зображений такий годограф для хвиль P , S і L_R , з якого видно, що швидкості хвиль L_R залишаються постійними, а хвиль P і S змінюються з відстанню. Існують годографи для більш складних видів сейсмічних хвиль, що виникають в результаті багаторазових зламів і відбиття. Нерідко на годографах відстань по осі абсцис виражається не в кілометрах, а в градусах ($1^\circ = 111,1$ км по великому колу).

На **рис. 92** показані можливі траєкторії сейсмічних хвиль всередині Землі. Точкою F позначено головний імпульс землетрусу, від якого починають рухатися хвилі P , S і L . Хвиля P , яка відбивається від поверхні Землі один, два, три рази і так далі, позначається відповідно як PP , PPP і т. д. Такі ж позначення використовують для поперечних хвиль SS , SSS і так далі. Хвилі P можуть перетворюватися в хвилі S при відбитті від поверхні Землі, і тоді вони позначаються як PS . При зворотному перетворенні хвиль S в хвилі P використовується позначення SP . Хвилі P_cP і S_cS позначають хвилі P і S , відбиті від межі мантії і ядра (літера « c » – перша літера англійського слова *core*, тобто «ядро»). Якщо хвиля проникає в зовнішнє ядро, їй присвоюється позначення PKP , де K – перша літера німецького слова «ядро» – *kern*. Внутрішнє ядро позначається літерою I . Проходження хвилі через зовнішнє і внутрішнє ядро з подальшим виходом на поверхню позначається літерами $PKIKP$. Якщо поперечні хвилі збуджують поздовжні (або навпаки), то відбиття від межі зовнішнього ядра або проходження через нього позначаються відповідно як $S_cP(P_cS)$, $SKP(PKS)$. У всіх випадках лише хвилі P проходять через зовнішнє (рідке) ядро. При проходженні хвиль P через внутрішнє ядро можливе їхнє перетворення в хвилі S , які



після проходження внутрішнього ядра знову збуджують на його межі хвилі P (Bormann et al. 2012).

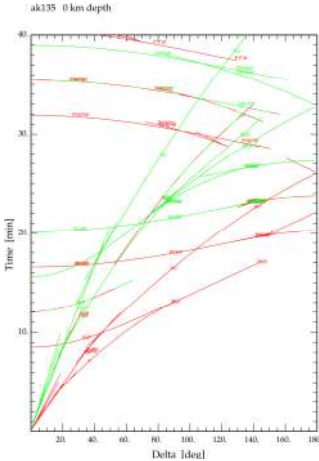


Рис. 91. Годограф

Крива, що є геометричним місцем кінців змінного (що змінюється з часом) вектора, значення якого в різні моменти часу відкладені від загального початку O .

На сейсмограмах, які реєструють сейсмічні коливання за допомогою спеціальних приладів, таких як сейсмографи (див. § 3.7), прихід різних хвиль характеризується відповідним часом вступу. Перший сплеск на сейсмограмі вказує на прихід найшвидших P -хвиль, після чого вступає хвиля S , і через певний час на сейсмограмі фіксується прихід поверхневої хвилі Релея L_R (рис. 90).

Справді, якщо припустити, що швидкості v_p та v_s постійні й дорівнюють середнім значенням, то отримуємо:

$$\Delta t = t_s - t_p = \Delta l / v_s - \Delta l / v_p, \quad (7)$$

де Δl – відстань від епіцентру до спостерігача; Δt – різниця в часі між приходами сейсмічних хвиль; v_p – швидкість P -хвиль, а v_s – швидкість S -хвиль. Отже, для визначення Δl необхідно знати значення Δt і швидкості хвиль.

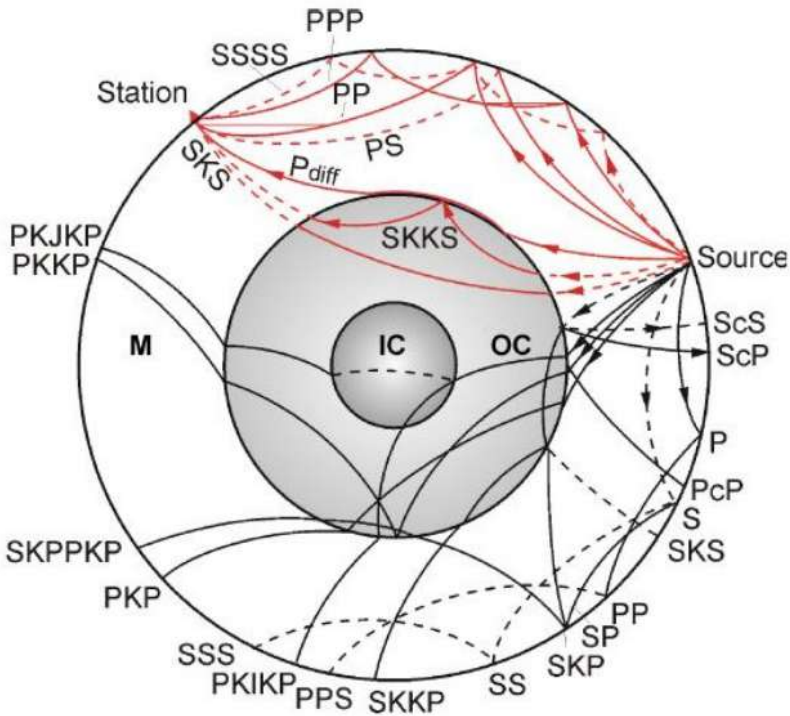


Рис. 92. Траєкторії сейсмічних хвиль усередині Землі
(Bormann et al. 2012)

У реальності швидкості v_p і v_s змінюються зі збільшенням відстані, і для більш точного визначення Δl використовуються спеціальні годографи. У цьому випадку, знаючи Δt , можна прямо визначити бажане Δl з графіка (або таблиці, якщо годограф заданий у табличній формі).

Якщо відстані від епіцентру були встановлені не на одній точці спостереження, а на трьох різних, то можна визначити місцезнаходження епіцентру. Це тому, що на Землі є лише одна точка,



яка розташована на заданих відстанях від трьох інших точок. Для визначення епіцентру проводяться кола з радіусами Δl_1 , Δl_2 , Δl_3 і, якщо радіуси визначені точно, всі кола перетинаються в одній точці – епіцентрі землетрусу (Ochoa et al. 2018). На практиці ці значення визначаються приблизно, тому встановлюється не точка, а деякий трикутник, центр тяжіння якого вважається місцезнаходженням епіцентру. З більшою кількістю точок спостереження місцезнаходження епіцентру може бути визначено точніше. За допомогою таких методів сейсмологи можуть вже через декілька хвилин після землетрусу відносно точно визначити місце епіцентру, знаходячись на відстані кількох тисяч кілометрів від нього.

Сейсмограми насправді містять записи переміщень, швидкостей і прискорень частинок ґрунту і виглядають досить заплутано. Дійсно, при реєстрації на віддалених сейсмостанціях всіх рухів ґрунту, що настають після землетрусу, фіксується велика кількість приходів різних хвиль, що виникають внаслідок відбиття та заломлення. Будь-яка *P*- або *S*-хвиля генерує на поверхні, де вона відбивається або заломлюється, як *P*-, так і *S*-хвилі, які поширюються з різними швидкостями, і тому приходять у різний час. Крім того, хвилі Релея і Лява, що поширюються по поверхні Землі в обох напрямках, а іноді декілька разів обходять її, роблять свій внесок в загальну кількість фаз або приходів, які сейсмолог повинен відповідно виділити. Незважаючи на те, що сам землетрус триває дуже короткий час, сейсмічні хвилі, які долають великі відстані, можуть іти одна за одною протягом години або й більше. Складність розшифровки запису на сейсмограмі поглиблюється накладаннями хвиль та змінами їх швидкості в корі і мантії, а також різницею умов при проходженні сейсмічними хвилями океанічних і континентальних шляхів. Тепер для розшифровки сейсмограм використовуються цифрові методи спектрального та кореляційного аналізу сейсмічних сигналів із задіянням новітнього програмного забезпечення.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

156. Що відбувається з сейсмічною хвилею на межі двох різних середовищ?

157. Які сейсмічні хвилі найшвидші?

158. Які хвилі досягають певної точки другими?

159. Як називається крива, що є геометричним місцем кінців змінного?

160. Який закон визначає напрям розповсюдження променя світла?

ТЕСТ

156. Якою буквою позначають поздовжні хвилі?

- а) P
б) S

- в) L
г) K

157. Якою буквою позначають поперечні хвилі?

- а) P
б) S

- в) L
г) K

158. Як позначають хвилі Релея?

- а) P
б) S

- в) L_R
г) L_Q

159. Як позначають хвилі Лява?

- а) P
б) S

- в) L_R
г) L_Q

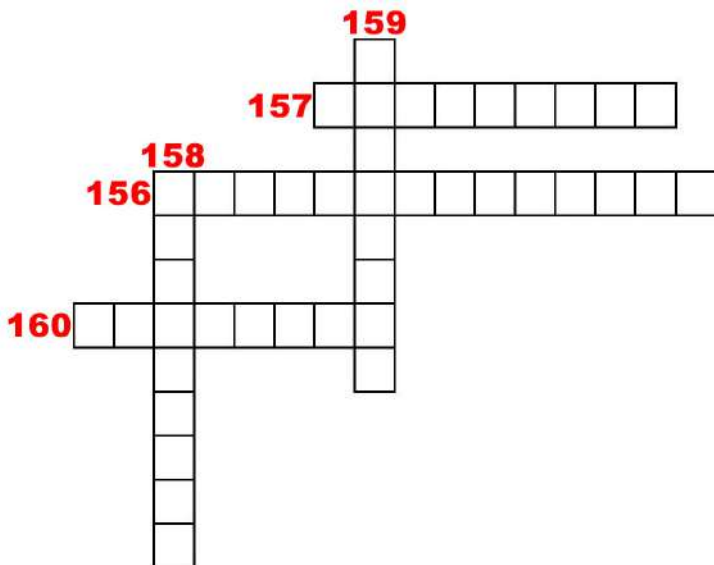
160. Хвилі Релея і Лява є...

- а) поверхневими
б) внутрішніми

- в) поздовжніми
г) поперечними



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 156–160)





3.7. Сейсмографи

Як влаштовані прилади для реєстрації землетрусів?

Прилади, які сприймають механічні коливання ґрунту й перетворюють їх в електричні сигнали, що потім реєструються, називаються сейсмографами. У цьому ж сенсі вживаються терміни «сейсмоприймач», «сейсмометр». Сейсмограф складається з двох основних частин: власне сейсмометра – приладу, який вловлює сейсмічні коливання, та реєструючого пристрою, який записує сейсмічний сигнал. Цей запис (сейсмограма) містить, окрім запису коливань ґрунту, мітки часу.

Рух земної поверхні при проходженні сейсмічних хвиль буває дуже складним, тому реєструється не сумарний рух, а три його складові у прямокутній системі координат – вертикальна та дві горизонтальні. Основна частина сейсмометра – маятник, який являє собою вантаж, надійно з'єднаний з основою приладу.

Основа приладу міцно закріплена на досліджуваному об'єкті або плиті, які складають єдине ціле з корінною породою. При коливаннях внаслідок інерції виникає рух маятника відносно основи. Цей рух може бути перетворений у електричний сигнал за допомогою приєднаної до маятника котушки, що занурена у поле постійного магніту. При зміщенні котушки відносно магніту в ній індукується струм, який фіксується реєструючим приладом. Такий принцип був уперше застосований Б. Голціним, творцем одного з найкращих для свого часу електродинамічних сейсмографів (див. § 3.1).

Реєструючий прилад записує сигнал у аналоговій (для сейсмографів старшого покоління) або цифровій формі (сучасні). Як аналоговий реєструючий засіб широке застосування отримав гальванометр.

Сейсмографи старшого покоління працювали так: струм котушки маятника, проходячи крізь рамку гальванометра, ви-



кликав відхилення рамки (Batlló et al. 2008). Спеціальний коліматорний засіб фокусував світловий промінь, що відбивався від дзеркальця, закріпленого на рамці, у світлову точку на фотопапері. У результаті цього на фотопапері, що переміщувався з постійною швидкістю, реєструвався рух ґрунту. Реєстрація струму, збуджуваного у котушці маятника, інколи виконувалася самописним приладом – формувався видимий запис (пером із чорнилами на простому папері, на хімічно обробленому папері розігрітою голкою та на закопченому папері вістрям пера). Аналогові сигнали могли записуватися також на магнітну стрічку. Але аналоговий запис помітно обмежував динамічний діапазон реєстрованих сигналів. Цей діапазон можна визначити як відношення амплітуд найбільшого та найменшого з сигналів, які читаються й записані на конкретному носії. Зазвичай він розміщений у межах від 20–30 (при гальванометричному записі на фотопапері) до 45–55 дБ (при аналоговій реєстрації на магнітну стрічку).

При цифровій реєстрації на цифровий носій величина діапазону зареєстрованих сигналів практично не обмежена, тому цифрова реєстрація сейсмічних коливань отримала найбільше поширення, оскільки є можливість для безпосереднього вводу цифрового запису сейсмічного сигналу у комп'ютер для його подальшої обробки й аналізу.

Складний сейсмічний рух точки земної поверхні визначається у загальному випадку змінним за величиною та напрямом у просторі вектором, але може бути однозначно визначений трьома скалярними коливаннями вздовж осей x , y , z . При сейсмічних спостереженнях напрям осі y зі знаком « \rightarrow » суміщають з напрямом на північ, напрям осі x зі знаком « $+$ » – з напрямом на схід, напрям осі z зі знаком « \uparrow » – з напрямом до zenіту. Отже, для трикомпонентної реєстрації сейсмічних коливань потрібний один вертикальний сейсмометр та два горизонтальних (рис. 93).

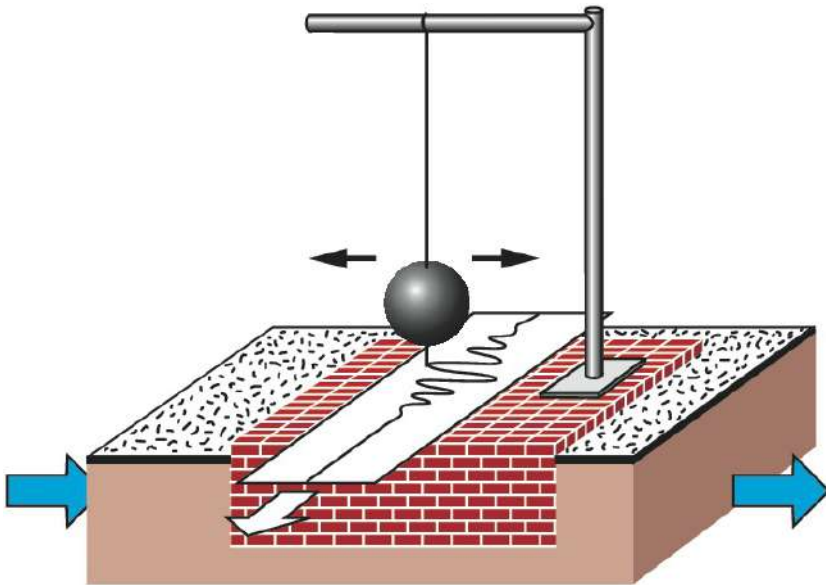


Рис. 93. Схема сейсмометра

Маятник коливається у вертикальній площині та дозволяє забезпечити реєстрацію вертикальної складової сейсмічних коливань. Якщо розвернути [рис. 93](#) на 90° за годинниковою стрілкою, маятник отримає можливість реагувати на горизонтальні зміщення, й у такому випадку ми отримаємо найпростішу схему горизонтального сейсмометра. Звісно, що реальні сейсмометри влаштовані значно складніше і мають спеціальні засоби для демпфірування коливань – забезпечення заданого ступеня їх згасання, захисту від різноманітних наводок тощо. Окрім цього, слабкі електричні сигнали, що виробляються сейсмометром, необхідно посилити, без чого неможлива їх реєстрація. Для цього застосовують підсилювачі, які створюють посилення коливань по напрузі більше десятків і сотень разів. Щоб забезпечити за-



дану смугу пропускання корисних сигналів, посилювач обладнують електричними фільтрами. Сейсмометр разом із посилювачем, фільтрами та реєструючим модулем утворює сейсмореєструючий канал.

Зазвичай вогнище землетрусу – це деяка площа, вздовж якої зсуваються один відносно одного сусідні блоки кори, при цьому один блок створює ефект стискування, а другий – розрідження у земній корі.

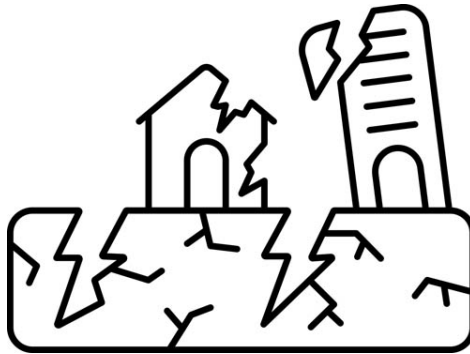
У результаті поздовжня сейсмічна хвиля, яка підходить знизу до земної поверхні, може бути як хвилею стиснення – додатний від вогнища вступ, так і хвилею розрідження – від’ємний від вогнища вступ, тому перший вступ *P*-хвилі на *Z*-компоненті (зенітному сейсмографі) обов’язково фіксується у міжнародних сейсмічних базах даних, де регулярно оновлюються відомості про всі сильні землетруси світу.

Застосовуються також сейсмографи, засновані на інших фізичних принципах. Так, у морській і річковій сейсморозвідці, коли умови контакту приймача із середовищем поліпшуються, застосовують п’езоелектричні приймачі тиску, що формується при поширенні пружної хвилі. При деформації п’езокристала на його гранях виникає різниця потенціалів, прямо пропорційна прикладеному тиску. Можна побудувати сейсмографи на основі оптичних квантових генераторів (лазерів), а також інших фізичних принципах (Kortström et al. 2016).

Конструювання сучасного сейсмографа являє складну науково-технічну задачу. Він повинен мати високу чутливість та реагувати на дуже малі зміщення, реєструючи сейсмічні коливання у діапазоні від тисячних і сотих часток Гц до десятків і сотень Гц, забезпечувати пропуск усіх основних частот, з якими пов’язані корисні сигнали, та заглушати шумові коливання, володіти невеликими нелінійними викривленнями, високою надійністю і стабільністю характеристик при малій вазі і габаритах. Особливо високі вимоги висуваються до сейсмографів при



цифровій реєстрації (Zheng et al. 2020). Вони повинні пропускати сейсмічні коливання відповідно до їх природного динамічного діапазону. При цьому нелінійні викривлення у сейсмографі повинні бути за можливості максимально малими, щоб якомога повніше використати високу точність цифрової реєстрації. У залежності від виконуваних завдань, а також з метою зменшення впливу перешкод сейсмографи можуть встановлюватися у штольнях, у місцях виходу корінних порід на поверхню, у спеціальних шахтах глибиною 20–40 м або у свердловинах на глибині до 100–300 м.





КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

161. Що є основною частиною сейсмографа?
162. Який канал утворює сейсмометр разом із посилювачем, фільтрами та реєструючим модулем?
163. У якій формі записували сигнали сейсмографи старшого покоління?
164. У якій формі записують сигнали сучасні сейсмографи?
165. Що є основою оптичного сейсмографа?

ТЕСТ

161. Чи обмежений діапазон реєстрації сигналів сучасним цифровим сейсмографом?

- а) так
б) ні
в) лише у верхній частині спектра
г) лише у нижній частині спектра

162. Для трикомпонентної реєстрації сейсмічних коливань потрібні сейсмометри...

- а) 2 вертикальних і 1 горизонтальний
б) 2 вертикальних і 2 горизонтальних
в) 2 вертикальних і 3 горизонтальних
г) 1 вертикальний і 2 горизонтальних

163. Сейсмографи на основі оптичних квантових генераторів працюють з допомогою...

- а) маятника
б) лазера
в) електромагніта
г) ізотопного генератора

164. Аналоговий запис обмежує динамічний діапазон у межах...

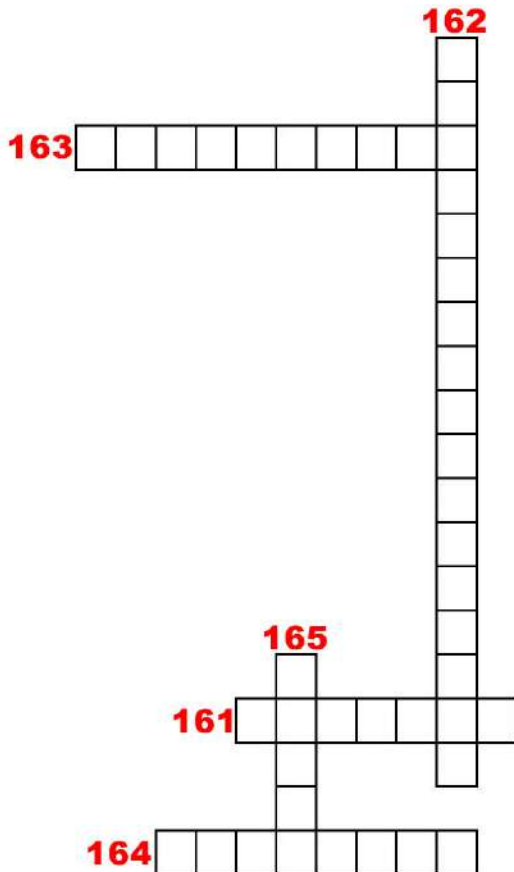
- а) 20–30 дБ
б) 15–25 дБ
в) 45–55 дБ
г) 55–65 дБ

165. Поздовжня сейсмічна хвиля, яка підходить знизу до земної поверхні, може бути...

- а) хвилею стиснення і хвилею розрідження
б) хвилею розрідження
в) хвилею стиснення
г) поверхневою хвилею



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 161–165)





3.8. Світова сейсмічна мережа *Хто стежить за землетрусами?*

Наразі не існує окремої «Світової сейсмічної служби» у загальному розумінні. Сейсмічні дослідження та моніторинг землетрусів зазвичай проводяться численними національними та міжнародними організаціями й інститутами, які співпрацюють між собою для забезпечення безпеки та інформування в разі сейсмічних подій (Bondár, Engdahl 2019; Ringler et al. 2021).

Нижче зазначимо кілька ключових організацій та ініціатив, які займаються моніторингом та дослідженням землетрусів та сейсмічної активності.

Геологічна служба Сполучених Штатів (*United States Geological Survey, USGS*). *USGS* має одну з найбільших мереж сейсмічних станцій у світі та відома своєю роботою з прогнозування і реагування на землетруси.

Світова сейсмічна мережа (*Global Seismographic Network, GSN*). Ця мережа включає десятки сейсмічних станцій по всьому світу, функціонує як міжнародний проєкт для моніторингу сейсмічних подій та обміну даними між національними сейсмічними організаціями.

Міжнародний центр інформації про землетруси (*International Seismological Centre, ISC*). Інформаційний центр, який збирає, аналізує та поширює інформацію про землетруси по всьому світу.

Ці організації співпрацюють для збору даних про землетруси, аналізу цих даних, надання попереджень та інформації про потенційно небезпечні сейсмічні події. Дослідники та фахівці з усього світу активно співпрацюють, щоб зрозуміти природу землетрусів та розробляти стратегії для зменшення їхнього впливу на людей та інфраструктуру.



Геологічна служба Сполучених Штатів (*United States Geological Survey, USGS*) – це агентство у складі уряду Сполучених Штатів, яке спеціалізується на моніторингу та дослідженні сейсмічних явищ, таких як землетруси та вулканічна активність (рис. 94). *USGS* входить до складу Міністерства внутрішніх справ США і є важливим джерелом інформації про геологічні та сейсмічні події в Сполучених Штатах та по всьому світу.

Основні функції та завдання *USGS* у сфері сейсмології включають:

- моніторинг сейсмічної активності: *USGS* утримує мережу сейсмічних станцій, розташованих в різних регіонах Сполучених Штатів та за їхніми межами. Ці станції записують сейсмічні події, включаючи землетруси та вулканічну активність;
- видача попереджень та інформації: *USGS* надає інформацію про землетруси та інші сейсмічні події, включаючи рівень загрози та поради щодо безпеки. Організація також видає аварійні попередження, коли землетруси можуть призвести до значних руйнувань або загрози для життя людей;
- дослідження сейсмічної активності: *USGS* проводить наукові дослідження для розуміння природи землетрусів та вулканічної активності, включаючи їхні причини, механізми виникнення та прогнозування. Ці дослідження сприяють розвитку методів передбачення сейсмічних подій та зменшенню ризику від них;
- поширення інформації: *USGS* надає доступ до сейсмічних даних та інформації широкій громадськості, дослідникам, інженерам, урядовим органам та іншим зацікавленим сторонам. Інформація про сейсмічні події доступна онлайн на їхньому вебсайті та через різні мережі.



**Рис. 94. Логотип Геологічної служби Сполучених Штатів
(United States Geological Survey, USGS)**

Сейсмічна служба Сполучених Штатів відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки та розумінні сейсмічних ризиків в Сполучених Штатах та в усьому світі.

Світова сейсмічна мережа (*Global Seismographic Network, GSN*) – це міжнародна мережа сейсмічних станцій, призначена для моніторингу та реєстрації сейсмічної активності на всій планеті. *GSN* є ключовим інструментом у глобальному дослідженні землетрусів і геологічних процесів, які призводять до них (рис. 95).

Основні характеристики та завдання *GSN* включають:

- *моніторинг сейсмічної активності: Мережа GSN складається з більш ніж 150 сейсмічних станцій, розташованих в різних кутках світу. Ці станції реєструють сейсмічні події, включаючи землетруси та інші сейсмічні явища, і передають ці дані для подальшого аналізу;*
- *збір та обробка даних: GSN використовує сучасні сейсмічні інструменти та технології для збору і обробки*



сейсмічних даних. Ці дані використовуються для створення карт сейсмічної активності, визначення параметрів землетрусів і створення аналітичних звітів;

- наукові дослідження: дані, зібрані GSN, використовуються для наукових досліджень у галузі сейсмології і геофізики. Вони допомагають вченим краще розуміти природу землетрусів, причини їх виникнення і їх вплив на Землю;
- поширення інформації: дані GSN важливі для розроблення раннях попереджень про землетруси і для оцінки ризику сейсмічних подій. Інформація, зібрана мережею, доступна громадськості, науковим установам і органам управління в режимі реального часу;
- співпраця з іншими сейсмічними організаціями: GSN співпрацює з національними сейсмічними службами та іншими мережами сейсмічних станцій для обміну даними та спільного реагування на сейсмічні події.



Рис. 95. Один із логотипів Світової сейсмічної мережі (Global Seismographic Network, GSN)



Світова сейсмічна мережа відіграє важливу роль у зборі та аналізі даних про сейсмічну активність по всьому світу, сприяє науковим дослідженням та спільним зусиллям для зменшення ризику внаслідок землетрусів і інших сейсмічних загроз.

Міжнародний центр інформації про землетруси (*International Seismological Centre, ISC*) – це незалежна некомерційна організація, яка спеціалізується на зборі, обробці та поширенні інформації про сейсмічну активність на всій планеті. *ISC* є важливим джерелом даних для наукових досліджень, моніторингу землетрусів та роботи в галузі сейсмології (рис. 96).

Основні функції та завдання Міжнародного центру інформації про землетруси включають:

- збір та аналіз даних: *ISC* збирає сейсмічні дані зі всього світу від різних сейсмічних станцій і мереж. Ці дані включають в себе інформацію про землетруси, їхні параметри та розташування. Організація аналізує ці дані для створення списку сейсмічних подій;
- співпраця з іншими сейсмічними організаціями: *ISC* співпрацює з національними сейсмічними службами та іншими мережами сейсмічних станцій для обміну даними та забезпечення взаємодії в галузі сейсмології. Ця співпраця сприяє поліпшенню якості та доступності сейсмічних даних;
- поширення інформації: *ISC* надає інформацію про сейсмічні події науковим установам, органам управління, дослідникам і громадськості. Їхні дані використовуються для створення карт сейсмічної активності та для розроблення рекомендацій щодо заходів безпеки;
- ведення бюлетенів і звітів: *ISC* веде бюлетені та звіти, які містять інформацію про останні сейсмічні події, а також наукові аналізи та статистику землетрусів.



Рис. 96. Логотип Міжнародного центру інформації про землетруси (*International Seismological Centre, ISC*)

Міжнародний центр інформації про землетруси відіграє важливу роль у забезпеченні доступу до сейсмічних даних та інформації для науковців, дослідників і тих, хто займається моніторингом та передбаченням землетрусів. Організація допомагає поглибити розуміння сейсмічних подій і сприяє безпеці населення в умовах сейсмічних загроз.



РОЗДІЛ 4 ПЕРЕДБАЧЕННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ

4.1. Методи передбачення землетрусів *Чи можливо прогнозувати землетрус?*

4.1.1. Геохімічні методи

Можна вважати беззаперечним фактом, що хімічний і компонентний склад підземних вод, які територіально пов'язані з епіцентральною зоною, змінюється в періоди, що передують та супроводжують землетруси. Процеси підготовки і виникнення землетрусу супроводжуються формуванням у підземних водах над вогнищем газово-гідрохімічних аномалій, що виявляються в широкому спектрі різних геохімічних показників.

З метою прогнозування землетрусів вивчаються характеристики підземних вод, які поділяються на п'ять груп.

- загальні фізико-хімічні показники, такі як температура, загальна солоність, яка зазвичай визначається за провідністю, рН-коефіцієнт;
- зміни у вмісті компонентів основного мінерального складу підземних вод (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-});
- вміст газоподібних компонентів підземних вод (Rn , H_2 , Ar , CO_2 , H_2S , N_2 , CH_4);
- вміст деяких мікрокомпонентів підземних вод (фтор, бор, ртуть, арсен, уран та інші);
- вміст ізотопних співвідношень $^3\text{He}/^4\text{He}$ та $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ у CO_2 та CH_4 підземних вод.



За ступенем їх хімічної активності та властивостями міграції гідрогеохімічні показники поділяються на індикатори, які передують тектонічним землетрусам, і індикатори, які супроводжують землетруси. До перших відносять інертні гази, такі як водень, азот, вуглекислий газ і їхні ізотопи, окремі макро- та мікрокомпоненти, такі як хлор, фтор, ртуть, кремній, бор, які під впливом термодинамічних змін можуть переходити з розчинів у газоподібний стан і, в такий спосіб збільшувати свою здатність до міграції. До других належать радіоактивні елементи, зокрема уран, торій та їхні ізотопи.

Тепер найбільший арсенал методів прогнозування землетрусів належить методам, які базуються на використанні геохімічних критеріїв.

Розглянемо наукові відкриття та винаходи, пов'язані з проблемою прогнозування землетрусів за геохімічними критеріями. Почнемо з наукового відкриття під назвою «Явище зміни хімічного складу підземних вод під час землетрусу». Автори цього відкриття Г.А. Мавлянов та ін. встановили раніше невідоме явище зміни хімічного складу підземних вод, пов'язане із землетрусом. Явище полягає в тому, що перед землетрусом, а також під час його проходження, в підземних водах, які територіально пов'язані з епіцентральною зоною, збільшується концентрація мікрокомпонентів, таких як благородні гази (радон, гелій, аргон), сполуки фтору, урану та змінюється їхній ізотопний склад (Мавлянова, Рахматуллаев 2017).

У Ташкенті вивчалася зміна поведінки радону в термомінеральній воді перед і після руйнівного землетрусу, який стався 26 квітня 1966 року. Вміст радону перед землетрусом протягом чотирьох років (з 1956 по 1959 рік) залишався сталим, а в середині 1965 року збільшився в 3 рази. Саме в цей період почався перший етап пружної деформації гірських порід. Максимальний вміст радону був зареєстрований 20 квітня 1966 року, через 5 днів стався землетрус потужністю 8 балів. Після основного



землетрусу тривалий час відбувалися афтершоками (повторні поштовхи (див. § 3.3 і 3.4), причому зміна вмісту радону в водах продовжувала змінюватися в закономірному порядку: його кількість зменшувалася між поштовхами і різко зростала за кілька днів до них, а потім знову поступово падала до попереднього фонового рівня.

Було також вивчено поведінку гелію, фтору та аргону в ташкентських мінеральних водах. Зазначалися систематичні зміни в їх концентраціях. Різкі коливання в складі (переважно збільшення концентрацій) спостерігалися безпосередньо під час землетрусів із силою понад 3 бали. Наприклад, концентрація гелію під час сильних поштовхів збільшувалася в 10–12 разів, фтору та аргону – в 2–3 рази (Umeda et al. 2008). Після поштовхів концентрація газів зменшувалася.

Окрім газових компонентів, досліджувалася поведінка деяких розчинених мікроелементів, зокрема урану, радію, а також ізотопів урану (урану-234 і урану-238), вміст яких після землетрусів різко знижувався до рівня, що передував землетрусу.

Дослідження Дагестанського землетрусу 1968 року підтвердило висновки авторів відкриття, і землетрус, який стався пізніше (1970 року) в Саракамиші⁷⁵, був передбачений за три місяці до початку події.

Однак, об'єктивно оцінюючи практичне значення свого відкриття, автори вказували, що це може бути використано при розробці нових методів пошуку передвісників землетрусів як частини комплексу геолого-геохімічних досліджень, пов'язаних із проблемою прогнозу землетрусів.

Подальша багаторічна практика прогностичних робіт на основі геохімічних критеріїв підтвердила правильність цього висновку авторів відкриття, і інші відкриття та винаходи, засно-

⁷⁵ **Саракамиш** – місто і район в ілі Карс Турецької Республіки.



вані на геохімічних показниках і спрямовані на розв'язання цієї проблеми, підтверджують правильність їхніх висновків.

Друге відкриття науковців під керівництвом Б.О. Мамина полягає у виявленні закономірності розподілу концентрації ізотопів гелію на Землі. Відкриття сформульоване так: «Встановлена раніше невідома закономірність розподілу концентрації гелію на Землі, яка полягає в тому, що у гелії, який утворюється в підкорових шарах Землі, співвідношення концентрацій ізотопів $^3\text{He}/^4\text{He}$ постійне і аномально велике, перевищуючи це співвідношення в гелії, який утворюється в гірських породах земної кори в сотні і тисячі разів» (Мамырин и др. 1979).

Автори відкриття вказують на принципову можливість використання величини співвідношення гелію-3 до гелію-4 для прогнозування землетрусів, оскільки в періоди, що передують землетрусам, до стаціонарного потоку гелію додається гелій, який містився раніше в гірських породах та мінералах і має інший ізотопний склад.

Відомий ізотопний склад гелію майже повністю зумовлений перемішуванням гелію з мантії та радіоактивного гелію з земної кори у різних пропорціях. При цьому в спостережуваному потоці гелію близько до поверхні Землі виділяється стаціонарна компонента, характерна для газів регіону у «спокійний» час, і додаткова компонента, пов'язана з додатковою дегазацією⁷⁶ порід земної кори при збільшенні напруги перед великими землетрусами.

Додатковий гелій, як правило, відрізняється ізотопним складом від стаціонарного гелію, тому його поява буде виявлятися в змінах співвідношення гелію-3 до гелію-4. Джерелами

⁷⁶ **Дегазація** – виділення газів з гірських порід під дією фізичних сил (температури, тиску тощо).



додаткового гелію можуть бути як гірські породи земної кори, які постачають гелій із низьким співвідношенням, так і характерні для деяких регіонів ендегенні процеси, які постачають мантийний гелій із високим співвідношенням гелію-3 до гелію-4. За думкою авторів відкриття, залежно від розташування та інтенсивності джерел додаткового гелію, це співвідношення може зменшуватися або збільшуватися в період, що передує землетрусу.

Під час розробки комплексної методики прогнозування землетрусів, що базується на розповсюдженні ізотопів інертних газів, автори вважають, що слід використовувати такі ізотопні співвідношення: $^3\text{He}/^4\text{He}$; $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^{\text{атм}}$ $^4\text{He}/\text{Rn}$ і концентрації гелію. Для ізотопного аналізу гелію був розроблений магнітний резонансний мас-спектрометр.

В результаті цього відкриття були встановлені закономірності поширення підвищених концентрацій вільного рухомого гелію в земній корі в залежності від глибинних розломів кори.

Головні положення розглянутого вище відкриття суттєво змінили уявлення про закономірності розподілу концентрацій ізотопів гелію в земній корі, мантиї та атмосфері Землі, хоча воно і не привнесло істотних доповнень порівняно з відкриттям Мавлянова в уявлення про можливість використання геохімічних критеріїв у прогнозуванні землетрусів.

Винаходи, які мають безпосереднє відношення до прогнозування землетрусів і базуються на геохімічних методах, насамперед належать методу І.О. Лучина. За його словами, «з метою підвищення надійності визначення часу початку землетрусу періодично вимірюють у місцях розриву цілісності гірських порід у газовій і рідкій фазах концентрацію газів, наприклад гелію, радону, водню, вуглекислого газу, які утворюються при радіоактивному розпаді та при радіохімічних процесах під впливом іонізуючих випромінювань, і на основі великого збільшення градієнта концентрації через виділення цих газів з мікропор гір-



ських порід під впливом напруг, що виникають перед землетрусом, визначають час початку землетрусу» (Лучин 1996).

Суть та відмінність цього методу полягають у тому, що в прогнозованій області в місцях порушення цілісності гірських порід на поверхні Землі або в свердловинах, пробурених до перетину з порушеннями, такими як тектонічні розломи, великі підземні порожнини тощо, беруть зразки рідини і газу. Різке збільшення концентрації або градієнта концентрації рідини і газу вказує на можливість землетрусів. Але виміряти концентрацію газів можна лише на відкритих розломах або з допомогою свердловини, яку пробурили так, щоб вона перетинала місце порушення цілісності гірських порід або порожнину. На жаль, в реальних геологічних умовах важко знайти такі області (крім гірських споруд), де б сейсмогенні розломи часто сягають поверхні. Важко точно пробурити свердловину в місці розлому чи порожнини. Крім того, потрібно заздалегідь знати, де ми очікуємо землетрус, і проводити вимірювання концентрації газів над епіцентром майбутнього землетрусу. А землетруси зазвичай мігрують в просторі та часі.

Явище міграції землетрусів можна порівняти з пострілом з гармати, у якого відбитий приціл, коли кожний наступний снаряд, випущений в одну ціль, не потрапляє в те саме місце. Так, катастрофічний землетрус в Чилі 22 травня 1960 року, супроводжувався майже сотнею повторних поштовхів, і на карті відобразився такою ж кількістю точок, жодна з яких не накладалася на іншу.

Окрім цього, вміст деяких елементів, таких як радон, «може зростати в мінеральних водах не лише перед землетрусом, але й завдяки його міграції за рахунок вилуговування гірських порід із вмістом радіоактивних елементів» (Mogro-Campero et al. 1980; Сардаров 1981), а також внаслідок асейсмічних тектонічних рухів.



Отже, на шляху практичного застосування винаходу Лучина як самостійного методу виникають практично непереборні перешкоди.

Винахід «Спосіб контролю за зміною ступеня деформації гірських порід у сейсмоактивному районі» (Кравцов и др. 1979) передбачає, як і попередній метод, дослідження газових і рідких флюїдів. При цьому «з метою підвищення інформативності методу та більш надійного прогнозування часу землетрусу здійснюють вимірювання співвідношень радіоактивних та стійких, включаючи радіогенні, ізотопів різних елементів, і за величиною змін співвідношень судять про стан гірських порід у конкретному районі».

Для оцінки ступеня деформації гірських порід та врахування змін складу флюїдів як середовища-носія інформації проводять вимірювання вмісту стійких ізотопів кисню-18, дейтерія-3, радіоізотопів $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, а в газах і водах визначають співвідношення ізотопів $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (Hosono et al. 2020). Крім того, у свердловині постійно вимірюють співвідношення короткоживучих радіоактивних ізотопів радону. За величиною зміни співвідношень радіоактивних і стійких ізотопів, наприклад, ізотопів радону, урану, вуглецю, гелію, аргону, визначають глибину джерела напруженості і об'єм втягнутих у процес деформації гірських порід. По кореляції ізотопних співвідношень визначають момент наближення землетрусу.

Отже, недоліки попереднього методу в цьому випадку ще більше поглиблюються необхідністю постійних вимірювань, що недоцільно щодо витрат.

Більшість вищезазначених причин не дозволили розв'язати проблему передбачення землетрусів. Це ж стосується двох інших винаходів (Сардаров 1975).

У першому винаході пропонується такий метод: «Доля приросту співвідношення кількості глибинних газів – гелію і аргону-40, за отриманими значеннями визначають момент на-



стання землетрусу. З метою визначення епіцентру землетрусу вимірювання проводять принаймні в трьох пунктах». Зауважимо, що гелій і аргон-40 є джерелами радіоактивних елементів (уран, торій, калій), які містяться в земній корі. Будучи інертними і стійкими газами, аргон і гелій проникають через тріщини і пори земної кори в атмосферу Землі. Тому автор винаходу вважає, що вони можуть передавати на поверхню інформацію про глибинні процеси, нагромадження тиску та температури у вогнищах майбутніх землетрусів.

Маса атома аргону в декілька разів більша, ніж маса атома гелію, а об'єм аргону у три рази більший, ніж об'єм гелію. З цього погляду автор винаходу вважає, що це суттєво для отримання достовірної інформації про зміни тиску в тих ділянках, де зазвичай розташовані вогнища землетрусів. За найменших змін тиску в глибинних шарах зміниться виміряне на поверхні Землі співвідношення гелію до аргону-40, і за темпом збільшення цих співвідношень можна судити про строки наближення землетрусу та встановлення його ймовірної сили.

Суть і відмінність методу Сардарова такі. Розвиваючи принцип цього методу, батько та син Сардарови запропонували новий спосіб передбачення часу виникнення землетрусів. У ньому, крім величини відношення гелію до аргону-40, запропоновано вимірювати і величину теплового потоку, і по різкій зміні ходу періодичності визначених величин судити про час виникнення землетрусу. Останнє досягається одночасними вимірюваннями визначених величин в місцях розриву цілісності гірських порід. Як зауважують автори цього винаходу, «для розробки методу передбачення землетрусів слід вивчати природні гази, – які виходять із сейсмічно активних зон надр Землі, а ще краще гази, які виходять з глибин над вогнищами землетрусів» (Сардаров и др. 1982).

З розгляду основних положень останніх двох винаходів очевидно, що недоліки, притаманні методам передбачення зем-



летрусів за геохімічними критеріями, залишилися й у них. Більше того, порівняно з попередніми методами ці способи ускладнюються через необхідність вимірювати параметри (наприклад, відношення гелію до аргону-40), зумовлені перетворенням радіоактивних елементів (уран, торій, калій). Навіть якщо вдавалося передбачити землетруси розглянутими методами, передбачення запізнювалося б у часі в порівнянні з методом, запропонованим Кравцовим.

Надзвичайно тривала практика використання геохімічних критеріїв для передбачення землетрусів в різних регіонах виявила малу ефективність такої методології. Відомо, що в основі спостережень за радоном, гелієм та іншими газами й ізотопами важких елементів був глибокий відбір проб, тобто максимальне наближення по вертикалі до центру сейсмічного вогнища. Для цього бурили свердловини на глибину 2–3 км. Така методика базується на праці [Горбушина и др. \(1972\)](#). В ній зроблено висновок, що вивільнення вивчених компонентів з породи у воду спричиняє її ультразвукове руйнування. Не враховуються також особливості розчиненої у воді та вільної газової фази. Однак факти свідчать, що в більшості випадків період, передуючий землетрусам (особливо сильним), відрізняється сейсмічною тишею, а ударна хвиля приходить з великих глибин раптово. Отже, попередньої деструкції порід не відбувається, і модель з впливом ультразвуку необґрунтована.

Під час польових досліджень складно провести взяття проб термальних газонасичених вод із глибоких горизонтів: для цього потрібне передпрохолодження, окремий забір газової та водної фаз з точним визначенням їхніх кількісних співвідношень.

Для геохімічного прогнозу необхідно проводити попередні вимірювання в точках зондування (на рівні дна свердловин) концентрації певних газогідрохімічних компонентів. Зміни концентрацій неодмінно пов'язані з внесенням або виведенням певного компонента, тобто із масообміном. При цьому важливо, щоб вели-



чина масообміну була статистично значущою на тлі природних флуктуацій та методичних похибок (зазвичай досягають перших десятків відсотків). Дані про аналізи масообміну гелію показують, що найдоцільніше брати проби з глибини 50–100 метрів.

Для довготривалих режимних спостережень за вмістом гелію, радону та інших газів використовують пристрої двох типів: з вакуумуванням герметично закритого зверху простору (шурфа або свердловини) та аналізом підземної газової фази на мас-спектрометрах або з виміром підземної фази-носія (газу або води) на приладах мас-спектрометричного та діафрагменного типу. На пристроях першого типу отримують синусоїдальні криві форми, природа яких, імовірно, не пов'язана з природними факторами, такими як сейсміка або гідродинаміка, включаючи припливи. Ймовірно, це техногенні гармоніки, які виникають у вимірювальних установках. Система другого типу краща за умови подальшого вдосконалення методики безпосереднього забору фази, її аналізу без дегазації в режимі потоку тощо.

Надійність тривалих режимних спостережень забезпечується, якщо сигнал гелію, отриманий від аналітичного пристрою, постійно порівнюється з одним і тим самим довгостроковим еталоном. Він повинен бути близьким за концентрацією до середніх вмістів компонента у вивченому водному шарі. Рівень забору фази повинен знаходитися в зоні максимального вертикального градієнта концентрації вивченого компонента (для гелію ця зона зазвичай розташована на перших десятках метрів або навіть безпосередньо пов'язана із виходом артезіанських вод на поверхню).

Усі ці недоліки в методології прогнозу та методиках експерименту з використанням геохімічних критеріїв вже були раніше висловлені і залишаються актуальними дотепер (Барсуков и др. 1989). Аналіз можливостей кожного із вищезазначених методів показує, що складнощі їх використання не обмежуються лише вищезазначеними недоліками в методології.



У реалізації розглянутих вище відкриттів та винаходів для прогнозу землетрусів існують обмеження, які потребують таких умов:

- наявність на земній поверхні розлому, який має генетичний зв'язок з вогнищем землетрусу, або свердловини, яка проникає до пересічення з розломом, з подальшим забором проб для аналізу;
- передбачуване знання місця вогнища землетрусу (що практично неможливо через міграцію вогнищ землетрусів у просторі та часі) з подальшим вимірюванням концентрацій газів у його епіцентрі;
- діагностика підвищення вмісту певних елементів (наприклад, радону) внаслідок процесів, що передують землетрусу, та відділення їх від явищ, пов'язаних із вилуговуванням порід з радіоактивними елементами;
- визначення змін у хімічному і компонентному складі підземних вод, зумовлених подіями, що передують землетрусам, від впливу явищ, спричинених асейсмічними тектонічними рухами;
- неперервні вимірювання і оперативна інформація.

При дотриманні всіх цих умов прогноз землетрусу за геохімічними показниками можливий лише в його епіцентрі, незадовго перед основним поштовхом.

Отже, наведені приклади дозволяють зробити висновок, що наукові відкриття і способи прогнозування землетрусів на підставі геохімічних показників мають важливе наукове значення, як частина геолого-геофізичного комплексу, спрямованого на розв'язання проблеми прогнозування часу землетрусів. Проте вони не можуть бути використані як самостійні альтернативні методи, що підтверджено багаторічною практикою сеймопрогностичних досліджень.



4.1.2. Геофізичні методи

Підготовка небезпечного природного явища, такого як землетрус, обов'язково відбивається на геофізичних полях. Дійсно, спостереження за геофізичними показниками свідчать про наявність аномальних змін електричних властивостей гірських порід, сили тяжіння, швидкостей сейсмічних і акустичних хвиль перед землетрусами та під час них. Тепер наявний великий фактичний матеріал, порівняльний аналіз відкриттів і методів виявляє переваги і недоліки прогнозування землетрусів за геофізичними критеріями.

Серед досліджень, спрямованих на пошук геофізичних передвісників землетрусів, чимало прогностичних робіт з використанням геоелектричних показників. Уперше виявлення зміни часу електричного опору гірських порід перед землетрусом було виконано О.М. Барсуковим в 1968 році. Його наукове відкриття називається «Явище зміни ефективного питомого опору гірських масивів перед місцевими землетрусами» (Барсуков 1972). У цьому відкритті «експериментально було встановлено раніше невідоме явище зміни ефективного питомого опору гірських масивів перед місцевими землетрусами, зумовлене перерозподілом порових рідин в гірських породах зони вогнища землетрусу, що призводить до збільшення електропровідності цих порід».

Як відомо, електропровідність гірських порід – це величина, обернена до електричного опору, і за інших рівних умов цей параметр залежить як від електричного опору гірських порід, так і від структури пор, які змінюються в масиві гірських порід, а також від порової рідини (Karato, Wang 2013). Порової рідина, або поровий флюїд, міститься в породах до глибини 15–20 км, іноді навіть глибше. Вважалося, що електричний опір гірських порід практично не змінюється з часом нижче рівня ґрунтових вод.



О. М. Барсуков вважає, що в процесі зростання напруги перед землетрусом у масиві гірських порід утворюються тріщини. Вони виникають на межах окремих зерен мінералів, де, як правило, концентруються пори. Рідина, яка міститься в порах, перетікає з них у тріщини, утворюючи відрізки токопровідних каналів. Подальший ріст тріщин збільшує розміри цих каналів, що сприяє зменшенню електричного опору гірської породи.

Утворення тріщин, які передують руйнуванню гірських порід, призводить до зміни структури гірських порід, перерозподілу порових розчинів у них, зміни тиску в порах і тріщинах і, як наслідок, до зміни електропровідності середовища в безпосередній близькості від потенційного вогнища землетрусу.

За такою моделлю було знайдено пояснення явища зміни ефективного відносного електричного опору гірських порід перед місцевими землетрусами. Пізніше, у 1979 році, О.М. Барсуков висунув гіпотезу, яка пояснює причини виникнення електричних передвісників землетрусів. Він вважає, що «процес тріщиноформування перед руйнуванням з точки зору електропровідності виявляється складнішим, ніж просте збільшення об'єму тріщин та їх заповнення провідною рідиною. Цей процес впливає на структуру порожнинного простору (звивистість капілярних токових каналів), що має більший вплив на електропровідність, ніж зміна порового об'єму» (Барсуков 1979).

Без детального розгляду можливих причин електричних передвісників землетрусів, відзначимо, що систематичні польові дослідження дозволили О.М. Барсукову експериментально виявити зміни електропровідності гірських масивів у часі перед місцевими землетрусами з енергією понад 10^8 Дж. Дослідження показали, що відносні зміни ефективного відносного електричного опору на поверхні тривають плавно, із амплітудою, яка досягає понад 10 % перед землетрусом із енергією понад 10^{13} Дж на гіпоцентральных відстанях 15–20 км. Час, протягом якого спостерігаються такі зміни, залежить від енергії землетрусу і



становить кілька тижнів або кілька місяців. Після землетрусу електричний опір гірського масиву практично відновлюється. Зміни, які спостерігаються на поверхні, відповідають локальному зменшенню відносного електричного опору гірських порід на глибині.

Відкриття О.М. Барсукова було підтверджено польовими спостереженнями, проведеними в сейсмоактивних районах Таджикистану, США і Китаю.

Але в деяких випадках прогностичні зміни електричного опору гірських порід в Китаї проявлялися не в напрямку зменшення, а навпаки, в напрямку збільшення. Багаторічні дослідження цього явища, як передвісника показали його низьку ефективність для передбачення землетрусів. Недоліки цього методу виявлення, на думку [Монахова \(1980\)](#), такі:

- по-перше, зазвичай неможливо навіть приблизно визначити місце вогнища майбутнього землетрусу без спеціальних досліджень. Це призводить до постійних помилок у передбаченні. Їх можна уникнути, якщо зону досліджень покрити густою мережею спостережних пунктів, що на практиці пов'язано зі значними труднощами;*
- по-друге, якщо точки спостережень знаходяться на достатньо великій відстані від вогнища, то важко виділити корисний сигнал серед шуму і помилок під час вимірювань;*
- по-третє, методика спостережень надзвичайно складна і не дозволяє проводити постійні або достатньо щільні дискретні спостереження, що необхідно для виявлення короткострокових передвісників.*

Вказані обмеження та недоліки передбачення землетрусів за геоелектричними показниками пояснюють той факт, що, не-



зважаючи на практично двадцятирічний досвід використання цього параметра для передбачення землетрусів, він не набув статусу самостійного ефективного методу передбачення.

Доповненням до цього методу є метод реєстрації електричного передвісника землетрусів, запропонований **Любошицем (1988)**. Він полягає в тому, що одночасно здійснюються регулярні вимірювання компонентів електричної напруги, які відповідають певному співвідношенню порід за анізотропією. Зміни всіх вимірюваних величин більш ніж на 60 % або зміни їх знаків свідчать про наявність передвісника землетрусу.

У рамках розв'язання проблеми передбачення землетрусів проводилися дослідження, спрямовані на пошук сейсмічних передвісників (**Алелов, Любошиц 1981**).

Серед цих досліджень виявлено відкриття **Рькунова и др. (1987)**, яке стосується явища модуляції високочастотних сейсмічних шумів Землі деформуючими процесами різного походження.

Як відомо, земна кора перебуває в постійному русі, і, крім сильних рухів, у ній відбуваються слабкі безладні неперіодичні коливання, відомі як мікросейсми або сейсмічний шум. В цьому контексті сейсмографи реєструють високочастотні сейсмічні шуми, під час яких поверхня Землі здійснює десятки коливань за секунду з амплітудою менше однієї тисячної мікрона.

Автори цього відкриття, базуючись на багаторічних сейсмічних дослідженнях та використанні спеціально розробленого обладнання, виявили й вивчили явище модуляції високочастотних сейсмічних шумів тривалими деформаційними процесами. Це відкриття призвело до нового розуміння шумів як каналу інформації про явища в глибинах Землі. Як відзначають автори відкриття, це явище використовується при виконанні практичних завдань, пов'язаних із передбаченням землетрусів.

Нині важко повною мірою оцінити практичне значення цього відкриття для прогнозу землетрусів, оскільки відсутні



будь-які дані про випадки передбачення землетрусів за його використання. Однак світова практика прогностичних досліджень має інформацію про виявлення можливостей використання сейсмічних шумів або мікроземлетрусів у частотному діапазоні 10–20 Гц. Наприклад, за даними Рикитаки (1979), північніше Токіо в міському районі Івацукі, було пробурено свердловину глибиною 3 510 метрів, в яку було встановлено контейнер із трикомпонентним сейсмометром для вимірювання прискорення і швидкості руху ґрунту. Сигнали з приладів подавалися до системи запису на поверхню Землі. Виявилось, що можна проводити спостереження мікроземлетрусів в діапазоні частот 10–20 Гц та зі збільшенням чутливості на 10^5 – 10^6 . Чутливість при таких вимірюваннях приблизно в тисячу разів вища, ніж при наземних спостереженнях.

Спільне використання даних із свердловин та наземних спостережень дозволило японським вченим виявити вогнища багатьох мікроземлетрусів, що відбуваються у районі Токіо. Це послужило підставою для створення додаткових двох свердловин у 1975 році.

З урахуванням наявних даних, настільки затратна система спостережень буде ефективною за кількох умов:

- по-перше, потрібно, щоб сильні землетруси супроводжувалися форшоками, які відсутні в переважній більшості (96 %) випадків;
- по-друге, спостереження мікроземлетрусів, які можуть бути форшоками головних поштовхів, слід проводити в епіцентральної зоні, що виключає можливість широкомасштабного прогнозу;
- по-третє, спостереження мають бути неперервними, що на практиці досягнути надзвичайно важко.



Проте, як вже зазначалося, явище міграції вогнищ землетрусів не надає гарантії безпосереднього попадання в зону вогнища.

Наведений перелік обмежень, який також властивий відкриттю Рикунова та його співавторів, не дозволяє розраховувати на практичне використання цього методу для прогнозування землетрусів.

Два наступних винаходи також не вирішують питання передбачення тектонічних землетрусів. Перший із них, розроблений колективом авторів, базується на тому, що перед землетрусом виникають акустичні хвилі, чия енергія сконцентрована в діапазоні частот від одиниць до сотень кілогерц (Хасанов и др. 1981). За думкою авторів винаходу, ці коливання викликані напругою, яка виникає в площинах розлому, де протягом приблизно доби перед землетрусом руйнується гірська порода. Діапазон частот цих коливань визначається розмірами нерівностей земної кори в площині розлому.

Акустичні сигнали, що передують землетрусам, поширюються у поверхневому шарі земної кори та в приземному (атмосферному) середовищі з різною швидкістю.

Хасанов разом із співавторами пропонують виконувати свій метод прогнозування, маючи дві точки реєстрації акустичних сигналів. Це дозволить локалізувати епіцентр землетрусу в межах сегмента, який утворюється перетином двох кіл із центром в першій та другій точках.

Як зазначають автори винаходу, для підвищення достовірності прогнозу щодо часу і місця землетрусу на поверхні Землі реєструють короткочасні імпульси (пакети) акустичних хвиль та інтервали часу між ними в діапазоні частот від 20 до 60 кГц. Час їх появи свідчить про час наближеного землетрусу, а відстань від пункту реєстрації до прогнозованого епіцентру землетрусу визначається за спеціальною формулою.



Згадуючи про практичні можливості цього методу, важливо підкреслити, що в природі існує чимало випадків рухів по розломах, які зумовлені асейсмічними тектонічними процесами і не відрізняються за проявом від таких, які виникають перед землетрусами. Отже, одним із важких завдань при використанні цього методу є відділення їх один від одного.

Крім того, за допомогою розглянутого методу можна передбачити землетруси не раніше, ніж за добу, тобто проводити оперативний прогноз. Для цього необхідно проводити постійні вимірювання, що економічно недоцільно і практично неможливо. При цьому будь-яка технічна несправність або виходження із ладу апаратури на добу може виключити можливість передбачення землетрусу, який може розпочатися саме в цей часовий проміжок.

Обмежуючи себе лише переліченими перешкодами, можна зробити висновок, що метод передбачення землетрусів Хасанова не може бути використаний як самостійний і має лише наукове значення.

До розділу геофізичних критеріїв також належить винахід [Амирханова, Сардарова \(1976\)](#), що ґрунтується на вимірюванні зміни сили тяжіння, яка діє на будь-яку матеріальну частинку, розташовану неподалік від земної поверхні. Ця сила визначається як геометрична сума сили тяжіння Землі, спрямованої до її центру, та відцентрової сили⁷⁷ інерції, яка враховує ефект її добового обертання навколо власної осі (див. § 1.4).

Як відомо, сила тяжіння в кожній точці земної поверхні не постійна, а періодично змінюється під впливом тяжіння Місяця і Сонця, тобто внаслідок так званих припливно-відпливних рухів. Найбільше підняття земної поверхні від тяжіння Місяця

⁷⁷ **Відцентрова сила** – сила, з якою матеріальна точка, котра рухається, діє на тіло (зв'язок), що утруднює свободу руху точки і змушує її рухатися криволінійно.



становить 35,6 см, найбільше опущення – 17,8 см, отже, найбільша амплітуда коливань земної поверхні, спричинених Місяцем, становить 53,4 см. Найбільше підняття рівнинної поверхні від тяжіння Сонця складає 16,4 см, найбільше опущення – 8,2 см, а максимальна амплітуда – 24,6 см. При певних положеннях Місяця і Сонця щодо розглянутої точки на Землі амплітуда її рівнинної поверхні може досягати 78 см завдяки сумуванню припливних рухів, спричинених Місяцем і Сонцем (Masi 2007; Varga, Grafarend 2019). Отже, припливно-відпливні рухи Місяця і Сонця мають коливальний характер на Землі (вгору-вниз) і також викликають зміни густини всередині Землі, які виявляються в помітних змінах сили тяжіння.

Водночас очевидно, що перед землетрусом в його вогнищі зростає напруга, яка, в свою чергу, призводить до збільшення густини речовини Землі та подальшого зростання значення сили тяжіння.

Величина та періодичність сили тяжіння, зумовлені тектонічними процесами, відрізняються від тих, що викликаються гравітаційним впливом Місяця і Сонця. Якщо зафіксувати добові земні припливи й відпливи протягом 20 днів, то можна чітко простежити періодичність зміни сили тяжіння протягом доби, що залежить від обертання Землі навколо своєї осі та плавної зміни сили тяжіння через обертання Місяця навколо Землі.

За думкою авторів згаданого винаходу, перебіг зміни сили тяжіння, який передує землетрусу, можна чітко виявити. Землетрусу передують переважно три стадії зміни сили тяжіння: перша починається зі зростання величини, характерної для варіації періодичного припливно-відпливного явища, залежного від добового обертання Землі; друга характеризується величиною прискорення сили тяжіння до максимуму, після чого вона починає зменшуватися до значення сили тяжіння; третя передує землетрусу, причому сила тяжіння не змінюється протягом приблизно 20 годин. Отже, за фрагментом отриманого графіка, на яко-



му спад зростаючої до цього сили тяжіння переходить у незмінну величину, можна судити про час виникнення землетрусу.

Таке теоретично можливо, але наразі експериментально не доведено модель передбачення землетрусів за зміною сили тяжіння.

Отже, всі недоліки, обмеження і труднощі, включаючи технічні й економічні аспекти, які були властиві попереднім розглянутим методам, залишаються і в методі передбачення землетрусів за зміною сили тяжіння. Тому цей метод лише доповнює наші уявлення про процеси, що відбуваються в епіцентральної зоні землетрусу, але не має самостійної цінності в розв'язанні загальнолюдської проблеми передбачення землетрусів.





4.1.3. Деформаційні методи

Переважно під деформаційними передвісниками землетрусів розуміють аномальні зміни рівня моря, які реєструються мареографічними станціями⁷⁸, вертикальні зсуви, які фіксуються геодезичними вимірюваннями, нахили, що вимірюються нахиломірами; вертикальні розтягнення, що реєструються деформометрами, та інші явища. Іншими словами, тут об'єднують як причинні, так і наслідкові явища.

Дотепер зареєстровано кілька винаходів, запропонованих різними авторами, які базуються на вимірюванні або контролі одного й того ж параметра – сучасного напруженого стану гірських порід або їх палеонапружень.

У 1983 році було зареєстровано відкриття [Вартаняна и др. \(2009\)](#), які виявили явище формування гідрогеодеформаційного поля (ГГД поля) Землі ([див § 3.3](#)).

Суть цього відкриття полягає в тому, що встановлено явище глобального пульсуючого перерозподілу рідкісних складових літосфери внаслідок зміни природних і техногенних напруг в її твердій частині. Це явище проявляється в постійному виникненні і розпаді багатьох термогідродинамічних, фізико-хімічних аномалій, які контролюють місцезнаходження областей короткочасних (впродовж доби, місяця) деформаційних процесів. Іншими словами, поле гідрогеодеформації Землі є результатом одночасної дії в усьому об'ємі планети численних, різної сили і, часто, різнонапружених процесів деформації речовини.

Вивчення поля гідрогеодеформації Землі показало, що не всі процеси деформації завершуються формуванням розривних або складчастих дислокацій. На думку авторів відкриття, остан-

⁷⁸ **Мареографічні станції** – станції на узбережжі або у відкритому морі, на яких розташовані прилади для вимірювання і безперервної автоматичної реєстрації коливань рівня моря.



ні є екстремальними формами тривалого спрямованого розвитку певної частини літосфери, а короткострокові структури деформації, які становлять основу поля гідрогеодеформації Землі, відображають пульсуючий в реальному часі режим зміни фізичного стану всього геологічного розрізу.

Існує зв'язок між процесами стиснення та розтягнення і розташуванням рівня підземних вод (їх мінералізацією, температурою й іншими параметрами). З погляду авторів відкриття, такі деформації відобразяться на потужності водоносних порід. Іншими словами, може бути обґрунтовано припущення, що ємнісні властивості колектора змінюються з часом і просторово, в залежності від напруженого стану всього масиву, що повинно відобразитися на рівні п'єзометричної поверхні⁷⁹ підземних вод, зосередженої в певному об'ємі.

Методи контролю напруженого стану гірських порід за допомогою вивчення поля гідрогеодеформації Землі, на думку [Вартаняна \(2019\)](#) і [Куликова, Рьжова \(2011\)](#), дозволять, зокрема, передбачити місцезнаходження епіцентру та час природних сейсмічних явищ: землетрусів, вивержень вулканів тощо.

Протягом останніх 40–50 років у багатьох країнах почали більш ретельно вивчати зміни рівня, тиску та дебіту підземних вод, які викликані землетрусами. Увагу дослідників привернули так звані гідрогеодинамічні (ГГД) ефекти як потенційні передвісники землетрусів. Однак, якщо розглядати ГГД-ефекти в широкому плані, вони можуть бути зумовлені як природними, так і штучними факторами.

ГГД-ефекти, викликані природними причинами, можна поділити на два самостійних класи:

⁷⁹ **П'єзометрична поверхня (площина)** – площина, у всіх точках якої тиск дорівнює атмосферному, яка у відкритій посудині збігається з вільною поверхнею. У закритій посудині п'єзометрична площина може бути розташована вище вільної поверхні або нижче неї.



- метеорологічні сезонні та ефекти, зумовлені земними припливними деформаціями;
- асейсмічні нахили земної поверхні, рухи по розломах, а також ефекти, пов'язані з тектонічними процесами.

Вчені вважають, що джерелами формування ГГД-ефектів є такі фактори, як зміна напружено-деформованого стану середовища, зміна фізичних полів – електромагнітних, акустичних й інших. За домінуючою думкою, головна причина формування ГГД-ефектів, яка не суперечить переліченим факторам, полягає в такому. У період перед землетрусом виникає особливий клас тектонічних рухів, названий сейсмогенеруючими тектонічними рухами. Ці рухи поширюються у всіх напрямках від вогнища майбутнього землетрусу, включаючи поверхню Землі в зонах, де його відчутність і руйнування будуть спостерігатися. Поява сейсмогенеруючих тектонічних рухів разом із горизонтальними зсувами призводить до підняття або опускання земної кори. У вертикальному розрізі піднімаються або опускаються самі шари земної кори. При цьому в приповерхній частині земної кори піднімаються чи опускаються один або кілька водоносних горизонтів. Відповідно до підняття та опускання всього регіону, також деформуються й опускаються водоносні пласти. При цьому на територіях, де відбувається підняття земної поверхні, спостерігається витік, водночас – зниження рівня, тиску та витрат підземних вод. У зоні опускання буде спостерігатися наплив, а потім підняття рівня, збільшення тиску та витрати підземних вод. Отже, спостерігається обернена залежність між напрямом вертикальної складової сейсмогенеруючих тектонічних рухів, рівнем, тиском і витратою підземних вод.

Проте існують випадки, коли зміни режиму підземних вод не передують землетрусу. Це стається у випадку, якщо ГГД-ефекти, викликані тектонічними причинами, нівелюються ГГД-



ефектами іншого походження або спостереження за підземними водами проводилися у свердловинах, розташованих в межах так званих басейнів підземних вод. Як відомо, останні формуються на територіях з пониженою водонепроникною товщею, борти якої розташовані приблизно на одних і тих самих висотних рівнях.

Причому один наслідок – зміна режиму підземних вод – може бути спричиненим як сейсмогенеруючими тектонічними рухами, так і асейсмічними нахилами земної поверхні. При опусканні земної поверхні відбувається відносний підйом рівня підземних вод, збільшення витрат і тиску, а при підйомі земної поверхні – зниження рівня підземних вод, зменшення витрат і тиску. Загальна картина настільки схожа, що, використовуючи лише ГГД-передвісників, можна скласти помилковий прогноз.

Саме так і сталося на Сахаліні, де до 1979 року було прогнозовано низку місцевих землетрусів на основі зміни рівня підземних вод у свердловинах. Проте в лютому 1979 року на півдні та півночі Сахаліну і на Курильських островах рівень води почав опускатися. Зазвичай він знижувався приблизно на 15 см, але до початку квітня опустився майже на 50 см. Було оголошено прогноз, але землетрусу не сталося. Рівень води спочатку стабілізувався, а потім різко почав зростати. Геодезичні роботи, проведені після цього, показали, що відбулася пластична деформація гірських порід, яку називають крипом (Сапрыгин 2003). Відрізнити підготовку крипу від землетрусу за допомогою ГГД-передвісників практично неможливо.

Сейсмогенеруючі тектонічні рухи поширюються в усі боки від вогнища майбутнього землетрусу в ті місця, де він буде відчуватися. Земна кора на шляху цих рухів нерівномірна як за тектонікою (вона складається з блоків і мікроблоків, ускладнена скидами, насувами тощо), так і за літологією (шари мають різні міцність, склад і властивості). Тому було б не виправдано очікувати однакової реакцію підземних вод на майбутній землетрус у



всіх регіонах. Десь земна кора підніматиметься, а десь опускатиметься, відповідно – рівень води знизиться або підніметься.

До негативних властивостей ГГД-передвісників слід віднести також їх дальню дію: у деяких випадках епіцентри землетрусів були віддалені на 800–900 км від пунктів спостережень, і прилади на цих пунктах все одно реєстрували коливання рівня води у свердловинах. При цьому визначити епіцентр землетрусу можна лише за умови покриття всієї сейсмоактивної зони мережею свердловин.

Різноманітність природи ГГД-ефектів занадто велика, щоб вважати їх самостійними передвісниками землетрусів. Іноді за сприятливих сейсмогеологічних та гідрогеологічних умов ГГД-ефекти, які передують землетрусам, є наслідком одного з етапів прояву сейсмогенеруючих тектонічних рухів. Тому використання їх для передбачення землетрусів виправдане лише в епіцентральної зоні і навіть там – тільки в поєднанні з іншими методами.

Природа ГГД-ефектів, а також практика їх застосування для передбачення землетрусів надає переконливе підтвердження їх низької практичної спроможності. Можна зробити висновок, що відкриття Вартадяна–Кулікова, маючи наукове значення для розуміння процесів, які відбуваються в поверхневій частині гідросфери Землі, не має самостійної практичної цінності для передбачення землетрусів і є лише фоном, на якому відбуваються передвісникові процеси. В ефекті Вартадяна–Кулікова підняття рівня підземних вод пояснюється стисненням гірських порід, а зниження – їх розтягненням. Фактично ж, зважаючи на сейсмогенеруючі тектонічні рухи, підняття та опускання рівня підземних вод є результатом прояву одного з компонентів (вертикальних) сейсмогенеруючих тектонічних рухів. При цьому підняття підземних вод відбувається внаслідок опускання земної кори, тобто вертикальних низхідних тектонічних рухів, а опускання або падіння рівня підземних вод – через підйом земної кори, тобто вертикальних висхідних тектонічних рухів.



Винахід **Исмаил-заде и др. (1981)** передбачає визначення палеонапружень у масиві гірських порід. При цьому в кожній точці дослідження беруть зразки порід, які мають різну орієнтацію, визначають температуру в точці відбору зразка, навантажують кожен зразок в напрямку його орієнтації і одночасно нагрівають його до температури, що відповідає температурі в точці відбору зразка, вимірюють відносне об'ємне деформування зразка від прикладеного навантаження, і відтак визначають максимальну величину і напрямок напруження, яке діяло на породу, а, отже, і на весь масив у геологічному минулому. За думкою авторів, цей метод дозволяє виконувати практичні завдання, пов'язані з можливістю передбачення землетрусів. Палеонапруження є наслідком попереднього циклу землетрусів. Отже, порівнюючи палеонапруження з діючими напруженнями в масиві гірських порід на даний період часу, можна судити про час настання наступного циклу землетрусів.

Ще одна розробка **Дубинчука и др. (1981)** спрямована на вивчення динаміки тектонічних напружень. Автори пропонують вводити в затрубний простір свердловини цементний розчин, що містить добавку радію в кількості, що перевищує його вміст у навколишніх гірських породах (наприклад, на порядок), і визначати динаміку напружень у земній корі за зміною швидкості виділення радону. Суть методу полягає в тому, що напруження, які виникають у масиві, передаються цементному каменю, і під дією цих напружень відбувається додаткове, порівняно з нормальним, ненапруженим станом, виділення радону, яке служить передвісником землетрусу.

У запропонованому **Старковым и др. (1981)** методі цю мету можна досягти ще більш трудомістким способом. У цьому методі, який включає реєстрацію змін швидкості деформації земної кори, визначають напрямки головних напружень, виявляють ділянки з надзвичайно великими їх значеннями. У випадку наявності аномалій швидкостей деформації проводять повторне



визначення напрямків напружень та змін їх абсолютних значень, і за наявності одночасних аномалій швидкостей деформацій і переорієнтації напрямків напружень можна зробити висновок про підвищену сейсмічну активність. Цей метод реалізується на трьох етапах, а другий з них включає ще три підетапи.

Отже, дефект усіх цих методів полягає в тому, що:

- по-перше, всі ці методи, навіть теоретично, придатні лише для прогнозування землетрусів в областях, розташованих над гіпоцентром землетрусу, і цей гіпоцентр передбачити наперед неможливо, оскільки він пересувається у часі, мігрує по площі та по глибині;
- по-друге, можливість вимірювати деформації є лише в гірських породах. В деяких методах для визначення напрямку або переорієнтації напруг використовують спеціальні сітки або оброблені зразки гірських порід, в інших – спеціальні свердловини;
- по-третє, ці методи надзвичайно важко автоматизувати, тому здебільшого неможливо отримувати швидку інформацію;
- по-четверте, складно відрізнити зміни напружень, що є передвісниками, від тих, які спричинені асейсмічними процесами або іншими чинниками.

Наразі найперспективніші спроби в галузі передбачення землетрусів потребують подальших досліджень і розробок, але дотепер точний і надійний метод прогнозування землетрусів залишається невідомим.



4.1.4. Геодинамічні методи

Геодинамічні критерії визначаються як показники, зумовлені рухами, перш за все тектонічними.

Одеков (1984) обґрунтував існування закономірності спільної дії вертикальних і горизонтальних тектонічних рухів у земній корі.

На основі цієї закономірності було передбачено і науково пояснено наявність раніше невідомого явища аномальної спільної зміни вертикальних і горизонтальних компонентів тектонічних рухів перед землетрусом, а також сейсмогенеруючих тектонічних рухів.

Це інноваційне рішення формулюється так: спосіб передбачення землетрусів ґрунтується на реєстрації горизонтальних і вертикальних компонентів тектонічних рухів земної кори в сейсмонебезпечних областях і відрізняється тим, що для підвищення достовірності в епіцентральної або плейстосейсмічній зоні постійно реєструють зсув фаз між вертикальним і горизонтальним відхиленнями, і при їхньому синхронному відхиленні від фонового значення роблять висновки щодо можливості виникнення землетрусу.

Іншими словами, суть цього методу, так само як і ефекту, на якому він ґрунтується, полягає в тому, що в земній корі одночасно діють вертикальні і горизонтальні тектонічні рухи, зумовлені силами розтягування і стиснення, які викликають рухи земної поверхні в періоди, що передують землетрусам, і під час самого землетрусу. Відомо, що сучасні рухи земної поверхні глобальні й безперервні в часі, вони мають різні напрямки і швидкості.

У практиці вивчення сучасних рухів земної кори геодезичними методами їх вертикальну та горизонтальну складові зазвичай визначають окремо і незалежно одна від одної. Більше того, у більшості випадків обмежуються визначенням лише вертика-



льних рухів земної кори, не беручи до уваги можливі горизонтальні зсуви. Це пояснюється передусім сформованою до цього часу технологією геодезичних вимірювань. Так, вертикальну складову рухів земної кори визначають на основі результатів повторних високоточних нівелювань. Горизонтальні складові можуть бути визначені, зокрема, за даними повторних тріангуляцій⁸⁰ високої точності. Однак випадки повторення тріангуляції або відповідних вимірювань планового положення точок земної поверхні порівняно рідкісні. Випадки спільного та одночасного визначення вертикальної і горизонтальної складових руху земної поверхні геодезичними методами виняткові.

Дані щодо трьох землетрусів різних класів і різної сили, перед якими були здійснені вимірювання лише одного компонента сучасних рухів земної кори, свідчили на користь запропонованого методу. Наприклад, перед землетрусом в Сарикамиші (червень 1970 р.), який мав 8 балів і викликав далеко від епіцентру в Алма-Аті поштовхи силою 5 балів, і перед землетрусом в Таразі, що в Казахстані (травень 1971 р.), з 7 балами вимірювалася вертикальна складова сучасних рухів в період перед землетрусом. Спочатку було помічено інтенсивне зростання руху, яке в 5–6 разів перевищувало фонове значення вертикальної складової сучасних рухів, потім сповільнення до самого землетрусу, а після нього знову інтенсивний рух, але із зворотним знаком.

Перед землетрусом в районі Ашхабада (серпень 1974 р.) силою 4 бали за 5 годин до землетрусу при спостереженнях з допомогою світлодалекомірів за горизонтальною складовою також було помічено збільшення значення руху з великою інтенсивністю, яке перевищувало фонові значення в 6 разів.

⁸⁰ **Тріангуляція** – один із головних методів створення мережі опорних геодезичних пунктів. Полягає в побудові рядів або мереж з прилеглих один до одного трикутників та визначенні розташування їх вершин у вибраній системі координат.



Отримані дані свідчать про очевидний зв'язок між характером рухів земної кори і процесами, що відбувалися в надрах Землі перед землетрусами. Це дозволяє використовувати цей метод як універсальний щодо прогнозу часу виникнення відчутних, сильних і катастрофічних землетрусів у всіх сейсмоактивних регіонах, не лише в епіцентрі, але й на великих площах майбутніх плейстосейстових та епіцентральної зон. Залежно від енергії передбачуваного землетрусу його початок можна буде прогнозувати за кілька днів або навіть за декілька років. Зі збільшенням кількості статистичних даних про прогнозування землетрусів в подальшому можна встановити кількісну залежність між глибиною вогнища, класом, енергією землетрусу, площею, що охоплюватиме плейстосейстову зону, з одного боку, та часом до початку землетрусу – з іншого. Крім того прогнозування землетрусів за цим методом може запобігти виникненню помилок, які допускаються при спробі прогнозувати землетруси, зокрема, лише за зміною одного з компонентів сучасних рухів земної кори. Як зазначалося вище, землетруси збудовлені сейсмогенеруючими тектонічними рухами, які виникають виключно при спільній дії сил розтягнення і стиснення, тоді як зміни лише одного компонента можуть бути спричинені рухами вздовж розломів, обвалами та іншими асейсмічними явищами. Саме з цієї причини лише після сейсмічних подій вдалося пов'язати із землетрусами аномальні зміни в часі одного з компонентів сучасних рухів в епіцентральної зоні у трьох наведених вище прикладах.

На основі наведених положень і прикладів в сейсмоактивних регіонах в епіцентрі, на очікуваній площі плейстосейстової та епіцентральної зон майбутнього землетрусу необхідно одночасно вимірювати вертикальні та горизонтальні компоненти сучасних рухів земної кори в одних і тих самих точках. При цьому фіксувати зміни в часі компонентів сучасних рухів земної кори на основі синхронного аномального відхилення ходу змін су-



часних вертикальних і горизонтальних рухів від фонових значень, щоб зробити висновки про наближення землетрусу.

Для досягнення цієї мети можна використовувати відому в геодезичній практиці методику вивчення сучасних горизонтальних рухів земної кори, доповнивши її вимірюваннями сучасних вертикальних рухів. У сейсмоактивних областях вибирають площі, на яких буде проводитися прогноз землетрусів. Дослідження сучасних вертикальних і горизонтальних тектонічних рухів на площах можна проводити, використовуючи також геодезичні пункти геодезичної мережі. На цьому етапі виявляють ділянки, де спостерігаються найсильніші відхилення сучасних вертикальних і горизонтальних тектонічних рухів, що вказують на початок проявів сейсмогенеруючих рухів. Спостереження за тектонічними рухами можна доповнити засобами наземних вимірювань і космічними спостереженнями.

На другому завершальному етапі спостереження проводять вже тільки на ділянках найбільших проявів сейсмогенеруючих тектонічних рухів; автоматизація процесу дослідження практично виключає участь людини в вимірюваннях. Сучасна наука має в розпорядженні високочутливе обладнання – радіоелектронні засоби, світлодалекоміри, теодоліти і нівеліри для вимірювання вказаних рухів, що дозволяє робити ще більш ранні прогнози часу землетрусу.

Однак і цей метод не дає високої точності прогнозу, оскільки часто землетруси не супроводжуються достатніми тектонічними рухами, які могли б бути достовірними передвісниками майбутнього землетрусу. Проте цей метод може бути використано для прогнозування (з достатньо малою ймовірністю) часу землетрусів будь-якого класу в усіх сейсмоактивних регіонах нашої планети.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

166. Який метод передбачення землетрусів ґрунтується на реєстрації горизонтальних і вертикальних тектонічних рухів?

167. У якому методі передбачення землетрусів використовуються електричні передвісники?

168. Яке поле виявила група вчених на чолі з Вартаняном?

169. У якому методі передбачення землетрусів використовуються дані про рівень підземних вод?

170. У якому методі передбачення землетрусів використовуються дані про поведінку радіоактивних ізотопів?

ТЕСТ

166. Який метод прогнозу землетрусу ґрунтується в т. ч. на основі визначення концентрації родону?

а) геохімічний

в) деформаційний

б) геофізичний

г) геодинамічний

167. Який метод прогнозу землетрусу зумовлений тектонічними рухами?

а) геохімічний

в) деформаційний

б) геофізичний

г) геодинамічний

168. Який метод прогнозу землетрусу базується на електропровідності гірських порід?

а) геохімічний

в) деформаційний

б) геофізичний

г) геодинамічний

169. Який метод прогнозу землетрусу базується на зміні рівня моря?

а) геохімічний

в) деформаційний

б) геофізичний

г) геодинамічний

170. Чи правомірно стверджувати, що землетруси можна спрогнозувати?

а) так

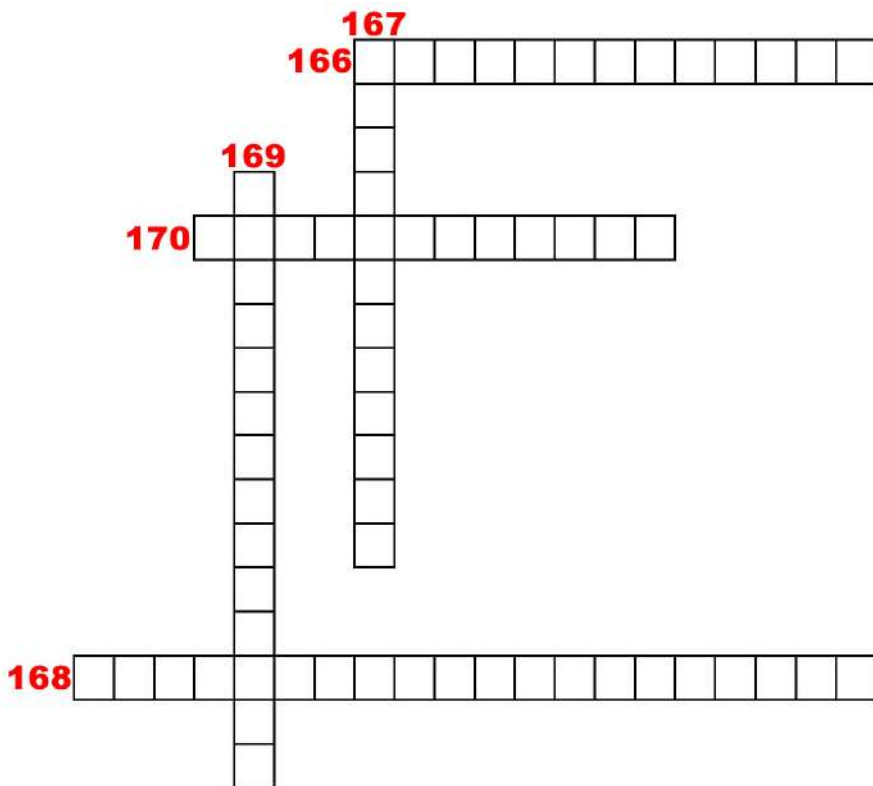
в) лише в окремих випадках

б) ні

г) лише в гірських системах



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 166–170)

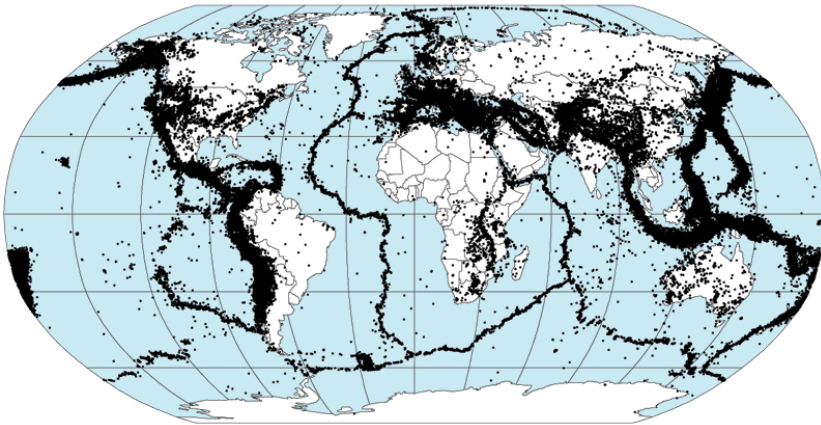




РОЗДІЛ 5 ГЕОГРАФІЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ

5.1. Сейсмічні пояси та межі літосферних плит *Де відбуваються землетруси?*

Здавна відомо, що землетруси розподілені по земній поверхні нерівномірно. Вони концентруються у сейсмічних поясах, які простягаються на тисячі кілометрів. Деякі пояси, такі як пояс вздовж Альп і Гімалаїв, були відомі давно, інші – виявлені пізніше за допомогою сейсмографів, встановлених по усій Землі. Виявилось, що сейсмічні пояси Землі чітко збігаються з обома світовими системами рельєфу: рифтами та жолобами (рис. 97).



**Рис. 97. Приуроченість вогнищ землетрусів
до рифтових зон і жолобів**



Поза межами цих систем землетруси відбуваються рідко, а всередині них постійно.

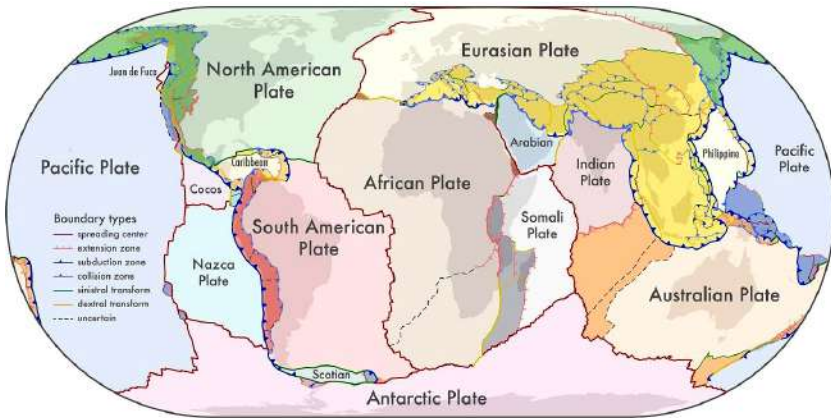


Рис. 98. Літосферні плити Землі

Не все ще відомо про вогнища землетрусів, але, безперечно, землетруси виникають у результаті деформації літосфери, коли під впливом прикладених до неї напруг межа міцності виявляється перевищеною, і літосфера розколюється, катастрофічно вивільняючи велику кількість енергії. Відповідно, пояси сейсмічності маркують зони розколу літосфери. Вони розбивають зовнішню тверду оболонку Землі на великі блоки, або плити. Маючи перед собою карту сейсмічності, будь-хто проведе межі літосферних плит: достатньо слідувати вздовж сейсмічних поясів (рис. 98). Можна виділити 13 головних літосферних плит: Євразійська, Північно-Американська, Південно-Американська, Африканська, Філіппінська, Тихоокеанська, Кокос, Наска та деякі інші. Розміри плит мають тисячі кілометрів, змінюючись у широких межах від 1 000 до 10 000 км. З карти видно, що до складу плит входять як континенти, так і приєднані до них океанські улоговини включно до серединно-океанічних хребтів.



Лише у деяких випадках межа плит збігається з поділом континент–океан.

Поділ літосфери на плити, обмежені сейсмічними поясами, є беззаперечним фактом, одним з базових у теорії тектоніки плит положенням (Coltice et al. 2019).

Землетруси та сейсмічні пояси відображають взаємодію літосферних плит. Якщо виникають землетруси, це означає, що відбувається розкол та деформація літосфери; якщо ж землетрусів немає, то, відповідно, й відсутні деформації у твердій оболонці. З цього робимо висновок – тектонічна активність на Землі сконцентрована в основному вздовж меж плит та зумовлена взаємодією плит.

Пояси сейсмічності неоднакові, вони поділяються на два типи, які відповідають світовій системі рифтів та світовій системі жолобів. У поясах першого типу, які збігаються зі світовою рифтовою системою, сейсмічність обмежена малими глибинами: 5–10, рідше 20 км від поверхні літосфери (Wu, Hu 2019). Сейсмологи визначили, що у сейсмічних поясах першого типу переважають напруги, орієнтовані перпендикулярно до поясів у сторони від них, тобто прикладені сили намагаються розірвати літосферу, та у результаті виникають умови розтягнення.

У поясах другого типу, витягнутих вздовж глибоководних жолобів, землетруси зароджуються у зоні, нахиленій від океану під континент та яка занурюється до глибини 700 км (Guadalupe et al. 2021). Ці нахилені глибокі зони, які часто називаються сейсмофокальними, були виявлені ще у 40-х роках та дали можливість зробити висновок про просування дна Тихого океану під Азію (див § 1.6).

Існування сейсмофокальної зони, яка глибоко занурюється, свідчить про те, що розм'якшена астеносфера перетинається у даному місці міцними пластами, які здатні на пружні деформації, якщо у них виникають землетруси. Такі пласти були виявлені при зондуванні мантиї під глибоководними жолобами



(Zabarinskaya et al. 2021). Їх товщина виявилася такою, що дорівнює 50–100 км, тобто такою ж, якою є океанічна літосфера, і навіть більше – умови проходження сейсмічних хвиль у ній, а отже й її фізичні властивості були такими ж, як у сусідній океанічній літосфері. У вогнищах землетрусів усередині сейсмофокальної зони переважають напруги, спрямовані вздовж до падіння цих пластів, причому у верхній частині – до глибини 150 км переважає зустрічне орієнтування напруг. Літосферні плити тут прагнуть зблизитися, й у результаті виникають умови стискання.

Відмінності між сейсмічністю у поясах двох типів, одні з яких пов'язані зі світовою рифтовою системою, а інші – з системою жолобів, є кардинальними: дрібнофокусні землетруси та умови розтягнення у першому випадку на відміну від глибинної сейсмофокальної зони та умов стискання у другому випадку.

Це свідчить про те, що існує два принципово різних способи взаємодії плит: коли плити розходяться, виникають рифтові зони з умовами розтягнення; коли плити сходяться, утворюються глибоководні жолоби з умовами стискання.

Пояси сейсмічності, а відповідно й межі літосферних плит супроводжуються молодим вулканізмом. У цьому легко переконатися, подивившись на карту географічного поширення молодого вулканізму. Відоме Тихоокеанське вогняне кільце йде вздовж системи глибоководних жолобів та приурочених до них сейсмічних поясів (рис. 99). Сучасні вулканічні виверження зареєстровані у рифтових зонах на континентах, зокрема у Східній Африці (рис. 100). Ці пояси вулканічних вивержень відомі здавна. Але лише близько 20 років тому був виявлений найпротяжніший та найграндіозніший вулканічний пояс. Він приурочений до осі серединно-океанічних хребтів, простягаючись на 60 000 км. Не дивно, що про нього практично нічого не було відомо, оскільки він схований під водою на глибині 2 700 м. Лише у Ісландії він виходить на поверхню.



Усі серединно-океанічні хребти мають вулканічне походження. Вулканізм відбувається у них строго по осі, локалізуючись у вузьких, шириною у кілька кілометрів, екструзивних зонах⁸¹ (Frueh-Green et al. 2022). У цьому могли переконалися підводні геологічні експедиції, які спускалися у такі зони у всіх океанах Землі. Вулканізм тут локалізований безпосередньо вздовж самої межі розходження плит.

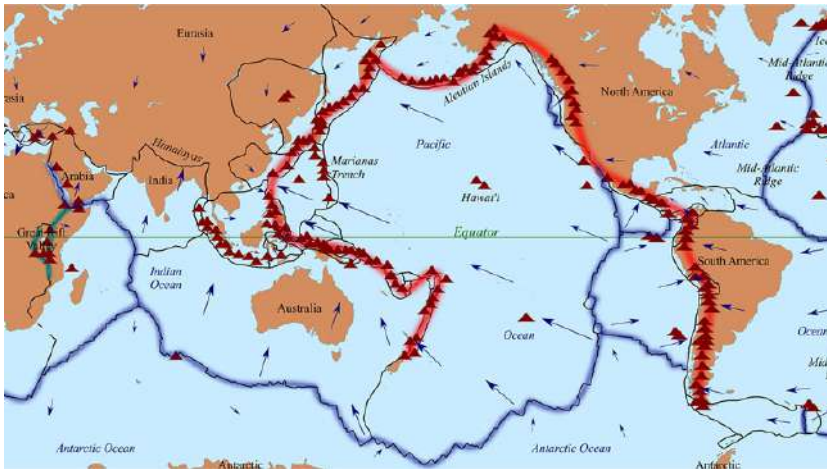


Рис. 99. Тихоокеанське вогняне кільце

Будь-які геологічні явища або структури, приурочені до меж плит, поділяються на 2 категорії. Не виняток і вулканізм: у ньому також можуть бути виділені 2 групи.

Уздовж меж розходження плит у океанах, тобто вздовж осей серединно-океанічних хребтів, виливаються одні базальти,

⁸¹ **Екструзія** – тип вулканічного виверження, при якому в’язка лава (андезитового, дацитового, ріолітового складів) видавлюється або виштовхується на денну поверхню, утворюючи над вулканом куполи.



причому примітні виливи з відкритих тріщин. Базальти мають склад, який відрізняється малим вмістом окису калію (0,2 %) та таких елементів, як стронцій, літій, торій, уран тощо.

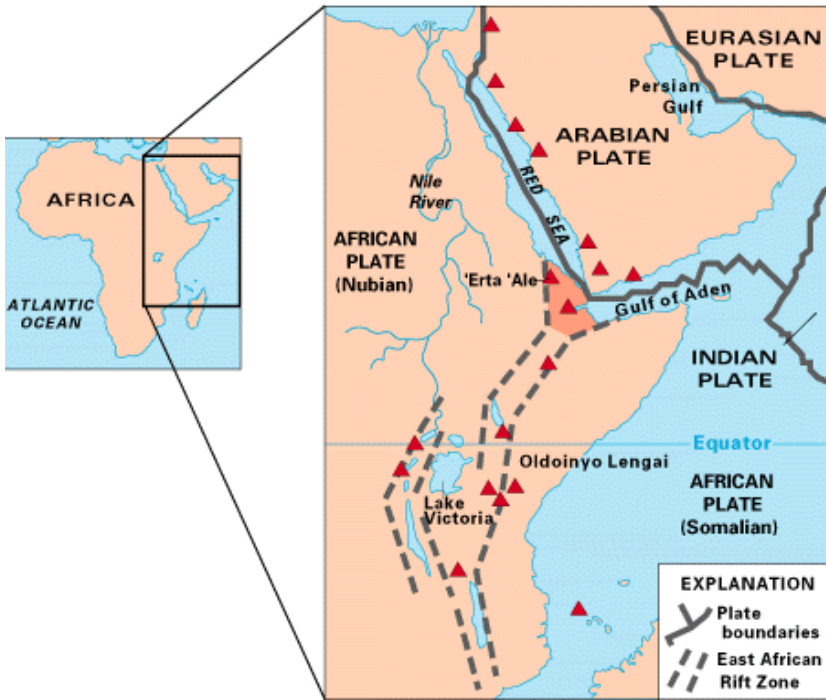


Рис. 100. Африканський континентальний рифт

Ці лави у класифікації вулканічних порід отримали самостійну комірку, позначену як базальти серединно-океанічних хребтів (базальти СОХ). Як й усі інші базальти, вони походять з мантії, виникнувши при частковому плавленні астеносфери, але відмінний малий вміст низки елементів, як і їхня ізотопна характеристика, вказують на шар у мантії, бідного на рідкісні елементи. Цим базальти СОХ сильно відрізняються від базальтів конти-



ментів і деяких регіонів у океані, таких як Гавайські острови, що розташовані в середині плити – на значній відстані від її меж.

У стінках глибоких ущелин трансформних розломів висотою до 5 км за допомогою драгування⁸² був апробований повний розріз океанічної кори. Його потужність складає всього 5–6 км. Осади утворюють верхній або перший шар товщиною не більше кілометра. Нижче йдуть лави базальтів та живлючі їх вертикальні пластиноподібні тіла, дайки, загальною потужністю 2–3 км. Ще нижче розміщуються масивні зернисті гірські породи того ж базальтового складу – це габбро. Вони застигли на глибині, у тій магматичній камері, звідки базальти через дайки надходили наверх. Нижню частину кори складають кристалічні розшаровані породи, складені з кристалів олівіну та піроксену, які відклавшись на дно магматичної камери, випадають з розплаву при поступовому його охолодженні. Потужність цієї нижньої частини кори, або третього шару, складеного з габбро та розшарованих порід, сягає потужності 3 км. Таким чином, океанічна кора – це застигла магматична камера, яка живила приповерхневі базальти. Породи, що залягають нижче належать вже мантиї. Вони складаються з ультраосновних порід, що являють собою тугоплавкий залишок мантийної речовини після відділення від нього базальтового розплаву.

Враховуючи незвично велике поширення базальтів СОХ (вони виливаються по усій довжині серединних хребтів), можна припускати практично повсюдне поширення астеносфери. Це свідчення того, що скрізь на глибині є розм'якшений шар, у який важка літосфера може занурюватися, а легка літосфера – спливати, оскільки наявний шар, по якому літосферні плити можуть переміщуватися у горизонтальному напрямі по земній сфері.

⁸² Драгування – підйом породи з дна із допомогою драги.



Там, де світова рифтова система вклинюється у континенти (континентальний рифт Східної Африки та на заході Північної Америки), поряд з базальтами з'являються кислі лави, ріоліти. Базальти – темні породи, бідні на кремнезем, ріоліти – світлі породи, багаті кремнеземом. Поєднання таких темних та світлих порід створює контрастний образ вулканічних полів континентальних рифтів. Кислі лави утворилися в основному за рахунок плавлення континентальної кори.

Зовсім інша картина спостерігається у вулканічних дугах, які супроводжують глибоководні жолоби та приурочені до меж зближення плит (Heuer et al. 2020). Це або ланцюжки острівних вулканів, або простягнуті вулканічні пояси на краю континентів. І ті, і інші розміщені у 100–200 км від центру глибоководних жолобів, знаходячись над нахиленою сейсмофокальною зоною Вадаті–Заварицького–Беньоффа.

Зазвичай відстань до цієї зони по вертикалі складає 150–200 км. Виверження здебільшого поодинокі, вони формують великі вулканічні конуси. Деякі вулкани зароджуються під водою й потім надбудовують свою вершину до та вище рівня моря, інші вивергаються постійно на суші або під водою. У випадку периферійно-континентальних вулканічних поясів, як у Андах, усі виверження відбуваються тільки у наземних умовах.

Лави за своїм складом відрізняються більшим різноманіттям, варіюючи від базальтів до ріолітів, але переважають породи середнього складу, андезити. Для вивержень характерна інтенсивна вибухова діяльність. Цьому типу вулканізму зазвичай властиві катастрофічні виверження. Вибухи вулканів Кракатау у Зондській протоці, вулкана Безіменного на Камчатці, Сент-Елленс на заході США отримали світову «славу» через трагічні наслідки. При виверженні відбувається миттєвий викид колосального за об'ємом вулканічного матеріалу. Наприклад, при виверженні вулкану Кракатау у 1883 році було викинуто 20 км^3 , а при вибусі вулкану Тамбора у 1815 році – 150 км^3 (див § 1.8)!



Уся вулканічна споруда або її частина у результаті вибуху злітає у повітря, а залишкова маса падає у прірву кальдери. Велика кількість вулканічного уламкового матеріалу, бомб, попелу, які випали з палючих хмар, являють собою характерну особливість вулканізму острівних дуг та активних континентальних периферій. Вибухова вулканічна діяльність свідчить про насиченість вивержень водяною парою і газом, леткими речовинами. Без такої насиченості вибухові процеси були б неможливі. З'являється дедалі більше даних, які підтверджують, що леткі речовини виникають не тільки у результаті надходження морської або атмосферної води у магматичне вогнище, а також і за рахунок приносу магмою їх з глибини і вивільнення при менших тисках.

Петрологи об'єднують різноманітні лави вулканічних дуг у єдину серію, яку називають вапняково-лужною (оскільки вміст вапна, СаО і лугів приблизно однаковий).

У відношенні її походження та джерела насичення водою й газами серед вчених немає єдиної думки. Більшість схиляється до висновку, що тепло, необхідне для виплавки лав, утворюється за рахунок тертя пластів, що занурюються.

Є ще третій спосіб взаємодії: коли плити ковзають одна відносно одної вздовж вертикальних площин, які називаються трансформними розломами (див § 1.5).

Межі плит поділяються відповідно на дві категорії: розходження та сходження (зближення).



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

171. Як називається вогняне кільце?
172. Як називається найбільший континентальний рифт?
173. Який вулкан вибухнув у Зондській протоці?
174. Де серединно-океанічні хребти масштабно здійснюються вище рівня океану?
175. З яких гірських порід здебільшого складаються лави серединно-океанічних хребтів?

ТЕСТ

171. Вогнища землетрусів в основному приурочені до...

- а) гірських споруд
б) рифтових зон і жолобів
в) вулканічних поясів
г) великих платформ

172. На скільки типів поділяються пояси сейсмічності?

- а) 1
б) 2
в) 3
г) 4

173. Чим ще супроводжуються пояси сейсмічності, крім землетрусів?

- а) цунамі
б) зеувами
в) вулканізмом
г) високими припливами

174. Вздовж меж розходження плит у океанах сформувалися...

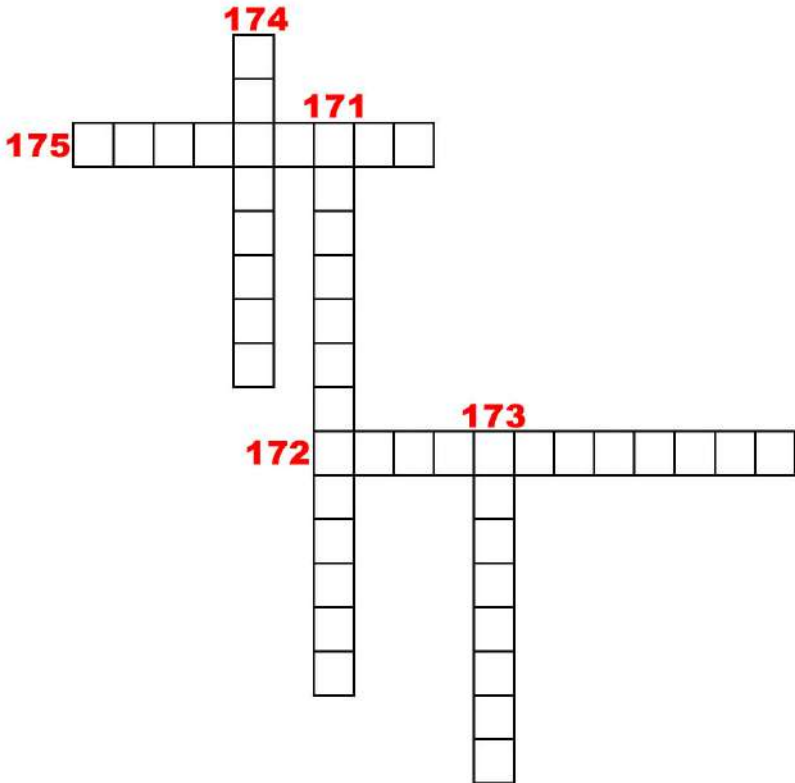
- а) острівні дуги
б) глибоководні жолоби
в) Вогняні кільця
г) серединно-океанічні хребти

175. По межі занурення однієї плити під іншу сформувалися...

- а) острівні дуги
б) глибоководні жолоби
в) Вогняні кільця
г) серединно-океанічні хребти



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 171–175)





5.2. На суші і на морі

Що таке мікросейсми і як народжуються цунамі?

Існує верхній ліміт корисного збільшення сейсмічних коливань. Земля ніколи не перебуває в абсолютному спокої. Якщо сейсмограф досить чутливий, він реєструє постійні слабкі коливання навіть при відсутності землетрусів. Ці коливання називаються мікросейсмами. Якщо збільшення дуже велике і мікросейсми відображаються на сейсмограмі, то подальше збільшення не має сенсу, оскільки це призведе лише до заплутування запису. Мікросейсми мають надзвичайно стабільний період, зазвичай в діапазоні від 4 до 6 секунд, хоча іноді можуть мати коротший період, що ускладнює роботу деяких типів сейсмографів (Besedina, Tubanov 2023). Їх амплітуда непостійна і постійно змінюється. При інтенсивних «мікросейсмічних бурях» записи стають практично нечитабельними.

Деякі мікросейсми, особливо з коротким періодом, здебільшого виникають унаслідок діяльності людини. Якщо сейсмічна станція розташована близько до міста, короткоперіодні коливання в основному зникають вночі, коли припиняють роботу підприємства і рух на дорогах спадає. Цих збурень можна до певної міри позбутися, розмістивши сейсмічні станції в спокійних (віддалених від міст) місцях. Існують також природні мікросейсми. Давно відомо, що в «глибині» материка вони завдають менше турбулентності, ніж на узбережжях, проте лише недавно стало зрозуміло, як саме пов'язані між собою хвилі на суші і воді.

Була висунута гіпотеза, що прибіжні хвилі, що розбиваються об берег, постійно генерують хвилі в землі, які реєструються як мікросейсми. Це, безперечно, пояснює походження деяких мікросейсм, особливо на узбережжях і берегах, що простягаються на великі відстані прямими лініями. Однак виявилось, що деякі джерела мікросейсм розташовані далеко у відкритому морі.

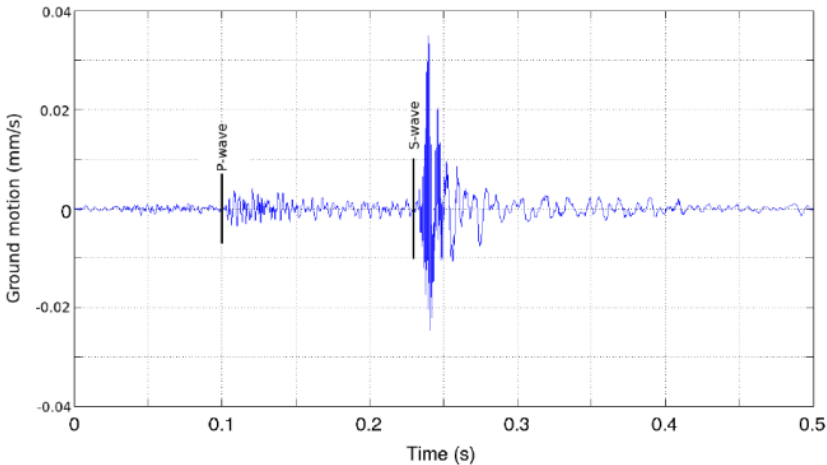


Рис. 101. Мікросейсми і сейсмічні хвилі на сейсмограмі

Під час Другої світової війни була встановлена мережа сейсмографів на островах Карибського моря, відома як потрійні станції. Передбачалося, що реєстровані ними мікросейсми будуть тісно пов'язані з різкими змінами погоди. Було виявлено, що їх джерело розташовується в центрі частих та інтенсивних у цьому регіоні тропічних циклонів і що можна відстежити рух штормів за допомогою спеціальних сейсмометрів. Подальші дослідження продемонстрували, що хвилі впливають на дно океану як насос і у такий спосіб передають свою енергію землі. Після виникнення хвилі можуть пройти кілька тисяч кілометрів, але з відповідним обладнанням можна розподілити їх (за походженням) на окремі джерела.

Хоча цей метод і видавався багатообіцяючим, сейсмографи для реєстрації мікросейсм не стали частиною стандартного обладнання для погодних прогнозів. У Данії було проведено декілька досліджень штормів у Північній Атлантиці, а на Королівсь-



кій сейсмостанції в Гонконзі виявили, що записи мікросейсм на стандартних приладах допомагають відстежувати тайфуни. Однак тепер використання радарів і супутників повністю витіснило сейсмологів з прогнозування штормів.

Окрім згаданих штормових мікросейсм з періодами в діапазоні від 4 до 6 секунд і коливань, спричинених роботою підприємств і транспортними засобами з періодами в 1 секунду і менше, існують й інші короткоперіодні коливання, спричинені місцевими метеорологічними умовами (Nishida, Takagi 2022). Основними серед них є дощові та морозні мікросейсми.

Мікросейсми в більшості випадків являють собою суміш різних типів поверхневих хвиль, і хоча їхнє основне джерело, очевидно, пов'язане зі штормами в океанах, морях і великих озерах (наприклад, системою Великих озер в Північній Америці, Каспійським морем, озером Вікторія в Африці), їхня амплітуда зростає незначно по мірі поширення на сушу (Farrell et al. 2023). Їх можна реєструвати в таких районах, як центр Північноамериканського континенту і в Середній Азії. Це може бути пояснено існуванням низькошвидкісного каналу в земній корі.

Після того, як метеорологи проявили байдужість щодо мікросейсм, сейсмологи знову почали розглядати їх лише як перешкоди, оскільки вони ускладнюють вибір належних місць для розташування станцій на малих островах.

Найвідомішим явищем, яке пов'язує сейсмічні та морські хвилі, є цунамі – сейсмічні хвилі в морі, які можуть виникати внаслідок сильних підводних землетрусів (рис. 102). Цунамі часто помилково називають припливними хвилями, хоча вони не мають нічого спільного з припливами. Використовуване японське слово «цунамі» насправді означає «хвилі в гавані». Оскільки наслідки сейсмічних морських хвиль найкатастрофічніші у вузьких естуаріях і затоках, цей термін можна вважати відповідним та зручним.



Механізм утворення цунамі ще не повністю з'ясований. Очевидно, що вода може зміщуватися, якщо відбудеться зсув по розлому, обвал або підняття морського дна. Однак професор Гутенберг свого часу виявив чимало випадків, коли епіцентр поштовху чітко розташовувався на суходолі. Ймовірно, морські хвилі іноді можуть виникати в результаті проходження поверхневих хвиль через мілководний континентальний шельф або ж вздовж підводного каньйону.

Землетруси також можуть породити хвилі у водоймах і озерах. Вода в озері або закритій морській бухті зазвичай коливається з конкретною частотою, яка залежить від розмірів і глибини басейну. Якщо ця частота збігається з частотою сейсмічних хвиль, то відбудеться резонанс, і хвилі посиляться. Такі коливання води називаються сейшами⁸³; крім землетрусів, їх можуть викликати вітер і інші фактори (McGarr 2019). Цунамі або сильні штормові хвилі, які пройшли повз вхід в закриту гавань, іноді викликають сейші всередині неї.

Сейші особливо часто виникають при сильних землетрусах через те, що хвилі з дуже довгими періодами зберігають значну амплітуду на відстанях, які значно перевищують відстані відчутності землетрусів (рис. 103). Після великого лісабонського землетрусу 1755 року про сейші повідомлялося з Франції, Італії, Нідерландів, Швейцарії, Англії і навіть з Норвегії і Швеції, тобто приблизно за 2 800 км від епіцентра. Після землетрусу в Ассамі в 1950 році коливання реєструвалися на гідрологічних постах в декількох водоймах Англії, а також спостерігалися в Скандинавії.

Цунамі можуть бути надзвичайно руйнівними. Деякі розповіді про них настільки емоційні, що в них важко відрізнити

⁸³ **Сейші** – стоячі хвилі великого періоду, від кількох хвилин до десятків годин, амплітуда – від декількох міліметрів до декількох метрів, які виникають у замкнених водоймах під впливом різниці атмосферного тиску, сейсмічних явищ, згонів і нагонів води.



факти від вигадок. Проте їх руйнівна сила проявляється лише при наближенні до берега. У глибоководних районах кораблі не можуть їх виявити, навіть якщо їх висота досягає декількох метрів, оскільки відстань між їхніми гребнями надзвичайно велика. Їх швидкість залежить від глибини (Behrens et al. 2021). Досягнувши мілководдя, хвиля різко сповільнюється, її фронт піднімається і розбивається з великою силою, особливо якщо він стиснутий в естуаріях або вузькій затоці. Навіть хвиля висотою 1–2 метри може пошкодити пришвартовані на мілководді судна, вдаривши їх об дно, і зруйнувати берегову інфраструктуру.



Рис. 102. Цунамі в Японії (11 березня 2011 року)

Виникнувши в якомусь місці, цунамі може пройти декілька тисяч кілометрів, практично не зменшуючи свою висоту. Цунамі від південноамериканських землетрусів викликають руйнування в Новій Зеландії, Японії, а також на Гаваях, які, крім того, піддаються впливу цунамі з Японії і Алеутських островів.



На щастя, дуже великі цунамі рідкісні, проте в Тихому океані вони виникають досить часто і являють серйозну загрозу, тому тут діє постійна служба попередження зі штаб-квартирою на Гаваїх. Її робота ґрунтується на співпраці сейсмічних та мареографічних станцій багатьох країн. Станції, що реєструють землетруси, які можуть породити цунамі, передають необхідні дані на Гаваї, де визначають епіцентр і, якщо землетрус виявився підводним, попереджають найближчі мареографічні станції про необхідність спостереження за відхиленнями рівня моря від норми. Хоча швидкість цунамі у відкритому океані може перевищувати 600 км/год, для багатьох районів можна оцінити час його приходу та ймовірну висоту хвилі, попередити судна та населення берегових територій, а в разі необхідності евакуювати людей.

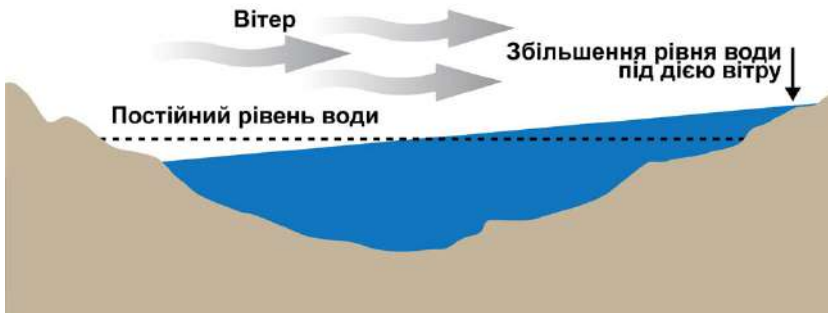


Рис. 103. Механізм формування вітрових сейшів

Цунамі, які вдаряють у береги Гавайських островів, найчастіше приходять з Алеутських островів, і попередження про них надходить з мареографів на узбережжях Аляски і Канади. Однак на самих Алеутах і в Японії небезпечні землетруси часто відбуваються надто близько. Незважаючи на це, в Японії діє система сповіщення, за допомогою якої передаються повідомлення з пошкоджених районів у райони, куди хвиля ще не дійшла.



Одна з найбільших сейсмічних морських хвиль зареєстрована в затоці Літуїя на Алясці у 1958 році. Ймовірно, ця подія, яка має власну назву «Мегацунамі в затоці Літуїя», не була чистим цунамі. Землетрус магнітудою 8 спровокував тут величезний обвал, який обвалився в затоку, викинувши хвилю на схил протилежного берега висотою понад 500 метрів, і ще одна хвиля розбилася на віддаленому березі на висоті 290 метрів. Під водою опинилися два риболовецькі судна, на яких загинули дві людини, і було знищено приблизно 10^2 км лісу (González-Vida et al. 2019). Існують й інші гігантські хвилі, породжені обвалами, але без участі землетрусів. Рекордом для звичайних цунамі вважається цунамі, яке накопалося на мис Лопатка (крайня південня точка півострова Камчатка) в 1737 році і розбилася на висоті 70 м (Godzikovskaya 2010).

У деяких країнах, де відбуваються землетруси на узбережжі, проблема цунамі не актуальна. Утворенню хвиль можуть перешкоджати деякі особливості морського дна або механізм самих поштовхів. Насамперед це стосується Нової Зеландії. Так, землетрус 1855 року на південному заході регіону Вайрарапа з магнітудою 8 призвів до підняття великої ділянки узбережжя, порушивши при цьому хід припливних течій у протоці Кука. Але, судячи з усього, він не спричинив утворення великих хвиль. Єдиний виразний випадок цунамі місцевого походження стався в 1947 році, коли хвиля, яка накопалося після доволі сильного поштовху біля Східного мису, розмила мости через невеликі протоки і завдала шкоди невеликому прибережному готелю.

Цунамі, спричинені землетрусами біля острова Рауль в архіпелазі Кермадек на початку 1976 року, викликали хвилі, які створили загрозу маленьким суднам, що перебували в затоках півострова Нортленд. На щастя, землетруси в районі островів Кермадек, подібно до узбережжя Нової Зеландії, рідко призводять до цунамі, навіть якщо землетруси і сильні. Найнебезпечніші хвилі приходять з Чилі. У 1868 році хвиля від землетрусу в



Чилі, яка дійшла до Нової Зеландії, відчулася на усіх узбережжях, а на островах Чатем відбулися підтоплення. Подібні хвилі проявилися і після чилійського землетрусу 1960 року. Вони призвели до припинення руху кораблів в порту Літтелтон протягом кількох годин. Втім, наслідки тих самих цунамі у віддалених районах Тихого океану, наприклад в Японії, часто руйнівні. Ці відмінності можна пояснити розташуванням плато Кемпбелл – великої площі відносно мілкої води на південному сході від острова новозеландського острова Південного. Хвиля, наближаючись до нього, сповільнюється, оскільки більша частина її енергії розсіюється, не досягаючи узбережжя Нової Зеландії. Іноді перед приходом цунамі море відступає від узбережжя, попереджаючи про наближення цунамі. У цьому випадку розумніше відразу ж перейти на підвищені місця.

Цунамі можуть супроводжуватися послідовними хвилями і внаслідок цього порушувати припливи та відпливи протягом кількох днів після першої хвилі.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

176. Як називається фонове тремтіння Землі, яке далеко не завжди викликано сейсмічними причинами?

177. Як називаються стоячі хвилі, як правило, в закритих водоймах?

178. Як називаються великі хвилі, викликані підводними землетрусами?

179. В якій затоці було зареєстроване найвище мегацунамі?

180. На якому мисі було зареєстроване найбільше класичне цунамі?

ТЕСТ

176. Фонове тремтіння Землі виражається в...

- а) поздовжніх сейсмічних хвилях в) мікросейсмах
б) цунамі г) сейшах

177. Цунамі поширюються на...

- а) 10 і більше км в) 500 і більше км
б) 100 і більше км г) 1000 і більше км

178. Як називається явище підйому води під впливом різниці атмосферного тиску, сейсмічних явищ, згонів і нагонів води?

- а) вулканічні землетруси в) мікросейсми
б) цунамі г) сейші

179. Як називаються високі хвилі, викликані землетрусами, вогнища яких розташовані на дні морів й океанів?

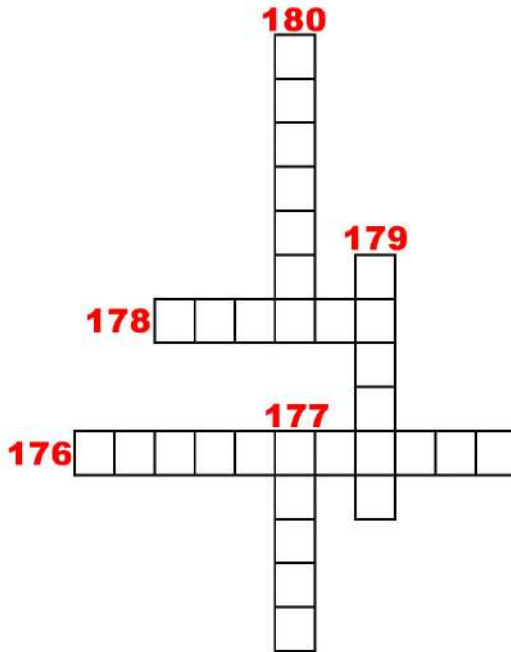
- а) вулканічні землетруси в) мікросейсми
б) цунамі г) сейші

180. Де в Тихому океані цунамі відчуваються найменше?

- а) Камчатка в) Японія
б) Нова Зеландія г) Гавайські острови



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 176–180)





5.3. Землетруси і вулкани

Чи пов'язані між собою вулкани і землетруси?

Вулкани і землетруси часто пов'язують з одним загальним джерелом катастроф, яке є типовим для узбереж Тихого океану. Діючі вулкани у великій кількості підносяться вздовж узбереж Тихого океану, які оточені глибоководними жолобами і зонами землетрусів. Землетруси на східних узбережжях Камчатки, наприклад, мають цікаву властивість: вони виникають за двісті кілометрів від узбереж, на дні океану, однак вони дуже потужні, а епіцентри розриву розташовані неглибоко. Проте, поки ці сильні землетруси досягають узбережжя, вони послаблюються і відчуються з силою лише 6–7 балів; пробіг по земній корі послаблює сейсмічні хвилі. Спроба горотвірних сил викликати сильний землетрус на узбережжі Камчатки переважно безуспішна: землетрус відбувається, але його вогнище розташоване на глибині понад 100 кілометрів! Звичайно, сколихнути таку товщу гірських шарів не просто – і землетрус істотно послаблюється. Чому так відбувається? Сейсмологи пояснюють це особливим зануренням вогнищ землетрусів під периферію материка, існуванням глибинного розлому, який формує поверхню розриву, нахиленої під континент. Цей розлом відділяє океанічну земну кору від зануреного в неї, схожого на айсберг, більш легкого континенту.

Землетруси з вогнищами, які розташовані на незначних глибинах в межах земної кори, відбуваються набагато рідше і зазвичай пов'язані з вулканічним поясом, який простягається вздовж узбереж Тихого океану, і не досягають значної сили. В межах континентів активні вулкани розташовані вздовж глибоких розломів – рифтових долин, для яких також характерні землетруси. Значно рідше діючі вулкани розташовані подалі від рифтових розломів, у межах яких активні землетруси – в центральних частинах континентів і океанів (рис. 104).



Що ж до землетрусів, які не мають нічого спільного з вулканами, то територій, де вони поширені, теж дуже багато. Це здебільшого гірські країни.

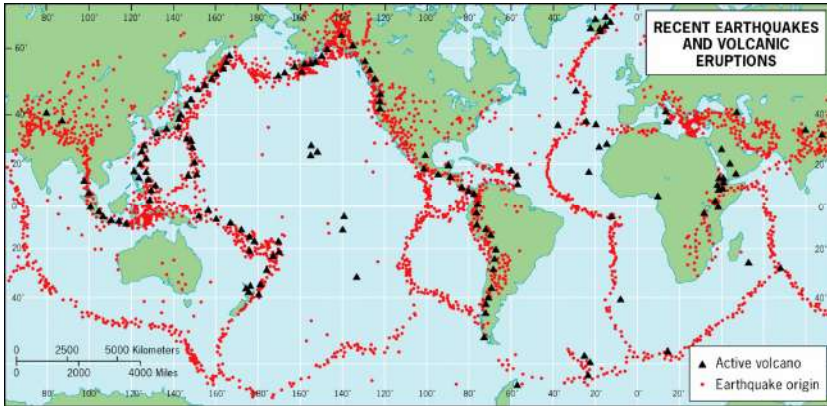


Рис. 104. Вулканічні виверження, які супроводжуються землетрусами і навпаки

Існує цілий спектр землетрусів: вулканічні, викликані переміщеннями магми на значних глибинах Землі; вулканотектонічні, які супроводжують переміщення гірських блоків земної кори одночасно з вулканічними виверженнями і, врешті, тектонічні, які пов'язані лише з розривами, що утворюються в гірських країнах (McNutt, Roman 2015).

Отже, виходить, що вулкани можуть діяти далеко від гірських ланцюгів, які піддаються впливу землетрусів, і не мати з ними нічого спільного.

Перш ніж описати вулкани без землетрусів і землетруси без вулканів, варто згадати, які сили породжують землетруси і вулканічні виверження – чи вони незалежні один від одного, чи, навпаки, пов'язані між собою?



Коли кажуть: виверження вулкана було спричинене землетрусом, з такою ж впевненістю можна сказати і навпаки – вулканічне виверження або навіть вулканічний вибух⁸⁴ викликав землетрус. Подібні дуети постійно трапляються у природі. В чому ж причина? Розриваючи земну кору, розлами, що утворюються під час землетрусів, відкривають шлях для просування магми, або ж магма піднімаючись з вулканічних вогнищ, формує розломи, які спричиняють землетруси і коливання земної поверхні? Виявляється, кожен із цих можливих випадків є лише частиною складних процесів. Природа значно складніша і в ній відбуваються події, які важко поділити на незалежні між собою. У природних системах усе взаємопов'язане. Тому, пов'язуючи вулкани і землетруси, слід пам'ятати про їх загальний зв'язок із ділянками динамічної земної кори.

Уявімо собі вулкан, коли в його головному вогнищі нагромаджується під великим тиском гаряча вулканічна пара. Жерло і кратер заблоковані застиглою лавою; під тиском пари, що намагається прорватися назовні, вулкан починає тремтіти, як паровий котел, загрожуючи вибухом. Відбувається серія землетрусів, передуючих виверженню. Під час цього місцевість навколо вулкана та його схили зазнають підймання під тиском вогнища, яке неухильно розширюється. Вдається виміряти за допомогою геодезичних інструментів і нахиломірів⁸⁵ величину цього підйому, що досягає кількох десятків сантиметрів (Hill et al. 2002). Зрозуміло, що всі сили в цей час спрямовані вгору, піднімаючи і розширюючи фундамент вулканічної споруди. Коли відбувається

⁸⁴ **Експлозія, або вибухове виверження** – тип вулканічного виверження, що характеризується активною вибуховою течією.

⁸⁵ **Нахиломір** – прилад для виміру нахилів поверхні Землі, які викликані регулярними припливами твердої оболонки та місцевими тектонічними рухами. Мінімальні нахили, які можна виміряти, складають десятитисячні часток секундної дуги.



прорив жерла і починається виверження, вулканічні землетруси припиняються, переходячи в ритмічні вулканічним тремтіння. Цікаво, що вулканічні землетруси, які виникають під час переміщення магми з вулканічного вогнища, дозволяють визначити місце майбутнього формування вулкана. Землетруси починаються задовго до виверження серією поштовхів, які поступово наближаються до поверхні землі, ніби сповіщаючи про підняття магми вгору.

Вулканотектонічні землетруси пов'язані з розломами, що обрамляють вулканічні кільцеві структури і кальдери, а також відокремлюють вулканічні пояси від гірських хребтів (Schick 1981).

Щодо тектонічних землетрусів, вони типові для гірських країн, де переважають зони стиснення, які заважають утворенню вулканів.

Отже, сусідні пояси розтягнення та стиснення взаємопов'язані і, відповідно, відрізняються домінуванням вулканів або землетрусів. Вулкани без землетрусів трапляються у центральних частинах континентів, далеко від великих розломів земної кори. Проте у цьому випадку варто відзначити, що без вулканічних і вулканотектонічних землетрусів тут не обходиться. Землетруси без вулканів відбуваються в тектонічних регіонах, де потужне стиснення земної кори перешкоджає вулканічним розплавам проникнути на поверхню Землі.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

181. Які долини розташовані вздовж серединно-океанічних хребтів?

182. Яким терміном описується вулканічний вибух?

183. Які землетруси пов'язані з тектонічними розломами?

184. В якому океані відбувається найбільше вулканічних вивержень і пов'язаних з ними землетрусів?

185. Як називається геодезичний прилад для вимірювання нахилу поверхні?

ТЕСТ

181. Які землетруси відбуваються рідше?

- а) з вогнищами близько до поверхні в) з вогнищами в нижній мантії
б) з вогнищами глибоко від поверхні г) з вогнищами під вулканами

182. Вулканічні землетруси виникають у зв'язку з...

- а) виверженням вулкана в) переміщенням магми з вулканічного вогнища
б) лавовими потоками г) цунами і сейшами

183. Вулканотектонічні землетруси пов'язані з...

- а) кристалічними щитами в) платформами
б) тектонічними розломами г) складчастими областями

184. Для гірських країн типові...

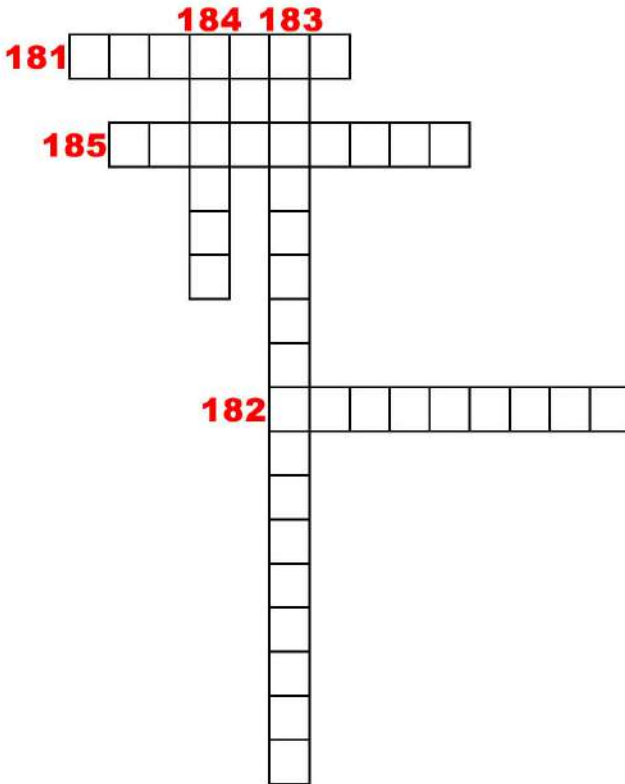
- а) вулканічні землетруси в) тектонічні землетруси
б) обвальні землетруси г) глибокофокусні землетруси

185. Підводні вулкани тяжіють до...

- а) острівних дуг в) океанічних западин
б) серединно-океанічних хребтів г) океанічних улоговин



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 181–185)





РОЗДІЛ 6 ЗЕМЛЕТРУСИ І ЛЮДИНА

6.1. Міфи і правда про землетруси *Чи варто боятися землетрусів?*

Землетрус – це не просто «тремтіння землі». Це і дуже сильний соціальний шок, викликаний значними руйнуваннями і жертвами. Протягом всієї відомої історії людства, ще з часів кам'яного віку, люди пам'ятають, що коливання землі несе смерть. Тому, мабуть, пройде ще багато часу, поки люди звикнуть до того, що їхні нові будинки гарантують їм безпеку, оскільки практика сучасного будівництва далеко не завжди гарантує таку.

Поки що ж люди панічно бояться землетрусів. Після серії навіть невеликих поштовхів страх, подібно до епідемії, розповсюджується серед людей дуже швидко. Симптоми цього масового захворювання дуже прості: деякі люди без будь-яких підстав вважають, що землетрус призведе до розколу землі і з тріщин почне вилитися лава, або гаряча вода, що море накопить на берег, чи що люди загинуть в численних розломах, як герої фільму «Мільйон років до нашої ери»

Страх – поганий помічник. Важливо, щоб можливий майбутній землетрус, як би раптово він не стався, не позбавив людей головної «зброї» – свідомого ставлення до реальності.

Землетрус – це дійсно важка катастрофа, до якої не можна ставитися легковажно. Якщо населений пункт розташований в зоні сейсмічної активності з потенційним рівнем 8 балів, то потрібно бути готовими до того, що рано чи пізно на його мешканців чекає 8 бальний землетрус, часто навіть сильніший.

Нікому ж не спаде на думку навесні будувати хатину без обігріву лише тому, що настає літо: зрозуміло, що взимку



обов'язково настануть морози. І з цього приводу ніхто не панікує: просто будують міцні стіни, монтують теплоізоляцію і обігрів, дотримуючись при цьому всіх будівельних норм.

На жаль, людська пам'ять надзвичайно коротка на рідкісні події, навіть коли вони є катастрофічними. Дуже часто вивірені будівельні стандарти і правила, які прийняті для будівництва землетрусостійких споруд, будівельники-практики в багатьох країнах вважають чимось на кшталт непотрібної дрібниці, про що свідчить недавній землетрус у Туреччині, що стався 6 лютого 2023 року з магнітудою близько 7,5, можливо і більше (Ozkula et al. 2023) (рис. 105). Це призводить до порушень будівельних норм, серед яких найпоширенішими і найстрашнішими є банально погана якість будівництва. Неуважно зварені з'єднання панелей, цегляна кладка, яка не забезпечує належного зчеплення, використання пилюватого піску для бетонних робіт – усі ці проблеми разом наразі важко вирішити остаточно, особливо у країнах, де не ведеться строгий контроль за будівництвом. У сейсмоактивних регіонах поганої якості будівництва варто боятися найбільше. Контроль за якістю будівництва житлових будинків, шкіл, лікарень має стати однією з основних задач усіх громадських, урядових і наукових організацій. Особливо важливо контролювати якість індивідуального будівництва в селах і малих містах, де і тепер використовуються традиційні будівельні матеріали і методи будівництва.

Під час сильних землетрусів на узбережжі Тихого океану потрібно завчасно страхуватися від небезпечного супутника землетрусів – величезних хвиль цунамі. Мешканці Камчатки і Курильських островів, Японії, Південно-Східної Азії і Австралії добре навчені цьому. Населеним пунктам на узбережжі внутрішніх морів, наприклад Чорного, Середземного, Балтійського і Баренцевого цунамі не загрожують, хоча морські хвилі невеликої висоти можуть утворюватися і тут під час сейсмічних подій,



проте вони абсолютно безпечні; прибій під час штормового погоди може завдати у цих морях значно більшої шкоди.

Під час землетрусів гігантські тріщини зазвичай є безпечними, оскільки вони виникають лише у надзвичайно рідкісних випадках, далеко не скрізь, і найчастіше не утворюють відкриті, глибокі щілини, а формують поверхневі утворення, схожі на дуже довгі, витягнуті невисокі сходинки. Один із найсильніших сухопутних землетрусів за останні 70 років – Гобі-Алтайське 1957 року – призвело до того, що земна поверхня «розтрощилася» і змістилася майже на 300 км, утворивши «сходинку» високою до 4 метрів (Okal 1976). Ймовірність того, що конкретна будівля опиниться безпосередньо на місці такого розлому, настільки мала, що з нею можна нехтувати. На жаль, те саме не можна стверджувати про деякі греблі.

Під час землетрусу для будинків проявляється й інша небезпека:

- *інтенсивні коливання ґрунту;*
- *нерівномірне просідання ґрунту під фундаментами будівель.*

Залежно від типу землетрусу найбільших пошкоджень зазвичай зазнає або перший поверх, або верхній. В будь-якому випадку варто мати на увазі, в якому будинку ви живете: якщо це будівля старої конструкції, то під час землетрусу там перебувати небезпечно. Якщо ви з якихось причин не зможете вийти на вулицю відразу, то найкраще перебувати там, де загроза падіння штукатурки або перекриття найменша, наприклад під аркою в несучій стіні.

Якщо стався один сильний поштовх, навіть сейсмологам спочатку не завжди зрозуміло, чи це був головний землетрус, чи лише сильний попередній поштовх. Наприклад, після сильних 8-



бальних землетрусів через якийсь час (від кількох годин до кількох днів) може відбутися головний землетрус – 9–10-бальний. Розрізнити ці два типи землетрусів не завжди вдається. Тому перші два-три дні після руйнівного землетрусу слід бути надзвичайно обережним, не заходити в руїни будинків... Зазвичай сейсмологи, розібравшись у ситуації, невдовзі надають свої рекомендації щодо подальших дій.



Рис. 105. Землетрус у туреччині і Сирії 6 лютого 2023 року

Зростаючи силу землетрусу від попередніх поштовхів до основного удару не слід плутати з іншим явищем – сильними повторними поштовхами. Часто їх буває досить багато, причому вони ведуть себе по-різному: іноді сильні поштовхи дуже швидко припиняються, а іноді тривають протягом кількох місяців.

Загальна властивість повторних поштовхів полягає в тому, що їхня магнітуда (енергія) зазвичай набагато менша, ніж у основного землетрусу. Але водночас і значно менша глибина вогнища: вогнища сильних повторних поштовхів являють собою



нові рухи вздовж верхнього краю основного розлому, особливо – по його краях. Після основного землетрусу тут залишаються великі залишкові напруги, які після певного часу руйнуються внаслідок повторних поштовхів («афтершоків») (див. § 3.4, 3.5). Одночасне зменшення як магнітуди, так і глибини вогнища призводить до того, що повторні поштовхи відчуються на невеликій території, але здебільшого доволі сильно. Часто переляканому населенню вони навіть видаються сильнішими, ніж основний поштовх. Страх перед повторними поштовхами набагато сильніший, ніж реальна небезпека від них. Тому не варто надмірно звертати на них увагу – і це зовсім не означає, що не потрібно зберігати обачність. Зазвичай ці поштовхи викликають жваві обговорення у місцевій пресі, їх рахують, передбачають, обговорюють, їх бояться – і вся ця надмірна увага марна.

Варто згадати ще одного ворога: після сильного землетрусу слід боятися антисанітарії, шлунково-кишкових і простудних захворювань, епідемій відомих хвороб, таких як черевний тиф, холера та інші небезпечні захворювання. Вони трапляються на тих територіях, де не вдається швидко організувати роботу після сильних землетрусів щодо евакуації населення, забезпечення його чистою водою, їжею і одягом, адже у ситуації, коли велика кількість населення живе в наметах, коли порушена система каналізації і не вистачає води, боротьба за чистоту є не менш важливою, ніж боротьба за спокій.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

186. Де відбувся землетрус 6 лютого 2023 року?
187. Які напруги залишаються після основного землетрусу?
188. Який землетрус утворив «сходнку» висотою до 4 м?
189. Який «помічник» поганий під час сейсмічної події?
190. Окрім землетрусів, яка ще небезпека чатує на мешканців узбереж Тихого океану?

ТЕСТ

186. Як потрібно ставитися до землетрусів?

- а) зі зневагою
б) зі страхом
в) з обережністю
г) зі спокоєм

187. Що часто настає після великих землетрусів?

- а) затишся
б) афтершоки
в) зміщення літосферних плит
г) зміна конфігурації узбереж

188. Що часто настає після великих землетрусів в неблагополучних регіонах?

- а) затишся
б) антисанітарія
в) евакуація населення
г) обговорення в пресі

189. Під час землетрусу найбільших ушкоджень зазнає(ють):

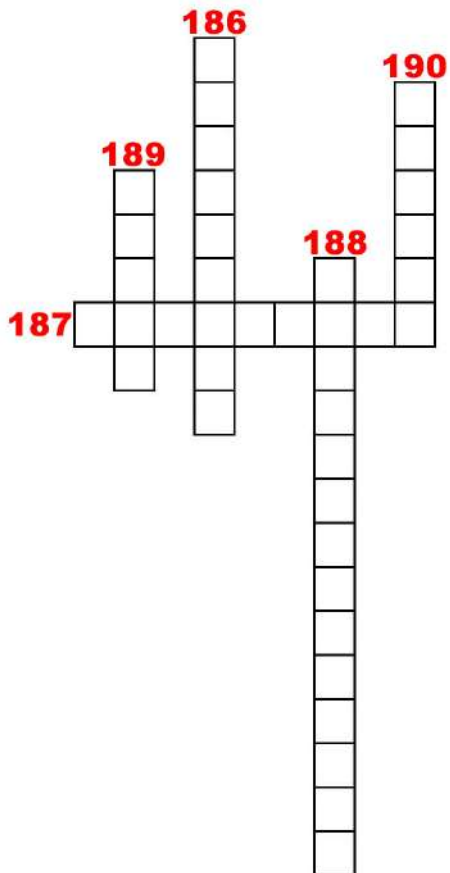
- а) нижні поверхи
б) верхні поверхи
в) середні поверхи
г) нижні і верхні поверхи

190. Чи є безпечними гігантські тріщини, які утворюються під час сильних землетрусів?

- а) так
б) ні
в) зазвичай так
г) під час сильних землетрусів гігантські тріщини не утворюються



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 186–190)





6.2. Деякі великі землетруси на Землі *Найбільші і найвеличніші...*

1460

В маорійських легендах збереглися відомості про сильне тремтіння землі, які сталося в 1460 році поблизу Веллінгтону і супроводжувалося вражаючим підняттям узбережжя (Eiby 1968). Сучасний півострів Мірамар перестав бути островом, сформувалася серія морських терас на узбережжі в Туракі-рі-Хед, що свідчить про тривалу історію вертикальних рухів узбережжя, пов'язану, очевидно, з давніми землетрусами. Миттєві підняття сформували низку терас, бровки яких маркуються світлою каймою. Частина берега між водним врізом і першою з них вперше відкрилася під час землетрусу Вайрарапа в 1855 році, а наступна – близько 1 460 року. Приблизні дати формування вищих терас – 1 100 і 2 900 років до н. е. Слабко нахилені поверхні далекого мису є відголосками ще більш давніх терас, вирізаних морем ще у плейстоцені, принаймні 100 тис. років тому. Тепер тут існує велика кількість терас, свідчення стійких піднять узбережжя протягом тривалого періоду.

1558

Найкатастрофічнішим землетрусом вважається землетрус 1 558 року в провінції Шансі (Китай). Нам невідома його магнітуда, але в результаті цієї події загинуло приблизно 830 000 людей (Ma et al. 2020). Хоча ця найстрашніша з сейсмічних катастроф, зафіксованих в хроніках історії, вона не є найсильнішою серед відомих нам землетрусів в історії людства. Зазвичай першість віддається Лісабонському землетрусу, магнітуда якого, можливо, досягала 9.



1755

Вважають, що епіцентр Лісабонського землетрусу розташовувався в океані, за 100 км від узбережжя Португалії. Встановити межі території, де відчувалися поштовхи, важко, оскільки велика територія зазнала впливу сейш. В будь-якому випадку її радіус перевищував 1 500 км – від Азорських островів до Італії та від Великої Британії до Північної Африки. Як повідомлялося, сейші спостерігалися навіть у Норвегії і Швеції, на відстані 3 500 км від епіцентру (Chester 2001). Руйнування Лісабона були жахливими. У 1755 році в місті проживало приблизно 230 тис. осіб, і за найскромнішими підрахунками приблизно 30 тис. з них загинули. Багато мешканців перебували в момент землетрусу в храмах, оскільки це був день Всіх Святих і час першої меси. За землетрусом наколилося цунамі висотою приблизно 7 метрів, розпочалися численні пожежі.

Катастрофа глибоко вразила всю Європу. Проте чимало людей не втрачали можливості збагатитися на ній. Вольтер⁸⁶ у передмові до своєї «Поєми про Лісабонську катастрофу» докоряв людям, які вважали, що «спадкоємці мертвих тепер отримують своє спадкове майно, каменярі розбагатіють на відновленні міста, звірі розжиріють на трупах, похованих під руїнами» (Богатирьова, Гуца 2019). Таким є природний результат природних катастрофічних подій.

1811

Варто пам'ятати, що райони з низькою сейсмічністю не застраховані від сильних поштовхів. Лісабон не відноситься до районів з високою сейсмічністю, як і долина Міссісіпі, де в

⁸⁶**Вольтер** – один із найвизначніших французьких філософів-просвітників XVIII століття: поет, прозаїк, сатирик, трагик, історик, публіцист, антиклерикал, що відомий своєю дотепністю, його нападками на настанови католицької церкви, а також пропагандою свободи віросповідання, свободи слова і відокремлення церкви від держави.



1811 році відбувся землетрус Нью-Мадриді. У той час епіцентральна зона не була так щільно заселена, як тепер, проте деякі поштовхи мали руйнівну силу (Johnston, Schweig 2001). Ріхтер вважав, що один з них, який стався 16 грудня, був найсильнішим серед відомих в той час на території Сполучених Штатів. Його відчували в Бостоні, за 1 700 км, а також в інших районах від Канади до Нового Орлеана. Як за силою, так і за приуроченістю до асейсмічного району, цей землетрус ставить виклик сучасним тектонічним концепціям.

1855

Вважається, що землетрус 1855 року був єдиним в Новій Зеландії, магнітуда якого досягала 8. Епіцентр розташовувався у південно-західній частині розлому Вайрарапа, на схилі гір Рімутака, приблизно за 25 км на схід від міста (Darby, Beanland 1992). Під час землетрусу відбулося вертикальне переміщення поверхні з амплітудою до 3 м і супроводжувалося відкриттям розлому довжиною до 50 км і загальним підняттям узбережжя біля гавані Веллінгтона. Це був перший випадок, коли на поверхні землі утворився розлом, викликаний землетрусом; цей факт описаний в книзі Лайелла⁸⁷ «Принципи геології».

1857

У 1862 році Роберт Маллет⁸⁸ він опублікував книгу «Великий неаполітанський землетрус 1857 року: основні принципи сейсмологічних спостережень» (Mallet 1862). Цей двотомний твір

⁸⁷Чарльз Лайєсл (1797–1875) – шотландський геолог, вулканолог, палеонтолог та гляціолог, основоположник сучасної геології; баронет, член Лондонського королівського товариства з розвитку знань про природу.

⁸⁸Роберт Маллет (1810–1881) – ірландський геофізик, інженер, винахідник, який відзначився у дослідженнях землетрусів, через що його інколи називають батьком сейсмології.



був добре ілюстрований кольоровими літографіями і тепер віднесений до сейсмологічної класики (рис. 106). В ньому подані детальні описи руйнувань у містах і селах, ретельно вивчені напрямки, в яких відбулося перевертання будівель і архітектурних пам'яток, характер діючих сил, що викликали руйнування, форма і положення ізосейст, а також зроблена спроба сформулювати загальні принципи.



Рис. 106. «Великий неаполітанський землетрус 1857 року»
(Mallet 1862)

Маллет не задовольнився лише описами; він також був експериментатором. Ним були проведені дослідження швидкості поширення сейсмічних хвиль, які він штучно збуджував вибухами невеликих порохових зарядів, а момент входження фіксував, спостерігаючи за поверхнею ртуті, налитої в маленьку посудину. Він також ввів в обіг багато термінів, які використовуються і тепер. Серед них: сейсмологія, ізосейста, сейсмічний фокус та інші. Цей землетрус не був дуже сильним, якщо,



звісно, не вимірювати його значення тим внеском, який він привніс у науку про землетруси.

1886

Ще один регіон Сполучених Штатів, який традиційно вважався асейсмічним (Південна Кароліна), також сильно постраждав від Чарльстонського землетрусу 1886 року ([Chapman et al. 2016](#)). Цей землетрус був одним із перших, якому був присвячений докладний геологічний звіт, що включав і кілька фотографій хорошої якості.

1929

До числа землетрусів, які залишилися в пам'яті мешканців Нової Зеландії, належить Мерчїсонський (або Буллерський) землетрус 1929 року, під час якого загинуло 17 людей ([Ferrar 1930](#)). Це була перша сейсмічна катастрофа в Новій Зеландії, що супроводжувалася людськими жертвами. Мерчїсон, який дав назву цьому землетрусу, представляв собою невелике поселення в якому проживало 300 мешканців, розташоване на дні глибокої долини річки Буллер, в місці її злиття з двома її притоками. Долина має ширину не більше 1 км і оточена пагорбами, які стрімко здіймаються до висот 1200–1500 м. Це один з найвологіших регіонів Нової Зеландії. Землетрус стався в середині зими, коли погода була особливо «поганою». Всі умови сприяли утворенню обвалів, і вони фактично відбулися, перекиваючи дороги і блокуючи річки. Це призвело до численних нещасних випадків. Крім того, кілька людей загинуло внаслідок повеней, які настали після руйнівних проривів тимчасових гребель.

1960

1960 рік став одним із найбільш трагічних в історії землетрусів, не тільки через катастрофічні наслідки чилійського



землетрусу у травні того ж року з магнітудою 8,5 і наступного руйнівного цунамі, а й через непропорційно сильні руйнування, спричинені декількома помірними землетрусами, вину за які було покладено на традиційні методи будівництва в країнах, які постраждалих найбільше. 21 лютого під час землетрусу з магнітудою 5,5 загинули 47 осіб у селі Мелуса в Алжирі, а 24 квітня 450 мешканців міста Лар та прилеглих сіл в Ірані були поховані під завалами своїх власних будинків, зруйнованих землетрусом магнітудою всього 5. Сейсмічний поштовх такої ж сили вразив вночі 29 лютого Агадір (західна частина Марокко), зрівняв старе місто з землею і руйнував приблизно половину всіх будівель в сучасному бізнес-центрі міста (Falconer 1968). Понад 1/3 населення міста загинуло, ще 1/3 була поранена. Під руїнами опинилося так багато тіл, що питання їх ідентифікації і перезахоронення навіть не ставилося. Район розрівняли і покинули.

Останній раз сильний землетрус трапився в цій частині Марокко в 1731 році, і цей випадок був забутий (El Harrouni et al. 2016). Слабкі поштовхи ігнорувались. Звісно, ніхто не передбачав, що Агадір розташований в межах активної сейсмічної зони, і навіть зараз чимало сейсмологів вважають, що повинен статися землетрус з магнітудою понад 5, щоб віднести цей регіон до високосейсмічного (рис. 107). Потрібно враховувати, що землетруси такої сили трапляються в різних частинах Землі кожні 3–4 дні. Надзвичайність цього землетрусу полягала у дуже малій фокусній глибині, яка, судячи з дуже невеликої протяжності зони руйнувань, не перевищувала 4 км, і у положенні епіцентра, розташованого всього за 1–2 км від міста.

На противагу Марокко, історія Чилі налічує велику кількість сильних землетрусів. Епіцентр землетрусу 22 травня з магнітудою 8,5 розташовувався на південь від півострова Арауко (Cisternas et al. 2005). Майже одразу після основного поштовху відбулася велика кількість повторних поштовхів, зафіксованих на всій території країни. Чимало з них виявилися



дуже сильними, через що було практично неможливо чітко визначити, з яким із них пов'язані певні руйнування. Міста Консепсьон і Вальдівія також відчували сильні поштовхи, проте більшість нових будівель, побудованих відповідно до норм, введених після землетрусу 1939 року, залишились неушкодженими. Старші будинки, споруджені до прийняття цього рішення – зруйнувалися. Через два дні після землетрусу відбулося виверження вулкану Пуеуе за 650 км на південний захід від Консепсьйона, вперше з 1905 року.



Рис. 107. Землетрус в Агадірі в 1960 році (Марокко)

Після землетрусу виникло цунамі, яке було найсильнішим за попередні роки. Під впливом цунамі, що виникло вздовж узбережжя Чилі, постраждало все тихоокеанське узбережжя. На Гавайських островах загинула 61 людина, незважаючи на евакуацію з найбільш небезпечних районів. В Японії також



зафіксовані численні нещасні випадки і серйозні пошкодження портових споруд та обладнання. У Новій Зеландії завдані збитки були мінімальними.

1963

Іншим прикладом катастрофічних наслідків помірною сейсмічного поштовху для міста, де під час будівництва не було враховано необхідних заходів безпеки, може служити землетрус у місті Скоп'є (Північна Македонія) 26 червня 1963 року з магнітудою 6. Помірні землетруси не є чимось незвичним для Північної Македонії, і саме місто Скоп'є вже було зруйнованим двічі – у 518 н. е. та в 1555 році. Багато з пошкоджених під час землетрусу будівель належали до новобудов, і хоча правила будівництва вимагали використання антисейсмічних заходів, їх часто не дотримувалися, переважно керуючись природним бажанням якнайшвидше ліквідувати наслідки війни і надати мешканцям міста нові квартири (Trajanovski 2021). Ця ризикована політика не виправдала себе. Руйнування в нових районах часто були так само вражаючими і катастрофічними, як і в Старому Місті, де, до речі, деякі живописні одноповерхові садиби з черепичними дахами, які існують вже кілька століть, залишилися неушкодженими. Водопровідна та каналізаційна системи зазнали лише незначних руйнувань. Фактором, який посилив руйнування, ймовірно, стали ґрунти. Місто розташоване на товщі пухких відкладів (піски та галька) товщиною від 3 до 80 м, а місцями і більше.

1964

27 березня 1964 року стало днем землетрусу з магнітудою 9,2 в затоці Принц-Вільям, Аляска. На острові Монтаг'ю спостерігалися розриви земної поверхні, але ще більш дивовижні геологічні явища, спричинені цим землетрусом, були виражені у підйомі та опусканні великих за площею ділянок



(Mavroeidis et al. 2008). Деякі з афтершоків мали магнітуду 6 і більше, що вже пособі є сильними землетруси.

1970

У Південній півкулі найбільшою сейсмічною катастрофою був землетрус в Перу 31 травня 1970 року. Магнітуда поштовху становила 7,7, епіцентр розташовувався за 25 км від узбережжя, на заході від морського порту Чимботе з населенням близько 120 тис (рис. 108). Жителів (Plafker et al. 1971). У Чимботе були сучасні житлові будівлі з залізобетонними конструкціями та фабрики із сталевими каркасами, але більшість житлових будинків було зведено з сирих цеглин. Деякі будинки були дво-поверховими.



Рис. 108. Землетрус в Перу 31 травня 1970 року

У містах та селах на відстані приблизно 100 км всі будівлі з сирій цегли були зруйновані. Сучасні ж будівлі були побудовані на слабких фундаментах і пошкоджені внаслідок розрідження ґрунтів,



спричиненого поштовхами. Тому не дивно, що лише в Чимботе було зареєстровано 500 смертельних випадків. Загальні втрати оцінювалися у 70 тис. загиблих, 50 тис. поранених і 800 тис. осіб, що залишилися без житла. Основною причиною такої величезної катастрофи був селевий потік, який зірвався з Уаскарана.

Невадо де Уаскаран – це гора в Андах, висотою 6 768 метрів, розташована приблизно за 100 кілометрів на схід від Чимботе. Величезні маси гірських порід, покритих льодом і снігом, зірвалися з її крутого західного схилу. Тут і раніше відбувалися сходження лавин, навіть без участі землетрусів. У 1962 році одна з них майже зруйнувала Ранрахирке, але місто Юнгаї вважалося безпечним, оскільки між ним і маршрутом сходження лавин знаходився гірський відріг висотою 250 метрів. Однак у 1970 році цього виявилось недостатньо і частина лавини перекинулася через гребінь.

Юнгаї було мальовничим містечком з гарною головною площею і кафедральним собором. Все, що залишилося від нього, – це невеликий фрагмент соборної стіни та чотири пальми, що стояли на площі. З 18 тис. мешканців міста загинуло 15 тисяч. Менше ніж за 5 хвилин лавина пройшла 3-кілометровий шлях до міста і ще 12 км вниз по долині. У Юнгаї, Ранрахирке та інших населених пунктах, розташованих на шляху лавини, загинуло 25–30 тисяч мешканців (Cluff 1971).

За своєю природою лавина в Юнгаї являла собою типовий лахар⁸⁹. Про рідкісний стан потоку свідчить бруд, викинутий на схили долини, його велика швидкість, а також те, що він легко подолав гребінь, який трапився на його шляху. Спочатку її товщина була досить великою – 10–15 метрів, але з рухом потоку вона поступово зменшувалася, і на міській площі в Юнгаї зали-

⁸⁹ **Лахар** – грязьові потоки, що виникають при змішуванні вулканічного матеріалу з водами кратерних озер, дощовою водою або водою, що утворюється внаслідок танення льоду або снігу на схилах вулкана.



шився лише приблизно 3-метровий шар наносів. Вони включали величезні валуни, деякі вагою до 100 тонн.

2004

Цунамі 2004 року в Індійському океані вразило узбережжя кількох країн Південної та Південно-Східної Азії в грудні 2004 року. Катастрофа спричинила величезні руйнування і втрати на узбережжі Індійського океану (Hirata et al. 2006).

26 грудня 2004 року о 7:59 ранку за місцевим часом біля узбережжя індонезійського острова Суматра стався підводний землетрус магнітудою 9,1. Протягом наступних семи годин цунамі, спричинене землетрусом, охопило Індійський океан, зруйнувавши прибережні райони аж до Східної Африки. У деяких місцях повідомлялося, що хвилі досягали висоти 9 метрів.

Цунамі 2004 року – одне з найбільших стихійних лих у відомій історії людства, убивши щонайменше 225 000 людей у багатьох країнах, причому Індонезія, Шрі-Ланка, Індія, Мальдіви і Таїланд зазнали найбільших збитків.

2011

Японський землетрус і цунамі 2011 року, які також називають Великим землетрусом Сендай або Великим землетрусом Тохоку, стихійним лихом, яке сталося на північному сході Японії 11 березня 2011 року. Подія почалася з потужного землетрусу біля північно-східного узбережжя Хонсю, головного острова Японії, який спричинив масштабні руйнування на суші і викликав серію великих хвиль цунамі, які спустошили багато прибережних районів країни, особливо в регіоні Тохоку (північно-східний Хонсю) (Fuse, Yokota 2012). Цунамі також спровокувало велику ядерну аварію на електростанції вздовж узбережжя.



КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

191. У якій провінції Китаю відбувся катастрофічний землетрус у 1558 році?
192. Який великий землетрус був описаний Р. Маллетом?
193. Який землетрус відбувся в Новій Зеландії в 1929 році?
194. У якому місті відбувся землетрус 26 червня 1963 року?
195. У якій країні відбувся землетрус 31 травня 1970 року?

ТЕСТ

191. Землетрус з магнітудою 9,2 в затоці Принц-Вільям відбувся...

- а) 1558
б) 1929
в) 1964
г) 2004

192. В якому році відбувся землетрус в Агадірі?

- а) 1460
б) 1960
в) 1964
г) 2004

193. В якому році відбувся землетрус в Перу?

- а) 1960
б) 1964
в) 1970
г) 2004

194. У якому році відбувся землетрус в Японії, у результаті чого зазнала uszkodжень атомна електростанція?

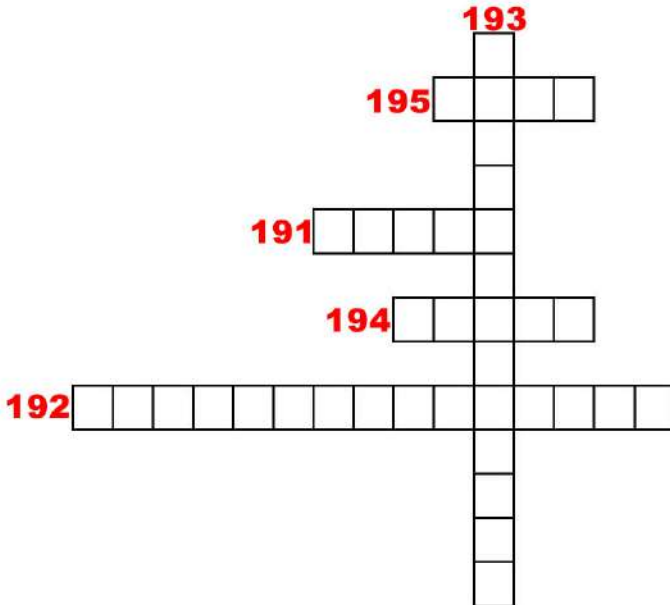
- а) 1964
б) 1970
в) 2004
г) 2011

195. У якому році відбувся Лісабонський землетрус?

- а) 1460
б) 1558
в) 1755
г) 1886



КРОСВОРД
(за контрольними запитаннями 191–195)





ПІСЛЯМОВА

Отже, ви познайомились із природою нашої планети, а саме:

- дізналися про її будову й особливості руху в космічному просторі;
- простежили історію формування поверхні нашої планети (як змінювали свою конфігурацію материки й океани, коли виникали і руйнувалися гірські системи тощо), зміни повітряної оболонки (газовий склад, потужність тощо) і еволюцію живого світу (виникнення життя – від появи перших прокариотів і до виникнення людини) впродовж всієї геологічної історії Землі;
- розкрили ключові питання, які стосуються сейсмології і сейсмометрії (як виникли ці науки, якими є сейсмічні шкали, як виникають землетруси, що собою являють сейсмічні хвилі, як функціонують прилади для реєстрації землетрусів – сейсмографи тощо); передбачення землетрусів (геохімічні, геофізичні, деформаційні і геодинамічні методи); географії землетрусів (сейсмічні пояси, взаємозв'язок між вулканами і землетрусами тощо); землетрусів і людини (як потрібно себе поводити під час сейсмічних подій, деякі найбільші землетруси в історії Землі тощо).

Деякі з параграфів цього видання візуалізовані на авторському YouTube-каналі «Цілком природно».

Сподіваюся, що навчально-методичний посібник «Земля і землетруси» збагатить ваш світогляд, допоможе краще зрозуміти й усвідомити багатогранність природи нашої планети і ті складні, часом надзвичайно тонкі зв'язки між компонентами її природи, сприятиме глибшому розумінню природи землетрусів, специфіці їх вивчення, географії і багатьох інших аспектів таких наук, як сейсмологія і сейсмометрія.



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Алелов, Ю.А., Любошиц, И.М.** (1981). Об одном из электрических предвестников землетрясений. *Физика Земли*, 10, 103-107.
2. **Амирханов, Х.И., Сардаров, С.С.** (1976). *Способ прогнозирования землетрясений*, 1.
3. **Барсуков, В.Л., Беляев, А.А., Серебренников, В.С.** (1989). *Вестники беды (о поиске средств геохимического прогноза землетрясений)*. Москва : Наука.
4. **Барсуков, О.М.** (1972) Гипотеза связи электрического сопротивления с прочностью осадочных горных пород. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 9, 11-24.
5. **Барсуков, О.М.** (1979). Возможная причина электрических предвестников землетрясений. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 8, 86-88.
6. **Богатирьова, К.В., & Гуца, Г.В.** (2019). Динамічний пейзаж у Поємі на руйнування Лісабону” Вольтера та в поємі Симеона Лисинецького Воззр’яніє страшилища во Песть и Будь”. *Прикарпатський вісник НТШ. Слово*, (3), 125-130.
7. **Вартанян, Г.С.** (2019). Глобальная эндодренажная система: некоторые флюидофизические механизмы геодинамических процессов. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(1), 53-78.
8. **Вартанян, Г.С., Куликов, Г.В., Гарифулин, В.А., Рыжов, А.А., Круподерова, О.Е., Лыгин, А.М., & Попов, Е.А.** (2009). Мониторинг гидрогеодеформационного поля: история создания и перспективы развития. *Разведка и охрана недр*, (9), 28-33.
9. **Вегенер, А.** (1925). *Возникновение материков и океанов*. Ленинград : Госиздат.
10. **Горбушина, Л.В., Тыминский, В.Г., Спиридонов, А.И.** (1972). К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозировании землетрясений. *Советская геология*, 1, 153-156.
11. **Добровольский, И.П.** (2004). Прогноз тектонического землетрясения: определение места и энергии землетрясения по данным сейсмического просвечивания. *Физика Земли*, 12, 31-41.
12. **Дубинчук, В.Т., Поляков, В.А., Фазуллин, М.И.** (1981). *Способ изучения динамики тектонических напряжений*. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии, 1.



13. **Исмаил-заде, Т.А., Балакишиев, Ш.А.О., Гасанов, А.Б.О.** (1981). *Способ определения палеонапряжений в массиве горных пород*. Научный центр «Гнофизика» Азербайджанской ССР, 1.
14. **Кирилюк, С.М., Кирилюк, О.В.** (2018). *Природа Марса : навчальний посібник*. Чернівці : Чернівецький національний університет.
15. **Кравцов, А.И., Кучер, М.И., Фридман, А.И.** (1979). Об изменении изотопного состава углерода природных газов в зависимости от сейсмической активности. *Геохимия*, 3, 387-390.
16. **Красилов, В.А.** (1977). *Эволюция и биостратиграфия*. Москва : Наука.
17. **Куликов, Г.В., Рыжов, А.А.** (2011). Прогноз землетрясений по данным мониторинга гидрогеодеформационного поля. *Геодинамика и тектонофизика*, 2(2), 194-207.
18. **Лучин, И.А.** (1996). Изменение концентрации радона – предвестник эндогенных пожаров, горных ударов, землетрясений и оценка влияния этих изменений на потенциальную радоноопасность территорий. *АНРИ*, 3(9), 96-98.
19. **Любошиц, В.М.** (1988). *Способ регистрации электрического предвестника землетрясения*. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, 1.
20. **Мавлянова, Н., Рахматуллаев, Х.** (2017). О роли академика ГА Мавлянова в развитии сейсмологии в Узбекистане. *GeoRisk*, 1, 12-19.
21. **Мамырин, Б.А., Толстихин, И.Н, Хабарин, Л.В.** (1979). О возможности применения отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ при прогнозировании землетрясений. *Геохимия*, (3), 384-386.
22. **Миланкович, М.** (1939). *Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата*. Москва : Редакция технической теоретической литературы.
23. **Монахов, Ф.И.** (1980). Механизм формирования гидрогеодинамического предвестника землетрясений. *Доклады Академии наук*, 251(4), 828-831.
24. **Одеков, О.А.** (1984). Общая модель процесса возникновения землетрясений и место их предвестников в ней. *Изв. АН ТССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук*, 64-70.
25. **Ризниченко, Ю.В.** (1985). *Проблемы сейсмологии: Избранные труды*. Москва : Наука.
26. **Рикитаки, Т.** (1979). *Предсказание землетрясений*. Москва : Мир.
27. **Рыкунов, Л.Н., Смирнов, В.Б., Старовойт, Ю.О., Чубарова, О.С.** (1987). Самоподобие сейсмического излучения во времени. *Доклады Академии наук*, 297(6), 1337-1341.



28. Сапрыгин, С.М. (2003). Тектоническая цикличность в недрах южного и среднего Сахалина по инструментальным данным. *Тихоокеанская геология*, 22(2), 73-80.
29. Сардаров, С.С. (1981). Эмпирическая связь краткосрочной предвестниковой аномалии с параметрами землетрясения. *Доклады Академии наук*, 258(4), 837-841.
30. Сардаров, С.С., Сардаров, С.С., Мантиков, А.Б. (1982). Периодические изменения газовых концентраций в термальных водах Дагестана. *Доклады Академии наук*, 262(6), 1351-1353.
31. Сардаров, С.С. (1975). Способ прогнозирования землетрясений. *Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки*, 12, 89.
32. Сергеева, Т.М. (2015). *Невідомі Чернівці : нариси з історії метеорології та сейсмології*. Чернівці : Рута.
33. Старков, В.И., Марков, Г.А., Козырев, А.А., Соболева, О.В. (1981). *Способ прогнозирования землетрясений*. Институт сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР, Горный институт Кольского филиала АН СССР, 1.
34. Хасанов, М.М., Негматкхлаев, С.Х., Брудный, Л.Г., Баннов, Ю.А., Тупикин, А.Ф. (1981). *Способ прогнозирования землетрясения и устройство для его осуществления*. Предприятие П/Я А-3987, 1.
35. Abushik, A.F. (2000). Silurian–earliest Devonian ostracode biostratigraphy of the Timan-Northern Ural region. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol*, 49(2), 112-125.
36. Anderson, D.L., Miller, W.F., Latham, G.V., Nakamura, Y., Toksöz, M.N., Dainty, A.M., ... & Knight, T.C.D. (1977). Seismology on mars. *Journal of Geophysical Research*, 82(28), 4524-4546.
37. Aretz, M., Herbig, H.G., Wang, X.D., Gradstein, F.M., Agterberg, F.P., & Ogg, J.G. (2020). The carboniferous period. *Geologic time scale 2020*, 811-874.
38. Arnould, M., Coltice, N., Flament, N., Mallard, C. (2020). Plate tectonics and mantle controls on plume dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 547, 116439.
39. Barron, E.J., & Fawcett, P.J. (1995). The climate of Pangaea: a review of climate model simulations of the Permian. *The Permian of Northern Pangea: Volume 1: Paleogeography, Paleoclimates, Stratigraphy*, 37-52.
40. Barnes, C.R., Fortey, R.A., & Williams, S.H. (1996). The pattern of global bio-events during the Ordovician Period. Global Events and Event Stratigraphy. *The Phanerozoic: Results of the International*



- Interdisciplinary Cooperation in the IGCP-Project 216 «Global Biological Events in Earth History»*, 139-172.
41. **Batlló, J.** (2014) Historical Seismometer. In: *Beer M., Kougioumtzoglou I., Patelli E., Au IK. (eds) Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Berlin : Heidelberg Springer.
 42. **Batlló, J., Stich, D., & Macià, R.** (2008). Quantitative analysis of early seismograph recordings. *Historical Seismology: Interdisciplinary Studies of Past and Recent Earthquakes*, 385-402.
 43. **Baumgardner, J.R.** (1985). Three-dimensional treatment of convective flow in the Earth's mantle. *Journal of Statistical Physics*, 39(5), 501–511.
 44. **Becker, R.T., Königshof, P., & Brett, C.E.** (2016). Devonian climate, sea level and evolutionary events: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 423(1), 1-10.
 45. **Becker, R.T., Marshall, J.E.A., Da Silva, A.C., Agterberg, F.P., Gradstein, F.M., & Ogg, J.G.** (2020). The devonian period. *Geologic time scale 2020*, 733-810.
 46. **Behrens, J., Løvholt, F., Jalayer, F., Lorito, S., Salgado-Gálvez, M.A., Sørensen, M., ... & Vyhmeister, E.** (2021). Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, 9, 628772.
 47. **Bertoza, F., Da Silva, B.C., Martill, D., Marlene, E., Vorderwuelbecke, T.A., Schouten, R., & Aquino, P.** (2021). A large pterosaur femur from the Kimmeridgian, *Upper Jurassic of Lusitanian Basin, Portugal*. *Acta Palaeontologica Polonica*, 66(4), 815-825.
 48. **Besedina, A.N., & Tubanov, T.A.** (2023). Microseisms as a Tool for Geophysical Research. A Review. *Journal of Volcanology and Seismology*, 17(2), 83-101.
 49. **Black, B.A., Lamarque, J.F., Marsh, D.R., Schmidt, A., & Bardeen, C.G.** (2021). Global climate disruption and regional climate shelters after the Toba supereruption. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(29), e2013046118.
 50. **Bondár, I., & Engdahl, E.R.** (2019). Seismological Networks. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 1-11.
 51. **Boore, D.M.** (1989). The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters. *Tectonophysics*, 166(1-3), 1-14.
 52. **Bormann, P., Engdahl, B., & Kind, R.** (2012). Seismic wave propagation and earth models. *New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2)*, 1-105.



53. **Brockmann, J.M., Schubert, T., & Schuh, W.D.** (2021). An improved model of the Earth's static gravity field solely derived from reprocessed GOCE data. *Surveys in Geophysics*, 42(2), 277-316.
54. **Brodkorb, P.** (1971). Origin and evolution of birds. *Avian biology*, 1, 19-55.
55. **Castellanos, J.C., Perry-Houts, J., Clayton, R.W., Kim, Y., Stanciu, A.C., Niday, B., Humphreys, E.** (2020). Seismic anisotropy reveals crustal flow driven by mantle vertical loading in the Pacific NW. *Science advances*, 6(28), eabb0476.
56. **Catling, D.C., Zahnle, K.J.** (2020). The archean atmosphere. *Science advances*, 6(9), eaax1420.
57. **Chakrabarti, S., Wright, J., Chang, P., Quillen, A., Craig, P., Territo, J., ... & Nielsen, E.** (2020). Toward a Direct Measure of the Galactic Acceleration. *The Astrophysical Journal Letters*, 902(1), L28.
58. **Chapman, M.C., Beale, J.N., Hardy, A.C., & Wu, Q.** (2016). Modern seismicity and the fault responsible for the 1886 Charleston, South Carolina, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(2), 364-372.
59. **Chatterton, B.D., Edgcombe, G.D., & Tuffnell, P.A.** (1990). Extinction and migration in Silurian trilobites and conodonts of northwestern Canada. *Journal of the Geological Society*, 147(4), 703-715.
60. **Chester, D.K.** (2001). The 1755 Lisbon earthquake. *Progress in Physical Geography*, 25(3), 363-383.
61. **Cisternas, M., Atwater, B.F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., ... & Husni, M.** (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437(7057), 404-407.
62. **Cliff, F.** (1987). Kiyoo Wadati and Early Research on Deep Focus Earthquakes: Introduction to Special Section on Deep and Intermediate Focus Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 92(B13), 13777-13788.
63. **Cluff, L.S.** (1971). Peru earthquake of May 31, 1970; engineering geology observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(3), 511-533.
64. **Clyne, M., Lamarque, J.F., Mills, M.J., Khodri, M., Ball, W., Bekki, S., ... & Toon, O.B.** (2021). Model physics and chemistry causing intermodel disagreement within the VolMIP-Tambora Interactive Stratospheric Aerosol ensemble. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(5), 3317-3343.
65. **Cochran, J.R.** (1980). Some remarks on isostasy and the long-term behavior of the continental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 46(2), 266-274.



66. **Colbert, E.H.** (1958). Tetrapod extinctions at the end of the Triassic Period. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 44(9), 973-977.
67. **Coltice, N., Husson, L., Faccenna, C., & Arnould, M.** (2019). What drives tectonic plates?. *Science advances*, 5(10), eaax4295.
68. **Cosgriff, J.W.** (1984). The temnospondyl labyrinthodonts of the earliest Triassic. *Journal of vertebrate Paleontology*, 4(1), 30-46.
69. **Darby, D.J., & Beanland, S.** (1992). Possible source models for the 1855 Wairarapa earthquake, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B9), 12375-12389.
70. **Davies, N.S., Berry, C.M., Marshall, J.E., Wellman, C.H., & Lindemann, F.J.** (2021). The Devonian landscape factory: plant–sediment interactions in the Old Red Sandstone of Svalbard and the rise of vegetation as a biogeomorphic agent. *Journal of the Geological Society*, 178(5).
71. **de Kock, M.O., Evans, D.A., Beukes, N.J.** (2009). Validating the existence of Vaalbara in the Neoproterozoic. *Precambrian Research*, 174(1-2), 145-154.
72. **Delcourt, H.R., & Delcourt, P.A.** (1988). Quaternary landscape ecology: relevant scales in space and time. *Landscape ecology*, 2, 23-44.
73. **Demar, R., & Bolt, J.R.** (1981). Dentitional organization and function in a Triassic reptile. *Journal of Paleontology*, 967-984.
74. **Denny, M.D., & Johnson, L.R.** (1991). The explosion seismic source function: Models and scaling laws reviewed. *Explosion Source Phenomenology*, 65, 1-24.
75. **Devaney, A.J., & Oristaglio, M.L.** (1986). A plane-wave decomposition for elastic wave fields applied to the separation of P-waves and S-waves in vector seismic data. *Geophysics*, 51(2), 419-423.
76. **DiMichele, W.A., Pfefferkorn, H.W., & Gastaldo, R.A.** (2001). Response of Late Carboniferous and Early Permian plant communities to climate change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29(1), 461-487.
77. **Dowrick, D.J.** (1996). The Modified Mercalli earthquake intensity scale: Revisions arising from recent studies of New Zealand earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 29(2), 92-106.
78. **Edgar, Z.** (1941). The Origin of William Gilbert's Scientific Method. *Journal of the History of Ideas*, 2 (1), 1-32.
79. **Eiby, G.A.** (1968). An annotated list of New Zealand earthquakes, 1460–1965. *New Zealand journal of geology and geophysics*, 11(3), 630-647.



80. El Harrouni, K., Kharmich, H., & Lamzah, A. (2016). Seismic performance of traditional urban architecture in Morocco. *International Journal of Heritage Architecture*, 1(1), 42-59.
81. Elewa, A.M., & Calner, M. (2008). Silurian global events—at the tipping point of climate change. *Mass extinction*, 21-57.
82. Elzanowski, A. (1983). Birds in Cretaceous ecosystems. *Acta Palaeontologica Polonica*, 28, 1-2.
83. Eriksson, P.G., Condie, K.C., Van Der Westhuizen, W., Van der Merwe, R., De Bruijn, H., Nelson, D., ... & Cunningham, M.J. (2002). Late Archaean superplume events: a Kaapvaal–Pilbara perspective. *Journal of Geodynamics*, 34(2), 207-247.
84. Falconer, B.H. (1968). Agadir, Morocco, reconstruction work six years after the earthquake of February 1960. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1(2), 72-91.
85. Farrell, J., Koper, K.D., & Sohn, R.A. (2023). The Relationship Between Wind, Waves, Bathymetry, and Microseisms in Yellowstone Lake, Yellowstone National Park. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(7), e2022JB025943.
86. Feichtinger, I., Ivanov, A.O., Winkler, V., Dojen, C., Kindlimann, R., Kriwet, J., ... & Stumpf, S. (2021). Scarce ctenacanthiform sharks from the Mississippian of Austria with an analysis of Carboniferous elasmobranch diversity in response to climatic and environmental changes. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 41(2), e1925902.
87. Ferrar, H.T. (1930). The Murchison (New Zealand) earthquake, 17th June, 1929. *Geological Magazine*, 67(3), 132-134.
88. Föllmi, K.B. (2012). Early Cretaceous life, climate and anoxia. *Cretaceous Research*, 35, 230-257.
89. Frey, E., & Tischlinger, H. (2012). The Late Jurassic pterosaur Rhamphorhynchus, a frequent victim of the ganoid fish *Aspidorhynchus*?. *PloS one*, 7(3), e31945.
90. Frueh-Green, G.L., Kelley, D.S., Lilley, M.D., Cannat, M., Chavagnac, V., & Baross, J.A. (2022). Diversity of magmatism, hydrothermal processes and microbial interactions at mid-ocean ridges. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(12), 852-871.
91. Fuse, A., & Yokota, H. (2012). Lessons learned from the Japan earthquake and tsunami, 2011. *Journal of Nippon Medical School*, 79(4), 312-315.
92. Gale, A.S., Mutterlose, J., Batenburg, S., Gradstein, F.M., Agterberg, F.P., Ogg, J.G., & Petrizzo, M.R. (2020). The cretaceous period. *Geologic time scale 2020*, 1023-1086.



93. **Garwood, R.J., & Edgecombe, G.D.** (2011). Early terrestrial animals, evolution, and uncertainty. *Evolution: Education and Outreach*, 4(3), 489-501.
94. **Godzikovskaya, A.A.** (2010). Macroseismic descriptions and parameters of Kamchatka earthquakes that occurred during the preinstrumental period of observation. *Journal of Volcanology and Seismology*, 4(5), 354-366.
95. **Goin, F.J., & Candela, A.M.** (2004). New Paleogene marsupials from the Amazon Basin of eastern Peru. The Paleogene Mammalian Fauna of Santa Rosa, Amazonian Peru. *Natural History Museum of Los Angeles County, Science Series*, 40, 15-60.
96. **Goldman, D., Sadler, P.M., Leslie, S.A., Melchin, M.J., Agterberg, F.P., & Gradstein, F.M.** (2020). The Ordovician Period. *Geologic time scale 2020*, 631-694.
97. **Golikov, A.N., & Scarlato, O.A.** (1989). Evolution of Arctic ecosystems during the Neogene period. *The Arctic seas: climatology, oceanography, geology, and biology*, 257-279.
98. **Golonka, J., & Ford, D.** (2000). Pangean (late Carboniferous–Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 161(1-2), 1-34.
99. **González-Vida, J.M., Macías, J., Castro, M.J., Sánchez-Linares, C., de la Asunción, M., Ortega-Acosta, S., & Arcas, D.** (2019). The Lituya Bay landslide-generated mega-tsunami–numerical simulation and sensitivity analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(2), 369-388.
100. **Guadalupe, C., Alfredo, E., & Rotondaro, R.** (2021). Earthen Architecture in Seismic Zones: Latin America and the Pacific Fire Belt. *Journal of Construction Research*, 3(1), 35-45.
101. **Gulia, L., Wiemer, S.** (2019). Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature*, 574(7777), 193-199.
102. **Gutenberg, B., & Richter, C.F.** (1955). Magnitude and energy of earthquakes. *Nature*, 176(4486), 795-795.
103. **Hallam, A.** (1969). Tectonism and eustasy in the Jurassic. *Earth-Science Reviews*, 5(1), 45-68.
104. **Hallam, A.** (1982). The Jurassic climate. *Studies in Geophysics: Climate in Earth History*. National Academy Press. Washington, DC, 159-163.
105. **Hammerl, C., Lenhardt, W.** (2003). *100 Years Seismological Service of Austria at the Central Institute for Meteorology and Geodynamics in Vienna/ Austria*. Vienna : Austria.
106. **Harper, W.L.** (2011). *Isaac Newton's scientific method: turning data into evidence about gravity and cosmology*. Oxford University Press.



107. Hays, J.D., Imbrie, J., Shackleton, N.J. (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194, 1121-1132.
108. Henderson, C.M., Shen, S.Z., Gradstein, F.M., & Agterberg, F.P. (2020). The permian period. *Geologic Time Scale 2020*, 875-902.
109. Hesselbo, S.P., Ogg, J.G., Ruhl, M., Hinnov, L.A., & Huang, C.J. (2020). The Jurassic Period. *Geologic time scale 2020*, 955-1021.
110. Heuer, V.B., Inagaki, F., Morono, Y., Kubo, Y., Spivack, A.J., Viehweger, B., ... & Hinrichs, K.U. (2020). Temperature limits to deep seafloor life in the Nankai Trough subduction zone. *Science*, 370(6521), 1230-1234.
111. Hewitt, G. (2000). The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405(6789), 907-913.
112. Hill, D.P., Pollitz, F., & Newhall, C. (2002). Earthquake–volcano interactions. *Physics Today*, 55(11), 41-47.
113. Hirata, K., Satake, K., Tanioka, Y., Kuragano, T., Hasegawa, Y., Hayashi, Y., & Hamada, N. (2006). The 2004 Indian Ocean tsunami: Tsunami source model from satellite altimetry. *Earth, planets and space*, 58(2), 195-201.
114. Holland, C.H. (2014). Biostratigraphy of British Silurian nautiloid cephalopods. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 53(1), 20.
115. Holland, C.H., & Copper, P. (2008). Ordovician and Silurian nautiloid cephalopods from Anticosti Island: trajectory across the Ordovician–Silurian (O–S) mass extinction boundary. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45(9), 1015-1038.
116. Horner, J.R., Goodwin, M.B., & Myhrvold, N. (2011). Dinosaur census reveals abundant Tyrannosaurus and rare ontogenetic stages in the Upper Cretaceous Hell Creek Formation (Maastrichtian), Montana, USA. *PLoS One*, 6(2), e16574.
117. Hosono, T., Yamada, C., Manga, M., Wang, C.Y., & Tanimizu, M. (2020). Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains. *Nature Communications*, 11(1), 2776.
118. Hötzl, H., & Zötl, J.G. (1978). Climatic changes during the Quaternary period. *Quaternary Period in Saudi Arabia: 1: Sedimentological, Hydrogeological, Hydrochemical, Geomorphological, and Climatological Investigations in Central and Eastern Saudi Arabia*, 301-311.
119. Innanen, K.A., Patrick, A.T., Duley, W.W. (1978). The interaction of the spiral density wave and the Sun's galactic orbit. *Astrophysics and Space Science*, 57(2), 511–515.



120. **Irmis, R.B.** (2010). Evaluating hypotheses for the early diversification of dinosaurs. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 101(3-4), 397-426.
121. **Is'hakov, G.** (2022). Climate Characteristics of the Neogene Period. *Eurasian Journal of History, Geography and Economics*, 14, 1-7.
122. **James, D., Perry, B.** (1969). The Early History of Seismometry (to 1900). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(1), 183-227.
123. **Johnston, A.C., & Schweig, E.S.** (1996). The enigma of the New Madrid earthquakes of 1811–1812. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(1), 339-384.
124. **Kao, H., & Shan, S.J.** (2004). The source-scanning algorithm: Mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophysical Journal International*, 157(2), 589-594.
125. **Karato, S.I., & Wang, D.** (2013). Electrical conductivity of minerals and rocks. *Physics and chemistry of the deep Earth*, 145-182.
126. **Kenchington, C.G., Harris, S.J., Vixseboxse, P.B., Pickup, C., & Wilby, P.R.** (2018). The Ediacaran fossils of Charnwood Forest: shining new light on a major biological revolution. *Proceedings of the Geologists' Association*, 129(3), 264-277.
127. **Keller, E.A., & Rockwell, T.K.** (1984). Tectonic geomorphology, Quaternary chronology, and paleoseismicity. *Developments and applications of geomorphology*, 203-239.
128. **Kopp, R.E., Kirschvink, J.L., Hilburn, I.A., & Nash, C.Z.** (2005). The Paleoproterozoic snowball Earth: a climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(32), 11131-11136.
129. **Korth, W.W.** (2018). Review of the marsupials (Mammalia: Metatheria) from the late Paleogene (Chadronian–Arikareean: late Eocene–late Oligocene) of North America. *PalZ*, 92(3), 499-523.
130. **Kortström, J., Uski, M., & Tiira, T.** (2016). Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences*, 87, 22-30.
131. **Kustatscher, E., Ash, S.R., Karasev, E., Pott, C., Vajda, V., Yu, J., & McLoughlin, S.** (2018). Flora of the late Triassic. *The Late Triassic World: Earth in a Time of Transition*, 545-622.
132. **Lamsdell, J.C., Hoşgör, İ., & Selden, P.A.** (2013). A new Ordovician eurypterid (Arthropoda: Chelicerata) from southeast Turkey: evidence for a cryptic Ordovician record of Eurypterida. *Gondwana Research*, 23(1), 354-366.



133. **Lawson, A. et al.** (1906). The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission. *Carnegie Institution of Washington Publication*, 87,1(1), 255-451.
134. **Lee, J.R., Candy, I., & Haslam, R.** (2018). The Neogene and Quaternary of England: landscape evolution, tectonics, climate change and their expression in the geological record. *Proceedings of the Geologists' Association*, 129(3), 452-481.
135. **Lee, M.S.** (1997). A taxonomic revision of pareiasaurian reptiles: implications for Permian terrestrial palaeoecology. *Modern Geology*, 21(3), 231-298.
136. **Le Hir, G., Donnadiou, Y., Godd ris, Y., Meyer-Berthaud, B., Ramstein, G., & Blakey, R.C.** (2011). The climate change caused by the land plant invasion in the Devonian. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3-4), 203-212.
137. **Lehmann, I.** (1936). «P». *Publications du Bureau Central S ismologique International*, A14(3), 87-115.
138. **LePage, B.A., Beauchamp, B., Pfefferkorn, H.W., & Utting, J.** (2003). Late Early Permian plant fossils from the Canadian High Arctic: a rare paleoenvironmental/climatic window in northwest Pangea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 191(3-4), 345-372.
139. **Liljedahl, L.** (1994). Silurian nuculoid and modiomorphid bivalves from Sweden. *Silurian nuculoid and modiomorphid bivalves from Sweden*, 1-89.
140. **Loydell, D.K.** (1998). Early Silurian sea-level changes. *Geological Magazine*, 135(4), 447-471.
141. **Ma, J., Feng, X.J., Li, G.Y., & Li, X.N.** (2020). New insights from analysis of historical texts on the 1568 Northeast Xi'an earthquake, Shaanxi, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 44, 101417.
142. **MacFadden, B.J.** (1986). Fossil horses from «Eohippus» (Hyracotherium) to Equus: scaling, Cope's Law, and the evolution of body size. *Paleobiology*, 12(4), 355-369.
143. **McGarr, A.** (2019). Seismic seiches. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 1-2.
144. **Madariaga, R.** (2007). Seismic source theory. *Earthquake seismology*, 4, 59-82.
145. **Mallet, R.** (1862). *Great Neapolitan earthquake of 1857: the first principles of observational seismology as developed in the report to the Royal Society of London of the expedition made by command of the Society Into the interior of the Kingdom of Naples, to investigate the circumstances of the great earthquake of December 1857* (Vol. 2). Chapman and Hall.



146. **Mäntyniemi, P., Tatevossian, R.E., & Vakarchuk, R.N.** (2017). On the epicenter determination of historical earthquakes attested to by sparse intensity data sets. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1136-1146.
147. **Marshall, C.R.** (2006). Explaining the Cambrian «explosion» of animals. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 355-384.
148. **Martin, L.D.** (2010). Paleogene avifauna of the holarctic. *Vertebrata Palasiatica*, 48(4), 367.
149. **Masi, M.** (2007). On compressive radial tidal forces. *American Journal of Physics*, 75(2), 116-124.
150. **Massare, J.A., & Callaway, J.M.** (1990). The affinities and ecology of Triassic ichthyosaurs. *Geological Society of America Bulletin*, 102(4), 409-416.
151. **Masursky, H., & Crabill, N.L.** (1976). Search for the Viking 2 landing site. *Science*, 194(4260), 62-68.
152. **Mavroeidis, G.P., Zhang, B., Dong, G., Papageorgiou, A.S., Dutta, U., & Biswas, N.N.** (2008). Estimation of strong ground motion from the great 1964 Mw 9.2 Prince William Sound, Alaska, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5), 2303-2324.
153. **McIlroy, D., Brasier, M.D., & Moseley, J.B.** (1998). The Proterozoic–Cambrian transition within the ‘Charnian Supergroup’ of central England and the antiquity of the Ediacara fauna. *Journal of the Geological Society*, 155(2), 401-411.
154. **McNutt, S.R., & Roman, D.C.** (2015). Volcanic seismicity. *The encyclopedia of volcanoes*, 1011-1034.
155. **Melchin, M.J., Sadler, P.M., & Cramer, B.D.** (2020). The silurian period. *Geologic time scale 2020*, 695-732.
156. **Meyer-Berthaud, B., Soria, A., & Decombeix, A.L.** (2010). The land plant cover in the Devonian: a reassessment of the evolution of the tree habit. Geological Society, London, *Special Publications*, 339(1), 59-70.
157. **Mogro-Campero, A., Fleischer, R.L., & Likes, R.S.** (1980). Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B6), 3053-3057.
158. **Mohorovičić, A.** (1908). Epicenters of earthquakes in Croatia and Slavonia (Epicentra potresa u Hrvatskoj i Slavoniji). *Yearly Report of the Zagreb Meteorological Observatory for the Year 1906. Part IV*, 15–19.
159. **Mohorovičić, A.** (1910). Epicenters of earthquakes in Croatia and Slavonia (Epicentra potresa u Hrvatskoj i Slavoniji). *Yearly Report of the Zagreb Meteorological Observatory for the Year 1909*.



160. **Morgan, M.E., Badgley, C., Gunnell, G.F., Gingerich, P.D., Kappelman, J.W., & Maas, M.C.** (1995). Comparative paleoecology of Paleogene and Neogene mammalian faunas: body-size structure. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 115(1-4), 287-317.
161. **Nishida, K., & Takagi, R.** (2022). A Global Centroid Single Force Catalog of P-Wave Microseisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(4), e2021JB023484.
162. **Ochoa, L.H., Niño, L.F., & Vargas, C.A.** (2018). Fast estimation of earthquake epicenter distance using a single seismological station with machine learning techniques. *Dyna*, 85(204), 161-168.
163. **Ogg, J.G., Chen, Z.Q., Orchard, M.J., & Jiang, H.S.** (2020). The triassic period. *Geologic time scale 2020?* 903-953.
164. **Okal, E.A.** (1976). A surface-wave investigation of the rupture mechanism of the Gobi-Altai (December 4, 1957) earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 12(4), 319-328.
165. **Oldham, R.D.** (1909). Recent Earthquakes. *Geographical Journal*, 33(3), 294-297
166. **Oreskes, N.** (2002). Continental Drift. *Encyclopedia of Global Environmental Change, Set*, 321.
167. **Orme, A.R.** (2007). Clarence Edward Dutton (1841–1912): soldier, polymath and aesthete. *Geological Society, London, Special Publications*, 287(1), 271-286.
168. **Ostřihanský, L.** (2012). Causes of earthquakes and lithospheric plates movement. *Solid Earth Discussions*, 4(2), 1411-1483.
169. **Owocki, K., Kremer, B., Cotte, M., & Bocherens, H.** (2020). Diet preferences and climate inferred from oxygen and carbon isotopes of tooth enamel of *Tarbosaurus bataar* (Nemegt Formation, Upper Cretaceous, Mongolia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 537, 109190.
170. **Ozkula, G., Dowell, R.K., Baser, T., Lin, J.L., Numanoglu, O.A., Ilhan, O., ... & Uludag, T.D.** (2023). Field reconnaissance and observations from the February 6, 2023, Turkey earthquake sequence. *Natural Hazards*, 1-38.
171. **Pan, Y., Xia, J., Xu, Y., & Gao, L.** (2016). Multichannel analysis of Love waves in a 3D seismic acquisition system. *Geophysics*, 81(5), EN67-EN74.
172. **Papazachos, B.C., Scordilis, E.M., Panagiotopoulos, D.G., Papazachos, C.B., & Karakaisis, G.F.** (2004). Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(3), 1482-1489.



173. **Parrish, J.T.** (1995). Geologic evidence of Permian climate. *The Permian of Northern Pangea: Volume 1: Paleogeography, Paleoclimates, Stratigraphy*, 53-61.
174. **Pfefferkorn, H.W., & Wang, J.** (2016). Paleoecology of Noeggerathiales, an enigmatic, extinct plant group of Carboniferous and Permian times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 448, 141-150.
175. **Plafker, G., Ericksen, G.E., & Fernandez Concha, J.** (1971). Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake. *Bulletin of the seismological society of America*, 61(3), 543-578.
176. **Preto, N., Kustatscher, E., & Wignall, P.B.** (2010). Triassic climates – state of the art and perspectives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 290(1-4), 1-10.
177. **Pšenička, J., Bek, J., Frýda, J., Žárský, V., Uhlířová, M., & Štorch, P.** (2021). Dynamics of Silurian plants as response to climate changes. *Life*, 11(9), 906.
178. **Raab, N.** (2014). The Tashkent earthquake of 1966: the advantages and disadvantages of a natural tragedy. *Jahrbücher für Geschichte Osteuropas*, 273-294.
179. **Raffi, I., Wade, B.S., Pälke, H., Beu, A.G., Cooper, R., Crundwell, M.P., ... & Vernyhorova, Y.V.** (2020). The neogene period. *Geologic time scale 2020*, 1141-1215.
180. **Reasenber, P.A.** (1999). Foreshock occurrence before large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B3), 4755-4768.
181. **Ren, D., Nel, A., & Prokop, J.** (2008). New early griffenfly, *Sinomeganeura huangheensis* from the Late Carboniferous of northern China (Meganeoptera: Meganeuridae). *Insect Systematics & Evolution*, 39(2), 223-229.
182. **Richter, C.F.** (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the seismological society of America*, 25(1), 1-32.
183. **Rikitake, T.** (1979). Classification of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 54(3-4), 293-309.
184. **Ringler, A.T., Anthony, R.E., Wilson, D.C., Auerbach, D., Bargabus, S., Davis, P., ... & Klimczak, E.** (2021). A review of timing accuracy across the Global Seismographic Network. *Seismological Society of America*, 92(4), 2270-2281.
185. **Rosner, R.** (2009). Scientists and mathematicians in Czernowitz University. *Proceedings of the 2nd ICESHS (Cracow, Poland)*.
186. **Roux, P., Sabra, K.G., Gerstoft, P., Kuperman, W.A., & Fehler, M.C.** (2005). P-waves from cross-correlation of seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 32(19).



187. **Rowland, D.** (2021). Cosmic microwave background is electromagnetic fog. *OSP Journal of Physics and Astronomy*, 2(1), 1-2.
188. **Rubidge, B.S., & Sidor, C.A.** (2001). Evolutionary patterns among Permo-Triassic therapsids. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 449-480.
189. **Trajanovski, N.** (2021). The City of Solidarity's Diverse Legacies: A Framework for Interpreting the Local Memory of the 1963 Skopje Earthquake and the Post-earthquake Urban Reconstruction. *Journal of Nationalism, Memory & Language Politics*, 15(01), 30-51.
190. **Turnbull, W.D., & Martill, D.M.** (1988). Taphonomy and preservation of a monospecific titanotheriid assemblage from the Washakie Formation (late Eocene), southern Wyoming. An ecological accident in the fossil record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63(1-3), 91-108.
191. **Turner, S., Wilde, S., Wörner, G., Schaefer, B., & Lai, Y.J.** (2020). An andesitic source for Jack Hills zircon supports onset of plate tectonics in the Hadean. *Nature Communications*, 11(1), 1-5.
192. **Saito, M.A., Sigman, D.M., & Morel, F.M.** (2003). The bioinorganic chemistry of the ancient ocean: the co-evolution of cyanobacterial metal requirements and biogeochemical cycles at the Archean-Proterozoic boundary?. *Inorganica Chimica Acta*, 356, 308-318.
193. **Sagan, C., Pieri, D., Fox, P., Arvidson, R.E., & Guinness, E.A.** (1977). Particle motion on Mars inferred from the Viking lander cameras. *Journal of Geophysical Research*, 82(28), 4430-4438.
194. **Sansom, I.J., Smith, M.M., Smith, M.P., & Ahlberg, P.E.** (2001). The Ordovician radiation of vertebrates. *Major events in early vertebrate evolution*, 156-171.
195. **Schick, R.** (1981). Source mechanism of volcanic earthquakes. *Bulletin Volcanologique*, 44(3), 491-497
196. **Schmidt, A.R., Jancke, S., Lindquist, E.E., Ragazzi, E., Roghi, G., Nascimbene, P.C., ... & Grimaldi, D.A.** (2012). Arthropods in amber from the Triassic Period. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(37), 14796-14801.
197. **Schopf, J.W., Kudryavtsev, A.B., Czaja, A.D., & Tripathi, A.B.** (2007). Evidence of Archean life: stromatolites and microfossils. *Precambrian Research*, 158(3-4), 141-155.
198. **Senter, P.J., & Mackey, J.J.** (2023). Forelimb motion and orientation in the ornithischian dinosaurs *Styracosaurus* and *Thescelosaurus*, and its implications for locomotion and other behavior. *Palaeontologia Electronica*, 26(3), 1-19.



199. Servais, T., Harper, D.A., Kröger, B., Scotese, C., Stigall, A.L., & Zhen, Y.Y. (2023). Changing palaeobiogeography during the Ordovician Period. *Geological Society, London, Special Publications*, 532(1), 111-136.
200. Seward, A.C. (1935). Notes on Jurassic Floras. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 23(1), 1-9.
201. Shapiro, N.M., & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7).
202. Sidorin, A.Y. (2019). Effects and lessons of the 1948 Ashgabat earthquake. *Seismic Instruments*, 55, 271-282.
203. Silva, P.G., Guerrieri, L., & Michetti, A.M. (2015). Intensity scale ESI 2007 for assessing earthquake intensities. *Springer Encyclopaedia of Earthquake Engineering. Berlin (Germany), Springer-Verlag*, 1-20.
204. Siveter, D.J., Vannier, J.M., & Palmer, D. (1991). Silurian Myodocopes: pioneer pelagic ostracods and the chronology of an ecological shift. *Journal of Micropalaeontology*, 10(2), 151-173.
205. Sjöberg, L.E. (2013). On the isostatic gravity anomaly and disturbance and their applications to Vening Meinesz–Moritz gravimetric inverse problem. *Geophysical Journal International*, 193(3), 1277-1282.
206. Smith, G.J., & DeSantis, L.R. (2020). Extinction of North American Cuvieronius (Mammalia: Proboscidea: Gomphotheriidae) driven by dietary resource competition with sympatric mammoths and mastodons. *Paleobiology*, 46(1), 41-57.
207. Speijer, R.P., Päläike, H., Hollis, C.J., Hooker, J.J., & Ogg, J.G. (2020). The paleogene period. *Geologic time scale 2020*, 1087-1140.
208. Stigloher, J., Decker, M., Körner, H.S., Tanabe, K., Moriyama, T., Taniguchi, T., ... & Back, C.H. (2016). Snell's law for spin waves. *Physical review letters*, 117(3), 037204.
209. Umeda, K., Ninomiya, A., & McCrank, G.F. (2008). High ^3He emanations from the source regions of recent large earthquakes, central Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(12).
210. Varga, P., & Grafarend, E. (2019). Influence of tidal forces on the triggering of seismic events. *Geodynamics and Earth Tides Observations from Global to Micro Scale*, 55-63.
211. Wall, S.D. (1981). Analysis of condensates formed at the Viking 2 Lander site: The first winter. *Icarus*, 47(2), 173-183
212. Watts, A.B. (2001). *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. Cambridge University Press.



213. **Whittington, H.B., Briggs, D.E.G.** (1985). The largest Cambrian animal, *Anomalocaris*, Burgess Shale, British-Columbia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 309(1141), 569-609.
214. **Williams, M.A.J., Ambrose, S.H., van der Kaars, S., Ruehleemann, C., Chattopadhyaya, U., Pal, J. & Chauhan, P.R.** (2009). Environmental impact of the 73 ka Toba super-eruption in South Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284, 3-4.
215. **Wilson, J.P., White, J.D., Montañez, I.P., DiMichele, W.A., McElwain, J.C., Poulsen, C.J., & Hren, M.T.** (2020). Carboniferous plant physiology breaks the mold. *New Phytologist*, 227(3), 667-679.
216. **Wing, S.L., & Boucher, L.D.** (1998). Ecological aspects of the Cretaceous flowering plant radiation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 379-421.
217. **Woodman, P., McCarthy, M., & Monaghan, N.** (1997). The Irish quaternary fauna project. *Quaternary Science Reviews*, 16(2), 129-159.
218. **Wu, Z., & Hu, M.** (2019). Neotectonics, active tectonics and earthquake geology: terminology, applications and advances. *Journal of Geodynamics*, 127, 1-15.
219. **Yao, J.** (1992). Global Jurassic floras and climate. *The Paleontological Society Special Publications*, 6, 320-320.
220. **Young, G.C.** (2010). Placoderms (armored fish): dominant vertebrates of the Devonian period. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38, 523-550.
221. **Yun, C.** (2019). Comments on the ecology of Jurassic theropod dinosaur *Ceratosaurus* (Dinosauria: Theropoda) with critical reevaluation for supposed semiaquatic lifestyle. *Volumina Jurassica*, 17(1).
222. **Zabarinskaya, L.P., Sergeyeva, N.A., Rashidov, V.A., Nisilevich, M.V., & Krylova, T.A.** (2021). Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone. *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*, 411-428.
223. **Zachos, J.C., Lohmann, K.C., Walker, J.C., & Wise, S.W.** (1993). Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A marine perspective. *The Journal of Geology*, 101(2), 191-213.
224. **Zahradnik, J.** (1989). Simple method for combined studies of macroseismic intensities and focal mechanisms. *Pure and applied geophysics*, 130, 83-97.
225. **Zheng, H., Fan, J., Zhao, D., Li, C., Dong, D., Zhang, G., & Wang, X.** (2020). A new method to estimate ocean-bottom-seismometer orientation



-
- using teleseismic receiver functions. *Geophysical Journal International*, 221(2), 893-904.
226. **Zhu, T., Sun, J., Gei, D., Carcione, J.M., Cance, P., & Huang, C.** (2019). Hybrid multiplicative time-reversal imaging reveals the evolution of microseismic events: Theory and field-data tests. *Geophysics*, 84(3), KS71-KS83.
227. **Ziegler, A.M.** (1990). Phytogeographic patterns and continental configurations during the Permian Period. *Geological Society, London, Memoirs*, 12(1), 363-379.

ДОДАТКИ



Відповіді до контрольних запитань і кросвордів:

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| 1. Мохоровичич | 33. Ендогенні |
| 2. Леманн | 34. Екзогенні |
| 3. Лігосфера | 35. Вода |
| 4. Астеносфера | 36. Олімп |
| 5. Буллард | 37. Тоба |
| 6. Магнетизм | 38. Тамбора |
| 7. Гілберт | 39. Палеореко́нструкція |
| 8. Залізо | 40. Амброуз |
| 9. Гідро́ген | 41. Спре́дінг |
| 10. Електромагнетизм | 42. Субдукція |
| 11. Нью́тон | 43. Мохо |
| 12. Диференціа́ція | 44. Ко́льська |
| 13. Ізоста́зія | 45. Мохоровичич |
| 14. Пра́тт | 46. Міланкович |
| 15. Ері | 47. Ексцентриситет |
| 16. Зоряна | 48. Пре́цесія |
| 17. Галактичний | 49. Ке́ппен |
| 18. Атра́ктора | 50. Ма́лий |
| 19. Релі́ктове | 51. Ві́кінг |
| 20. Оріє́нтира | 52. Ві́тер |
| 21. Веге́нр | 53. Уто́пія |
| 22. Стабі́льними | 54. Ка́менистий |
| 23. Активними | 55. Сейсмо́метр |
| 24. Конвекці́йних | 56. Ката́рхей |
| 25. Панге́я | 57. Да́рвін |
| 26. Сейсмофока́льна | 58. Метеорити |
| 27. Беньо́фф | 59. Фі́шер |
| 28. Вада́ті | 60. Міся́чний |
| 29. Га́л | 61. Стародавній |
| 30. Торо́си | 62. Прока́ріоти |
| 31. Гравіта́ція | 63. Ваальба́ра |
| 32. Виві́рювання | 64. Стромато́літи |



-
- | | |
|-------------------|---------------------|
| 65. Кратон | 100. Пелікозаври |
| 66. Родинія | 101. Пангея |
| 67. Авлакоген | 102. Лабіринтодonti |
| 68. Чарнії | 103. Плезіозаври |
| 69. Едіакарська | 104. Проклофони |
| 70. Кріогеній | 105. Псевдозухії |
| 71. Водорості | 106. Стегозавр |
| 72. Трилобіти | 107. Птеродактиль |
| 73. Аномалокаріс | 108. Іхтіозаври |
| 74. Гондвана | 109. Археоптерикс |
| 75. Каледонська | 110. Брахіозавр |
| 76. Магматизмом | 111. Квіткові |
| 77. Спекотним | 112. Тиранозавр |
| 78. Ракоскорпіони | 113. Гесперорніс |
| 79. Панцирні | 114. Ссавців |
| 80. Золота | 115. Стиракозаври |
| 81. Лаврентія | 116. Сумчасті |
| 82. Табуляти | 117. Еогіпус |
| 83. Ворбольтєла | 118. Уїнтатерій |
| 84. Ортоцераси | 119. Палеомастодонт |
| 85. Псилофіти | 120. Креодонтів |
| 86. Голонасінні | 121. Мегатерій |
| 87. Дунклеостевс | 122. Мегалоцерос |
| 88. Стегоцефал | 123. Дінорніс |
| 89. Амоноїдеї | 124. Шаблезубий |
| 90. Кистипері | 125. Беринговий |
| 91. Каламіти | 126. Гюнцьке |
| 92. Меганєвра | 127. Вюрмське |
| 93. Едафозавр | 128. Архіпєлага |
| 94. Кордаїти | 129. Людина |
| 95. Вугілля | 130. Носорогом |
| 96. Зональність | 131. Китай |
| 97. Котилозаври | 132. Сорок |
| 98. Звірозубі | 133. Конрад |
| 99. Вимирання | 134. Чєккі |



- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 135. Сейсмоскоп | 166. Геодинамічний |
| 136. Меркаллі | 167. Геофізичному |
| 137. Три | 168. Гідрогеодеформаційне |
| 138. Плейстосейстова | 169. Деформаційному |
| 139. Болт | 170. Геохімічному |
| 140. Ріхтер | 171. Тихоокеанське |
| 141. Конструктивна | 172. Африканський |
| 142. Реконструктивна | 173. Кракатау |
| 143. Деструктивна | 174. Ісландії |
| 144. Релаксаційна | 175. Базальтів |
| 145. Рейда | 176. Мікросейсми |
| 146. Ріхтеру | 177. Сейші |
| 147. Рікітаке | 178. Цунамі |
| 148. Форшок | 179. Літуїя |
| 149. Магнітуди | 180. Лопатка |
| 150. Могі | 181. Рифтові |
| 151. Ізосейсти | 182. Експлозія |
| 152. Лінеамент | 183. Вулканотектонічні |
| 153. Вогнище | 184. Тихому |
| 154. Макросейсмічне | 185. Нахиломір |
| 155. Потенційна | 186. Туреччині |
| 156. Переломлюється | 187. Залишкові |
| 157. Поздовжні | 188. ГобіАлтайський |
| 158. Поперечні | 189. Страх |
| 159. Годограф | 190. Цунамі |
| 160. Снелюса | 191. Шансі |
| 161. Маятник | 192. Неаполітанський |
| 162. Сейсмореєструючий | 193. Мерчісонський |
| 163. Аналоговій | 194. Скоп'є |
| 164. Цифровій | 195. Перу |
| 165. Лазер | |



Відповіді до тестів:

- § 1.1 – 1 – в; 2 – г; 3 – б; 4 – г; 5 – б.
§ 1.2 – 6 – г; 7 – б; 8 – в; 9 – а; 10 – а.
§ 1.3 – 11 – г; 12 – б; 13 – в; 14 – а; 15 – а.
§ 1.4 – 16 – в; 17 – в; 18 – а; 19 – г; 20 – а.
§ 1.5 – 21 – г; 22 – а; 23 – б; 24 – в; 25 – г.
§ 1.6 – 26 – б; 27 – в; 28 – б; 29 – г; 30 – а.
§ 1.7 – 31 – б; 32 – а; 33 – в; 34 – б; 35 – г.
§ 1.8 – 36 – в; 37 – г; 38 – б; 39 – а; 40 – г.
§ 1.9 – 41 – б; 42 – а; 43 – б; 44 – в; 45 – б.
§ 1.10 – 46 – в; 47 – а; 48 – в; 49 – а; 50 – б.
§ 1.11 – 51 – г; 52 – в; 53 – б; 54 – б; 55 – а.
- § 2.1 – 56 – г; 57 – а; 58 – в; 59 – б; 60 – б.
§ 2.2 – 61 – г; 62 – в; 63 – б; 64 – а; 65 – а.
§ 2.3 – 66 – в; 67 – б; 68 – а; 69 – г; 70 – а.
§ 2.4 – 71 – г; 72 – в; 73 – б; 74 – а; 75 – б.
§ 2.5 – 76 – в; 77 – в; 78 – б; 79 – а; 80 – б.
§ 2.6 – 81 – г; 82 – а; 83 – в; 84 – г; 85 – б.
§ 2.7 – 86 – в; 87 – б; 88 – а; 89 – г; 90 – а.
§ 2.8 – 91 – в; 92 – в; 93 – а; 94 – б; 95 – г.
§ 2.9 – 96 – в; 97 – б; 98 – а; 99 – г; 100 – а.
§ 2.10 – 101 – в; 102 – в; 103 – б; 104 – а; 105 – б.
§ 2.11 – 106 – в; 107 – а; 108 – б; 109 – г; 110 – б.
§ 2.12 – 111 – б; 112 – а; 113 – а; 114 – г; 115 – б.
§ 2.13 – 116 – в; 117 – в; 118 – б; 119 – б; 120 – а;
§ 2.14 – 121 – б; 122 – в; 123 – а; 124 – б; 125 – г.
§ 2.15 – 126 – б; 127 – г; 128 – в; 129 – г; 130 – а.
- § 3.1 – 131 – в; 132 – б; 133 – в; 134 – а; 135 – г.
§ 3.2 – 136 – б; 137 – в; 138 – б; 139 – в; 140 – б.
§ 3.3 – 141 – г; 142 – б; 143 – б; 144 – в; 145 – а.
§ 3.4 – 146 – в; 147 – а; 148 – а; 149 – г; 150 – в.
§ 3.5 – 151 – а; 152 – а; 153 – в; 154 – г; 155 – а.
§ 3.6 – 156 – а; 157 – б; 158 – в; 159 – г; 160 – а.
§ 3.7 – 161 – б; 162 – г; 163 – б; 164 – в; 165 – а.
- § 4.1. – 166 – а; 167 – г; 168 – б; 169 – в; 170 – в.
- § 5.1 – 171 – б; 172 – б; 173 – в; 174 – г; 175 – б.
§ 5.2 – 176 – в; 177 – г; 178 – г; 179 – б; 180 – б.
§ 5.3 – 181 – а; 182 – в; 183 – б; 184 – в; 185 – б.
- § 6.1 – 186 – в; 187 – б; 188 – б; 189 – г; 190 – в.
§ 6.2 – 191 – в; 192 – б; 193 – в; 194 – г; 195 – в.



**Покликання на візуалізовані параграфи
на авторському YouTube-каналі «Цілком природно»:**

§ 1.1. Що ми знаємо про внутрішню будову Землі?



§ 1.2. Що таке планетні магнітні поля?



§ 1.3. Чому планети сферичні?



§ 1.4. Як швидко рухається Земля?



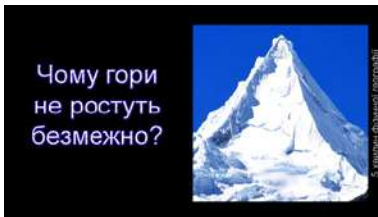


Продовження додатка В

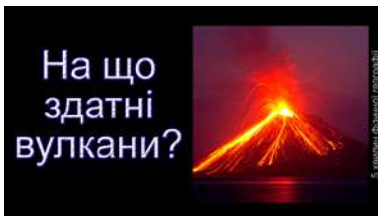
§ 1.5. Яка сила схована в надрах Землі?



§ 1.7. Чому гори не ростуть безмежно?



§ 1.8. На що здатні вулкани?



1.9. Як виверження Тонга об'єднує Мохо та стратосферу?





§ 1.10. Що змінюють цикли Міланковича?



§ 2.1. Яким був догеологічний етап розвитку Землі?



§ 2.2. Як еволюціонувала Земля в археї?



§ 2.3. Яким був найдовший еон Землі – протерозой?





Продовження додатка В

§ 2.4. Як змінилася Земля в кембрійському періоді?



§ 2.5. Чим особливий ордовицький період?



§ 2.6. Що відбувалось у силурійському періоді?



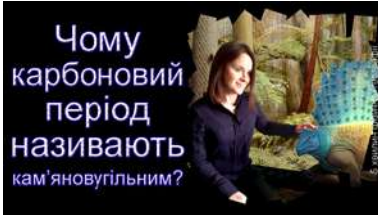
§ 2.7. Чому девон називають періодом риб?





Продовження додатка В

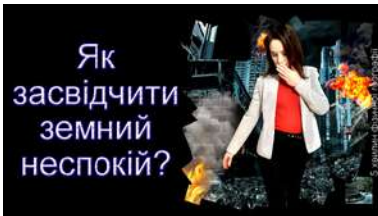
§ 2.8. Чому карбоновий період називають кам'яновугільним?



§ 2.9. Чому пермський період катастрофічний?



§ 3.1. Як засвідчити земний неспокій?



Навчальне видання

Кирилюк Сергій Миколайович

ЗЕМЛЯ І ЗЕМЛЕТРУСИ

Навчально-методичний посібник

Набір та комп'ютерна верстка *С.М. Кирилюк*
Літературний редактор *О.В. Колодій*
Дизайн обкладинки *С.М. Кирилюк*

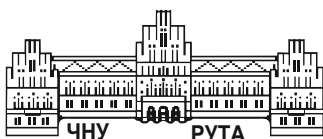
Підписано до друку 28.12.2023. Формат 60 x 84/16.

Папір офсетний. Друк різнографічний.

Ум.-друк. арк. 24,0. Обл. вид. арк. 22,3. Зам. Н-101.

Видавництво та друкарня Чернівецького національного
університету 58002, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.



ՀԿՄ ՆԱԽԱՐԱՐԱՆ
ՀԱՅԿԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ
ՆԱԽԱՐԱՐԱՆ

ISBN 978-966-423-829-5



9 789664 238295

