

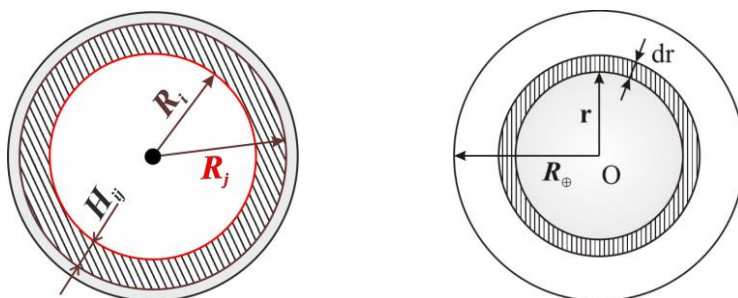
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА



В.В. Фурман, Ю.М. Віхоть, О.М. Павлюк

**ОСНОВИ ГЕОФІЗИКИ**  
(фізика Землі)

**Навчальний посібник з практикуму**  
для студентів геологічного факультету  
ЛНУ імені Івана Франка



**Основи геофізики (фізика Землі):** навчальний посібник з практикуму для студентів геологічного факультету ЛНУ імені Івана Франка / укл. : В.В. Фурман, Ю.М. Віхоть, О.М. Павлюк. – Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2016. – 104 с.

У навчальному посібнику з практикуму викладена навчальна програма дисципліни «Основи геофізики», відповідно до якої подані методичні рекомендації та *фізико-математичні основи підходу* до розв'язання практичних завдань з фізики Землі. Навчальний посібник містить приклади та способи розв'язання практичних задач з фізики Землі, рекомендовану літературу, інформаційне забезпечення, додатки з довідковими таблицями, низкою ілюстрацій для кращого розуміння та сприйняття практичного матеріалу студентами.

Для студентів ЛНУ імені Івана Франка напрямів підготовки 6.040103 – геологія і 6.040106 – екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування стаціонарної й заочної форми навчання. Може бути корисним для викладачів вищих навчальних закладів під час проведення ними практичних курсів з дисциплін «Основи геофізики», «Фізика Землі» та ін.

**Укладачі:** кандидат фізико-математичних наук, доцент  
***В.В. Фурман***  
кандидат геологічних наук, асистент  
***Ю.М. Віхоть***  
асистент ***О.М. Павлюк***

**Рецензент:** доктор фізико-математичних наук, професор  
***Д.В. Малицький***

**Відповідальний за випуск:** доктор геологічних наук, професор  
***М.М. Павлунь***

**Редактор:** *Лариса Сідлович*

**Відповідальний за друк:** *Олена Старунько*

*Затверджено  
на засіданні Вченої ради  
геологічного факультету  
(протокол № 29/2 від 17.02.2016 р.)*

## ВСТУП

Аналізуючи важливість *фізики чи фізики Землі у науках про Землю*, перш за все необхідно звернути увагу на одне загальне питання і поділитися міркуваннями про те, *яке ж місце займає саме фізика Землі у геологічних науках?* Авторі переконані, що вона має бути серед тих природничих наук, вивченню яких студенти присвячують роки навчання, а науковці – все своє наукове життя. Хотілось би кожному із тих, хто причетний до геології, продемонструвати матеріал, на основі якого можна переконатися, що фізика Землі, яка є частиною геофізики, потрібна геологам постійно. Адже те, що необхідно знати геологам з фізики Землі, ще не раз буде повторюватися під час вивчення інших спеціальних геологічних дисциплін.

Коли ми стверджуємо, що геологам потрібна фізика Землі, то маємо на увазі не тільки те, що вони мають бути ознайомлені з окремими явищами і законами, з якими безпосередньо стикаються на практиці. Геологам потрібне володіння цим предметом у його сукупності. Тобто фахівцю будь-якої геологічної спеціальності потрібне знання фізики Землі як суцільної дисципліни з її специфічною методикою. Для цього треба знати не лише експериментальну її частину, але й теорію, та володіти нею.

Саме курс «*Основи геофізики*», що призначений для студентів другого та третього курсів геологічного факультету, які навчаються за напрямками підготовки 6.040103 – геологія та 6.040106 – екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування денної й заочної форми навчання, і написаний відповідно до мети й завдань навчальний посібник\* з прикладами задач і способами їхнього розв’язання на основі фізико-математичних підходів спробує дати відповідь на питання – *яке ж місце фізики Землі у науках про Землю і для чого геологу чи екологу необхідно знати фізику Землі?*

---

\*Електронну версію навчального посібника можна завантажити зі сайтів:

[https://www.researchgate.net/profile/Vitaly\\_Fourman](https://www.researchgate.net/profile/Vitaly_Fourman)

[https://www.researchgate.net/profile/Yuriy\\_Vikhot3](https://www.researchgate.net/profile/Yuriy_Vikhot3)

<http://vikhot-yuriy.jimdo.com/> або <http://yuvik.jimdo.com/>

# 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО НАВЧАЛЬНИЙ КУРС

**Метою навчального курсу «Основи геофізики»** є сформулювати й дати загальне уявлення про геофізичні поля, процеси для дослідження земної кори і Землі в цілому, показати, які фундаментальні фізичні властивості масивів гірських порід лежать в основі геофізичних досліджень. Курс має пробудити зацікавлення до майбутньої спеціальності як інтегрованої науки, заснованої на використанні новітніх досягнень геології, фізики, математики й інформатики. Геофізика та власне фізика Землі досліджує ті ж самі явища, що й інші науки про Землю (геологія, географія і т.д.), але відрізняється від них тим, що в ній у значно більшому обсязі використовуються методи фізико-математичного аналізу явищ природи та земних структур.

**Завдання курсу:** викласти предмет і метод геофізики як науки, що дає опис природи фізичних полів Землі, властивостей і закономірностей їхнього розподілу в просторі та часі; показати місце геофізики серед інших наук про Землю. Необхідно дати загальне уявлення про геофізику як про засіб вирішення фундаментальних і прикладних задач із вивчення будови й еволюції Землі, для вирішення екологічних та інженерних проблем у пошуках, розвідуванні й експлуатації родовищ корисних копалин.

**Предметом навчального курсу** є опис фізичних процесів, що відбуваються у надрах нашої планети, з метою пояснення сучасної будови і стану Землі, її формування й еволюції. У цьому геофізика є теоретичною основою для цілої низки геолого-геофізичних дисциплін. Курс складається з двох частин – лекційної та практичної. На лекціях даються теоретичні основи фізики Землі. На лабораторних заняттях розглядаються методи розв'язання задач.

**У результаті вивчення цієї дисципліни студент повинен знати:**

- ✓ будову, склад, основні оболонки Землі;
- ✓ сейсмологію, гравітаційне і магнітне поле Землі;
- ✓ реологічні характеристики Землі;
- ✓ методи вивчення внутрішньої будови Землі та її зовнішніх полів;
- ✓ методи побудови моделей Землі;
- ✓ історію розвитку й еволюцію Землі;
- ✓ фізичні характеристики і фізичні процеси та їхній зв'язок з геотектонікою і геодинамікою;

- ✓ методи вибору й обґрунтування раціонального комплексу геофізичних методів у вирішенні різних геологічних задач;
- ✓ практичне використання геологічних і геофізичних методів при вирішенні геологічних задач, використання польового геофізичного устаткування;

***мати уявлення про:***

- ✓ фізико-математичні основи гравірозувдки, магніторозвідки, сейсморозувдки, електророзувдки, ядерної геофізики;
- ✓ методи геофізичних досліджень, правила та умови виконання геофізичних робіт;

***уміти:***

- ✓ аналізувати геологічні процеси у призмі фізичних явищ і процесів;
- ✓ застосовувати на практиці методи геофізичних досліджень під час пошуків і розвідування корисних копалин, під час вивчення глибинної будови Землі й аналізу геологічних структур на глибині.

Курс «**Основи геофізики**» є обов'язковим навчальним курсом, який вивчається студентами другого курсу геологічного факультету. Курс розрахований на 288 години і вивчається у першому та другому семестрах навчального року на другому курсі, з них виокремлено такі частини: лекційні та лабораторні заняття – по 64 години, самостійні завдання – 160 годин.

## 2. ПРОГРАМА ЛЕКЦІЙНОГО КУРСУ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ГЕОФІЗИКИ»

Наведено навчальну програму з лекційного курсу «Основи геофізики» (табл. 2.1), що розроблена на кафедрі фізики Землі Львівського національного університету імені Івана Франка. В основі курсу виокремлено дві основні частини. Перша частина – **Фізико-математичні основи геофізичних досліджень**, що відображає фізико-математичний підхід до розв’язання геофізичних задач як ключ до розуміння місця та важливості фізики Землі в науках про Землю, а також необхідності викладання цього курсу на геологічному факультеті для майбутніх фахівців з геології, екології. Друга частина – **Геофізичні методи дослідження геологічної будови земної кори**, що вже на другому курсі ознайомлює студентів з основи геофізики і показує її роль під час дослідження глибинної будови земної кори, що необхідне для пошуку та розвідування родовищ корисних копалин.

Таблиця 2.1

### Програма лекційного курсу «Основи геофізики»

<b>1. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>
ВСЕСВІТ І ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ КОНСТАНТИ ПРИРОДИ
СОНЯЧНА СИСТЕМА І ЗЕМЛЯ
ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗЕМЛІ
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБОЛОНОК ЗЕМЛІ
ГЛОБАЛЬНІ ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ЗЕМЛІ
ГІДРОСФЕРА
ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ
ФІЗИЧНІ ПОЛЯ ЗЕМЛІ
ГРАВІТАЦІЙНЕ ПОЛЕ. ГРАВІТАЦІЙНА РОЗВІДКА
<b>2. ГЕОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕОЛОГІЧНОЇ БУДОВИ ЗЕМНОЇ КОРИ</b>
КЛАСИФІКАЦІЯ ГЕОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ПО ФІЗИЧНИХ ОСНОВАХ, ПО ОБ’ЄКТАХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПО РІВНЯХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОЛІВ ЗЕМЛІ.
ПЕТРОФІЗИКА
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОЛОНОК ЗЕМЛІ
ГЕОТЕРМІЯ
СЕЙСМІЧНІСТЬ І БУДОВА ЗЕМЛІ. СЕЙСМОРОЗВІДКА
МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ ТА ПЛАНЕТ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ
МАГНІТНА РОЗВІДКА
ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ. ЕЛЕКТРОРОЗВІДКА
ЯДЕРНА ГЕОФІЗИКА

### 3. ТЕМИ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ПРАКТИЧНОГО КУРСУ

Практичний курс з «**Основ геофізики**», відповідно до кількості семестрів, складається з двох частин, що наведені нижче на схемі. У першій частині основна увага приділена **фізико-математичним основам геофізичних методів досліджень**, що викладаються у першому (III навчальному) семестрі на другому курсі. У три блоки зібрані завдання (задачі, відповіді на теоретичні питання, питання для самоконтролю), що містять інформацію та дають знання про фізичні властивості Землі й інших космічних об'єктів, глобальні фізичні процеси і загальні уявлення про фізичні поля Землі. На прикладі цих завдань демонструється роль фізики Землі в науках про Землю та необхідність оперування такими знаннями з фізики Землі для геологів будь-яких спеціальностей. Друга частина – **геофізичні методи досліджень геологічної будови земної кори**.

#### 1. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ  
ВЛАСТИВОСТІ ЗЕМЛІ,  
МІСЯЦЯ, СОНЦЯ ТА ІНШИХ  
КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

ГЛОБАЛЬНІ ФІЗИЧНІ  
ПРОЦЕСИ В ЗЕМЛІ

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ  
ВЗАЄМОДІЇ ТА ФІЗИЧНІ  
ПОЛЯ

#### 2. ГЕОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕОЛОГІЧНОЇ БУДОВИ ЗЕМНОЇ КОРИ

#### 4. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДЛЯ ГЕОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР І ПРОЦЕСІВ В ОБОЛОНКАХ ЗЕМЛІ

Нерідко трапляється ситуація, коли студент добре знає звичайну теорію курсу фізики чи фізики Землі та володіє лекційним матеріалом, проте зовсім не вміє розв'язувати задачі з фізики, а тим більше з фізики Землі. Деякі студенти зізнаються, що вивчення теорії у них не викликає жодних труднощів, оскільки вони добре запам'ятовують і розуміють формули фізичних законів, визначення. Але як тільки справа доходить до розв'язання задач, вони потрапляють у «глухий кут». Прочитавши умови деяких задач, вони навіть не знають, з чого починати розв'язування. Іноді, розв'язуючи задачу, занурившись у нетрі теорії, написавши багато формул, законів, рівнянь, студент не розуміє, чи розв'язав він вже задачу, чи ще далеко до її розв'язку тощо. Часто, правильно розв'язавши задачу в загальному вигляді, студенти роблять помилки вже у розрахунках, серед яких найпоширенішими є неузгодженість одиниць вимірювання, записаних у різних системах. А неправильна числова відповідь задачі (для деяких типів задач) – це все ж таки неправильна відповідь, і тому такий розв'язок задачі вважається неправильним.

Звичайно, навчитися розв'язувати задачі з фізики Землі непросто. Можна добре знати теорію і не вміти розв'язувати навіть найпростіші задачі з фізики чи фізики Землі. Це не випадково. Щоб успішно розв'язувати задачі, знання теорії є необхідним, але недостатнім. Необхідно (крім конкретних знань) оволодіти ще так званими *узагальненими знаннями*. Зазвичай вони набуваються з досвідом, у процесі розв'язання задач, загалом наприкінці вивчення курсу загальної фізики. Втім, іноді вони не засвоюються зовсім.

Узагальнені знання викладені переважно у перших двох підрозділах нашого посібника, що наведені нижче. У них можна дізнатися, що таке насамперед *фізична задача*, з чого треба починати розв'язок задач з фізики та з фізики Землі, чим завершується цей розв'язок і багато іншого з методичної частини.

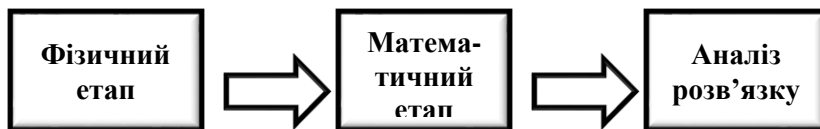
Основу узагальнених знань становлять *фундаментальні поняття* фізики, що мають методологічний характер. Фундаментальних методологічних понять фізики чи фізики Землі порівняно небагато. У цьому посібнику з розв'язання задач з фізики Землі використовуємо такі вісім понять: *фізична система, фізична*



*величина, фізичний закон, стан фізичної системи, взаємодія, фізичне явище, ідеальні об'єкти й ідеальні процеси, фізична модель.* Ці поняття взаємопов'язані і, таким чином, складають систему. Особливе значення має зв'язок фізичного явища зі всіма іншими фундаментальними поняттями. Використання системи фундаментальних понять дає змогу сформулювати найважливіше визначення теоретичної фізичної задачі як *фізичне явище, у якому невідомі які-небудь зв'язки та величини.*

**Розв'язати задачу з фізики Землі / геофізики – це означає відновити невідомі зв'язки, визначити шукані фізичні величини та проаналізувати геологічний процес як набір фізичних явищ.**

Таке визначення має дуже важливу методичну роль. Якщо задача з фізики Землі / геофізики відображає насамперед будь-яке фізичне явище, а вже потім геологічний процес чи геологічне явище (або сукупність фізичних явищ і геологічних процесів), то необхідно не лише мати уявлення про ці явища та процеси (конкретні знання з геології), але й уміти аналізувати будь-яке геологічне явище та процес (використовуючи вже набуті узагальнені знання). Аналіз природного геологічного явища та процесу починається з вибору й аналізу фізичної системи і завершується складанням замкненої системи рівнянь у результаті застосування відповідних фізичних законів. Звідси безпосередньо впливає поділ процесу розв'язання поставленої задачі з фізики Землі на три етапи: *фізичний* (він завершується, якщо складена замкнена система рівнянь), *математичний* (його мета – отримання розв'язку в загальному та числовому вигляді) та етап *аналізу* розв'язку. Звідси природно впливає необхідність у створенні системи *розв'язку задач з фізики чи фізики Землі* як системи загальних орієнтирів для здійснення самостійної діяльності того, хто розв'язує задачу на кожному з цих етапів.



Єдиного методу розв'язання задач з фізики Землі немає. Проте є *загальний підхід (як система методів) до розв'язання будь-якої задачі з фізики Землі.*

#### 4.1. Деякі загальні поняття фізики Землі / основ геофізики

Загальний підхід до розв'язку довільної задачі з фізики Землі базується на деяких фундаментальних поняттях власне фізики. Ці поняття є загальновідомими. У цьому підрозділі вони наведені з метою відзначити деякі їхні специфічні ознаки. Одним із таких центральних понять є поняття фізичної системи.

**Фізична система – це сукупність фізичних об'єктів, при цьому навіть один фізичний об'єкт може бути фізичною системою.**

Розв'язок фізичної задачі пов'язаний із дослідженням будь-якої фізичної системи. Надалі побачимо, що вибір і дослідження фізичної системи – це початок аналізу фізичної ситуації задачі. Фізичні об'єкти системи мають деякі фізичні властивості й можуть брати участь у різноманітних фізичних процесах. Для характеристики властивостей фізичних об'єктів і фізичних процесів вводяться різні *фізичні величини*.

Досить важливим є також поняття стану *фізичної системи*. Загальне поняття стану довільної фізичної системи відносно складне. Якщо фізична система складається з однієї частинки, то її механічний стан визначається шістьма величинами: трьома координатами ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) і трьома компонентами імпульсу частинки ( $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$ ).

**Тіла фізичної системи взаємопов'язані як між собою, так і з зовнішніми об'єктами.** Цей спільний зв'язок проявляється у взаємодії фізичних об'єктів. Взаємодія – найважливіша властивість будь-яких фізичних об'єктів. Вона обумовлена їхньою внутрішньою будовою. У фізиці відомі чотири основних види взаємодій між елементарними частинками: *сильна, електромагнітна, слабка та гравітаційна*. У цій книзі не будуть використовуватися ні сильні, ні слабкі взаємодії. Взаємодія може змінити або положення фізичної системи, або її стан.

**Процес зміни положення або стану фізичної системи називають фізичним явищем.**

Таке поняття в загальному підході до розв'язку довільної задачі з фізики Землі є найважливішим. У природі відбувається багато різноманітних фізичних явищ: рух планет і зірок, грім і блискавка, випаровування води та випадання роси, коливання атомів і рух молекул, випромінювання та поглинання світла тощо. Не так просто з'ясувати навіть якісну картину того чи іншого природного явища, особливо фізичного.

*Аналіз фізичного явища доцільно починати з вибору та дослідження фізичної системи, бо саме явище відбувається в будь-якій системі.*

У процесі аналізу фізичних об'єктів системи корисно з'ясувати, до яких ідеальних об'єктів вони належать, які мають властивості, з якими тілами та яким чином вони можуть взаємодіяти, якими можуть бути результати і наслідки цієї взаємодії. Фізичне явище характеризується зміною фізичних величин. Ці величини пов'язані між собою.

Відомо, що *необхідний і стійкий зв'язок або залежність між деякими фізичними величинами відображаються у фізичному законі.*

У кожному фізичному законі можна розглядати множину сторін або граней (необхідність, об'єктивність, фізичний зміст тощо). Надалі нам особливо необхідними будуть дві специфічні сторони фізичного закону: *умови (або межі) застосовності й метод застосування закону.* Будь-який фізичний закон відносний у тому сенсі, що він правильний лише за певних умов.

*Сукупність цих обмежень назвемо умовами (або межами) застосовності закону.* Якщо хоча б одна із цих умов порушена, то даний закон застосувати не можна, він стає неправдивим. Наприклад, другий закон Ньютона у формі  $\vec{F} = m\vec{a}$  справедливий, якщо виконуються такі умови: рух тіла розглядається стосовно інерційної системи відліку, тіло має бути матеріальною точкою, маса тіла – постійною, швидкість тіла повинна бути значно меншою від швидкості світла у вакуумі тощо. При порушенні хоча б однієї з цих умов другий закон Ньютона у записаній вище формулі застосувати не можна.

При розв'язанні задач з фізики Землі недостатньо знати відповідний закон (його фізичний зміст, умови застосовності тощо), необхідно ще вміти його застосовувати у конкретних умовах. **Для кожного фізичного закону існує метод (алгоритм) його застосування.** Наприклад, щоби правильно записати другий закон Ньютона у формі  $\vec{F} = m\vec{a}$ , необхідно виконати певну систему дій. *По-перше*, перевірити, чи виконані умови застосовності цього закону (якщо хоча б одна з них порушена, то закон застосовувати не можна). *По-друге*, вибрати інерційну систему відліку (даний закон застосовується лише стосовно таких систем відліку). *По-третє*, знайти всі сили, що діють на дане тіло (у закон входить величина  $F$  – геометрична сума всіх сил, що діють на тіло масою  $m$ ). *По-четверте*, визначити проекції всіх сил на осі координат (другий

закон Ньютона – векторний закон). *По-н'яте*, знайти алгебраїчну суму проєкцій усіх сил на кожную вісь координат ( $\Sigma F_x$ ,  $\Sigma F_y$ ,  $\Sigma F_z$ ). Нарешті, *в-шостих*, записати другий закон Ньютона у вигляді системи трьох рівнянь:  $\Sigma F_x = ma_x$ ,  $\Sigma F_y = ma_y$ ,  $\Sigma F_z = ma_z$ , де  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  – проєкції вектора прискорення на осі  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ .

#### 4.2. Ідеалізація задач з фізики Землі / основ геофізики

Нехай у поставленій задачі є необхідні дані (повнота яких забезпечена) і треба визначити певні невідомі фізичні величини. Однак не це є головним у поставленій задачі. Найважливішим у такій задачі є те, що вона вже *ідеалізована*. Автор задачі вже ввів досить багато додаткових умов, що її спрощують. Вводячи ці умови та обмеження, він штучно відсікає зв'язки даного домінуючого фізичного явища з іншими явищами. Припускається також, що вплив деяких інших додаткових змінних величин є порівняно малим і ними можна знехтувати. Отже, **поставлена фізична задача – це задача про «чисте», «ідеалізоване» явище / процес**. Дуже часто у науці об'єктом розгляду слугує не «реальна річ», а її ідеальний образ. Це пояснюється тим, що реальні фізичні (а також геологічні) об'єкти і явища настільки складні та взаємопов'язані, що їхнє вивчення та кількісне дослідження з урахуванням усіх змінних величин, взаємозв'язків і взаємодій створило би нездоланні математичні труднощі. ***Розумна ідеалізація конкретних фізичних задач є найважливішою рисою фізики чи фізики Землі як науки.*** Без ідеалізації задач не можна розв'язати до кінця жодної конкретної задачі. Дуже часто спрощені умови й обмеження формулюються у самій задачі, але іноді вони наявні в задачі у прихованому чи неявному вигляді.

У різних задачах спрощені умови різноманітні, але ***спільним для всіх способів ідеалізації задачі є нехтування неістотними чи дургорядними зв'язками та взаємодіями.*** У зв'язку з цим виникає питання про *критерії* такого нехтування: *коли, за яких умов тим чи іншим зв'язком або взаємодією можна знехтувати, а за яких – ні?* Це питання тісно пов'язане з методом аналізу розв'язку задачі та методом оцінки, які детально будуть розглянуті нижче.

Найчастіше під час розв'язання задач використовують такі два способи ідеалізації: 1) *введення ідеальних фізичних об'єктів*; 2) *нехтування несуттєвими взаємодіями та процесами*. До останнього способу належить і введення ідеальних фізичних явищ та геологічних процесів.

Важливо відмітити, що у будь-якому ідеальному фізичному об'єкті лише нехтують певною його властивістю: насправді властивістю дане тіло володіє, але в конкретних умовах задачі ця властивість проявляє себе настільки слабо, що нею можна знехтувати.

У фізиці та фізиці Землі вводять багато ідеалізованих об'єктів (явищ, процесів тощо), що використовуються під час ідеалізації фізичних задач. Наведемо деякі з них:

- 1. Матеріальна точка.** *Фундаментальний і універсальний фізичний об'єкт. У понятті матеріальної точки нехтують геометричними розмірами тіла порівнянно з характерною відстанню, що розглядається у даній задачі.*
- 2. Абсолютно тверде тіло (або просто тверде тіло).** *У цьому ідеальному об'єкті нехтують можливою деформацією тіла.*
- 3. Абсолютно пружне тіло.** *Тут нехтують залишковою деформацією тіла. Вона в умовах конкретної задачі настільки мала, що її можна не брати до уваги. Важливо відмітити, що під час взаємодії абсолютно пружних тіл не відбувається перетворення механічної енергії на інші види енергії (тобто виконується закон збереження у механіці).*
- 4. Абсолютно непружне тіло.** *У цьому випадку нехтують здатністю тіл відновлювати початкову форму після деформації. Ця властивість у абсолютно непружного тіла практично не проявляється, і нею можна знехтувати.*

Приклади інших ідеальних об'єктів будуть наведені в подальшому.

Для другого способу ідеалізації або вводять ідеальні фізичні процеси, або нехтують несуттєвими фізичними процесами, явищами та взаємодіями. Прикладами ідеальних процесів є ізохорний, ізобарний, ізотермічний, адіабатний та інші процеси.

Досить часто, розв'язуючи конкретну задачу, нехтують змінною тієї чи іншої фізичної величини, припускаючи, що ця зміна мала. Наприклад, у задачі: *знайти дальність польоту артилерійського снаряду (початкова швидкість 600 м/с; опором тиску повітря знехтувати), випущеного під кутом 45 °*, всупереч добре відомому факту – залежності прискорення вільного падіння від висоти точки над поверхнею Землі – вважаємо, що прискорення постійне ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ). Але оскільки висота  $h$  підйому снаряда (кілька кілометрів) мала порівняно з радіусом Землі ( $R \approx 6400 \text{ км}$ ),

то припущення, що у даній задачі прискорення вільного падіння  $g$  постійна величина, є досить розумним.

Отже, **внаслідок ідеалізації та спрощення замість реального фізичного явища розглядають його схематичну модель.** Звичайно у моделі реального фізичного явища відображають лише головне й основне, беруть до уваги лише суттєві зв'язки та взаємодії, а замість реальних тіл розглядають різноманітні ідеальні об'єкти. Класифікація моделей фізичних явищ, вочевидь, збігається з класифікацією самих природних явищ. Отже, у змісті фізики залежно від властивостей фізичної системи та умов, у яких відбуваються різноманітні фізичні явища, можна виділити дві загальні моделі: модель класичних фізичних явищ (*класична модель*) і модель квантових фізичних явищ (*квантова модель*).

У цьому посібнику розглядаються лише класичні фізичні явища та відповідні їм моделі геологічних процесів, явищ і формування структур. Дуже часто успіх у розв'язку тої чи іншої задачі або проблеми з фізики Землі (чи геофізики) залежить від того, наскільки вдало вибрана ця модель.

#### **4.3. Класифікація задач з фізики Землі / основ геофізики**

Відомо, що класифікувати різноманітні об'єкти можна за будь-якими їхніми ознаками. Але найдосконалішою є *класифікація за суттєвими ознаками*. Фізичні задачі мають багато ознак. Для того, щоб отримати оптимальні класифікації задач з фізики Землі, необхідно виділити суттєві ознаки фізичної задачі. Отже: **що таке задача з фізики Землі? Які її суттєві ознаки?** Корисно поставити й низку інших питань: **коли і як виникає фізична задача? Що значить розв'язати задачу з фізики Землі? Які бувають задачі з фізики Землі / основ геофізики?** Ці питання не є такими простими, як може здатися на перший погляд, а навпаки, досить важливими для розуміння структури та призначення фізики Землі / основ геофізики для геологів та екологів різних вузьких спеціальностей.

Під час вивчення певного фізичного явища одні фізичні величини, що характеризують це явище, можуть бути відомими, а інші – ні. Якщо під час дослідження фізичного явища чи геологічного процесу людина знає про нього все (в рамках цього явища), то жодних питань і задач для нього не виникає. Задачі та питання виникають тоді, коли упродовж цього дослідження деякі фізичні величини, що характеризують дане явище, з якихось причин невідомі. Отже, задача формується під час вивчення фізичного явища / геологічного процесу, коли у цьому явищі / процесі

невідомі будь-які зв'язки, взаємодії, фізичні величини тощо. Таким чином, можна припустити таке визначення задачі з фізики Землі:

**Задача з фізики Землі / геофізики – це фізичне явище, точніше – його словесна модель (або сукупність фізичних явищ) із деякими відомими і невідомими фізичними величинами, що характеризують геологічні явища, процеси та формування структур.**

**Розв'язати задачу з фізики Землі / геофізики – це означає знайти (відновити) невідомі зв'язки, фізичні величини, показати вплив фізичних явищ на геологічний процес і формування структур тощо.**

З цих визначень, безперечно, впливають дві класифікації фізичних задач. Перша ґрунтується на відміні *методів* знаходження невідомих величин, а друга – враховує *зміст* фізичного явища чи геологічного процесу, які відображає кожна задача з фізики Землі.

Можливі два способи знаходження невідомих величин якого-небудь фізичного явища: *експериментальний* і *теоретичний*. У експериментальному методі на досвіді, шляхом вимірювань визначають невідомі величини. У теоретичному методі ці невідомі величини визначають шляхом фізичного аналізу даного явища, за допомогою відповідних фізичних законів, що керують цим явищем або процесом. Фізичні закони зв'язують між собою різноманітні фізичні величини, серед яких можуть опинитись як відомі, так і невідомі. Якщо в результаті застосування відповідних фізичних законів складена замкнена система рівнянь, у число невідомих якої входять і ті невідомі фізичні величини, які необхідно визначити, то після розв'язку цієї системи рівнянь дана задача може бути розв'язана теоретично (словесно). Із цих двох способів і впливає класифікація задач з фізики Землі / основ геофізики. Задачі можуть бути *експериментальними* та *теоретичними*.

**Задачу називають експериментальною, якщо для її розв'язання необхідно використовувати вимірювання.** Експериментальні задачі не будуть досліджуватись у цьому посібнику (їх зазвичай розглядають у лабораторному практикумі більше з курсу фізики та геофізики і набагато менше – з курсу фізики Землі чи нашого курсу основ геофізики).

**Теоретичною фізичною задачею назовемо фізичне явище / процес (або сукупність явищ / процесів) з деякими відомими і невідомими фізичними величинами, що**

характеризують геологічні явища / процеси чи формування структур, якщо таку задачу розв'язують, не застосовуючи вимірювань. У цьому посібнику будемо розглядати лише теоретичні задачі з фізики Землі, що викладені у курсі «Основи геофізики». Надалі для стислості будемо вживати словосполучення «теоретична задача».

Класифікацію теоретичних задач проведемо за двома найважливішими ознаками фізичної задачі, що сформульовані вище (задачу ставить і розв'язує людина, а задача виражає яке-небудь фізичне явище). За першою ознакою розділимо всі задачі на два класи: *непоставлені* та *поставлені*.

**Непоставленою** назвемо задачу, у якій або не забезпечена сукупність необхідних даних (за винятком табличних величин) для її розв'язку, або не проведена її ідеалізація, або немає ні того, ні іншого. Ідеалізація задачі проводиться вже самим студентом на основі знань, отриманих із лекційного курсу. Більш детально непоставлені задачі будуть розглядатися нижче.

**Натомість у поставленій задачі не лише забезпечена повнота величин і їхніх значень, необхідних для розв'язку, але й проведено процес ідеалізації.** Отже, поставлена задача – це певним чином «підготовлена» задача, що завжди матиме розв'язок.

Класифікацію поставлених задач проведемо на підставі другої суттєвої ознаки, що стверджує: задача виражає певне фізичне явище. За тими ж ознаками, що й фізичні явища, класифікуються і фізичні задачі: *до якого типу належить фізичне явище, що виражає дана задача, до того ж типу належить і відповідна задача*. Таким чином, яке фізичне явище, така відповідна цьому явищу і задача. За загальною ознакою всі поставлені задачі розділимо на *класичні* та *квантові*. Далі, кожен класичну (і, звичайно, квантову) задачу можна було би віднести за окремими ознаками до відповідного типу (аж до підрозділу за елементарними ознаками). Але навряд чи доцільно проводити таку більш детальну класифікацію задач з фізики Землі – не лише тому, що для цього попередньо довелося би викласти всю сукупність фізичних явищ (тобто цілий курс фізики), але і внаслідок того, що для студентів, які вже пройшли курс загальної фізики, вона може видатися досить громіздкою і, вочевидь, малокорисною у процесі розв'язання задач. Тому обмежимося вищенаведеною загальною класифікацією за двома узагальненими ознаками (непоставлені та поставлені; класичні та квантові задачі). Зауважимо: якщо аналіз фізичної системи, часто ще до кінцевого розв'язку, дає змогу визначити, є



задача класичною чи квантовою, які у ній наведені ідеальні об'єкти й ідеальні процеси, які взаємодії та їхні можливі наслідки тощо, то приналежність даної задачі до непоставленої або поставленої іноді можна встановити лише після її розв'язання.

Корисно ввести ще поняття про так звану *основну задачу*. Кожне фізичне явище / геологічний процес характеризується певною сукупністю фізичних величин. Ці величини пов'язані між собою деякими фізичними законами. Серед багатьох законів, що керують даним фізичним явищем / геологічним процесом, є один або кілька головних, фундаментальних. Знаходження фізичних величин, що входять у фундаментальні закони, формує зміст основної задачі фізичного явища. Далі, використовуючи другорядні закони, визначають усю сукупність фізичних величин, що характеризують дане явище чи процес. Можна стверджувати, що **будь-яка основна задача з курсу фізики Землі / основ геофізики полягає у знаходженні стану відповідної фізичної системи, яка характеризує геологічний процес чи явище, формування геологічних структур.**

#### **4.4. Етапи розв'язання поставленої задачі з фізики Землі**

У процесі розв'язання поставленої задачі корисно розрізнити три етапи: *фізичний, математичний і аналіз розв'язання*. Фізичний етап починається ознайомленням з умовами задачі й завершується складанням замкненої системи рівнянь, у число невідомих якої входять і шукані величини. Після складання замкненої системи рівнянь задача вважається фізично розв'язаною. Математичний етап починається розв'язанням замкненої системи рівнянь і закінчується отриманням числової відповіді. Цей етап можна розділити на два наступних:

- а) отримання розв'язку задачі у загальному вигляді,
- б) знаходження числової відповіді задачі.

Розв'язавши систему рівнянь, знаходять розв'язок задачі у загальному вигляді. Виконавши арифметичні обчислення, отримують числову відповідь задачі.

На математичному етапі майже відсутній фізичний елемент. Безумовно, математичний етап є менш важливим, ніж етап фізичний, але необхідно підкреслити, що він не є другорядним, особливо для певного типу задач, що потребують числового вираження (напр., радіус Землі, тиск і температура, густина земної кори, напруженість гравітаційного поля тощо). На жаль, іноді недооцінюють роль цього етапу, вважаючи, що його взагалі можна не проводити. Неправильно також вважати, що помилки, зроблені

на математичному етапі, є другорядними. Якщо під час розв'язання системи рівнянь або під час переведення одиниць з одної системи в іншу, або під час арифметичного обчислення зроблена помилка, розв'язок для певного типу задачі загалом виявиться неправильним (хоча більшість задач у цьому посібнику не потребують арифметичного обчислення).

З точки зору практики **задача розв'язана правильно лише у тому разі, коли отримані правильні загальна і числова відповіді**. Помилково математичний етап вважати другорядним ще й тому, що після нього повинен іти етап аналізу рішення. Останній етап узагалі не можна провести, якщо не отримана загальна та числова відповідь задачі (наприклад, для задач із визначення і порівняння напруженості гравітаційного поля на різних планетах, на полюсах чи екваторі, на вершинах гір чи в океанічних западинах тощо). Отже, для кінцевого розв'язання задачі з фізики Землі фізичний і математичний етапи є рівнозначно необхідними.

Заключним етапом, що настає після отримання розв'язку в загальному вигляді та числової відповіді, є етап аналізу отриманого розв'язку. На цьому етапі з'ясовують, як і від яких фізичних величин залежить знайдена величина, за яких умов ця залежність здійснюється тощо. На завершення аналізу загального розв'язку розглядають можливість постановки і розв'язання інших задач шляхом зміни та перетворення умов даної задачі. Іноді під час аналізу загального розв'язку методом теорії розмірності величин встановлюють правильність отриманого розв'язку. Зауважимо, що даний метод дає лише необхідну ознаку правильності розв'язку.

Під час аналізу числової відповіді часто досліджують:

а) розмірність отриманої величини;  
б) відповідність отриманої числової відповіді фізично можливим значенням шуканої величини; наприклад, якщо для швидкості якого-небудь тіла отримано значення більше, ніж швидкість світла у вакуумі ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), то відповідь ця однозначно помилкова;

в) при багатозначній відповіді беруть до уваги узгодження отриманих відповідей з умовами задачі.

Аналіз розв'язку задачі деякою мірою є творчим процесом, тому його метод (викладений вище) не має бути дуже суворим і може включати в себе (залежно від умов задачі) й низку інших елементів. Аналіз розв'язку тісно пов'язаний з методом *постановки задачі*, що буде викладений нижче.

Система етапів розв'язання поставленої фізичної задачі важлива не сама по собі. Самого знання цієї системи ще недостатньо для розв'язання задач. Особливість системи етапів полягає у тому, що вона безпосередньо пов'язана з проблемою системи методів розв'язання задач. Справа у тому, що на кожному етапі студент (чи будь-хто інший), розв'язуючи задачу, має здійснювати відповідну для цього етапу *самостійну діяльність*.

Часто кажуть: **щоб навчитися розв'язувати задачі з фізики Землі / основ геофізики, необхідно розв'язувати їх самостійно.** Це, звичайно, правильно. Але якщо не вказати будь-кому загальних способів / методів його діяльності, то він буде діяти на підставі складного методу спроб і помилок. Звідси випливає необхідність у *системі загальних методів* для проведення всіх етапів розв'язання довільної задачі з фізики Землі / основ геофізики як способів самостійної діяльності того, хто цю задачу розв'язує. Отже, система загальних методів має характеризуватися такими властивостями:

а) бути універсальною, тобто застосовуватися до розв'язання будь-якої задачі з курсу фізики Землі / основ геофізики;

б) охоплювати всі етапи розв'язання довільної задачі.

У результаті аналізу проведення кожного етапу розв'язання довільної задачі з фізики Землі / основ геофізики можна запропонувати систему загальних методів:

1) *метод аналізу фізичної ситуації задачі;*

2) *метод застосування фізичного закону;*

3) *систему загально-окремих методів;*

4) *метод спрощення й ускладнення;*

б) *метод оцінювання;*

б) *метод аналізу розв'язку;*

7) *метод постановки задачі.*

Необхідно зазначити, що жоден метод, взятий окремо, сам по собі не є універсальним. Кожен метод має сенс і проявляє свою найбільшу силу тільки у системі методів. Остання ж не завжди автоматично гарантує розв'язання задачі. Іноді задача може бути розв'язана і без методів («інтуїтивно», тобто завдяки досвіду, глибоким знанням тощо). Але розв'язки задач будуть отримані у більшості випадків частіше та швидше, якщо діяти згідно з цими методами. Стисло кажучи, система загальних методів – це не догма, а спрямування для самостійної діяльності під час розв'язання задач з фізики Землі / основ геофізики, це система розумних порад, а не інструкція. Для проведення кожного етапу під час розв'язання

задачі можуть бути використані відповідні методи. У наступному підрозділі кожен метод розглядається детальніше.

#### **4.5. Метод аналізу фізичної ситуації в задачах**

Зауважимо, що розв'язання будь-якої задачі з фізики Землі чи основ геофізики – це, насамперед, розумовий процес. Будь-яка задача з фізики Землі виражає фізичне явище (або групу явищ) чи геологічний процес (або формування геологічних структур), тобто формує такий собі взаємозв'язок «фізичне явище – геологічний процес». Співвідношення між шуканими та відомими фізичними величинами містяться всередині цього явища / процесу. Для того, щоб знайти співвідношення (які мають становити замкнену систему рівнянь), необхідно не тільки знати сутність даного явища / процесу, систему його фізичних параметрів, законів і меж його застосовності, але й уміти виділити всі ці елементи у конкретній задачі. З чого ж починається аналіз чи синтез фізичної ситуації задачі?

*Вступна частина* методу аналізу фізичної ситуації задачі має допоміжний характер. Це ніби входження, вступ у світ взаємозв'язку «фізичних явищ – геологічних процесів» задачі. Аналіз явищ / процесів тут проводять уже на стадії попереднього ознайомлення з задачею. Після прочитання задачі корисно записати її умови, намагаючись осмислити дані та шукані величини, а також зв'язок між ними. Далі необхідно зробити креслення (схему, рисунок), позначивши на ньому всі дані та шукані величини. Рисунок дає змогу наочно представити взаємозв'язок «фізичне явище – геологічний процес» у конкретній задачі.

У *основній частині* цього методу потрібно вже конкретно провести аналіз фізичних явищ. Як відомо, фізичне явище має *якісну* та *кількісну* характеристики. Тому спочатку визначають якісну характеристику явища (чим це явище відрізняється від інших, яка його сутність, як воно відбувається тощо). Конкретно тут, по-перше, обирають фізичну систему (які фізичні об'єкти входять у систему), по-друге, визначають якісні характеристики цих об'єктів (яким ідеальним об'єктом є кожне тіло: матеріальна точка, тверде тіло тощо), по-третє, розглядають, у яких фізичних процесах задіяні об'єкти системи.

Потім встановлюють кількісні зв'язки та співвідношення між різноманітними фізичними величинами, що характеризують дане явище. Вище зазначалося, що кількісні зв'язки різноманітних фізичних величин відображаються у фізичних законах. Тому, застосовуючи відповідні фізичні закони, отримують замкнену

систему рівнянь. Після складання замкненої системи рівнянь задача вважається *фізично розв'язаною*.

Практично *фізичний аналіз задачі зводиться в основному до виділення й аналізу фізичного явища, що є наслідком певного геологічного процесу чи формування геологічної структури*. Отже, метод аналізу фізичної ситуації задачі відповідає на питання: *з чого почати, що і як треба робити під час розв'язання будь-якої поставленої задачі і що може бути кінцевими розв'язками таких задач з фізики Землі чи основ геофізики*.

#### **4.6. Метод спрощення й ускладнення**

Такий метод використовують при розв'язанні складних непоставлених і нестандартних задач. Він широко застосовується на етапі аналізу розв'язання задачі з фізики Землі. На цьому етапі метод спрощення й ускладнення дає змогу будь-яку задачу поділити на «блоки» простіших чи складніших задач.

Складовими методу спрощення й ускладнення є два взаємопов'язаних і протилежних процеси: *процес спрощення* (ідеалізація, аналіз та відкидання другорядних явищ, нехтування несуттєвими деталями і т.д.) та *процес ускладнення* (аналіз раніше відкинутих об'єктів, явищ, ускладнення фізичної системи, взаємозв'язків і т.д.). Математичну основу цих процесів становлять методи аналізу. Цей метод часто використовують при аналізі будь-якої фізичної ситуації, здійснюючи *аналіз фізичної величини* або *аналіз фізичних явищ*.

Оцінка фізичної величини полягає, по-перше, у арифметичному (числовому) розрахунку порядку величини (*оцінка порядку*) і, по-друге, у порівнянні однорідних величин за їхніми порядками (*порівняння за порядком*).

*При порівнянні фізичних величин (що залежать від інших величин) спочатку знаходять їхні відношення у загальному вигляді, а після цього виконують числовий розрахунок порядку цього відношення.*

*Оцінка фізичного явища зводиться, по-перше, до отримання фундаментального закону, що керує даним явищем, а, по-друге, до числового розрахунку порядку фізичної величини.*

#### **4.7. Універсальні методи – метод диференціювання й інтегрування**

Є універсальні методи, що можуть бути використані для розв'язання багатьох задач із курсу фізики Землі. Оволодівши невеликою кількістю таких методів, можна успішно розв'язати

будь-які поставлені завдання. Таких універсальних методів небагато.

Серед них, крім кінематичних, динамічних, законів збереження, є **метод диференціювання та інтегрування**, що так часто використовується у фізиці Землі та геофізиці. У методі диференціювання та інтегрування велике значення має положення про межі застосування фізичних законів. Як відомо, зміст фізичного закону не завжди є абсолютним, а його використання обмежене рамками умов застосування.

Часто фізичний закон можна поширити (змінивши його форму) через межі його застосування методом диференціювання й інтегрування. В основі цього методу лежать два принципи: принцип можливості подати закон у диференціальній формі та принцип суперпозиції (якщо величини адитивні).

Суть методу диференціювання й інтегрування полягає у наступному. Припустимо, фізичний закон має вигляд:

$$K = LM, \quad (4.1)$$

де  $K$ ,  $L$ ,  $M$  – деякі фізичні величини, і обов'язковою умовою застосування закону є  $L = \text{const}$ . Якщо  $L \neq \text{const}$  і є деякою змінною функцією від  $M$ , тобто  $L = L(M)$ , то рівняння закону набуватиме іншого вигляду. Виділимо досить малий проміжок  $dM$  зміни величини  $M$  таким чином, щоб зміною величини  $L$  на цьому проміжку можна було знехтувати (рис. 4.1). Таким чином, допускаємо, що на ділянці проміжку  $dM$  величину  $L$  можна вважати сталою ( $L = \text{const}$ ), і відповідно умови застосування закону (навіть формула 4.1) на ділянці  $dM$  виконані (але приблизно, у межах допустимого). Тоді рівняння матиме вигляд:

$$dK = L(M)dM, \quad (4.2)$$

де  $dK$  – зміна величини  $K$  на ділянці  $dM$ . Використовуючи принцип суперпозиції (сумуючи величини на усіх ділянках зміни величини  $M$ ), отримуємо значення величини  $K$  у вигляді:

$$K = \int_{M_1}^{M_2} L(M)dM, \quad (4.3)$$

де  $M_1$  та  $M_2$  – початкове і кінцеве значення величини  $M$ .

Отже, метод диференціювання й інтегрування складається з двох частин. У першій частині знаходимо **диференціал** (4.1) шуканої величини. У більшості випадків для цього виконують поділ тіл на доволі маленькі ділянки, щоб їх можна було вважати за матеріальні точки, або поділ великого проміжку часу на такі малі відрізки часу  $dt$ , щоб упродовж них процес можна було приблизно вважати рівномірним (незмінним).

Друга частина методу – сумування (або *інтегрування*). Найскладнішим у цій частині є *вибір змінної інтегрування* та *визначення меж інтегрування*. Для визначення змінної інтегрування необхідно детально проаналізувати: від яких змінних залежить диференціал шуканої величини і яка змінна є головною та найсуттєвішою. Цю змінну найчастіше і вибирають як змінну при інтегруванні. У результаті диференціал шуканої величини набуває вигляду функції від змінної інтегрування. Наступним є визначити крайні межі як граничні значення змінної інтегрування. Після визначення певного інтегралу отримують числове значення шуканої величини.

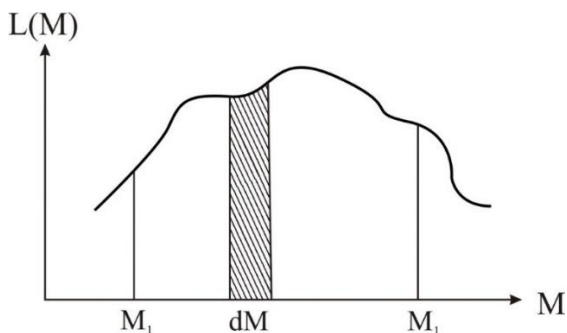


Рис. 4.1. Проміжок  $dM$  зміни величини  $M$ , що відображає найменшу зміну величини  $L$  (тобто  $L = const$ )

Метод диференціювання й інтегрування є універсальним і необхідним методом як у вивченні теорії, так і особливо у розв’язанні задач з дисциплін геологічного профілю – фізики Землі, геофізики. Наприклад, цей метод застосовують для визначення роботи змінної сили, моментів інерції в оболонках Землі, що мають різну густину, при вивченні фізичних полів (гравітаційного, магнітного, електромагнітного і т.д.) для розрахунку напруження та потенціалів, створених неточковими масами, неточковими зарядами тощо.

Математичну основу методу становлять диференціювання й інтегрування функцій, тому розглянутий метод дає змогу практично здійснити міжпредметний зв’язок при вивченні курсів фізики Землі / основ геофізики та інших загальних дисциплін.

## 5. СПОСОБИ ТА ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ З ПРАКТИЧНОГО КУРСУ

Показані приклади розв'язування практичних і теоретичних завдань з практичного курсу, що слугують полегшенням для розуміння під час самостійного виконання студентами індивідуальних завдань. До цього розділу є додатки з табличними даними, які необхідно використовувати під час розв'язання практичних завдань.

### 5.1. Основні фізичні властивості Землі, Місяця, Сонця та інших космічних об'єктів

У цьому підрозділі основна увага приділена визначенню фізичних характеристик Сонячної системи – Землі, Місяця, Сонця та взаємопов'язаних космічних об'єктів за їхніми орбітальними й іншими характеристиками, дані про деякі з них наведені у додатку В.

Сонце, що є центральною зіркою, та всі природні космічні об'єкти (планети, супутники, комети, астероїди тощо), які рухаються навколо нього або навколо інших об'єктів (напр., супутники рухаються навколо своїх планет, а супутники разом з планетами рухаються навколо Сонця), формують планетну систему, відому нам як Сонячна система. Вона є складовою галактики – Чумацького шляху (інші назви: Молочний шлях, Галактика (з великої літери), Божа дорога), що разом із галактиками – Андромеди, Трикутника та низкою інших галактик утворюють місцеву галактичну групу, яка, у свою чергу, входить до Надскупчення Діви.

Сонячна система є системою гравітаційно пов'язаних небесних тіл, що складається з центрального масивного тіла – Сонця, восьми великих планет, які рухаються навколо нього по еліпсу за законами Кеплера (Меркурій, Венера, Земля, Марс, Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун), понад ста їхніх супутників, поясу астероїдів і поясу Койпера, які складаються з метеоритної речовини, пилу й комет, і далеко розміщених трильйонів астероїдів та комет, що залишилися від формування Сонячної системи (рис. 5.1).

Головна роль у Сонячній системі належить Сонцю. Його маса приблизно в 750 разів перевищує масу всіх інших тіл, що входять до однойменної системи, і становить близько 99 % усієї її маси. Гравітаційне тяжіння Сонця є визначальною силою для руху всіх тіл Сонячної системи, які обертаються навколо нього. Середня



відстань від Сонця до найдалшої від нього планети Нептун становить 30 астрономічних одиниць (а.о.), тобто приблизно 4,5 млрд км, що дуже мало порівняно з відстанями до найближчих зір. Тільки деякі комети віддаляються від Сонця на понад 1 000 а.о. і можуть відчувати істотний вплив тяжіння інших зір.

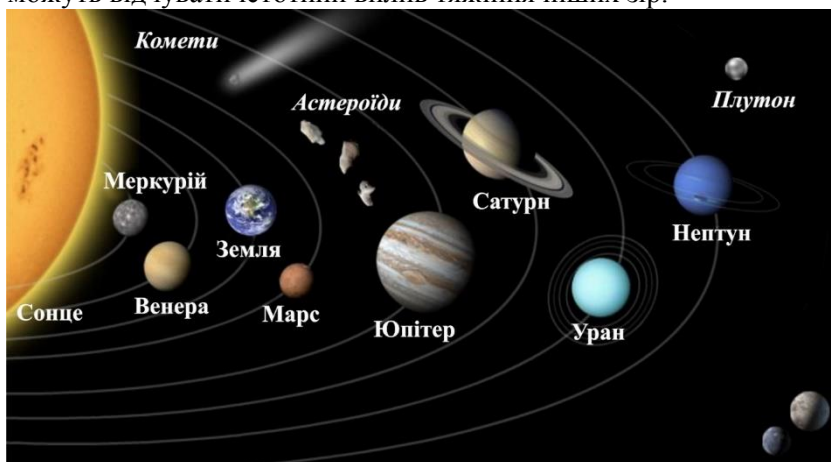


Рис. 5.1. Сонячна система з головними планетами і карликовою планетою Плутон

Більша частина маси тіл, пов'язаних зі Сонцем гравітацією, міститься у восьми відносно відокремлених планетах, що мають майже кругові орбіти й розташовані в межах майже плоского диска – площини екліптики. Чотири менші внутрішні планети (планети земної групи) Меркурій, Венера, Земля та Марс складаються, головню, зі силікатів і металів. Чотири зовнішні газові гіганти Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун значною мірою складаються з водню та гелію і набагато масивніші, ніж планети земної групи.

У Сонячній системі є дві ділянки, заповнені малими тілами. Пояс астероїдів, що розташований між Марсом і Юпітером, за складом подібний до планет земної групи, оскільки складається переважно зі силікатів і металів. Найбільшими об'єктами поясу астероїдів є Церера, Паллада та Веста. За орбітою Нептуна розташовано транснептунові об'єкти (пояс Койпера), що складаються зі замерзлої води, аміаку й метану, найбільшими з яких є Плутон (26 Генеральна асамблея Міжнародного астрономічного союзу 2006 р. виключила його зі складу планет), Седна, Хаумеа, Макемаке й Ерида. Додатково до тисяч малих тіл у цих двох

ділянках є інші популяції різноманітних дрібних тіл, таких як комети, метеороїди та космічний пил, що рухаються навколо Сонця.

Окрім світла, Сонце випромінює безперервний потік заряджених частинок (плазми), в основному гелієво-водневої плазми з невеликою домішкою більш важких елементів, відомих як сонячний вітер. Цей потік частинок поширюється зі швидкістю приблизно 1,5 млн км на годину, наповнюючи навколосонячний простір і створюючи довкола Сонця певний аналог планетарної атмосфери (геліосферу), яка простягається на відстань близько 100 а.о. від Сонця. Вона відома як міжпланетне середовище. Проте магнітне поле Землі заважає сонячному вітру зірвати її атмосферу. Венера і Марс не мають магнітного поля, тому сонячний вітер поступово здуває їхні атмосфери в космос (*матеріали про Сонячну систему взяті зі сайтів: <http://voyagesolarsystem.org/>; [http://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна система](http://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_система) та ін.*).

Те, що Земля, як і будь-які інші планети, є кулястою, не викликає жодних сумнівів. Проте слід пам'ятати, що найбільш поширеними доказами кулястості Землі є такі: куляста тінь від Землі на Місяці при місячних затемненнях (доказ Арістотеля); збільшення тіні від вертикальних об'єктів у напрямку від екватора до полюсів у один і той самий день року (метод Ератосфена); поступове «занурювання» корабля за обрій у відкритому океані; аналогія з іншими небесними тілами; збільшення дальності видимого горизонту з підняттям угору; сучасні космічні дослідження.

Нижче наведені різноманітні задачі з фізики Землі / основ геофізики, що характеризують фізичні властивості Землі та інших космічних об'єктів.

**ВАРТО  
ЗНАТИ**  
(детальніше  
додаток Е)

$$\begin{aligned} \text{Довжина кола } L &= 2\pi R \\ \text{Площа кола } S &= (\pi d^2)/4 = \pi R^2 \\ \text{Площа поверхні сфери } S &= 4\pi R^2 \\ \text{Об'єм кулі } V &= \frac{4}{3}\pi R^3 \\ \text{Об'єм тора («бублика»)} \\ V &= 2\pi^2 Rr^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Об'єм циліндра} \\ V &= R^2 H \\ \text{Площа поперечного} \\ \text{перерізу циліндричної} \\ \text{форми} \\ s &= \frac{\pi d^2}{4} \end{aligned}$$

### 5.1.1. Методи визначення радіусів і відстаней між космічними тілами



#### 1. Метод Ератосфена для визначення радіуса Землі $R_{\oplus}$

## ЦІКАВО ЗНАТИ

Перше досить точне вимірювання величини Земної кулі здійснив Ератосфен Кіренський (II ст. до н. е.). Здійснюючи подорожі з м. Олександрії на південь до м. Сіена (тепер м. Асуан), люди помітили, що там влітку в день літнього сонцестояння (21 або 22 червня) опівдні сонце освітлює дно глибоких колодязів, тобто буває в зеніті. Вертикальні стовпи в цей момент не дають тіні. В Олександрії ж у цей день сонце опівдні не доходить до зеніту.

Ератосфен виміряв, наскільки полуденне сонце в Олександрії відхилене від зеніту, й отримав величину  $7,12^\circ$ , що становить  $1/50$  кола. Це вимірювання йому вдалося зробити за допомогою приладу під назвою *скафіс*. Скафіс являв собою чашу в формі півкулі. У його центрі була вертикально зафіксована голка, тінь від якої падала на внутрішню поверхню скафіса. Для вимірювання відхилення сонця від зеніту (у градусах) на внутрішній поверхні скафіса проводили окружності, помічені цифрами.

Побудувавши креслення, Ератосфен абсолютно правильно обчислив, що Олександрія від Сіени лежить на відстані, що дорівнює  $1/50$  кола Землі. Щоб знайти окружність Землі, залишалося виміряти відстань між Олександрією та Сіеною і помножити її на 50. Цю відстань було визначено за кількістю днів, які витрачали каравани верблюдів на перехід між містами. Відстань між містами була 5 000 стадіїв, таким чином, окружність Землі дорівнювала 250 000 стадіїв, а радіус, відповідно, – 39 790 стадіїв. Проте невідомо, якими стадіями користувався Ератосфен. Якщо грецькими (178 км), то радіус Землі, за його обчисленнями, дорівнював 7 082 км, а якщо єгипетськими, – то 6 287 км. Сучасні вимірювання показали, що середній радіус Землі становить 6 371 км.

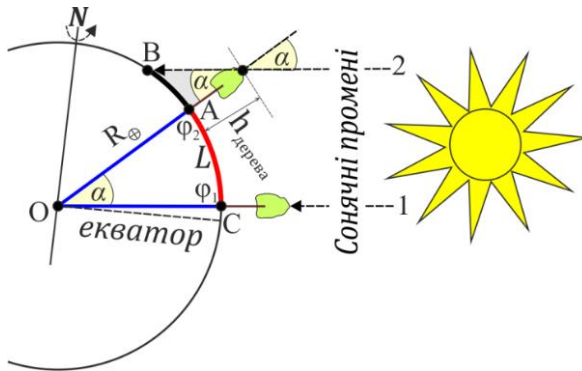


Рис. 5.2. Радіус Землі  $R_\oplus$  за методом Ератосфена

### Вихідні дані:

$L$  – відстань між м. Сіена та м. Александрія;  
 $\alpha$  – кут, який утворює тінь під впливом сонячних променів у день сонцестояння у м. Сіена (м. Асуан) ( $7,2^\circ$ )

### Знайти:

Радіус Землі  $R_\oplus$  – ?

**Коротка довідка:** географічна широта ( $\varphi$ ) – це кут між прямовисною лінією і площиною екватора, який визначається довжиною дуги меридіана між екватором і паралеллю даного пункту в градусах (коливається в межах від 0 до  $90^\circ$ ); географічна довгота ( $\lambda$ ) – двогранний кут між площинами меридіанів – початкового (Грінвіцького) і даного пункту, тобто дуга паралелі в градусах між початковим меридіаном і меридіаном, проведеним через пункт спостереження (коливається в межах від 0 до  $180^\circ$ ).

**Розв'язок** (рис. 5.2):

*Перший спосіб:*

Довжина дуги всього кола ( $2\pi R_\oplus$ ) відноситься до довжини дуги  $L$ , що є відстанню між містами, як  $360^\circ$  (повне коло) до кута  $\alpha$ , який утворюють міста:  $\frac{2\pi R_\oplus}{L} = \frac{360^\circ}{\alpha}$ . Тоді  $R_\oplus = \frac{180^\circ L}{\pi \alpha}$ .

*Другий спосіб:*

$AO = OC = R_\oplus$  – радіус Землі;

1, 2 – промені Сонця;  $\alpha$  – кут між радіусами.

Якщо  $\varphi_2$  – широта точки  $A$ , а  $\varphi_1$  – широта точки  $C$ , то  $\alpha = \varphi_2 - \varphi_1$ .

$C$  – точка на Земній кулі, де Сонце в zenіті, тобто промінь перпендикулярний до поверхні та предмети не дають тіні. Прямі 1 і 2 паралельні, тоді  $OA$  – січна, тому кут  $\alpha$  дорівнює куту між променем 2 і вертикаллю в точці  $A$ . Його можна знайти, вимірюючи, наприклад, тінь від дерева, що падає на землю, – відрізок  $AB$ .

Довжина дуги кола  $AC$ , що є відстанню між містами  $A$  і  $C$ , дорівнює:

$$AC = AO \cdot \alpha \text{ (рад)},$$

де  $AO = R_\oplus$ ,  $\alpha$  (рад) – значення кута  $\alpha$  в радіанах ( $180^\circ = \pi$  (рад)).

Один радіан – це площинний кут, утворений двома радіусами так, що довжина дуги між ними дорівнює радіусу кола.

$$\text{Тоді } AC = L = R_\oplus \cdot \alpha \text{ (рад)}, \text{ звідси } R_\oplus = \frac{L}{\alpha \text{ (рад)}}.$$

Якщо  $\pi$  відноситься до  $180^\circ$ , а  $\alpha$  (рад) до  $\alpha$  (градуси), то:

$$\alpha \text{ (рад)} = \frac{\pi \alpha \text{ (градуси)}}{180^\circ}.$$

$$\text{Отже, } R_\oplus = \frac{180^\circ L}{\pi \alpha}$$



**2. Як зі сучасної геологічної карти України знайти радіус Землі  $R_\oplus$  ? (визначення за широтою Києва ( $\varphi_1$ ) та Одеси ( $\varphi_2$ ), за відстанню  $L$  між цими містами)**

**Вихідні дані:**

$\varphi_1$  – широта Києва ( $\approx 50^\circ$ );  
 $\varphi_2$  – широта Одеси ( $\approx 46^\circ$ );  
 $L$  – відстань між містами по карті  
(довжина меридіана 111 км)  $\approx 444$  км

**Знайти: радіус Землі**  
 $R_\oplus$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.3):

Оскільки  $\frac{2\pi R_\oplus}{L} = \frac{360^\circ}{\alpha}$ , тоді  $R_\oplus = \frac{180^\circ L}{\pi\alpha}$  (з попередньої задачі).

Знаючи, що  $\alpha$  – це різниця між значенням широти, наприклад, Києва ( $\varphi_1$ ) та Одеси ( $\varphi_2$ ), що лежать приблизно на одному меридіані, виражаємо цей кут формулою:  $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Отже,  $R_\oplus = \frac{180^\circ L}{\pi(\varphi_1 - \varphi_2)}$

Наприклад, підставимо значення, користуючись таблицями з додатків посібника:

$$R_\oplus = \frac{180^\circ \cdot 444}{3,14 \cdot 4^\circ} = 6\,363 \text{ (км)}$$

Насправді радіус Землі змінюється залежно від широти (зменшується від полюсів до екватора) через її сплюснутість –  $R_\oplus = 6\,356 - 6\,375$  (км).

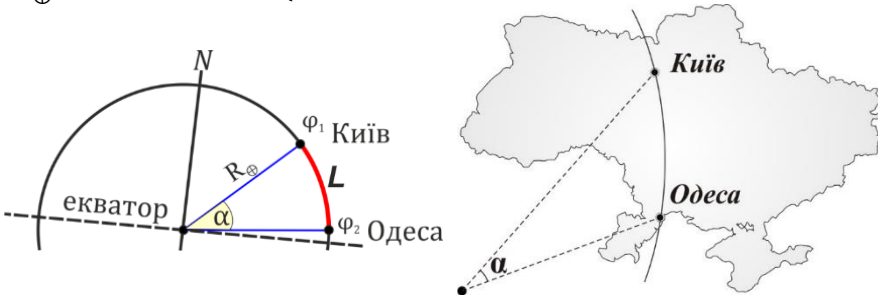


Рис. 5.3. Радіус Землі  $R_\oplus$  зі сучасної геологічної карти України



### 3. Визначення радіуса Землі $R_\oplus$ методом Аль Біруні

**Вихідні дані:**

$AB = H$  – висота гори;  
 $C$  – точка, у якій лежить лінія горизонту там, де лінія зору  $BC$  торкається поверхні Землі;  
 $\alpha$  – кут між лінією зору та горизонтальною площиною

**Знайти: радіус**  
Землі  $R_\oplus$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.4):  $AO = OC = R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $\varphi$  – кут між радіусами Землі;  
 кут  $BSC = 90^\circ$ , отже, кут  $BOS +$  кут  $OBC = 90^\circ$   
 (сума всіх кутів трикутника завжди  $180^\circ$ )  
 Отже,  $\varphi =$  кут  $BOS = 90^\circ -$  кут  $OBC$ .

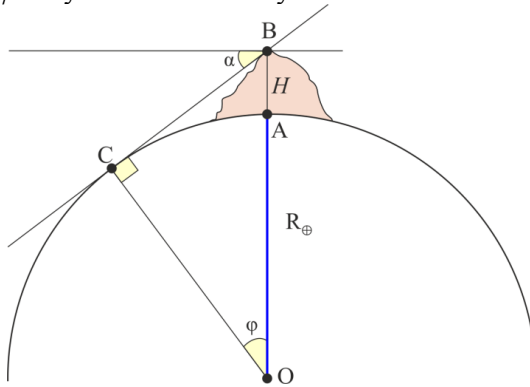


Рис. 5.4. Радіус Землі  $R_{\oplus}$  за методом Аль Біруні

Оскільки  $OB$  перпендикулярне до горизонту, то  $\alpha +$  кут  $OBC = 90^\circ \rightarrow \alpha = 90^\circ -$  кут  $OBC$ . Порівнюючи вирази, бачимо, що  $\varphi = \alpha$ .

Сучасні заміри кута  $\alpha$  можемо здійснити за допомогою приладів для астрономічних і геодезичних спостережень. Вони дають змогу виміряти кут між двома напрямками.

$$\text{З трикутника } OBC: \cos \varphi = \frac{OC}{OB} = \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + H} = \cos \alpha$$

$$R_{\oplus} = (R_{\oplus} + H) \cos \alpha$$

$$R_{\oplus} - R_{\oplus} \cos \alpha = H \cos \alpha$$

$$R_{\oplus} (1 - \cos \alpha) = H \cos \alpha$$

$$R_{\oplus} = \frac{H \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$$



**4. Під яким кутом до горизонту необхідно спостерігати з г. Говерли верблюда, котрий зникне на півдні, щоб знайти точне значення радіуса Землі  $R_{\oplus}$ ?**

**Вихідні дані:**  $h$  – висота г. Говерли, 2 061 км || **Знайти:** кут  $\alpha$  – ?

**Розв'язок (подібний до методу Біруні)** (рис. 5.5):  $\alpha$  – кут, під яким маємо спостерігати верблюда, що зникає за горизонтом. У точці  $C$  верблюд зникає. А будь-яка дотична до кола буде утворювати прямиий кут з лінією, що сполучатиме  $OBC$  –

прямокутний трикутник з прямим кутом у точці С. Кут  $\varphi$  дорівнюватиме куту  $\alpha$ .

Оскільки співвідношення росту людини та верблюда незначне, то ними при обчисленнях можна знехтувати.

Таким чином, з прямокутного трикутника кут до горизонту  $\alpha$  буде дорівнювати:  $\cos \alpha = \cos \varphi = \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}$  ;

$$\alpha = \varphi = \arccos\left(\frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}\right)$$

Наприклад, якщо середній радіус Землі  $R_{\oplus} = 6\,371$  км, а висота г. Говерли  $h = 2\,061$  км, тоді  $\alpha = \arccos\left(\frac{6371}{6371+2,061}\right) \approx 1,5^{\circ}$

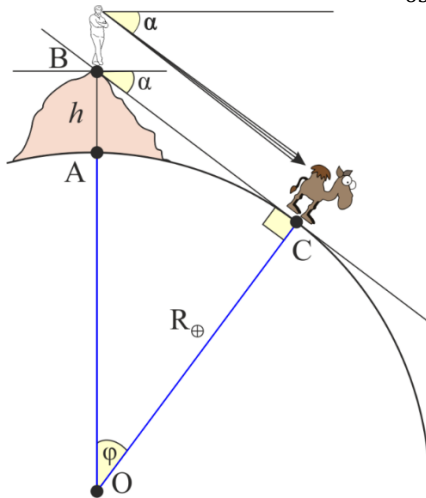


Рис. 5.5. Визначення кута до горизонту (до задачі 4)



**5. Визначити відстань, на яку можна у ясну погоду з г. Говерли ідентифікувати об'єкти, що лежать на горизонті**

**Вихідні дані:**

$h$  – висота г. Говерли, 2061 м;

$R$  – радіус Землі, 6 371 км

**Знайти:**

видиму відстань  $L$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.6):

**Перший спосіб (за теоремою Піфагора):**

Оскільки з прямокутного трикутника  $BOC$  – кут  $BCO = 90^{\circ}$ , то можна використати теорему Піфагора: квадрат гіпотенузи дорівнює сумі квадратів катетів –  $OB^2 = BC^2 + OC^2$ . Видима відстань  $L = BC$ , яку необхідно знайти, дорівнюватиме:  $BC^2 = OB^2 - OC^2$ . Оскільки  $OC = R_{\oplus}$ ,  $OB = R_{\oplus} + h$ , тоді:  $BC^2 = (R_{\oplus} + h)^2 - R_{\oplus}^2$ .

$$BC = \sqrt{(R_{\oplus} + h)^2 - R_{\oplus}^2}$$

$$BC = \sqrt{R_{\oplus}^2 + 2R_{\oplus}h + h^2 - R_{\oplus}^2}$$

Оскільки  $h^2 \ll R_{\oplus}$ , тоді:

$$L = BC = \sqrt{2R_{\oplus}h}$$

Якщо висота гори Говерли = 2,061 км, а середній радіус Землі  $R_{\oplus} = 6371$  км, тоді видима максимальна відстань може становити:

$$L = BC = \sqrt{2 \cdot 6371 \cdot 2,061} \approx 162 \text{ км.}$$

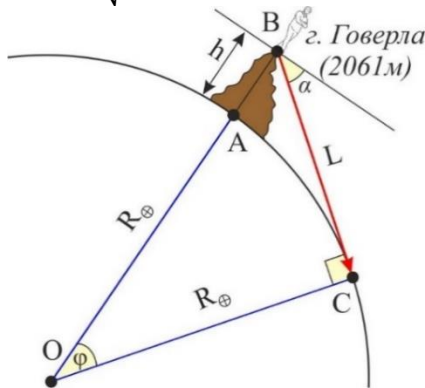


Рис. 5.6. Визначення відстані, на яку можна ідентифікувати об'єкти на горизонті з г. Говерли (до задачі 5)

**Другий спосіб (подібний до методу Біруні):**

Необхідною умовою має бути те, що відомим є кут горизонту  $\alpha$ :  $\sin \alpha = \frac{L}{R_{\oplus} + h}$ ; тоді  $L = \sin \alpha (R_{\oplus} + h)$ .



6. Якщо уявну Землю опоясати металевим обручем по екватору, а потім розрізати цей обруч, зробити вставку ( $\Delta L = 1$  м) та знову рівновіддалено опоясати ним Землю, – чи пролізе кіт між новим обручем та поверхнею Землі?

**Вихідні дані:**  $R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $\Delta L = 1$  м – вставка

**Знайти:**  $\Delta R$ , – ?

**Розв'язок** (рис. 5.7):

Довжина обруча  $L$  навколо Землі приблизно дорівнюватиме довжині кола –  $L = L_{\oplus} = 2\pi R_{\oplus}$ .



$\Delta R$  – різниця між радіусом нового обруча та радіусом Землі.

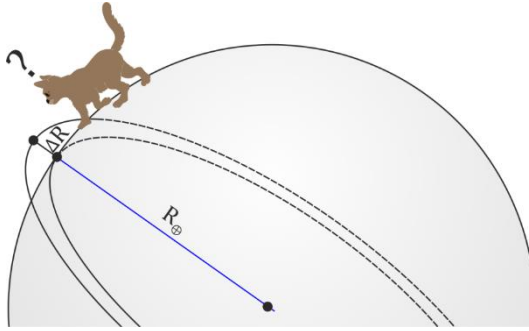


Рис. 5.7. Схематичне зображення до задачі 6

Довжина нового обруча  $L_1$ :

$$L_1 = L_{\oplus} + \Delta L; L_1 = 2\pi (R_{\oplus} + \Delta R).$$

$$\text{Тоді } L_{\oplus} + \Delta L = 2\pi (R_{\oplus} + \Delta R); \Delta L = 2\pi \Delta R$$

$$\Delta R = \frac{\Delta L}{2\pi}$$

$$\Delta R = \frac{1}{2 \cdot 3,14} = 0,16 \text{ (м)}$$

**Відповідь:** кіт пролізе.



**7. Як із будь-якої карти України знайти відстань від Землі до Місяця? (за широтами м. Києва ( $\varphi_1$ ) та м. Одеси ( $\varphi_2$ ) і відстанню між ними  $L$ )**

**Вихідні дані:**  $\varphi_1$  – широта Києва;  
 $\varphi_2$  – широта Одеси;  
 $L$  – відстань між містами по карті;  
 $M_{\text{міс}}$  – маса Місяця

**Знайти:**  
 $M_{\oplus}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.8):

Земля і Місяць рухаються одне стосовно одного за рахунок двох рівнодійних сил: гравітаційної  $F_{\text{гр}}$  – створеної Землею та Місяцем і власних відцентрових  $F_{\text{від}}$ . (Землі та Місяця відповідно).

$$F_{\text{від}} = F_{\text{гр}}$$

(відцентрова сила Землі або Місяця = гравітаційній силі, створеній Землею або Місяцем)

$$\begin{cases} M_{\oplus} \omega^2 R_1 = G \frac{M_{\oplus} M_{\lrcorner}}{R^2} \\ M_{\lrcorner} \omega^2 R_2 = G \frac{M_{\lrcorner} M_{\oplus}}{R^2} \end{cases}$$

Додаємо два рівняння – обидві їх сторони:

$$\omega^2 (R_1 + R_2) = G \frac{M_{\lrcorner} + M_{\oplus}}{R^2}$$

$$R^3 = \frac{G (M_{\lrcorner} + M_{\oplus})}{\omega^2} \quad (\text{де } \omega = \frac{2\pi}{T}), \text{ тоді}$$

$$R^3 = \frac{G (M_{\lrcorner} + M_{\oplus}) T^2}{4\pi^2} \quad (\text{де } M_{\oplus} = \frac{g R_{\oplus}^2}{G} = \frac{g L^2 180^{\circ 2}}{\gamma \pi^2 \alpha^2}), \text{ тоді}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{G (M_{\lrcorner} + \frac{g L^2 180^{\circ 2}}{G \pi^2 \alpha^2}) T^2}{4\pi^2}}$$

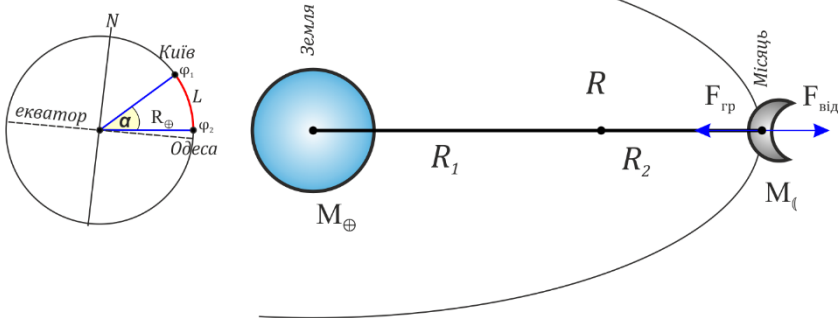


Рис. 5.8. Визначення відстані від Землі до Місяця (до задачі 7)



### Завдання для самоконтролю та самостійної роботи

1. Зобразити схему Сонячної системи з планетами.
2. Знайти дані про Сонячну систему як члена нашої галактики.
3. Теорії виникнення Сонячної системи.
4. Закони Кеплера.
5. Теорії походження Землі, її вік.
6. Планети Сонячної системи, її основні фізичні властивості.
7. Яка планета лежить «на боці» (тобто її вісь) стосовно площини обертання навколо Сонця (Відповідь: Уран)
8. Рух Землі навколо Сонця, перигелій, афелій, пори року, зоряний, або сидеричний рік.
9. Зобразити схему освітлення Землі Сонцем у різні пори року.

**10.** Геометричні розміри Землі та Місяця.

**11.** За допомогою яких геодезичних і астрономічних приладів можна визначити радіус Землі, кут між двома видимими предметами, кут і висоту астрономічних об'єктів щодо видимого або штучного горизонту і т.д.?

**12.** Який прилад був сконструйований ще до н.е. і показував зв'язок між довжиною та положенням сонячної тіні, що падає від тих чи інших предметів, і положенням Сонця на небі, й доводив, що Земля кругла? Ким він був сконструйований?

**13.** Чи всюди на Земній кулі довжина тіні від одного й того ж предмета буде однаковою? Чому? Про що це свідчить?

**14.** Обчислити відстань, на якій можна ідентифікувати об'єкти на горизонті, й кут, під яким можна спостерігати їх з г. Еверест (Джомолунгма), гори Гімалаї.

**15.** На яку максимальну відстань можна бачити об'єкти на березі моря з власної висоти?

**16.** Визначити відстань, на якій можна побачити корабель зі 160-го поверху найвищої будівлі світу (Бурдж Халіфа, 828 м, ОАЕ).

**17.** Вивести і записати загальну формулу для знаходження відстані, на яку можна бачити об'єкти на березі моря з будь-якої гори, що має висоту  $h$ .

**18.** Визначити дальність видимого горизонту г. Ельбрус (5 642 м) при нормальній видимості атмосфери і встановити, чи можна з цієї гори спостерігати узбережжя Чорного моря у м. Сухумі (приблизна відстань 130 км).

**19.** Чи можна зі статовулкану г. Кіліманджаро (5 895 м) побачити озеро Вікторія і берег Індійського океану (відстані між об'єктами знайти за допомогою карти і масштабу).

**20.** Чи можна з фізичної карти України (або світу, або інших країн) обчислити радіус Місяця. Як це зробити? За якою формулою?

**21.** Відомо, що перебуваючи на вершині гори-вулкану Олімп на Марсі (найвищій найвідомішій горі у Сонячній системі, 25 км), не можна через кривизну планети побачити її країв. Обчислити, на яку відстань можна спостерігати видимий горизонт із цієї вершини на Марсі, й оцінити, яку ширину має ця гора. Відомо, що висота країв схилів вулкану становить 7 км (табличні дані взяти з додатку В).

**22.** Визначити радіус Землі за відомою температурою на її поверхні, масою Землі, речовинним складом атмосфери, висотою газу в атмосфері.

## 5.1.2. Маса Землі та інших планет



### 8. Як обчислити масу Землі $M_{\oplus}$ «через масу геолога»?

**Вихідні дані:**  $m$  – маса геолога.

**Знайти:** масу Землі  $M_{\oplus}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.9):

У системі відліку, зв'язаної із Землею, на кожне тіло (геолог) діє сила ваги (сила тяжіння):

$F_m = mg$ , де  $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння,  $m$  – його маса.

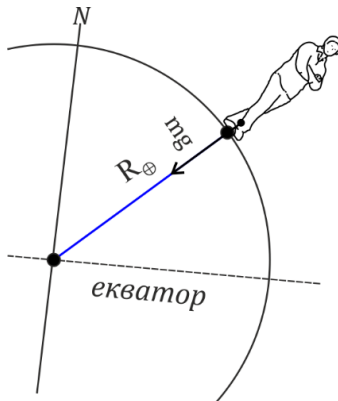


Рис. 5.9. Маса Землі  $M_{\oplus}$  «через масу геолога» (до задачі 8)

Згідно із законом всесвітнього тяжіння (І. Ньютон, 1687 р.), сила притягання між двома тілами (матеріальними точками: Землею й тілом геолога) прямо пропорційна добутку їхніх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F_{\text{гр.}} = G \frac{M_{\oplus} m}{R_{\oplus}^2},$$

де  $G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$  – гравітаційна стала,  $M_{\oplus}$  – маса Землі,  $m$  – маса геолога,  $R_{\oplus}$  – відстань між ними.

Якщо не враховувати добове обертання Землі навколо своєї осі, то можна припустити, що сила ваги геолога та сила гравітаційного тяжіння у системі геолог–Земля дорівнюють одна одній:  $F_{\text{т.}} = F_{\text{гр.}}$ .

$$mg = G \frac{M_{\oplus} m}{R_{\oplus}^2}$$

$$\text{Отже, } M_{\oplus} = \frac{gR_{\oplus}^2}{G}.$$



9. Знайти масу Землі  $M_{\oplus}$  з карти України (за широтами Києва ( $\varphi_1$ ) та Одеси ( $\varphi_2$ ), відстанню  $L$  між цими містами)

**Вихідні дані:**  $\varphi_1$  – широта Києва;  
 $\varphi_2$  – широта Одеси;  
 $L$  – відстань між містами на карті

**Знайти:** масу Землі  $M_{\oplus}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.10):

Сила ваги тіла, що лежить на поверхні Землі, та сила гравітаційного тяжіння, з яким це тіло притягується до Землі, дорівнюють одна одній:  $F_m = F_{gp}$ .

$F_T = mg$ ;  $F_{gp} = G \frac{M_{\oplus} m}{R_{\oplus}^2}$ , де  $m$  – маса тіла,  $M_{\oplus}$  і  $R_{\oplus}$  – маса та радіус Землі відповідно.

$$mg = G \frac{M_{\oplus} m}{R_{\oplus}^2}.$$

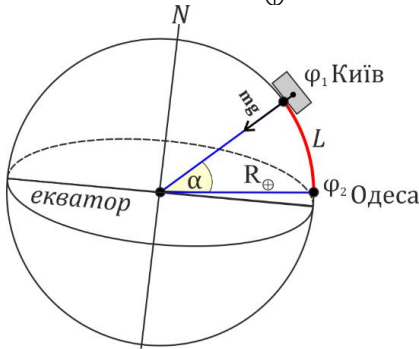


Рис. 5.10. Маса Землі  $M_{\oplus}$  з карти України

Тоді  $g = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$ .

Підставивши значення  $R_{\oplus}$ , яке з попередніх задач дорівнює:

$$R_{\oplus} = \frac{180^\circ L}{\pi(\varphi_1 - \varphi_2)},$$

масу Землі визначимо за рівнянням:

$$M_{\oplus} = \frac{gR_{\oplus}^2}{G} = \frac{g}{G} \cdot \frac{180^{\circ 2} L^2}{\pi^2(\varphi_1 - \varphi_2)^2}$$



10. Знайти масу планети Землі з даних про орбіту супутника Місяця

**Вихідні дані:** $M_{\zeta}$  – маса Місяця; $R$  – відстань від Землі до Місяця (радіус орбіти); $T_{\zeta}^{\oplus}$  – період обертання Місяця навколо Землі**Знайти:** масуЗемлі  $M_{\oplus}$  – ?

**Коротка довідка:** кутова швидкість  $\omega$  – кут повороту тіла за одиницю часу (вимірюється у градусах та радіанах); визначається за формулою  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Вона є однаковою для всіх точок Земної кулі, на відміну від лінійної (швидкість, з якою тіло рухається по колу), яка залежить від географічної широти (на полюсі лінійна швидкість дорівнює 0 м/с).

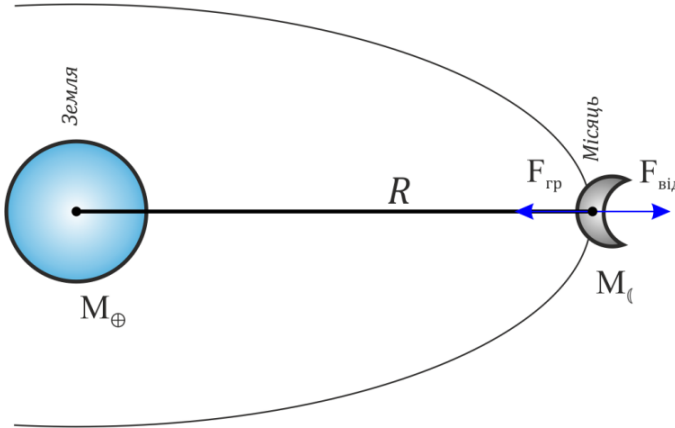


Рис. 5.11. Знаходження мас планет за даними про орбіту їхніх супутників на прикладі Землі та Місяця

**Розв'язок** (рис. 5.11):

Місяць як природний супутник Землі обертається рівномірно навколо неї завдяки рівнодійній двох сил: гравітаційної  $F_{гр.}$ , створюваної Місяцем і Землею, та власної відцентрової  $F_{від}$ :

$$F_{гр.} = F_{від}.$$

Згідно зі законом всесвітнього тяжіння,

$$F_{гр.} = G \frac{M_{\oplus} M_{\zeta}}{R^2},$$

де  $G$  – гравітаційна стала,  $M_{\oplus}$  – маса Землі,  $M_{\zeta}$  – маса Місяця,  $R$  – відстань між ними (радіус орбіти).

З іншого боку діє відцентрова сила, яка визначається за формулою:  $F_{від} = M_{\zeta} \omega^2 R$ , де  $\omega$  – кутова швидкість обертання Місяця навколо Землі, що визначається за формулою:  $\omega = \frac{2\pi}{T_{\zeta}^{\oplus}}$ , де  $T_{\zeta}^{\oplus}$  – період обертання Місяця навколо Землі.

$$\text{Тоді: } F_{\text{від}} = M_{\zeta} \left( \frac{2\pi}{T_{\oplus}} \right)^2 R = 4\pi^2 \frac{M_{\zeta} R}{(T_{\oplus})^2}$$

Знаючи, що  $F_{\text{зр.}} = F_{\text{від.}}$ , матимемо:

$$G \frac{M_{\oplus} M_{\zeta}}{R^2} = 4\pi^2 \frac{M_{\zeta} R}{(T_{\oplus})^2}$$

Тоді маса Землі дорівнюватиме:

$$M_{\oplus} = \frac{4\pi^2}{GT_{\zeta}^2} R^3$$



### 11. Як зі сучасної карти України знайти масу Сонця?

(за широтами м. Києва ( $\varphi_1$ ) та м. Одеси ( $\varphi_2$ ), відстанню  $L$  між цими містами, відстанню  $R$  від Сонця до Землі)

**Вихідні дані:**  $\varphi_1$  – широта Києва;

$\varphi_2$  – широта Одеси;

$L$  – відстань між містами по карті

**Знайти:** масу

Сонця  $M_{\odot}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.12):

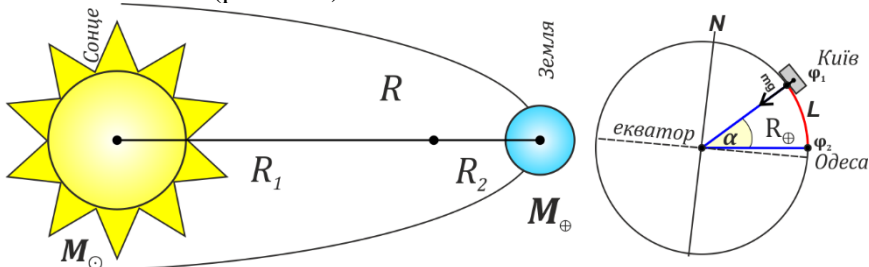


Рис. 5.12. Визначення маси Сонця  $M_{\odot}$  з карти України

Як і Сонце, всі планети рухаються одне навколо одного за рахунок двох рівнодійних сил: гравітаційної  $F_{\text{зр.}}$ , створюваної Сонцем і Землею, та власних відцентрових  $F_{\text{від.}}$  (Сонця і Землі відповідно):  $F_{\text{від.}} = F_{\text{зр.}}$  (відцентрова сила планети / Сонця = гравітаційній силі, створеній цією планетою та Сонцем).

$$\begin{cases} M_{\odot} \omega^2 R_1 = G \frac{M_{\odot} M_{\oplus}}{R^2} \\ M_{\oplus} \omega^2 R_2 = G \frac{M_{\oplus} M_{\odot}}{R^2} \end{cases}$$

$$\omega^2 (R_1 + R_2) = G \frac{M_{\oplus} + M_{\odot}}{R^2}$$

$$\omega^2 R^3 = G (M_{\oplus} + M_{\odot}) \quad (\text{де } \omega = \frac{2\pi}{T}),$$

$$\text{тоді } \frac{4\pi^2}{T^2 G} R^3 = M_{\oplus} + M_{\odot} \quad (\text{де } M_{\oplus} = \frac{gR_{\oplus}^2}{G} = \frac{gL^2(180^\circ)^2}{G\pi^2(\varphi_1 - \varphi_2)^2}),$$

$$\text{тоді } M_{\odot} = \frac{4\pi^2}{T^2 G} R^3 - \frac{gL^2(180^\circ)^2}{G\pi^2(\varphi_1 - \varphi_2)^2}$$



**12. Обчислити масу  $M_{\oplus}$  Землі за температурою на її поверхні, якщо відомими є радіус Землі, речовинний склад атмосфери, потужність і густина газу атмосфери**

**Вихідні дані:**  $T_{\text{атм.}}^{\oplus}$  – температура атмосфери Землі;  
 $R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $h_{\text{атм.}}$  – висота атмосфери;  
 $\rho_{\text{атм.}}$  – густина газу атмосфери;  
 $M_{\text{газу}}$  – молярна маса газу атмосфери

**Знайти:**  
 $R_{\oplus} - ?$

**Розв'язок:**

Стан газу густиною  $\rho_{\text{атм.}}$  в атмосфері описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона:  $pV_{\text{атм.}} = \frac{m_{\text{атм.}}}{M_{\text{газу}}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus}$ , де  $R$  – універсальна газова стала, 8,31 Дж/(моль·К).

Це рівняння можна записати в іншому вигляді, враховуючи те, що  $\rho_{\text{атм.}} = \frac{m_{\text{атм.}}}{V_{\text{атм.}}}$ :

$$p = \frac{m_{\text{атм.}}}{V_{\text{атм.}} M_{\text{газу}}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus} = \frac{\rho_{\text{атм.}}}{M_{\text{газу}}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus}$$

Тиск газу, потужність якого дорівнює  $h_{\text{атм.}}$ , визначатиметься за формулою:

$$p = \frac{\text{вага атмосфери}}{\text{площа сфери Землі}} = \frac{P}{S},$$

$$p = \frac{\rho_{\text{атм.}} S h_{\text{атм.}} g}{S} = \rho_{\text{атм.}} g h_{\text{атм.}}$$

Тоді:

$$\frac{\rho_{\text{атм.}}}{M_{\text{газу}}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus} = \rho_{\text{атм.}} g h_{\text{атм.}}$$

Проте відомо, що  $g = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$

Тоді маса Землі  $M_{\oplus}$  визначатиметься з формули:

$$M_{\oplus} = \frac{RT_{\text{атм.}}^{\oplus}}{M_{\text{газу}}} \cdot \frac{R_{\oplus}^2}{G h_{\text{атм.}}}$$

З подібної задачі, маючи масу, можна визначити і радіус Землі за формулою:



$$R_{\oplus} = \sqrt{\frac{M_{\text{газу}}}{RT_{\text{атм.}}^{\oplus}} \cdot GM_{\oplus} h_{\text{атм.}}}$$



### *Завдання для самоконтролю та самостійної роботи*

1. Як знайти масу будь-якої планети Сонячної системи за відомою масою Сонця та з інших табличних даних (за необхідності можна використати дані з додатків посібника).

2. Як можна зважити будь-яку планету Сонячної системи за масою Землі? Вивести і записати формулу для знаходження маси будь-якого космічного тіла за масою Землі.

3. Знайти масу Місяця за відомою масою Землі.

4. Вивести формулу, за якою можна знайти масу будь-якої планети за її супутником.

5. Знайти масу Сонця за даними про період обертання Землі.

6. Визначити масу планети за періодом обертання будь-якого її супутника.

7. Знайти масу галактики з табличних даних за періодом обертання Сонця.

8. Знайти інформацію про хімічний склад Всесвіту. Які хімічні елементи у ньому переважають, а яких є найменше?

#### **5.1.3. Знаходження маси оболонок, густини середовищ і її розподілу в Землі, Сонячній системі**

Земля, вік якої сягає 5 млрд років, за сучасними космогонічними уявленнями, утворилася в протосонячній системі з розсіяної газопилової речовини. Є декілька гіпотез походження Землі та Сонячної системи. Найприйнятнішою для виникнення планет, зокрема для Землі, є така: спочатку розсіяна газопилова речовина хаотично оберталася навколо Сонця, пізніше нерівномірно розподілилася по уявній земній орбіті у вигляді тора («бублика»), а пізніше з часом упорядковувалася; внаслідок взаємного притягання частинок формувалися згустки, з яких пізніше утворилися планети. Після формування планети Землі (прототип планети Венери на сьогодні) за рахунок зіткнення її з космічними частинками відбувалося подальше збільшення розмірів нашої планети.

Під дією гравітаційного поля за умов розігрівання земних надр речовина Землі диференціювалася. Утворилися різні за хімічним складом, агрегатним станом і фізичними властивостями основні оболонки геосфери: земна кора, мантія (верхня і нижня),

ядро (зовнішнє та внутрішнє). Не менш важливими оболонками є гідросфера, атмосфера та ін. Земна кора, мантія та внутрішнє ядро є твердими, натомість зовнішнє ядро, за сучасними уявленнями, вважають рідким. Найбільш поширеними хімічними елементами, що переважають у складі Землі, є залізо та кисень (разом становлять близько 65 %), кремній і магній (разом становлять близько 28 %) та ін. Густина від поверхні Землі до центру зростає – за підрахунками, у центрі нашої планети вона становить приблизно  $12,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .



### 13. Знайти середню густину речовини в Сонячній системі

**Вихідні дані:**  $M_{\odot}$  – маса Сонця;

$M_{\text{пл.}}$  – маса планет Сонячної системи;

$m_{\text{аст.}}$  – маса космічних тіл Сонячної системи;

$R_{\text{с.с.}}$  – радіус Сонячної системи

**Знайти:**

$\bar{\rho}_{\text{с.с.}}$  – ?

**Розв'язок:**

Якщо припустити, що маса Сонячної системи об'єднує масу Сонця, маси планет і маси усіх інших космічних тіл (астероїдів, комет, космічного пилу та ін.), що у ній містяться, то тоді її середня густина дорівнюватиме відношенню усіх цих мас до загального об'єму Сонячної системи:

$$\bar{\rho}_{\text{с.с.}} = \frac{M_{\odot} + \sum M_{\text{пл.}} + \sum m_{\text{аст.}}}{V_{\text{с.с.}}}$$

$$\bar{\rho}_{\text{с.с.}} = \frac{M_{\odot} + \sum M_{\text{пл.}} + \sum m_{\text{аст.}}}{\frac{4}{3} \pi R_{\text{с.с.}}^3}$$



### 14. Знайти середню густину Сонця

**Вихідні дані:**  $M_{\odot}$  – маса Сонця;

$R_{\odot}$  – радіус Сонця

**Знайти:**  $\bar{\rho}_{\odot}$  – ?

**Розв'язок:** середня густина Сонця, як і будь-якого тіла кулястої форми, приблизно дорівнюватиме:

$$\bar{\rho}_{\odot} = \frac{M_{\odot}}{V} = \frac{M_{\odot}}{\frac{4}{3} \pi R_{\odot}^3}$$

За розрахунками, середня густина Сонця становить  $1\,410 \text{ кг/м}^3$



### 15. Знайти середню густину речовини, що була розподілена по орбіті нашої планети Землі

**Вихідні дані:**  $M_{\oplus}$  – маса Землі,  $6 \cdot 10^{24}$  км

$R_{\oplus}^{\odot}$  – відстань від Землі до Сонця, 149,6 млн км

**Знайти:**

$\bar{\rho}_{\oplus}^{\odot}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.13): будемо вважати, що уся маса Землі колись була розпоршена у вигляді частинок, які розподілилися по орбіті й рухалися навколо Сонця. Отже, за фізичними законами, найімовірніше, цей космічний пил рухався по орбіті навколо Сонця у формі тора («бублика»), з якого пізніше сформувалася наша планета, тому відношення усієї маси Землі до його об'єму і буде середньою густиною:  $\bar{\rho}_{\oplus} = \frac{M_{\oplus}}{V_{\tau}}$

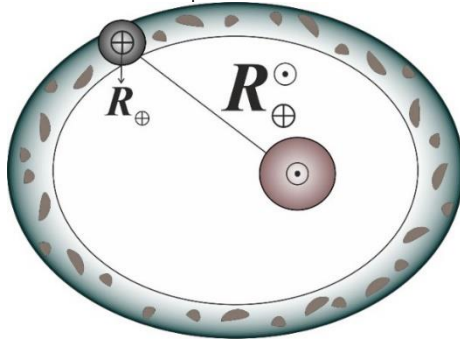


Рис. 5.13. Визначення густини речовини на орбіті нашої планети (до задачі 15)

**Об'єм тора визначається за формулою:**

$V_{\tau} = 2\pi^2 R_{\oplus}^{\odot} R_{\oplus}^2$ , тобто площа Землі з радіусом  $R_{\oplus}$  ( $\pi R_{\oplus}^2$ ), помноженим на довжину орбіти від Землі до Сонця ( $2\pi R_{\oplus}^{\odot}$ ).

**Тому середня густина речовини, що розподілена по орбіті нашої планети, буде визначатися за формулою:**

$$\bar{\rho}_{\oplus}^{\odot} = \frac{M_{\oplus}}{S} = \frac{M_{\oplus}}{2\pi^2 R_{\oplus}^{\odot} R_{\oplus}^2}$$



### 16. Знайти середню густина в системі Земля-Місяць

**Вихідні дані:**  $M_{\oplus}$  – маса Землі;

$R_{\oplus}^{\text{л}}$  – відстань від Землі до Місяця

**Знайти:**

$\bar{\rho}_{\oplus}^{\text{л}}$  – ?

**Розв'язок:** середню густина можна записати як відношення суми мас Землі та Місяця до об'єму, у якому вони обертаються:

$$\bar{\rho}_{\oplus} = \frac{M_{\oplus} + M_{\text{к}}}{\frac{4}{3}\pi(R_{\oplus})^3}$$



17. Знайти середню густину земної кори

**Вихідні дані:**  $M_{\text{кори}}$  – маса Землі;  
 $R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $H_{\text{кори}}$  – середня товщина земної кори

**Знайти:**  
 $\rho_{\text{кори}}$  – ?

**Розв'язок:**

середня густина земної кори є відношенням маси земної кори до її об'єму:

$$\bar{\rho}_{\text{кори}} = \frac{M_{\text{кори}}}{V_{\text{кори}}}$$

Зважаючи на те, що товщина земної кори набагато менша від радіуса Землі, то об'єм можна визначити як добуток площі поверхні сфери з радіусом  $R_{\oplus}$  ( $4\pi R_{\oplus}^2$ ) на середню товщину кори  $H_{\text{кори}}$ , тоді:

$$\bar{\rho}_{\text{кори}} = \frac{M_{\text{кори}}}{4\pi R_{\oplus}^2 H_{\text{кори}}}$$



18. Знайти середню густину верхньої та нижньої мантії

**Вихідні дані:**  $M_{\text{м}}$  – маса мантії;  
 $R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $H_{\text{к}}$  – товщина земної кори;  
 $H_{\text{я}}$  – товщина внутрішнього та зовнішнього ядра

**Знайти:**  
 $\bar{\rho}_{\text{мантії}}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.14):

Середня густина мантії є відношенням маси до її об'єму. Об'єм мантії можна визначити через відомі об'єми інших шарів у Землі, використовуючи товщину кори  $H_{\text{к}}$  і товщину ядра  $H_{\text{я}}$ :

$$\bar{\rho}_{\text{мантії}} = \frac{M_{\text{м}}}{V_{\text{м}}}$$

$$\bar{\rho}_{\text{мантії}} = \frac{M_{\text{м}}}{\frac{4}{3}\pi((R_{\oplus} - H_{\text{к}})^3 - (R_{\oplus} - H_{\text{я}})^3)}$$

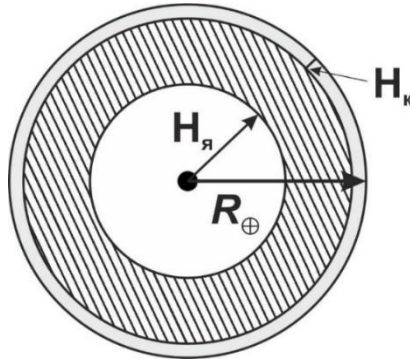


Рис. 5.14. Схематичне зображення до задачі 18



**19. Знайти середню «густину» океану**

**Вихідні дані:**  $M_{\text{води}}$  – маса води та льодовиків;  
 $R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $H_{\text{св.ок.}}$  – середня глибина океану

**Знайти:**  
 $\bar{\rho}_{\text{ок}}$  – ?

**Розв’язок:** «середня» густина океану дорівнюватиме відношенню маси води до об’єму всієї води. Вважаючи, що середня глибина Світового океану набагато менша від радіуса Землі, матимемо:

$$\bar{\rho}_{\text{ок}} = \frac{M_{\text{води}}}{V_{\text{води}}} = \frac{M_{\text{води}}}{4\pi R_{\oplus}^2 H_{\text{св.ок.}}}$$



**20. Визначити масу будь-якої з оболонок Землі за відомою середньою густиною  $\bar{\rho}$  та її верхньою і нижньою межами (або за відомою верхньою межею і товщиною  $H_{\text{об}}$ )**

**Вихідні дані:**

$R_j$  – відстань від центру Землі до верхньої межі;  
 $R_i$  – відстань від центру Землі до нижньої межі;  
 $H_{\text{об}}$  – товщина  $ij$  – оболонки;  
 $\bar{\rho}$  – середня густина  $ij$  – оболонки

**Знайти:**  $M_{ij}$  – ?

**Розв’язок** (рис. 5.15): масу будь-якого шару Землі можна записати у вигляді формули:  $dm = 4\pi r^2 \rho dr$  або  $m = 4\pi r^2 \bar{\rho} \Delta r$  (за умови, що  $\Delta r$  набагато менша від радіуса Землі).

Тоді маса будь якої  $ij$ –оболонки Землі визначатиметься за формулою (окрім внутрішнього ядра):

1) за відомою верхньою  $R_j$  та нижньою  $R_i$  межею:

$$M_{ij} = \int_{R_i}^{R_j} 4\pi r^2 \bar{\rho} dr = \frac{4}{3} \pi r^3 \bar{\rho} \Big|_{R_i}^{R_j}$$

$$M_{ij} = \frac{4}{3} \pi R_j^3 \bar{\rho} - \frac{4}{3} \pi R_i^3 \bar{\rho}$$

2) або за відомою верхньою межею  $R_j$  і товщиною оболонки  $H_{об}$ :

$$M_{ij} = \frac{4}{3} \pi \bar{\rho} R_j^3 - \frac{4}{3} \pi \bar{\rho} (R_j - R_{об})^3$$

Маса внутрішнього ядра визначатиметься за об'ємом сфери через радіус  $R_я$  та середнє значення густини  $\bar{\rho}$ :

$$M_я = \frac{4}{3} \pi \bar{\rho} R_я^3$$

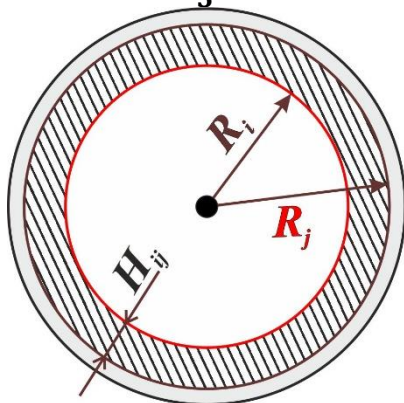


Рис. 5.15. Визначення маси будь-якої з оболонок Землі (до задачі 20)



### **Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

1. На якій підставі зроблена диференціація внутрішніх оболонок Землі?

2. Які оболонки виділяються у будові Землі? У яких агрегатних станах вони перебувають?

3. Які найпоширеніші елементи переважають у складі кожної оболонки Землі та як вони впливають на її фізичні властивості?

4. Знайти масу Землі за масою її оболонок і з урахуванням залежності від глибини густини кожної з оболонок.

5. Знайти масу земної кори з табличних даних.

6. Знайти масу верхньої мантії з табличних даних.

7. Знайти масу ядра з табличних даних.

8. Обчислити маси оболонок Землі з табличних даних і визначити, яка з оболонок становить найбільший відсоток у масі Землі.

9. Наскільки зміниться рівень  $\Delta H_{\text{св.ок.}}$  Світового океану, якщо усі льодовики розтануть.

#### 5.1.4. Момент інерції Землі та її оболонок

Момент інерції Землі є важливою фізичною характеристикою, що визначає інтенсивність падіння тіла з космосу та характеризує розподіл мас у тілі, і поряд із масою є мірою інертності тіла при поступальному русі. Ця фізична величина залежить від того, навколо якої осі тіло обертається і як розподілена його маса по об'єму. Головний момент інерції – це момент інерції щодо головної осі, яка проходить через центр мас. Отже, момент інерції тіла щодо осі обертання залежить від маси тіла та від розподілу цієї маси. Чим більша маса тіла і чим далі ця маса розташована від уявної осі обертання, тим більший момент інерції має тіло.

Оскільки Земля, внаслідок гравітаційної диференціації, складається з кількох шарів, що мають різну густину і віддалені на різній відстані, то важливим є внесок кожного шару (земної кори, мантії, ядра) у загальний момент інерції Землі. Стосовно густини відомо, що ядро є щільнішим і розташованим найближче до осі обертання, на відміну від легшої силікатного складу мантії, тому слід оцінити внесок оболонок у загальне значення моменту інерції.

Момент інерції Землі можна обчислити двома способами: 1) способом, який використовує закон збереження моменту імпульсу Землі (за масою Місяця); 2) способом додавання моментів інерції кожної з оболонок Землі: земної кори, мантії, ядра.

Метод знаходження моменту інерції Землі, коли використовується закон збереження моменту імпульсу Землі, базується на основі припущення про утворення Місяця із частинок речовини, що відділилися від Землі у результаті вибуху. Тому формула, що відображає момент інерції Землі (або будь-якої планети) така:

$$I_{\oplus} = \frac{1}{\omega_{\oplus}} R_{\oplus} M_{\zeta} v_{1к},$$

де  $R_{\oplus}$  – радіус Землі,  $R_{\oplus} = 6,371 \cdot 10^6$  м;  $M_{\zeta}$  – маса Місяця, тобто сума усіх частинок, що відділилися від Землі, з яких сформувався Місяць,  $M_{\zeta} = 7,35 \cdot 10^{22}$  кг;  $v_{1к}$  – перша космічна

швидкість, що для планети Землі становить  $v_{1к} = 7,9 \cdot 10^3$  м/с;  $\omega_{\oplus}$  – кутова швидкість обертання Землі,  $\omega_{\oplus} = 2\pi/T_{\oplus}$ , де  $T_{\oplus}$  – період добового обертання Землі навколо своєї осі,  $T_{\oplus} = 8,64 \cdot 10^4$  с.

Тоді  $I_{\oplus} = 5,2 \cdot 10^{37}$  кг  $\cdot$  м<sup>2</sup>.

Для знаходження моменту інерції Землі шляхом пошарового додавання моментів інерції уявимо собі Земну кулю, що складається з  $n$ -тонкостінних сфер (земна кора, верхня та нижня мантія, зовнішнє ядро), товщиною  $\Delta r$  та центрального твердого ядра, що має радіус  $R_{я}$ . Тоді момент інерції Земної кулі можна виразити такою формулою (момент інерції суцільного тіла кулястої форми, тобто ядра визначається за формулою:

$$I = \frac{2}{5} MR^2): I_{\oplus} = I_{i-n} + I_{я} = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 + \frac{2}{5} M_{я} R_{я}^2,$$

де  $I_{i-n}$  – момент інерції  $i$ -сфер загальною кількістю  $n$ ;  $I_{я}$  – момент інерції ядра;  $m_i$  – маса  $i$ -сфери;  $M_{я}$  і  $R_{я}$  – відповідно маса та радіус твердого земного ядра, припустивши, що воно має однорідну густину;  $r_i$  – радіус  $i$ -сфери, що змінюється від  $R_{я}$  до  $R_{\oplus}$ .

Масу  $i$ -сфери можна знайти за формулою:  $m_i = 4\pi\rho_i r_i^2 \cdot \Delta r$ . Тоді  $I_{i-n}$  з попереднього рівняння можемо записати таким чином:

$$I_{i-n} = \frac{8}{3} \pi \sum_{i=1}^n \rho_i r_i^4 \cdot \Delta r$$

Якщо припустити, що густина речовини Землі від поверхні твердого ядра до поверхні земної кори (від  $R_{я}$  до  $R_{\oplus}$ ) змінюється прямолінійно і безперервно, то вираз під знаком  $\Sigma$  можна замінити інтегралом:

$$I_{i-n} = \frac{8}{3} \pi \int_{R_{я}}^{R_{\oplus}} r^4 \rho(r) dr$$

Тоді момент інерції Землі дорівнюватиме:

$$I_{\oplus} = \frac{8}{3} \pi \int_{R_{я}}^{R_{\oplus}} r^4 \rho(r) dr + \frac{2}{5} M_{я} R_{я}^2$$

$$I_{\oplus} = \frac{8}{15} \pi \bar{\rho} (R_{\oplus}^5 - R_{я}^5) + \frac{2}{5} M_{я} R_{я}^2$$

Якщо припустити і використати середню густину оболонок вище ядра приблизно  $\rho = 3,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, радіус Землі  $R_{\oplus} = 6,371 \cdot 10^6$  м, радіус ядра  $R_{я} = 1,216 \cdot 10^6$  м, маса ядра  $M_{я} = 1,92 \cdot 10^{24}$  кг, тоді:

$$I_{\oplus} = 5,27 \cdot 10^{37} + 0,11 \cdot 10^{37} = 5,38 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$



Отже, значення моменту інерції Землі, що визначене двома різними способами, є майже однаковим. Це підтверджує розподіл густини у Землі та зосередження приблизно половини маси Землі у твердому земному ядрі.



**21. Знайти момент інерції  $I$  та момент імпульсу  $L$  Землі за відомими радіусом і масою, припустивши, що Земля є суцільним кулястим тілом однорідного складу, яке обертається навколо своєї осі.**

**Вихідні дані:**  $R_{\oplus}$  – радіус Землі;  
 $M_{\oplus}$  – маса Землі

**Знайти:**  $I_{\oplus} - ?$   
 $L - ?$

**Розв’язок:** момент інерції, якщо припустити, що Земля є суцільним тілом кулястої форми з однорідною густиною, визначається за формулою:  $I_{\oplus} = \frac{2}{5} M_{\oplus} R_{\oplus}^2$

Якщо підставити дані, то значення моменту інерції дорівнюватиме:

$$I = \frac{2}{5} \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2 = 9,7 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Момент імпульсу  $L$  Земної кулі буде визначатися:

$$L = I\omega = I \frac{2\pi}{T}$$

Тоді момент імпульсу дорівнюватиме:  $L = 7,1 \cdot 10^{33} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ .

Нижче наведена табл. 5.1, у якій подані дані для розрахунку моментів інерції оболонок Землі.

Таблиця 5.1

Верхні  $R_2$  і нижні  $R_1$  межі оболонок Землі та їхня густина

Оболонки Землі	Густина, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$	Глибина, км	Нижня межа $R_1$ , км	Верхня межа $R_2$ , км	Момент інерції*, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$
Земна кора	2,7 – 3,3	65	6 306	$R_{\oplus} = 6 371$	
Верхня мантія	3,3 – 5,0	700	5 671	6 306	
Нижня мантія	5,0 – 5,7	2885	3 486	5 671	
Зовнішнє ядро	9,9 – 12,2	5155	1216	3 486	
Внутрішнє ядро	12,6 – 13,0	6371	0	$R_{\text{я}} = 1 216$	

\*Доповніть таблицю самостійно, визначивши моменти інерції кожної з оболонок Землі й оцініть, яка з оболонок дає найбільший вклад у момент інерції Землі та порівняйте сумарні значення моменту інерції з моментом інерції як тіла сферичної форми зі середньою густиною  $5,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .



22. *Із розподілу густини речовини в надрах Землі знайти момент інерції земної кори за відомим радіусом Землі, потужністю кори 65 км та середньою густиною  $3,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$*

**Вихідні дані:**  $R_{\oplus}$  – радіус Землі, 6 371 км;

$H_k$  – потужність земної кори, 65 км;

$\bar{\rho}$  – середня густина кори,  $3,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

**Знайти:**

$I_k$  – ?

**Розв’язок:** момент інерції будь-якої оболонки, що не є тілом кулястої форми, включаючи і земну кору, визначається за формулою:

$$I_{об} = \frac{8}{3} \pi \int_{R_1}^{R_2} r^4 \bar{\rho}(r) dr,$$

де  $R_2$  та  $R_1$  – верхня та нижня межі земної кори, тобто відстані від осі обертання – центру Землі. Верхня межа  $R_2$  для земної кори – це радіус Землі  $R_{\oplus}$ , а нижня межа дорівнюватиме  $R_1 = R_{\oplus} - H_k$  (6 306 км).

Таким чином, момент інерції земної кори буде визначатися рівнянням:

$$I_k = \frac{8}{15} \pi \bar{\rho} (R_{\oplus}^5 - R_1^5)$$

$$I_k = \frac{8}{15} \cdot 3,14 \cdot 3,0 \cdot 10^3 \cdot \left( (6,371 \cdot 10^6)^5 - (6,306 \cdot 10^6)^5 \right)$$

$$I_k = 2,64 \cdot 10^{36} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

**Зробимо порівняння у різних оболонках Землі за цією ж формулою:**

Момент інерції верхньої мантії –  $2,82 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Момент інерції нижньої мантії –  $4,75 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Момент інерції зовнішнього ядра –  $9,5 \cdot 10^{36} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Момент інерції внутрішнього ядра –  $5,7 \cdot 10^{34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Отже, найбільший внесок у момент інерції Землі належить мантії.



**Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

1. *За відомими радіусом і масою Сонця знайти його момент інерції  $I$  щодо своєї осі обертання як тіла кулястої форми, що має однорідну густину.*

2. *Із розподілу густини речовини в надрах Землі знайти момент інерції верхньої мантії за відомими верхніми та нижніми границями, потужністю і середньою густиною (дані взяти з таблиці у відповідному додатку цього посібника).*

3. Із розподілу густини речовини в надрах Землі знайти момент інерції зовнішнього ядра Землі за відомими верхніми та нижніми границями, потужністю і середньою густиною (дані взяти з таблиці у відповідному додатку цього посібника).

4. Із розподілу густини речовини в надрах Землі знайти момент інерції внутрішнього ядра Землі за відомими верхніми та нижніми границями, потужністю і середньою густиною (дані взяти з таблиці у відповідному додатку цього посібника).

### 5.1.5. Тиск усередині Землі

Від поверхні Землі до її центру зростають густина (табл. 5.2, див. додаток Б), а відповідно – і тиск гірських порід у різних оболонках геосфери внаслідок зростання сили тяжіння порід, характерних для кожної геосфери, що залягають вище. Так, тиск у центрі планети за підрахунками (тобто відомими розмірами Землі та границь її геосфер) і геофізичними дослідженнями, припустивши, що густина внутрішнього твердого ядра приблизно  $12,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , становить  $3,6 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ . Нижче подана табл. 5.2, яка дає уявлення про тиск і температуру в мантії на глибинах, а задачі дають розуміння й уявлення про те, як визначати тиск в оболонках Землі та на їхніх межах.

Таблиця 5.2

Характеристики мантії за геофізичними дослідженнями

Глибина, км	Густина, $10^3 \text{ кг/м}^3$	Тиск, $10^{11} \text{ Па}$	Температура, К
100	3,359	0,0314	1610
200	3,420	0,0649	1610
300	3,479	0,0988	1680
400	3,540	0,1332	1750
500	3,742	0,171	1975
650	4,051	0,231	2075
800	4,365	0,295	2412
1000	4,570	0,386	2462
1250	4,712	0,502	2525
1500	4,850	0,621	2587
1750	4,985	0,743	2650
2000	5,116	0,869	2712
2250	5,242	0,999	2775
2500	5,365	1,134	2838
2885	5,550	1,354	2934



23. Обчислити тиск усередині Землі на відстані  $r$  від центру, припустивши, що Земля однорідна, тобто густина однакова

**Вихідні дані:**  $\rho$  – середня густина Землі;  
 $h$  – глибина у Землі від поверхні

**Знайти:**  $p_{\oplus} - ?$

**Розв’язок** (рис. 5.16):

Введемо деякі спрощення. Будемо вважати, що Земля є однорідним шаром, який має радіус  $R_{\oplus}$ . Поле тяжіння (гравітаційне поле) однорідного шару еквівалентне полю матеріальної точки такої ж маси, розміщеної в центрі кулі. Будь-яке тіло масою  $m$ , що розміщене на поверхні Землі, притягується до неї зі силою, яка дорівнює:  $F_{\text{гр.}} = G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$ . Відповідно це поле здійснює на Землю

тиск:  $p = \frac{F_{\text{гр.}}}{S}$ , де  $S$  – площа опори тіла ( $4\pi R_{\oplus}^2$ ). Якщо значна кількість таких тіл розміщена на поверхні Землі тонким сферичним шаром, то тиск такого сферичного шару масою  $dm$  дорівнюватиме:

$$dp = G \frac{M_{\oplus} dm}{4\pi R_{\oplus}^4}.$$

Сила тяжіння тіла до Землі залежить від відстані до її центру. Відповідно товщина сферичного шару має бути значно меншою порівнянно з цією відстанню. Кожен сферичний шар здійснює тиск на шари, що залягають нижче. Для розрахунку тиску в центрі Землі необхідно використати метод диференціювання та інтегрування (детальніше див. підрозділ 4.7).

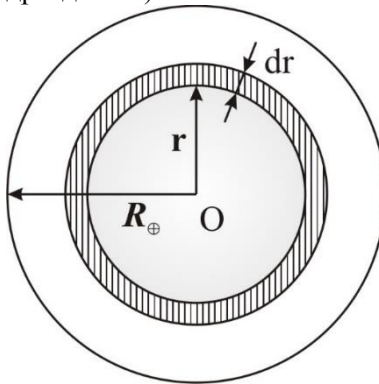


Рис. 5.16. Тиск усередині Землі на відстані  $r$  від центру

Розділимо Землю на тонкі сферичні шари. Розглянемо один такий шар товщиною  $dm$ , розміщений на відстані  $r$  від центру Землі O (рис. 5.16). Він притягується до частини Землі (зафарбована сірим кольором на рис. 5.16), що міститься всередині (зовнішня частина Землі не діє на шар), зі силою:  $dF_{\text{гр.}} = G \frac{4\pi r^2 dr \rho}{r^2} \cdot \frac{4\pi r^3 \rho}{3}$ , де  $\rho$  – середня густина Землі. Звідси впливає тиск шару:

$$dp = \frac{dF_{\text{гр.}}}{4\pi r^2} = G \frac{4\pi \rho^2 r dr}{3}$$

Після інтегрування отримуємо, позначивши радіус Землі  $R_{\oplus}$ , тиск усередині Землі на відстані  $r$  від центру Землі  $r = R_{\oplus} - h$ :

$$p(h) = \int_r^{R_{\oplus}} dp = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 (R_{\oplus}^2 - r^2)$$

Якщо підставити замість  $r = R_{\oplus} - h$ , то отримаємо тиск на глибині  $h$ :  $p(h) = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 (2R_{\oplus}h - h^2)$



24. Знайти тиск у центрі Землі, припустивши, що Земля однорідна

**Вихідні дані:**  $\rho$  – середня густина Землі;  
 $R_{\oplus}$  – радіус Землі

**Знайти:**  $p_{\oplus} - ?$

**Розв'язок** (рис. 5.17):

З отриманого раніше рівняння:  $p(h) = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 (2R_{\oplus}h - h^2)$  знаходимо тиск у центрі Землі (тобто задаємо необхідну умову –  $R_{\oplus} = h$ ):  $p = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 R_{\oplus}^2$ . Якщо підставити значення, то отримаємо (вважаючи, що середня густина Землі  $\bar{\rho} = 5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ):  $p \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  або **0,2 ТПа**. Відомо, що нормальний атмосферний тиск дорівнює приблизно  $10^5$  (101 325) Па. Отже, тиск у центрі Землі перевищує на шість порядків нормальний атмосферний тиск.

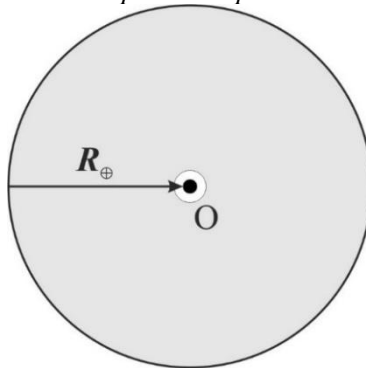


Рис. 5.17. Тиск у центрі Землі (Земля однорідна)

Проте за сейсмічними даними густина в центрі Землі у внутрішньому ядрі є більшою і становить  $\rho = 12,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Тому відповідно тиск теж майже у два рази буде більшим:  $p = 3,6 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ .



25. За відомими масами оболонок Землі обчислити тиск на їхніх межах, наприклад, на межі мантії та ядра

**Вихідні дані:** *i* – верхні оболонки, мантія + земна кора;  
*j* – нижня оболонка, ядро;  
*ij* – межа оболонок – мантії та ядра;  
*M<sub>i</sub>* – маса порід оболонок, що залягають вище межі *ij*;  
*M<sub>j</sub>* – маса порід оболонок, що залягають нижче межі *ij*

**Знайти:**  
*p<sub>ij</sub>* – ?

**Розв’язок** (рис. 5.17):

Тиск на межі будь-яких оболонок *ij* Землі дорівнюватиме відношенню гравітаційної сили *F<sub>гр.ij</sub>* до площі сфери *S<sub>ij</sub>*, що відповідає межі розділення оболонок, радіусом *R<sub>ij</sub>* від центру Землі:

$$p_{ij} = \frac{F_{гр.ij}}{S_{ij}} = G \frac{\sum M_i \cdot \sum M_j}{4\pi R_{ij}^2 R_{ij}^2} = G \frac{\sum M_i \cdot \sum M_j}{4\pi R_{ij}^4}$$

Для прикладу спробуємо записати тиск на межі мантії та внутрішнього ядра. Сума мас оболонок  $\sum M_i$ , що залягають вище межі *ij*, дорівнюватиме масі земної кори, масі верхньої та нижньої мантії, а  $\sum M_j$  (оболонок, що залягають нижче межі *ij*) – тільки масі внутрішнього та зовнішнього ядра. Тому можемо записати таке рівняння:

$$p_{ij} = G \frac{(M_{з.к.} + M_{в.м.} + M_{н.м.}) \cdot (M_{зн.я.} + M_{вн.я.})}{4\pi R_{ij}^4}$$

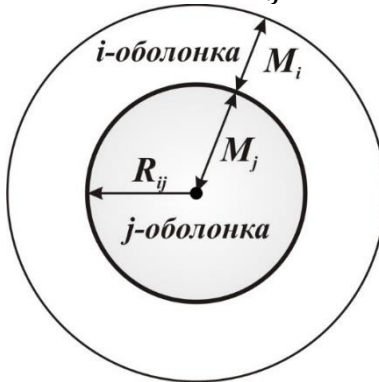


Рис. 5.17. Тиск на межах оболонок Землі



### Завдання для самоконтролю та самостійної роботи

1. Обчислити тиск на межі нижньої та верхньої мантії за відомими масами оболонок.
2. Обчислити тиск у центрі Місяця з табличних даних за припущенням однорідності густини.
3. Знайти тиск усередині Сонця за табличними даними, припустивши, що густина однакова.

4. Як знайти тиск усередині Землі з карти України за методом Ератосфена та припущенням, що Земля однорідна?

5. Знайти тиск у центрі Землі з карти України, припустивши, що Земля однорідна за густиною?

6. Припустивши, що густина однакова, обчислити тиск усередині та в центрі планети Марс.

7. Знайти, користуючись виведеною формулою, тиск на межі структурних оболонок Землі.

### **5.1.6. Температура у внутрішніх оболонках Землі**

Основним джерелом внутрішньої теплової енергії є енергія радіоактивного розпаду хімічних елементів у надрах Землі. Внутрішнє тепло дає поєднання залишкового тепла від планетарної акреції з теплом, що виникає внаслідок радіоактивного розпаду хімічних елементів. За різними оцінками, від 45 до 90 % тепла, що виходить із Землі, походить від радіоактивного розпаду елементів, що головним чином розташовані у мантиї. Підраховано, що 1 г радію виділяє 140 ккал тепла за годину, а при повному його перетворенні у свинець виділяється 3 млн ккал, що еквівалентно згоранню 500 кг кам'яного вугілля.

Температура у земних оболонках з глибиною зростає. Зміна температури (в градусах Цельсія) на кожні 100 м глибини у надрах Землі називається *геотермічним градієнтом*. Відстань у метрах, упродовж якої температура підвищується на 1 °С, називається *геотермічним ступенем*. Величину геотермічного градієнта й геотермічного ступеня відраховують від поясу, що має постійну температуру і залягає на глибинах близько 15–40 м, залежно від географічного положення місцевості.

Величина геотермічного градієнта у середньому становить 3 °С на кожні 100 м, а величина геотермічного ступеня – 33 м. Проте у різних районах Землі значення цих величин неоднакові. Наприклад, величина геотермічного ступеня у верхніх шарах літосфери змінюється в межах: у Донбасі – 28–33 м, у Харкові – 37,7 м, у США – 7–138 м, а максимально у Південній Африці – 167 м. Згідно з розрахунками, до глибини 20 км зберігається геотермічний ступінь, який відомий для поверхневих горизонтів Землі. Нижче 20 км, ймовірно, зростання температури з глибиною уповільнюється, оскільки за такого геотермічного градієнта температура у центрі Землі досягала би 45 тис. °С, що призвело би до порушення магнітних властивостей залізо-нікелевого ядра, а

температура, за різними підрахунками, у ядрі становить близько 7000 °С.

У різних точках Землі при бурінні свердловин зафіксовані теж неоднакові значення температур: у Північному Прикаспії – 108,3 °С на глибині 3 000 м, у США – 244 °С на глибині 7 136 м, у Краснодарському краї – 219,4 °С на глибині 6267 м.



**26. Визначити температуру гірських порід у найглибшій шахті України – шахті Шахтарська-Глибока (Донецька обл.), що міститься на глибині близько 1 546 м, якщо температура шару земної кори, яка не залежить від пори року, становить 10 °С**

**Вихідні дані:**  $h$  – глибина шахти, 1 546 м;

$T_1$  – температура шару земної кори, 10 °С

**Знайти:**

$T$  – ?

**Розв’язок:** через кожні 33 м температура підвищується на 1 °С, тому:  $\Delta T = \frac{1\,546}{33} = 47$  °С.

Отже, температура гірських порід у шахті становитиме:

$$T = T_1 + \Delta T = 57$$
 °С.



**27. Якою буде температура повітря в шахті глибиною 1 400 м у різні пори року: влітку при температурі повітря на поверхні +25 °С і взимку при температурі –25 °С?**

**Вихідні дані:**  $h$  – глибина шахти, 1 320 м;

$T_1$  – температура шару земної кори влітку, +25 °С;

$T_2$  – температура шару земної кори взимку, –25 °С

**Знайти:**

$T$  – ?

**Розв’язок:** визначимо, наскільки збільшиться температура на глибині 1 400 м, використовуючи геотермічний ступінь (33 м / 1 °С):  $\Delta T = \frac{h}{33} = \frac{1\,320}{33} = 40$  °С.

Тому температура повітря в шахті у різні пори року становитиме:  $T = T_1 + \Delta T$  .

Влітку температура буде +65 °С, а взимку – +15 °С.



**Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

1. Що таке геотермічний ступінь і геотермічний градієнт? Наведіть приклади цих величин у різних точках Землі.

2. Найглибша свердловина, що пробурена у Карпатах, – свердл. Шевченково-1 має глибину 7 522 м. Визначити, наскільки зміниться температура у цій свердловині порівняно з



температурою поверхневого шару земної кори (температуру на поверхні взяти 15 °С).

3. Визначити, якою могла би бути температура гірських порід у найглибшій шахті світу – золоторудній шахті Тау-Тона (ТауТона Міне, Йоганнесбург, ПАР), що міститься на глибині близько 4 000 м, хоча насправді температура через специфіку геологічної будови там сягає лише 50-60 °С.

4. Визначити глибину шахти, якщо температура гірських порід у ній становить 100 °С.

5. Визначити температуру повітря у шахті, що має глибину 891 м, якщо на поверхні температура становить 8 °С.

6. Визначити температуру в шахті, якщо на поверхні Землі  $t = +8$  °С, а глибина шахти 750 м.

7. Визначити температуру в шахті, якщо на поверхні Землі  $t = +15$  °С, а глибина шахти 1000 м.

8. Визначити температуру в шахті, якщо на поверхні Землі  $t = -20$  °С, а глибина шахти 1000 м.

9. Визначити температуру на поверхні Землі, якщо у шахті глибиною 1000 м температура становить +30 °С.

10. Температура на поверхні +24 °С, а на глибині +34 °С. Знайти ймовірну глибину шахти.

### **5.1.7. Температура, тиск в атмосфері та її маса**

Атмосфера – газова оболонка Землі, що утворена зі суміші газів, які мають різне походження та вік. Первинна атмосфера за своїм складом була зовсім іншою, ніж сучасна атмосфера. Первинна, або безкиснева атмосфера, головню, була складена продуктами виплавлення та дегазації речовин земних надр. Це була суміш водню, метану, аміаку, парів води та ін. Наявність у ній значного вмісту вуглекислого газу сумнівна. Про це свідчать сліди великих зледенінь у древніших шарах Землі.

Усі гази первинної атмосфери, що входять у сучасну атмосферу, виділялися із глибин Землі поступово, протягом значної частини геологічної історії нашої планети або були перетворені вже у самій атмосфері в результаті дегазації. Більшість газів земної кори та мантії вступали у реакцію з водою та мінералами кори, певна частина молекул цих газів розщеплювалася під дією сонячної радіації. Гази виходили на земну поверхню під час вулканічних процесів по великих розломах земної кори, повільно просочувались у зовнішній простір крізь крихкі та пористі породи. Поле тяжіння Землі притягувало гази, що вийшли із земних надр і з'єднувалися

між собою внаслідок хімічних реакцій. Поступово густина первинної атмосфери підвищувалася за рахунок безперервної дегазації земних надр. Переважна більшість водяної пари конденсувалась і випадала на Землю, а меншість – залишалась у газоподібному стані над землею поверхнею. Деякі гази (інертний аргон) накопичувалися в атмосфері. Такі гази як аргон і гелій утворювалися шляхом розпаду радіоактивних елементів. Близько  $3,5 \cdot 10^9$  років тому атмосфера була азотно-аміачно-вуглекислою, у ній вміст  $\text{CO}_2$  досягав 50-60 %. У ранньому протерозої (2,6 – 1,9 млрд років тому) відбулася зміна складу первинної атмосфери у результаті процесів гідратації океанічної кори океанічними водами. З того часу почав діяти потужний механізм з'єднання  $\text{CO}_2$  у карбонатах, а його парціальний тиск у атмосфері почав зменшуватися. Із рифтових зон серединно-океанічних хребтів у відкритий океан почала надходити значна кількість «свіжих» гірських порід і почали відкладатися потужні товщі карбонатних порід. Ці породи зв'язувалися з  $\text{CO}_2$ , що перед тим накопичився у первинній архейській атмосфері (3,5–2,6 млрд років тому). Одночасно з карбонатами із рифтових зон виносилося двовалентне залізо, яке на мілководді поступово окислювалося до тривалентного, посилено поглинаючи кисень, який виробили мікрободорості. Тому в докембрійську епоху атмосфера Землі мала дуже низький парціальний тиск кисню. Лише після повного зникнення вільного заліза у мантії, на межі протерозою та фанерозою (570 млн років тому), кисень почав накопичуватися в атмосфері.

Вільний кисень, що виділився із земних надр, практично увесь пішов на окислення деяких металів верхньої товщі Землі. Маса кисню становила близько 33 % від його сучасної маси і поступово збільшувалася. Незначним джерелом формування кисню був розпад молекул води на складові частини під дією ультрафіолетового випромінювання Сонця у верхніх шарах повітряної оболонки Землі. Проте основна маса кисню вивільнялася внаслідок фотосинтезу. Поява кисню в первинній атмосфері різко змінила її склад. Він поглинався в океанах, розчинявся у його водах і осаджувався у вигляді вугільної кислоти, що сприяло формуванню вапнякових товщ. Поступово в атмосфері Землі почав переважати азот  $\text{N}_2$  і збільшуватися кисень. Близько 200 млн років тому сформувалася сучасна вторинна атмосфера, в якій переважає азот.

Повітряна оболонка – атмосфера, як і тверде тіло Землі, не є симетричною щодо центру сили тяжіння Землі. Маса атмосфери з урахуванням особливостей рельєфу Землі та розподілу температури

по її поверхні становить  $5,27 \cdot 10^{18}$  кг. У теплий період вона більша, ніж у холодний, приблизно на  $10^{10}$  кг. Крім того, у результаті планетарного тепла та масообміну маса атмосфери має сезонний перерозподіл. Наприклад, зі січня до липня з Північної півкулі мігрує у Південну близько  $4 \cdot 10^{15}$  кг повітря. Маса атмосфери розподілена по висоті нерівномірно: 50 % її зосереджено у нижньому 5-кілометровому шарі, 75 % – до висоти 10 км; 99 % – у нижньому 30-кілометровому шарі. Нижньою межею атмосфери є поверхня материків та океанів. Верхню границю атмосфери виділити складно. На поверхні Землі густина повітря приблизно дорівнює  $\rho \approx 1,24-1,30$  кг/м<sup>3</sup>. З висотою значення  $\rho$  зменшується і на висоті 60-70 тис. км над земною поверхнею поступово наближається до густини міжпланетного середовища.

Важливими характеристиками фізичного стану атмосфери є, крім густини, атмосферний тиск, температура та вологість повітря тощо. Усі ці характеристики змінюються як по вертикалі, так і по горизонталі, проте найбільш різкі зміни спостерігаються у вертикальному напрямку. Виділяють по вертикалі декілька шарів: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, екзосфера.

Температура повітря у нижніх шарах атмосфери знижується з висотою у середньому на  $6^\circ\text{C}$  на кожен 1 км висоти (*вертикальний градієнт температури*). Натомість у горизонтальному напрямку на  $6^\circ\text{C}$  температура змінюється лише через 500-600 км. Атмосферний тиск у повітряній оболонці з підняттям угору знижується на 1 мм рт. ст. на кожні 10 м підйому.



**28. Обчислити масу атмосфери зі сучасної геологічної або екологічної карти України за відомим атмосферним тиском  $p_0$ , прискоренням вільного падіння  $g$  (за широтами Києва ( $\varphi_1$ ) та Одеси ( $\varphi_2$ ), відстанню  $L$  між цими містами)**

**Вихідні дані:**  $\varphi_1$  – широта Києва;

$\varphi_2$  – широта Одеси;

$L$  – відстань між містами на карті;

$P$  – атмосферний тиск (101 325 Па)

**Знайти:**

$m_{\text{атм.}}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.18):

Вага атмосфери:  $F_{\text{атм.}} = m_{\text{атм.}}g$ , де  $m_{\text{атм.}}$  – маса атмосфери.

Тиск, який створює атмосфера на поверхню Землі, визначається за формулою:  $p_0 = \frac{F_{\text{атм.}}}{S}$ , де  $S = 4\pi R_{\oplus}^2$  – площа поверхні Землі.

$$\text{Тоді } p_0 = \frac{m_{\text{атм}}g}{4\pi R_{\oplus}^2}$$

На поверхні Землі атмосферний тиск відомий і становить за н.у.:  $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$ .

$$\text{Тоді } m_{\text{атм}} = \frac{p_0 4\pi R_{\oplus}^2}{g} \text{ або } m_{\text{атм}} = \frac{p_0 4\pi R_{\oplus}^4}{g M_{\oplus}}$$

Відомо, що  $R_{\oplus} = \frac{180^\circ L}{\pi(\varphi_1 - \varphi_2)}$  (з попередніх задач для визначення радіуса Землі за методом Ератосфена).

Отже,

$$m_{\text{атм}} = \frac{p_0 4\pi}{g} \cdot \frac{(180^\circ)^2 L^2}{\pi^2(\varphi_1 - \varphi_2)^2} = \frac{4p_0(180^\circ)^2 L^2}{g\pi(\varphi_1 - \varphi_2)^2}$$

Наприклад, коли підставимо дані, то матимемо:

$$m_{\text{атм}} = \frac{101\,325 \cdot 4 \cdot 180^2 \cdot 444\,000^2}{9,8 \cdot 3,14 \cdot 4^2}$$

$$m_{\text{атм}} = 5,3 \cdot 10^{18} \text{ (кг)}$$

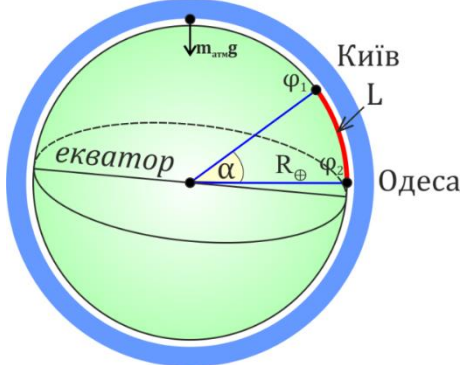


Рис. 5.18. Визначення маси атмосфери Землі за геологічною картою України



**29. Визначити температуру докембрійської атмосфери Землі, що була аналогом сучасної атмосфери Венери, якщо висота її 20 м, а складалася вона в основному з діоксиду вуглецю. Відомими є маса та радіус Землі.**

**Вихідні дані:**  $M_{\oplus}$  – маса Землі;

$R_{\oplus}$  – радіус Землі;

$h_{\text{атм}}$  – висота атмосфери;

$M_{\text{CO}_2}$  – молярна маса вуглекислого газу, 44 г/моль

**Знайти:**

$T_{\text{атм.}}^{\oplus}$  – ?

**Розв'язок:** Стан газу в атмосфері описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона:  $pV_{\text{атм.}} = \frac{m_{\text{атм}}}{M_{\text{CO}_2}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus}$ , де  $R$  – універсальна газова стала, 8,31 Дж/(моль · К).

Це рівняння можна записати в іншому вигляді, враховуючи те, що  $\rho_{\text{атм.}} = \frac{m_{\text{атм.}}}{V_{\text{атм.}}}$ :

$$p = \frac{m_{\text{атм.}}}{V_{\text{атм.}} \cdot M_{\text{CO}_2}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus} = \frac{\rho_{\text{атм.}}}{M_{\text{CO}_2}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus}$$

Тиск газу, висота якого дорівнює  $h$ , визначатиметься за формулою:

$$p = \frac{\text{вага атмосфери}}{\text{площа сфери Землі}} = \frac{P}{S}$$

$$p = \frac{\rho_{\text{атм.}} S h_{\text{атм.}} g}{S} = \rho_{\text{атм.}} g h_{\text{атм.}}$$

Тоді:

$$\frac{\rho_{\text{атм.}}}{M_{\text{CO}_2}} RT_{\text{атм.}}^{\oplus} = \rho_{\text{атм.}} g h_{\text{атм.}}$$

Звідси маємо:

$$T_{\text{атм.}}^{\oplus} = \frac{M_{\text{CO}_2} h_{\text{атм.}}}{R} \cdot g = \frac{M_{\text{CO}_2} h_{\text{атм.}}}{R} \cdot G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$$

Наприклад, коли підставимо дані, то матимемо:

$$T_{\text{атм.}}^{\oplus} = \frac{44 \cdot 20}{8,31} \cdot 9,8 = 1\,142 \text{ К (869 }^{\circ}\text{C)}$$

Для прикладу температура атмосфери Венери на поверхні Землі становить 740 К (467 °C).



**30. Визначити температуру на найвищій вершині Українських Карпат, якщо біля підніжжя вона становить 20 °C.**

**Вихідні дані:**  $T_1$  – температура біля підніжжя, 20 °C;  
 $H$  – висота г. Говерли, 2,061 км

**Знайти:**  
 $T$  – ?

**Розв'язок:**

При піднятті на 1 км температура знижується на 6 градусів.

Таким чином, зміна температури від підніжжя до г. Говерли становитиме:  $\Delta T = H \cdot 6 = 2,061 \cdot 6 = 12,4$  °C.

Біля підніжжя температура 20 °C, тоді на горі Говерлі температура буде нижчою і становитиме:  $T = 20 - 12,4 = 7,6$  °C.



**31. На найвисокогірнійшій метеорологічній станції «Пожижевська», що розташована у Карпатах неподалік г. Говерли, температура повітря на 3,8 °C вища, ніж на найвищій вершині Українських Карпат. Визначити, на якій абсолютній висоті працює ця метеостанція.**

**Вихідні дані:**  $\Delta t$  – зміна температури,  $3,8\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $H_2$  – висота г. Говерли,  $2,061\text{ км}$

**Знайти:**  
висоту  $H_1$  – ?

**Розв'язок:**

Висоту метеостанції можна знайти за формулою, використавши температурний градієнт, зміну температури на  $6$  градусів на  $1\text{ км}$ :  $H_1 = H_2 - (\Delta t : 6\text{ }^\circ\text{C})$ .

Тоді абсолютна висота, на якій розташована метеостанція, становитиме:  $H_1 = 2,061\text{ км} - (3,8\text{ }^\circ\text{C} : 6\text{ }^\circ\text{C}) = 1,430\text{ км}$ .



**32. Яким буде атмосферний тиск на вершині г. Роман-Кош ( $1\,545\text{ м}$ ), якщо біля підніжжя, що лежить на висоті  $75\text{ м}$ , тиск становить  $740\text{ мм рт. ст.}$**

**Вихідні дані:**  $p_1$  – тиск біля підніжжя,  $740\text{ мм рт. ст.}$ ;  
 $H_1$  – висота підніжжя,  $75\text{ м}$ ;  
 $H_2$  – висота г. Роман-Кош,  $1\,545\text{ м}$

**Знайти:**  
 $p_2$  – ?

**Розв'язок:**

Біля підніжжя висота становить  $75\text{ м}$ , висота гори –  $1545\text{ м}$ , тому різниця буде  $1470\text{ м}$ . З висотою тиск знижується –  $1\text{ мм рт. ст.}$  на  $10\text{ м}$ . Тому різниця тиску буде становити:  $1470/10 = 147\text{ мм рт. ст.}$  Тиск на г. Роман-Кош дорівнюватиме:

$$p_2 = p_1 - 147 = 740 - 147 = 593\text{ мм рт. ст.}$$



**33. Визначити абсолютну висоту гори, якщо атмосферний тиск на її вершині становить  $650\text{ мм рт. ст.}$**

**Вихідні дані:**  
 $p_2$  – тиск на вершині гори,  $650\text{ мм рт. ст.}$

**Знайти:**  $H_2$  – ?

**Розв'язок:**

Атмосферний тиск знижується з підняттям вгору на  $10\text{ мм рт. ст.}$  на кожні  $100\text{ м}$  підйому. На рівні моря тиск становитиме  $760\text{ мм рт. ст.}$  Тому різниця тиску на рівні моря і на вершині гори становитиме  $110\text{ мм рт. ст.}$  ( $760-650$ ).

$$\text{Визначаємо висоту гори } H_2: H_2 = 110/10 \cdot 100\text{ м} = 1\,100\text{ м.}$$



**34. В Антарктиді від потужного льодового поля відколовся айсберг товщиною  $1800\text{ м}$ . Визначте атмосферний тиск на його вершині, якщо на шельфовому льодовому полі заввишки  $1800\text{ м}$  тиск становив  $540\text{ мм рт. ст.}$**

**Вихідні дані:**  $H_2$  – висота айсберга,  $1800\text{ м}$ ;  
 $p_1$  – тиск атмосфери на висоті  $1800\text{ м}$ ,  $540\text{ мм рт. ст.}$

**Знайти:**  
 $p_2$  – ?

**Розв'язок:**

Густина льоду та густина води є різними і співвідносяться як 900 до 1000. Тому, потрапивши у воду, 9/10 айсберга буде перебувати під водою, а лише 1/10 – над водою. Визначимо висоту айсберга над водою – 180 м:  $1800 \cdot 0,1 = 180$  м.

Визначимо різницю між висотою льодового поля та висотою айсберга над рівнем моря:  $1800 - 180 = 1620$  м.

Тому тиск на вершині айсберга буде більший і дорівнюватиме:  $p_2 = 540 + 1620 / 10 = 702$  мм рт. ст.



**35. Визначити напрямок і швидкість вітру, якщо у пункті А атмосферний тиск дорівнює 1022 мб, у пункті В – 968 мб, а відстань між цими пунктами становить 1 200 км.**

**Вихідні дані:**

$p_A$  – тиск у точці А, 1 022 мбар;  
 $p_B$  – тиск у точці В, 968 мбар;  
 $L$  – відстань між А і В, 1 200 км.

**Знайти:**

Швидкість вітру  $v_{вітру}$  – ?  
Напрямок вітру – ?

**Розв'язок:** для того, щоб визначити швидкість вітру, необхідно провести відповідні розрахунки:

1) визначити різницю атмосферних тисків між пунктами А і В:  $1\ 022 - 968 = 54$  мб (1 мб = 100 Па або приблизно 0,75 мм рт. ст.);

2) визначити, як змінюється атмосферний тиск на кожні 100 км за рівнянням, якщо відомо, що на відстані 1200 км він змінився на 54 мб:

Якщо 1 200 км – 54 мб, а 100 км –  $x$  мб

Тоді  $x = (54 \cdot 100 / 1200) = 4,5$  мб

3) швидкість вітру можна визначити, помноживши одержану величину на коефіцієнт 3:

$v_{вітру} = 4,5 \cdot 3 = 13,5$  м/с.

Напрямок вітру буде від області з високим тиском у область з низьким, тобто вітер буде дути від пункту А до пункту В.



**Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

1. Зобразити профілі зміни тиску  $p$  і температури  $T$  з висотою.

2. Знайти температуру атмосфери на поверхні будь-якої планети з однорідною атмосферою за відомим радіусом і масою планети.

3. Визначити, на якій висоті в Карпатах з'явиться зона снігів і льодовиків, якщо біля підніжжя середня річна температура становить  $+16^{\circ}\text{C}$ . Що це за вершина могла би бути?

4. Температура повітря у січні на вершині гори в середньому становить  $-4^{\circ}\text{C}$ , а біля її підніжжя, на висоті 400 м над рівнем моря,  $+2^{\circ}\text{C}$ . Визначити абсолютну висоту гори.

5. Визначити температуру повітря на вершині г. Аконкагуа (6 962 м), якщо біля її підніжжя температура становить  $+24^{\circ}\text{C}$ .

6. Яка буде температура на найвищій вершині Анд, якщо на узбережжі температура становить  $28^{\circ}\text{C}$ .

7. Атмосферний тиск біля підніжжя гори, який зафіксували альпіністи, становив 540 мм рт. ст. На вершині гори атмосферний тиск становить 225 мм рт. ст. Визначити абсолютну висоту гори.

8. Визначити, наскільки нормальний атмосферний тиск найвищої рівнинної частини України (г. Берда, 515 м) більший від відповідного значення на вершині г. Говерла за відомим нормальним атмосферним тиском на рівні моря.

9. Визначити висоту хмарочоса, якщо біля входу в нього атмосферний тиск становить 770 мм рт. ст., а на покрівлі – 730 мм рт. ст.

10. Яким буде тиск на висоті 3 000 м, якщо на рівні моря він становить 760 мм рт.ст.

11. Тиск повітря біля підніжжя гори на висоті 100 м над рівнем моря дорівнює 750 мм рт. ст., а на вершині гори у цей час – 550 мм рт. ст. Обчислити абсолютну висоту гори.

### **5.1.8. Висота гір на планетах Сонячної системи**

Кожна планета Сонячної системи, що має тверду поверхню, характеризується своїм неповторним рельєфом. Чи це гори або западини, чи інші форми рельєфу, проте вони є неповторними і характерними лише для певної планети, що зумовлено насамперед відмінними фізичними процесами та явищами й механічними властивостями речовини планети. Відомо, що найвищою вершиною на Землі є гора Еверест (або Джомолунгма) у Гімалаях, висота якої – 8 848 м. Чому не 15 км або 30 км? Якою ж все-таки може бути максимальна висота гір на планетах Сонячної системи? Для прикладу, на сусідній планеті Марс найвищою вершиною є гора Олімп, згаслий і не діючий вже вулкан, що досягає 27 км від підніжжя або 25 км від середнього рівня поверхні планети, і має круті схили по боках, висотою до 7 км (рис. 5.19, 5.20).



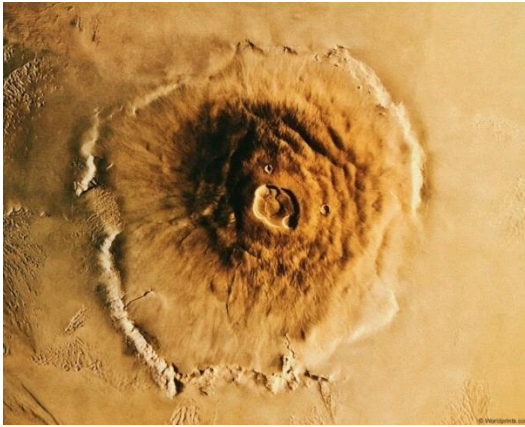
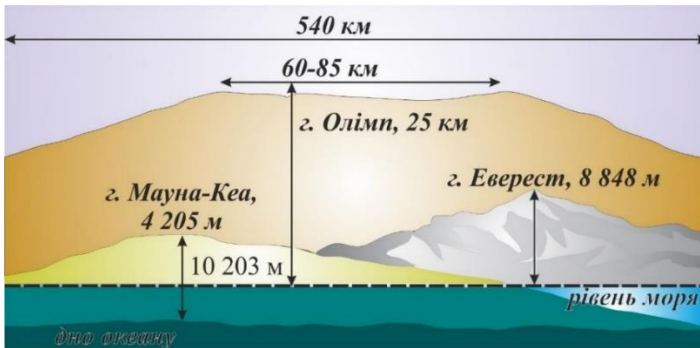


Рис. 5.19. Фото з космосу найвищої вершини Сонячної системи – гори-вулкану Олімп на планеті Марс (висота 25 км, ширина 540 км)



г. Мауна-Кеа



г. Еверест

Рис. 5.20. Порівняння характеристик найвищих вершин на Землі (г. Еверест, г. Мауна-Кеа) та на планеті Марс (г. Олімп)

Гора Олімп і є *найвідомішою найвищою горою у Сонячній системі*. Виникає питання: чому на сусідній із Землею планеті гори у три рази вищі, ніж на нашій планеті? Чому на одних планетах гори є і вони порівняно високі, а на інших – гори менші або їх майже немає? Подані нижче задачі дадуть розуміння такого

фізичного явища і відповідь на питання: чому ж такі відмінності у висотах гір Сонячної системи і чим це можна пояснити з фізичної точки зору?



36. Яка максимально можлива висота гори  $H_{max}$ , що складена магматичними гірськими породами, густиною  $\rho_{г.п.}$ , з позиції плавлення порід? (відомою є питома теплота плавлення, наприклад, базальту  $\lambda_{пл}$ )

**Вихідні дані:**

$\lambda_{пл}$  – питома теплота плавлення базальту;

$\rho_{г.п.}$  – густина базальту

**Знайти:**  $H_{max}$  – ?

**Розв'язок** (рис. 5.21):

Збільшення висоти гори на  $\Delta x$  викличе збільшення її потенціальної енергії на величину, що дорівнює  $M_2 g \Delta x$ .

$$\Delta E_n = M_2 g (H_{max} + \Delta x) - M_2 g H_{max} = M_2 g \Delta x$$

Ця енергія витратиться на розплавлення частини гори в її основі з такою ж потужністю  $\Delta x$ , що матиме масу  $\Delta m$ .

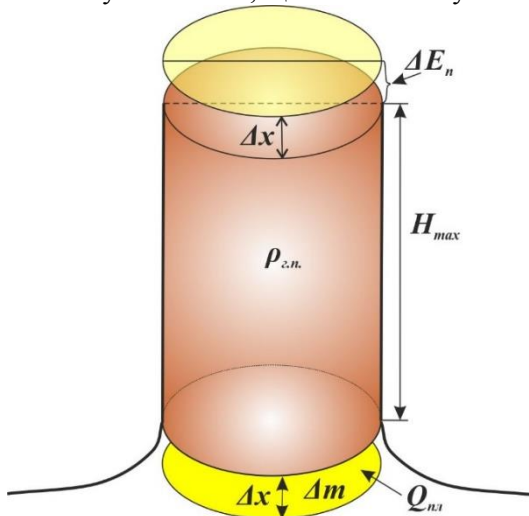


Рис. 5.21. Висота гори з позиції плавлення порід

Тобто зміна потенціальної енергії дорівнюватиме теплоті, що піде на плавлення порід, масою  $\Delta m$  – маса надлишкової частини гори з потужністю  $\Delta x$ .

$$Q_{пл} = \Delta m \lambda_{пл}. (\Delta m - \text{маса порід, що плавляться})$$

$$\text{Так як } \Delta E_n = Q_{пл}, \text{ тоді } M_2 g \Delta x = \Delta m \lambda_{пл}.$$

Оскільки масу гори можна виразити через рівняння:

$$M_2 = \rho_{г.п.} V_2 = \rho_{г.п.} S H_{max},$$

а масу надлишкової гори –  $\Delta m = \rho_{г.п.} \Delta V = \rho_{г.п.} S \Delta x$ ,  
 тоді отримаємо:  $\rho S H_{max} \rho_{г.п.} \Delta x = \rho_{г.п.} S \Delta x \lambda_{пл.}$

**Отже, максимальна висота гори з позиції плавлення порід  
 визначатиметься за формулою:  $H_{max} = \lambda_{пл}/g$ .**



**37. З позиції міцності гірських порід визначте на Землі  
 максимально можливу висоту гори  $H_{max}$ , що складена  
 магматичними гірськими породами (напр, гранітами)  
 за відомими густиною  $\rho$ , межею міцності  $\sigma_{max}$  та  
 прискоренням вільного падіння на планеті  $g$ .**

**Вихідні дані:**

$\sigma_{max}$  – межа міцності граніту,  $200 \cdot 10^6$  Па;

$\rho$  – густина граніту,  $2,64 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння на Землі,  $9,8$  м/с<sup>2</sup>

**Знайти:**

$H_{max} - ?$

**Розв'язок** (рис. 5.22, 5.23): будь-який підйом гори призводить до руйнування (розтікання або плавлення) цього шару під дією сили тиску гори, що відповідає межі текучості матеріалу, з якого складена гора, із затратою на це роботи тиску гірських порід – літостатичного тиску гори. Межа текучості гірських порід приблизно становить 90 % від межі міцності порід, тому за межу текучості можна брати такий параметр як межа міцності порід на стиснення. Чим нижче породи залягають на глибині, тим вони пластичніше поведуться: висока температура порід і тиск сприяють переходу з крихкого стану у пластичний.

$$p = \rho g H_{max}$$

Тому можемо припустити, що, ймовірно, висота гір на планеті зростає до межі, зумовленої міцністю, тобто межею міцності гірських порід на стиснення:  $P = \sigma_{max}$  (межа міцності порід на стиснення). Тоді  $\sigma_{max} = \rho g H_{max}$ .

**Отже, висота гори з позиції міцності порід  
 дорівнюватиме (формула ідеалізована):**

$$H_{max} = \sigma_{max} / \rho g$$

**Якщо гора на Землі, наприклад, складена магматичною  
 породою гранітом, то:  $H_{max} = 200 \cdot 10^6 / (2,64 \cdot 10^3 \cdot 9,8) = 7\,600$  м  
 (висота г. Еверест – 8 848 м).**

Наприклад, якщо гори містяться на планеті Марс, на якому прискорення вільного падіння  $3,7$  м/с<sup>2</sup>, а густина і межа міцності граніту така ж, як і на Землі, то висота гори на планеті Марс буде дорівнювати:

$$H_{max} = 200 \cdot 10^6 / (2,64 \cdot 10^3 \cdot 3,7) = 20\,500 \text{ м.}$$

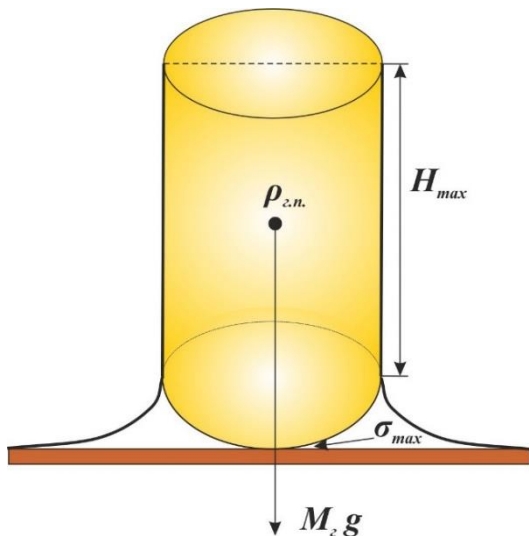


Рис. 5.22. Висота гори (за межею міцності порід)

Відомо, що висота г. Олімп на планеті Марс становить близько 25 км. Якщо порівняти з Землею, то висота гір майже утричі менша за висоту гір на Марсі.

Отримане значення висоти гір на планетах трохи відрізняється від реальних, оскільки на глибині внаслідок підвищення температури і тиску породи швидше стають пластичнішими та руйнуються швидше: для прикладу, межа міцності граніту на стиснення змінюється від 100 до 300 МПа.

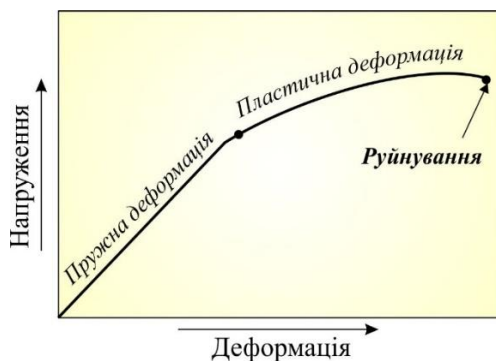


Рис. 5.23. Графік, який демонструє процеси, що відбуваються з гірськими породами під час збільшення напружень і деформацій



## **Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

1. Визначити максимально можливу висоту гори  $H_{\max}$  на планеті Марс, що складена гірськими породами, які мають густину  $\rho$  та межу міцності  $\sigma_{\max}$ , близьку до базальту. Відомим є також і прискорення вільного падіння на Марсі, що дорівнює  $g = 3,7 \text{ м/с}^2$ .

2. З позиції міцності гірських порід визначити максимально можливу висоту гори  $H_{\max}$  на Землі, складену різними типами гірських порід (осадовими, магматичними, метаморфічними), що мають відповідну відому густину  $\rho$  та межу міцності гірських порід  $\sigma_{\max}$ .

3. Визначте і порівняйте максимально можливу висоту гори  $H_{\max}$  на планетах Земля та Марс з позиції міцності порід за відомими прискореннями вільного падіння – відповідно  $9,8$  та  $3,7 \text{ м/с}^2$ . Гори складені основними магматичними гірськими породами, що мають густину  $\rho$  та межу міцності  $\sigma_{\max}$ , близьку до базальту.

4. Оцінити максимальну висоту гір на планетах Сонячної системи з позиції міцності порід, припустивши, що гірські породи мають такі ж властивості, як і на Землі. Знайти інформацію про те, на яких планетах Сонячної системи є гори, а на яких гір немає.

5. Визначити, у яких осадових, магматичних і метаморфічних порід (по одній породі з кожного типу), що мають певну густину і складають гору висотою  $H = 3\ 000 \text{ м}$ , породи будуть «текти».

## **5.2. Фізичні процеси у системі «Земля – космічні тіла»**

### **5.2.1. Рух космічних тіл (астероїдів, комет, космічного пилу) в бік Землі**

Оскільки Земля є космічним тілом, то вона, як і будь-яка планета Сонячної системи, постійно відчуває небезпеку з боку інших небесних тіл, наприклад, астероїдів і комет, що часто пролітають неподалік від неї та несуть загрозу руйнування всього живого у певному регіоні, материку або загалом усієї планети. На Землю дуже часто потрапляють метеори, космічний пил.

Астероїди, або малі планети, що мають розміри від  $1$  до  $1\ 000 \text{ км}$ , маса яких змінюється від  $10^{12}$  до  $10^{24} \text{ кг}$ , рухаються по еліптичних орбітах навколо Сонця, що розташовані головню між орбітами Марса і Юпітера (близько  $98\ \%$ ). Вони мають неправильну осколкову форму (Цецера, Веста, Флора). Астероїди, що існують також і поза головним поясом, поділяються на: навколоземні

(орбіти їх розташовані неподалік земної орбіти або всередині, або ззовні та потенційно можуть зіткнутися з нашою планетою); троянські (астероїди, що синхронізувалися з рухом планет-гігантів Юпітера, Нептуна, Марса); кентаври (орбіти таких астероїдів лежать між орбітами Юпітера та Нептуна). Основним джерелом комет із довгим періодом обертання, що прилітають у Сонячну систему, та багатьох астероїдів-кентаврів і комет сімейства Юпітера є хмара Оорта, що перебуває на відстані понад 50 тис. а.о.

Найбільшу ймовірну руйнівну потенційну небезпеку на Землю несуть навколоземні астероїди (наприклад, група Аполлона, Атона), орбіти яких завдяки віковим збуренням перетинають орбіту Землі та продовжують рухатися в бік нашої планети.

Упродовж ХХ ст. відбувалися відомі зіткнення з астероїдами у вигляді падіння Тунгуського та Сіхоте-Алінського метеоритів. Ці метеорити долетіли до землі у безлюдних місцях. Проте у 2013 р. сталося зіткнення Землі з невеликим астероїдом, діаметром близько 17 м, і спричинило велику трагедію та загибель людей на Уралі.

Проте якщо астероїд перетинає орбіту Землі, то це не завжди означає, що він обов'язково має з нею зіткнутися. В історії Землі є низка таких фактів, коли астероїди великих і малих розмірів перебували біля самої Землі (напр., останній півкілометровий астероїд 2004 BL86, який наблизився до Землі 26.01.2015 р. на відстань 1,2 млн км, що втричі більша ніж відстань від Землі до Місяця), проте вони не завдали їй жодної шкоди, оскільки змінили свою траєкторію і постійно віддалялися від орбіти Землі, зустрівши на своєму шляху перешкоду (наприклад, зіткнувшись із меншими небесними тілами і т.п.).

Найнебезпечнішими для усього людства є ті астероїди, які перетинають орбіту Землі на мінімальній відстані (менше 0,05 а.о.) і мають абсолютну зіркову величину від 22 та менше (чим менша ця величина, тим вони яскравіші). Крім того, такі астероїди мають бути досить великими, тобто мати достатню масу, щоби зруйнувати (розплавити, розпорошити, випарувати тощо) Землю.

Астероїд, зустрівши Землю на шляху, пролітає крізь її атмосферу й у вигляді метеоритів досягає поверхні Землі, формуючи астроблеми з діаметром у кілька сотень кілометрів. Зіткнення з астероїдами залишають помітний слід у геологічній історії нашої планети (локальні землетруси, глобальні цунамі), навіть можуть призвести до ядерної зими (потрапляння в атмосферу значної кількості пилу).

На землю постійно падає велика кількість метеоритів, маса яких змінюється від кількох грамів до кількох кілограмів, за різними розрахунками близько 5-6 тонн за добу (або 2 тис. тонн на рік), а також космічний пил (до 20 тис. тонн). Найбільше метеоритів на Землі – кам'яного (найпоширеніші хондрити, що мають більший вміст металів і сульфідних мінералів) складу, менше залізних (нікелісте залізо), і ще менше залізо-кам'яного складу (рис. 5.24).



*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 5.24 Астероїди у космосі (*a*) при наближенні до Землі; астроблема (*б*) – Аризонський кратер («Каньйон Диявола» або «Кратер Беррінджера», США, 50 тис. р. тому), діаметр – 1 200 м, глибина – 180 м, висота кам'яного валу, що оточує вирву – 45 м; Сіхоте-Алінський (*в*) залізний метеорит, маса якого 60–100 тонн (Росія, Далекий Схід, 1947 р.); метеорит Альєнде (*г*) – найбільший і найдавніший вуглецевий хондрит (Мексика, штат Чіуауа, 1969), масою понад 2 т (вік 4,5 млрд р.).

Найбільшим метеоритом, що досяг земної поверхні 80 тисяч років тому і не залишив жодного сліду падіння, є залізний (84 % – залізо; 16 % – нікель; решта – домішки кобальту) метеорит Гоба (походить від назви ферми, біля якої був знайдений), об'єм якого 9 м<sup>3</sup>, а маса – майже 60 тонн. Він був знайдений на території сучасної Намібії у 1920 р. і початкова маса його була 90 тонн. Відсутність слідів падіння, очевидно, пов'язана зі сповільненням його атмосферою, тому великих викидів енергії не відбулося.

Наприклад, у результаті зіткнення залізо-нікелевий метеорит, що упав у Аризоні (США) й утворив астроблему «Каньйон Диявола», або «Кратер Беррінджера», виділилася енергія, яку було оцінено в 10 мегатонн (1 мегатонна (Мт) ТНТ =  $4,184 \cdot 10^{15}$  Дж). У цьому кратері знайдені дрібні включення залізо-нікелевих сплавів: камаситу й теніту, що характерні для залізних метеоритів, а також мінерали коесит і стишовіт, що утворюються за дуже великого тиску під час вибухів.

Метеорит Альєнде у Мексиці, штат Чіуауа, 1969 р. – найбільший вуглецевий хондрит на Землі (близько 2 тонн) – наближався до Землі зі швидкістю понад 16 кілометрів на секунду. Він є найдавнішим метеоритом, виявленим на Землі. За віком, що визначений за багатими на кальцій і алюміній включеннями, він належить до найстаріших об'єктів, і на 30 мільйонів років старший, ніж сама Земля. Завдяки його вивченню маємо інформацію про те, якими були умови в ранню епоху формування Сонячної системи. Метеорит падав у вигляді яскравої вогняної кулі, яка пізніше вибухнула, розколовшись на дрібні кусочки, внаслідок тертя об повітря атмосфери. Таким чином, енергія метеорита перетворюється, утворюючи низку ударних хвиль у повітрі, на землі або у воді.

На території України теж відомі падіння метеоритів. Близько 400 млн років тому неподалік теперішнього міста Іллінці Вінницької області внаслідок падіння 4 млн тонн метеоритної породи з космосу утворився кратер діаметром 7 км. Ця ділянка відома як Іллінецька зоряна рана. Метеорит під час падіння розколовся на дві частини. Потужність вибуху Іллінецького метеорита, який тривав кілька секунд, дорівнювала 8 тис. Челябінських метеоритів, а температура приблизно дорівнювала 4–5 тис. градусів (при такій температурі плавляться навіть граніти), тому тут знаходили навіть алмази і найбільший у світі агат, який тепер зберігається у Берлінському музеї.

У описаних нижче задачах спробуємо показати, які фізичні явища та процеси відбуваються з Землею при контакті з такими космічними тілами (астероїди, комета, космічний пил), та оцінити масу астероїдів, необхідну для руйнування (розплавлення чи розпорощення) нашої планети.



**38. Якою має бути маса астероїда, щоб зруйнувати (нагріти й розплавити) Землю?**



**Вихідні дані:**  $M$  – маса Землі ( $5,972 \cdot 10^{24}$  кг);  
 $m$  – маса астероїда;  
 $v$  – швидкість астероїда; 70 км/с;  
 $U$  – швидкість астероїда і Землі;  
 $R$  – радіус Землі 6371 км

**Знайти:**  $\frac{m}{M}$  – ?

**Коротка довідка.** *Перша космічна швидкість* – швидкість  $v_I$ , яку необхідно надати тілу при запуску з будь-якої планети, щоб воно стало її штучним супутником і при цьому рухалося по колу, центр котрого збігається з центром планети ( $\approx 7,9$  км/с). Визначають за формулами:

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R_{\oplus}}} = \sqrt{g_0 R_{\oplus}} \text{ (біля поверхні Землі);}$$

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R_{\oplus} + h}} \text{ (на висоті } h \text{ над поверхнею Землі).}$$

**Друга космічна швидкість** – найменша швидкість  $v_{II}$ , яку треба надати тілу біля поверхні Землі або іншої планети, щоб воно могло подолати її тяжіння і стати штучним супутником Сонця ( $\approx 11,2$  км/с):

$$v_{II} = \sqrt{2v_I}.$$



Рис. 5.25. Наближення астероїда та ймовірне розплавлення планети внаслідок цього

**Розв'язок** (рис. 5.25): припустимо, що  $v$  – швидкість астероїда (має бути більшою від другої космічної швидкості для нашої планети) щодо Землі. Земля нерухома – система відліку пов'язана із Землею;  $U$  – швидкість Землі й астероїда після удару;  $M$  – маса Землі;  $m$  – маса астероїда.

Імпульс астероїда до удару  $p_1 = mv$ , імпульс після удару  $p_2 = (M + m)U$ . Згідно із законом збереження імпульсу  $p_1 = p_2$  або  $mv = (M + m)U$ , тоді  $U = \frac{mv}{M+m}$ .

Кінетична енергія астероїда до удару:  $E_{K1} = \frac{mv^2}{2}$

Кінетична енергія після удару:  $E_{K2} = \frac{(M+m)U^2}{2}$

На руйнування витрачається енергія  $Q = E_{K1} + E_{K2}$ :

$$Q = \frac{mv^2}{2} - \frac{(M+m)U^2}{2}; \text{ якщо } U = \frac{mv}{M+m}, \text{ тоді}$$

$$Q = \frac{mv^2}{2} - \frac{(M+m)\frac{mv}{M+m}}{2}$$

$$Q = \frac{mv^2}{2} \left(1 - \frac{m}{M+m}\right) = \frac{mv^2}{2} \left(\frac{M+m-m}{M+m}\right) \approx \frac{mv^2}{2}$$

Енергія астероїда витрачається на нагрівання порід Землі та їхнє розплавлення:

$$Q = E_{\text{нагр.}} + E_{\text{пл.}} = cM\Delta T + M\lambda,$$

де  $\Delta T$  – температура нагрівання;  $c$  – питома теплоємність Землі;  $\lambda$  – питома теплота плавлення порід Землі.

Тоді:

$$\begin{aligned} \frac{mv^2}{2} &= cM\Delta T + M\lambda; \\ \frac{m}{M} &= \frac{2(c\Delta T + \lambda)}{v^2}. \end{aligned}$$



**39. Яким має бути астероїд, щоб розпорошити Землю по сфері з нескінченним радіусом при зіткненні з нею, якщо швидкість астероїда 70 км/с?**

**Вихідні дані:**  $M$  – маса Землі;

$m$  – маса астероїда;

$v$  – швидкість астероїда, 70 км/с;

$R_{\oplus}$  – радіус Землі 6371 км

**Знайти:**  $\frac{m}{M} - ?$



Рис. 5.26. Розпорошення планети астероїдом

**Розв'язок** (рис. 5.26):

Чи може астероїд своїм ударом розпорошити Землю, тобто розподілити всю земну речовину по сфері з нескінченним радіусом.

Затрачувана при цьому енергія дорівнює потенціальній енергії гравітаційного поля Землі:

$$W = \frac{GM^2}{R}$$

З попередньої задачі енергія астероїда дорівнює:

$$Q = \frac{mv^2}{2}$$

Вважаючи, що  $Q = W$ , матимемо:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GM^2}{R}; \frac{mv^2}{2M} = \frac{GM}{R}; \frac{m}{M} = \frac{2GM}{Rv^2}.$$

Якщо потенціал поля, або прискорення вільного падіння:

$$g = \frac{GM}{R^2},$$

$$\text{тоді } \frac{m}{M} = \frac{2GM}{R^2} \frac{R}{v^2} = \frac{2gR}{v^2}.$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$\frac{m}{M} = \frac{2 \cdot 0,0098 \text{ км/с}^2 \cdot 6371 \text{ км}}{70^2 \text{ км/с}} = \frac{1}{40}$$

Отже, астероїд, щоб розпорошити Землю, повинен мати масу, в 40 разів меншу від маси Землі ( $5,972 \cdot 10^{24}$  кг), тобто приблизно:  $2,5 \cdot 10^{23}$  кг.



**40. Обчислити енергію, яка виділиться внаслідок падіння одного із найбільших метеоритів Гоба (Намібія), що мав масу 60 тонн і рухався зі швидкістю 16 км/с. Отриману енергію порівняти з електроенергією, яку спожила Тернопільська область у 2013 р. (приблизно 5 ТДж).**

**Вихідні дані:**

$m$  – маса астероїда, 60 000 кг;

$v$  – швидкість астероїда, 16 км/с;

$E_{\text{спож.}}$  – спожита електроенергія у

Тернопільській обл. за 2013 р., 5 ТДж ( $10^{12}$  Дж).

**Знайти:**

$E_{\text{астер.}}$  – ?

**Розв'язок:** енергія, яку виділить астероїд, рухаючись у атмосфері Землі, приблизно дорівнюватиме:

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

Таким чином, знаючи масу та швидкість астероїда, визначаємо енергію, яку виділяє астероїд:

$$E_{\text{астер.}} = 15 \cdot 10^{12} \text{ Дж} = 7,5 \text{ ТДж.}$$

Порівнявши отриману енергію зі спожитою електроенергією у Тернопільській обл., отримаємо:

$$\frac{E_{\text{астер.}}}{E_{\text{спож.}}} = 1,5$$

Тобто енергія, яку міг виділити астероїд Гоба, у 1,5 рази перевищує енергію, спожиту мешканцями Тернопільської області у 2013 р.



### **Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

1. *Описати рух космічного тіла з космосу до поверхні Землі на прикладі «астероїда–метеорита» й охарактеризувати взаємодії під час руху з оболонками (атмосферою, гідросферою, літосферою) Землі та фізичні процеси, які він спричинює.*

2. *Що таке астроблеми? Найбільш відомі астроблеми у світі. Які фізичні процеси відбуваються під час їхнього виникнення?*

3. *Які родовища та мінерали можуть утворюватися внаслідок падіння метеоритів?*

4. *Які ви знаєте типи метеоритів? Які з них є особливо цінними для геологічних досліджень? Чому?*

5. *Що таке перша космічна швидкість? Яке її значення для планети Земля?*

6. *Поняття другої космічної швидкості. Якою вона має бути у системі космос–Земля?*

7. *Порівняти енергію, яку виділив метеорит Альєнде (Мексика) при падінні, з електроенергією, спожитою мешканцями Львівської області за 2013 р. (близько 15 ТДж), припускаючи, що маса астероїда близько 2 тонн і наближався він до Землі зі швидкістю понад 16 км/с.*

8. *Яку енергію необхідно затратити, щоб розплавити Землю? (для розрахунку використати питому теплоту плавлення базальту  $c_{\beta}$ ).*

#### **5.2.2. Сонце, сонячне випромінювання**

Тепловий стан поверхні Землі формується за рахунок зовнішніх і внутрішніх джерел тепла. Дослідженнями встановлено, що близько 99,5 % усього тепла поверхневого шару Землі має зовнішнє, головним чином сонячне походження. Інші зовнішні джерела, що виникають, наприклад, за рахунок припливного тертя у системі Земля–Місяць, космічних променів високих енергій і космічних катастроф, зміни сталої гравітації і т.д., не мають такого суттєвого значення.

Сонце випромінює рівномірно в усі боки світлову енергію загальною потужністю  $3,83 \cdot 10^{26}$  Вт, з якої на Землю надходить лише  $1,75 \cdot 10^{17}$  Вт за годину. Це означає, що кожен  $1 \text{ м}^2$  земної поверхні отримує  $83,8$  кДж тепла за  $1$  хв, або  $1,376 \cdot 10^3$  Дж за  $1$  с. Цю величину, що відображає інтенсивність сонячної енергії на поверхні Землі, називають сонячною сталою –  $1,376 \cdot 10^3$  Дж/(с · м<sup>2</sup>), або  $1,376$  кВт/м<sup>2</sup>. Сонячне випромінювання частково відбивається поверхнею Землі у космос. Кількість відбитої сонячної радіації, що виражена в частках одиниці або відсотках радіації, яка надходить, називають *альбедо*.

Значення альбедо для різних поверхонь коливається у широких межах (альбедо снігу –  $0,40$ - $0,90$ ; морського льоду –  $0,30$ - $0,40$ ; ґрунту –  $0,05$ - $0,45$ ) і визначається кількома чинниками. Альбедо водної поверхні залежить від кута падіння сонячних променів: з підняттям Сонця над горизонтом альбедо водної поверхні зменшується. Наприклад, при сході Сонця (кут падіння променів  $4$ - $5^\circ$ ) альбедо поверхні води становить  $0,35$ , при куті  $45^\circ$  відбивання сонячної радіації зменшується до  $0,05$ , а коли Сонце перебуває у зеніті – альбедо становить  $0,02$ . Альбедо вільної від льоду поверхні морів і океанів менше за альбедо материків. Для Землі альбедо становить  $0,28$ . Безумовно, Сонце як найбільше джерело сонячного випромінювання має великий вплив на перебіг геологічних процесів і явищ на Землі, що відповідно визначаються певними фізичних процесами.

Проте важливими є і внутрішні джерела тепла Землі та їхній вплив на загальний тепловий стан. До таких джерел належить тепло розпаду радіоактивних елементів, гравітаційної диференціації речовини Землі (залишкове тепло), тепло її адіабатичного стиснення (гравітаційне тепло), тепло хімічних реакцій у гірських породах. Із усіх цих джерел до основних належать радіоактивне та залишкове тепло, що визначає внутрішні процеси у Землі.

*41. На  $1 \text{ м}^2$  земної поверхні падає кількість сонячної енергії  $j_{\oplus}$  –  $1,376$  кВт/м<sup>2</sup>. Обчислити, скільки випромінює  $1 \text{ м}^2$  поверхні Сонця, якщо враховувати те, що все випромінювання Сонця потрапляє на поверхню Землі. Дано радіус Сонця та відстань від Землі до Сонця. Отриману величину порівняти з потужністю Добротвірської ТЕС ( $500$  МВт / год), що працює на вугіллі Львівсько-Волинського басейну.*



**Вихідні дані:**

- $R_{\oplus}^{\odot}$  – середня відстань від Землі до Сонця, радіус земної орбіти, 149,6 млн км;  
 $R_{\odot}$  – радіус Сонця, 695 800 км;  
 $j_{\oplus}$  – інтенсивність сонячної енергії, 1,376 кВт/м<sup>2</sup>, або  $1,38 \cdot 10^3$  Дж/(с · м<sup>2</sup>);  
 $E_{\odot}$  – потужність Добротвірської ТЕС, 500 МВт/год

**Знайти:**

$j_{\odot} - ?$

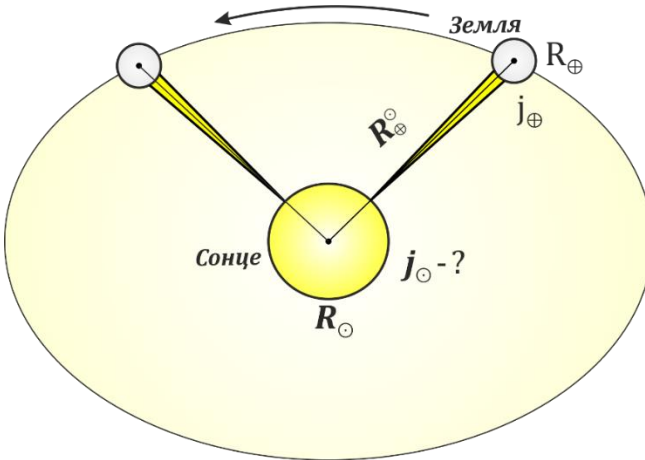


Рис. 5.27. Схематичне зображення до задачі 41

**Розв'язок** (рис. 5.27): потужність випромінювання усієї радіації Сонця дорівнює потужності енергії, яку отримує вся поверхня Землі:  $E_{\odot} = E_{\oplus}$ .

Уся потужність енергії, яку випромінює Сонце, дорівнює:

$$E_{\odot} = j_{\odot} S_{\odot} = j_{\odot} 4\pi R_{\odot}^2,$$

де  $j_{\oplus}$  – це сонячна стала, що дорівнює 1,376 кВт/м<sup>2</sup>, або інтенсивність сонячної енергії, або кількість тепла, яку дістає 1 м<sup>2</sup> поверхні, перпендикулярної до сонячних променів, на верхній межі атмосфери при середній відстані від Землі до Сонця  $R_{\oplus}^{\odot}$ .

Припускаємо, що потужність усієї сонячної радіації, яку випромінює Сонце, дорівнюватиме всій енергії, яку отримує Земля, здійснюючи повний оберт навколо Сонця:

$$E_{\oplus} = j_{\oplus} S_{\oplus} = j_{\oplus} 4\pi R_{\oplus}^2.$$

$$\text{Тоді } j_{\odot} 4\pi R_{\odot}^2 = j_{\oplus} 4\pi R_{\oplus}^2;$$



## 42. Обчислити, яку кількість сонячної енергії недоотримуватиме Земля внаслідок «ядерної зими» протягом 10 років.

**Ядерна зима.** Катастрофічна ядерна війна або навіть забруднення атмосфери радіонуклідами, що може трапитися під час аварій на атомних електростанціях та інших ядерних об'єктах під час випробовувань ядерної зброї, є надзвичайно небезпечними і можуть спричинити таке явище як **ядерна зима**. Найперше після ядерних вибухів виникнуть великі пожежі, що спричинить підняття температури на  $1^{\circ}\text{C}$ , яке супроводжуватиметься буревіями та поширенням радіонуклідних течій повітря по всій Земній кулі. Якщо в епіцентр ядерних вибухів потраплять нафтові й газові свердловини, вони спричинять виділення в атмосферу багато «парникових газів» (оксид карбону, метану тощо), пилу й сажі, підвищення температури на  $5^{\circ}\text{C}$ , танення льодовиків і підвищення рівня води у Світовому океані, в результаті чого будуть затоплені великі території суходолу. Руйнування на 50-60 % озонового шару призведе до збільшення ультрафіолетового випромінювання Землі. За рахунок здійснення попелу, пилу та сажі прозорість атмосфери зменшиться у сотні разів. Тропосфера нагріється, приземний шар повітря буде охолоджуватися на  $15-30^{\circ}\text{C}$ , а локальні зниження температури сягатимуть  $-40...-50^{\circ}\text{C}$ , настане ефект ядерної зими, яка може тривати кілька місяців. Проте після осідання пилу, сажі та попелу атмосфера знову може прогрітися на  $20-30^{\circ}\text{C}$  вище від норми, що спричинить повені на великих ділянках і селі у гірських районах з буревіями та снігопадами.

Подібні кліматичні зміни можуть виникнути і після виверження вулканів, – ефект так званої **вулканічної зими**. Сонячне випромінювання внаслідок забруднення земної атмосфери значною кількістю вулканічного попелу та сірчаними газами не досягає земної поверхні і спричинює зниження температури на кілька градусів. Ефект вулканічної зими виникає після виверження вулканів, яке за шкалою експлозивного індексу перевищує шість балів.

### **Вихідні дані:**

$j_{\oplus}$  – інтенсивність сонячної радіації на поверхні Землі;

$t$  – час у секундах за 10 років;

$R_{\oplus}$  – радіус Землі, 6371 км

**Знайти: -**  
 $E_{\oplus}$  – ?

**Розв'язок:**

За гіпотетичними припущеннями, в результаті викиду великої кількості диму та сажі у стратосферу внаслідок вулканічних вивержень, ядерних вибухів, масштабних пожеж і внаслідок суттєвого підвищення кількості відбитого світла температура на планеті повсюдно знизиться до арктичної, тобто настане ядерна зима.

Припустимо, що під час ядерної зими уся кількість енергії, яку випромінює Сонце, не доходить до поверхні Землі й не нагріває її. Тоді сонячна енергія, яку недоотримуватиме Земля упродовж 10 років, дорівнюватиме добутковій інтенсивності сонячної радіації на поверхні Землі на час (у секундах) та на площу поверхні Землі:

$$E_{\oplus} = j_{\oplus} t S,$$

де інтенсивність сонячної радіації  $j_{\oplus} = 1,38 \text{ кВт/м}^2$ , або  $1,38 \cdot 10^3 \text{ Дж/(с} \cdot \text{м}^2)$ , а площа поверхні Землі визначається за формулою:  $S = 4\pi R_{\oplus}^2$ .

Тоді  $E_{\oplus} = j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2$ .

**43. На скільки градусів зміниться середня температура Землі внаслідок її охолодження упродовж ядерної зими тривалістю 10 років, за відомою інтенсивністю сонячної радіації на поверхні Землі ( $1,376 \text{ кВт/м}^2$ )? Для розрахунків використати питому теплоємність базальту  $C_{\beta}$ .**



**Вихідні дані:**

- $j_{\oplus}$  – інтенсивність сонячної радіації на поверхні Землі,  $1,376 \text{ кВт/м}^2$ , або  $1,38 \cdot 10^3 \text{ Дж/(с} \cdot \text{м}^2)$ ;
- $t$  – час у секундах за 10 років;
- $R_{\oplus}$  – радіус Землі, 6371 км;
- $C_{\beta}$  – питома теплоємність базальту,  $800 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ .

**Знайти:**  
 $\Delta T$  – ?

**Розв'язок:**

З попередньої задачі відомо, що кількість сонячної енергії, яку недоотримуватиме Земля упродовж 10 років, визначатиметься за формулою:

$$E_{\oplus} = j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2$$

Саме цієї енергії не вистачатиме на звичне нагрівання, що спричинить зменшення температури земної кори на певну кількість градусів. Якщо припустити, що земна кора складена в основному з базальтових порід із питомою теплоємністю  $C_{\beta}$ , то кількість теплоти, що використовується на нагрівання базальтової поверхні, дорівнюватиме:



$$Q_{\beta} = C_{\beta} \cdot m \cdot \Delta T$$

Припустимо, що кількість недоотриманої сонячної енергії дорівнюватиме кількості теплоти:

$$E_{\oplus} = Q_{\beta}$$

$$j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2 = C_{\beta} m \Delta T$$

Тоді земна поверхня, що складена базальтами, охолонуться на певну температуру  $\Delta T$ :

$$\Delta T = \frac{j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2}{C_{\beta} m}$$



**44. Знайти зміну температури однорідної атмосфери за 10 років за даними про інтенсивність сонячної енергії на Землі, даними про випромінювання з поверхні Землі та з урахуванням того, що лише частина сонячної енергії залишається в атмосфері, перетворюється на теплоту і йде на нагрівання атмосфери, а решта випромінюється назад у космос.**

**Вихідні дані:**

$j_{\oplus}$  – інтенсивність сонячної радіації на поверхні Землі, 1,376 кВт/м<sup>2</sup>, або  $1,38 \cdot 10^3$  Дж/(с · м<sup>2</sup>);  
 $t$  – час у секундах за 10 років;  
 $R_{\oplus}$  – радіус Землі, 6371 км;  
 $E_{\text{випр.}}$  – енергія випромінювання;  
 $C_{\text{атм.}}$  – питома теплоємність атмосферного повітря, Дж/(кг·°C)

**Знайти:**  
 $\Delta T$  – ?

**Розв'язок:**

Загальна кількість усієї сонячної енергії Землі, що надходить на поверхню упродовж 10 років, визначатиметься за формулою (з попередніх задач):

$$E_{\oplus} = j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2$$

За відомою енергією випромінювання  $E_{\text{випр.}}$  знаходимо лише ту частину енергії, що йде на нагрівання атмосфери:

$$\Delta E = E_{\oplus} - E_{\text{випр.}} = j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2 - E_{\text{випр.}}$$

З іншого боку теплота, що йде на нагрівання атмосфери, дорівнюватиме:

$$Q = C_{\text{атм.}} m_{\text{атм.}} \Delta T$$

Уся енергія  $\Delta E$  перетворюється на теплоту:

$$\Delta E = Q$$

$$j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2 - E_{\text{випр.}} = C_{\text{атм.}} m_{\text{атм.}} \Delta T$$

Тоді температура однорідної атмосфери зміниться на температуру  $\Delta T$ , що визначатиметься за формулою:

$$\Delta T = \frac{j_{\oplus} t 4\pi R_{\oplus}^2 - E_{\text{випр.}}}{C_{\text{атм.}} m_{\text{атм.}}}$$



45. За скільки часу згорить Сонце, якщо на поверхні Землі фіксують 1,376 кВт сонячної радіації на 1 м<sup>2</sup>?

**Вихідні дані:**

$j_{\oplus}$  – інтенсивність сонячної радіації на поверхні Землі, 1,376 кВт/м<sup>2</sup>, або  $1,38 \cdot 10^3$  Дж/(с · м<sup>2</sup>);

$R_{\oplus}$  – середня відстань від Землі до Сонця, радіус земної орбіти, 149,6 млн км;

$R_{\odot}$  – радіус Сонця, 695 800 км;

$R_{\oplus}$  – радіус Землі, 6371 км

**Знайти:**  $t$  – ?

**Розв'язок:**

За рівнянням Ейнштейна, енергія, яка виділиться при повному згорянні маси Сонця, що на 60 % складається з гелію, дорівнюватиме (проте зауважимо, що це рівняння для Сонця є ідеалізованим, оскільки не весь водень, що входить до складу Сонця при термоядерних реакціях, перетворюється відразу ж у гелій):

$$E_{\odot} = M_{\odot} c^2,$$

де  $c$  – швидкість світла, 300 км/с.

Уся енергія, яку випромінює Сонце, дорівнюватиме:

$$E_{\odot} = j_{\odot} S_{\odot} = j_{\odot} 4\pi R_{\odot}^2,$$

або, якщо записати через сонячну сталу  $j_{\oplus}$ , то матимемо (з попередніх задач):

$$E_{\odot} = E_{\oplus} = j_{\oplus} S_{\oplus}^{\odot} = j_{\oplus} 4\pi R_{\oplus}^{\odot 2}.$$

Припустимо, що енергія, яка виділиться при згорянні всієї маси Сонця, дорівнюватиме сонячній радіації, яку отримуватиме Земля упродовж певного часу:  $M_{\odot} c^2 = j_{\oplus} 4\pi R_{\oplus}^{\odot 2} t$ .

Тоді

$$t = \frac{M_{\odot} c^2}{j_{\oplus} 4\pi R_{\oplus}^{\odot 2}}.$$



### **Завдання для самоконтролю та самостійної роботи**

- 1. Знаючи, що у зорях відбувається термоядерна реакція синтезу двох ядер водню в ядро гелію і при цьому виникає дефект мас, що спричиняє виділення енергії, знайти, скільки часу горітиме Сонце?*
- 2. Яку масу витрачає Сонце за 1 с, щоб забезпечити на поверхні Землі інтенсивність сонячного випромінювання 1,376 кВт на 1 м<sup>2</sup>?*
- 3. Скільки років може жити Сонце, якщо вся теплова енергія з його поверхні виникає внаслідок ядерних реакцій і вивільняється?*
- 4. Періоди льодовикових епох і потеплінь в історії Землі.*
- 5. Що таке ефект вулканічної зими і який його вплив на Землю?*
- 6. Що таке ядерна зима і як вона може вплинути на планету Земля?*
- 7. Як впливають цикли Міланковича на геологічні процеси?*
- 8. Причини виникнення зледенінь у минулому.*
- 9. Епохи зледенінь.*

## 6. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ



### Основна література

1. *Абрамов В.Ю.* Основы геофизики и интерпретации геофизических методов / В.Ю. Абрамов, В.И. Бровкин. – М. : Изд-во РУДН, 2008. – 204 с.
2. *Браун Д.* Недоступная Земля / Д. Браун, А. Массет; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 262 с.
3. *Викулин А.В.* Физика Земли и геодинамика: учеб. пособие для геофиз. специальностей вузов / А.В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. – 463 с.
4. Геофизика: учебник / В. Богословский, Ю. Горбачев, А. Жигалин [и др.]; под ред. В.К. Хмелевского. – М. : КДУ, 2007. – 320 с.
5. *Клос Є.С.* Малий фізичний довідник / Є.С. Клос, Ю.В. Караван. – Львів : Світ, 1997. – 270 с.
6. *Кузьменко Е.Д.* Основы геофізики: метод. вказівки / Е.Д. Кузьменко, С.М. Багрій. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – 50 с.
7. *Літнарівич Р.М.* Фізика з основами геофізики: курс лекцій / Р.М. Літнарівич. – Рівне : МЕРУ, 2007. – 74 с.
8. *Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли / В.А. Магницкий [ред. А.О. Глико]. – М. : Наука, 2006. – 390 с.
9. *Никитин А.А.* Комплексование геофизических методов: учеб. для вузов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевской. – Тверь : ГЕРС, 2004. – 294 с.
10. *Орленок В.В.* Основы геофизики: учеб. пособие / В.В. Орленок. – Калининград, 2000. – 446 с.
11. Основы геофізики (методи розвідувальної геофізики): підруч. для студ. геол. спец. вузів / М.І. Толстой, А.П. Гожик, М.В. Рева [та ін.]. – К. : ВПЦ «Київський університет», 2006. – 446 с.
12. *Павлов А.Н.* Геофизика. Общий курс о природе Земли: учебник / А.Н. Павлов. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2006. – 454 с.
13. *Тарасов Л.В.* Физика в природе: книга для учащихся / Л.В. Тарасов. – М. : Просвещение, 1988. – 351 с.
14. *Тяпкін К.Ф.* Основы геофізики: підручник / К.Ф. Тяпкін, О.К. Тяпкін, М.А. Якимчук. – К. : Карбон Лтд, 2000. – 248 с.
15. *Хмелевской В.К.* Основы геофизических методов: учеб. для вузов / В.К. Хмелевской, В.И. Костицын. – Пермь : Перм. ун-т, 2010. – 400 с.



## Додаткова література

1. *Болт Б.* В глубинах Земли. О чем рассказывают землетрясения / Б. Болт. – М. : Мир, 1984. – 374 с.
2. *Бондарев В.И.* Сейсморазведка: учеб. для вузов / В.И. Бондарев. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2007. – 690 с.
3. *Бондарев В.И.* Сейсморазведка: учеб. для вузов. Т. 1 / В.И. Бондарев, С.М. Крылатков. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2011. – 402 с.
4. *Бондарев В.И.* Сейсморазведка: учеб. для вузов. Т. 2 / В.И. Бондарев, С.М. Крылатков. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2011. – 408 с.
5. *Бондаренко В.М.* Общий курс геофизических методов разведки: учеб. пособие / В.М. Бондаренко, Г.В. Демура, А.М. Ларионов. – М. : Недра, 1986. – 452 с.
6. *Ботт М.* Внутреннее строение Земли / М. Ботт. – М. : Мир, 1974. – 376 с.
7. *Викулин А.В.* Введение в физику Земли: учеб. пособие для геофиз. специальностей вузов. – Петропавловск-Камчатский : КГПУ, 2004. – 240 с.
8. Геофизические методы исследований: учеб. пособие / В.К. Хмелевской, Ю.И. Горбачев, А.В. Калинин [и др.]. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КГПУ, 2004. – 232 с.
9. *Гершанок Л.А.* Магниторазведка: учебник / Л.А. Гершанок. – Пермь : Перм. ун-т, 2009. – 420 с.
10. *Девис П.* Случайная Вселенная / П. Девис. – М. : Мир, 1985. – 160 с.
11. *Жарков В.Н.* Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение / В.Н. Жарков, В.П. Трубицын, Л.В. Самсоненко. – М. : Наука, 1971. – 384 с.
12. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет / В.Н. Жарков. – М. : Наука, 1983. – 416 с.
13. *Жданов М.С.* Электроразведка: учеб. для вузов / М.С. Жданов. – М. : Недра, 1986. – 316 с.
14. *Захаров В.С.* Лекции по физике Земли: учеб. пособие / В.С. Захаров, В.Б. Смирнов. – М. : ООО «ИПЦ Маска», 2010. – 264 с.
15. *Знаменский В.В.* Общий курс полевой геофизики: учеб. для геофиз. специальностей / В.В. Знаменский. – М. : Недра, 1989. – 519 с.
16. *Козырев А.А.* Введение в геофизику: учеб. пособие / А.А. Козырев, Я.А. Сахаров, Н.В. Шаров. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2000. – 116 с.
17. *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев [отв. ред. В.К. Тартаковский]. – К. : Наук. думка, 1989. – 864 с.
18. *Кухлинг Х.* Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем. [под ред. Е.М. Лейкина] – М. : Мир, 1982. – 520 с.

19. *Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли / В.А. Магницкий. – М. : Недра, 1965. – 380 с.
20. *Магницкий В.А.* Общая геофизика: учеб. пособие / В.А. Магницкий. – М. : МГУ, 1995. – 317 с.
21. *Маловичко А.К.* Гравиразведка: учеб. для вузов / А.К. Маловичко, В.И. Костицын. – М. : Недра, 1992. – 357 с.
22. *Мэрион Дж. Б.* Физика и физический мир / Дж. Б. Мэрион. – М. : Мир, 1971. – 628 с.
23. *Пиблс Ф.Дж.Э.* Структура Вселенной в больших масштабах / Ф.Дж.Э. Пиблс. – М. : Мир, 1983. – 345 с.
24. *Сорохтин О.Г.* Развитие Земли / О.Г.Сорохтин, С.А.Ушаков. – М. : Изд-во МГУ, 2002. – 506 с.
25. *Стейси Ф.* Физика Земли / Ф. Стейси. – М. : Мир, 1972. – 344 с.
26. *Теркот Д.* Геодинамика: геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1 / Д. Теркот, Дж. Шуберт [пер. с англ.] – М. : Мир, 1985. – 376 с.
27. *Теркот Д.* Геодинамика: геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 2 / Д. Теркот, Дж. Шуберт [пер. с англ.] – М. : Мир, 1985. – 360 с.
28. *Успенский Д.Г.* Гравиразведка / Д.Г. Успенский. – Л. : Недра, 1968. – 331 с.
29. Физика Земли: курс лекций / С.Н. Кашубин, В.Б. Виноградов, А.В. Кузин, В.В. Филатов. – Екатеринбург, 1998. – 162 с.
30. *Хаин В.Е.* Геотектоника с основами геодинамики / В.Е. Хаин, М.Г. Ломизе. – М. : КДУ, 2005. – 560 с.
31. *Хаин В.Е.* Планета Земля от ядра до ионосферы / В.Е. Хаин, Н.В. Короновский. – М. : КДУ, 2007. – 244 с.
32. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 1: Геофизические методы исследования земной коры: учеб. пособие / В.К. Хмелевской. – Дубна : Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 203 с.
33. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика: учеб. пособие / В.К. Хмелевской. – Дубна : Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 184 с.
34. *Шейдеггер А.* Основы геодинамики / А. Шейдеггер [пер. с англ. С.К. Бежановой]. – М. : Недра, 1987. – 384 с.
35. *Шериф Р.* Сейсморазведка / Р. Шериф, Л. Гелдарт. – М. : Мир, 1987. – Т. 1. – 447 с. ; Т. 2. – 400 с.



## Електронні ресурси

1. Викулин А.В. Введение в физику Земли: учеб. пособие для геофиз. специальностей вузов. – Петропавловск-Камчатский : КГПИУ, 2004. *Режим доступу\**: <http://www.kscnet.ru/ivs/publication/tutorials/vikulin/cont.html>
2. Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика: учеб. пособие для геофиз. специальностей вузов / А.В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. – 463 с. *Режим доступу\**: [http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/vikulin/fz\\_gd.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/vikulin/fz_gd.pdf)
3. Всілякі цікавинки. Цікаві факти про космос. *Режим доступу\**: <http://cikavo.com.ua/>
4. Захаров В.С. Физика Земли. *Режим доступу\**: <http://dynamo.geol.msu.ru/courses/physics-of-the-earth.html>
5. Інфо-сервіс з фізики. *Режим доступу\**: <http://cikava-phizyka.pp.ua/>
6. Науково-популярний канал Simple-Science. *Режим доступу\**: <http://simplescience.ru/> або <https://www.youtube.com/user/GTVscience>.
7. Пантелеев В.Л. Физика Земли и планет: курс лекций / В.Л. Пантелеев. – М. : МГУ им. М.В. Ломоносова. Физический факультет, 2001. – 117 с. *Режим доступу\**: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1161600>.
8. Соломчак Н.Ф. Англійська мова для геофізиків: практикум з англійської мови / Н. Ф. Соломчак, О. В. Шевченко, О. М. Карпенко. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. – 103 с. *Режим доступу\**: <http://chitalnya.nung.edu.ua/sites/default/files/booksonline/1502/index.html>
9. Формулы: интерактивный справочник. *Режим доступу\**: <http://www.fxyz.ru/>.
10. American Geophysical Union AGU. *Режим доступу\**: <http://publications.agu.org/books/>
11. Global Earth Physics: a handbook of Physical Constants / [Editor Thomas J. Ahrens]. – Washington: AGU, 1995. *Режим доступу\**: <http://www.scribd.com/doc/7592971/AGU-Ref-Shelf-1-Global-Earth-Physics-a-Handbook-of-Physical-Constants-T-Ahrens>
12. National Geographic. *Режим доступу\**: <http://www.nationalgeographic.com/>
13. Physics Formulas List. *Режим доступу\**: <http://www.buzzle.com/articles/physics-formulas-list.html>
14. Renton J.J. The Nature of Earth: An Introduction to Geology / J.J. Renton. – The Great Courses, 2006. – 192 с.
15. The International System of Units (SI). *Режим доступу\**: <http://www.bipm.org/en/measurement-units/>

---

\* Доступ до електронних адрес може змінюватися



## Іноземна література

1. *Bagnold R.A.* The physics of blown sand and desert dunes / Ralph Alger Bagnold. – Courier Corporation, 2012. – 320 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/R\\_A\\_Bagnold\\_The\\_Physics\\_of\\_Blown\\_Sand\\_and\\_Desert\\_D?id=TTJw5\\_7aNVcC](https://play.google.com/store/books/details/R_A_Bagnold_The_Physics_of_Blown_Sand_and_Desert_D?id=TTJw5_7aNVcC).

2. *Ben-Menahem A.* Seismic waves and sources / Ari Ben-Menahem, Sarva Jit Singh. – Springer Science & Business Media, 2012. – 1108 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/A\\_Ben\\_Menahem\\_Seismic\\_Waves\\_and\\_Sources?id=LOPTBwAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/A_Ben_Menahem_Seismic_Waves_and_Sources?id=LOPTBwAAQBAJ)

3. *Bercovici D.* Mantle Dynamics: Treatise on Geophysics / David Bercovici. – Elsevier, 2010. – 7000 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/David\\_Bercovici\\_Mantle\\_Dynamics?id=bIHNCgAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/David_Bercovici_Mantle_Dynamics?id=bIHNCgAAQBAJ)

4. *Bertotti B.* Physics of the earth and the solar system: Dynamics and evolution, space Navigation, space-Time Structure / Bruno Bertotti, Paolo Farinella. – Springer Science & Business Media, 2012. – 480 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/B\\_Bertotti\\_Physics\\_of\\_the\\_Earth\\_and\\_the\\_Solar\\_Syst?id=Mwr8CAAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/B_Bertotti_Physics_of_the_Earth_and_the_Solar_Syst?id=Mwr8CAAAQBAJ).

5. *Brekke A.* Physics of the upper polar atmosphere / Asgeir Brekke. – Springer Science & Business Media, 2012. – 386 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Asgeir\\_Brekke\\_Physics\\_of\\_the\\_Upper\\_Polar\\_Atmospher?id=fRVLAAAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/Asgeir_Brekke_Physics_of_the_Upper_Polar_Atmospher?id=fRVLAAAAQBAJ).

6. *Campbell W.H.* Earth magnetism: a guided tour through magnetic fields / Wallace H. Campbell. – Academic Press, 2001. – 151 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Wallace\\_H\\_Campbell\\_Earth\\_Magnetism?id=7L9vZc680FUC](https://play.google.com/store/books/details/Wallace_H_Campbell_Earth_Magnetism?id=7L9vZc680FUC).

7. *Condie K.C.* Earth as an evolving planetary system / K.C. Condie. – Academic Press, 2015. – 350 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Kent\\_C\\_Condie\\_Earth\\_as\\_an\\_Evolving\\_Planetary\\_Syste?id=I\\_t-hUWi5I8C](https://play.google.com/store/books/details/Kent_C_Condie_Earth_as_an_Evolving_Planetary_Syste?id=I_t-hUWi5I8C)

8. *Cuffey K.M.* The physics of glaciers / K.M. Cuffey, W.S.B. Paterson. – Academic Press, 2010. – 704 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Kurt\\_M\\_Cuffey\\_The\\_Physics\\_of\\_Glaciers?id=Jca2v1u1EKEC](https://play.google.com/store/books/details/Kurt_M_Cuffey_The_Physics_of_Glaciers?id=Jca2v1u1EKEC)

9. *Dmowska R.* Earthquake Thermodynamics and Phase Transformation in the Earth's Interior / R. Dmowska, J.R. Holton [Eds. Roman Teisseyre, Eugeniusz Majewski]. – Academic Press, 2000. – Vol. 76. – 674 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Roman\\_Teisseyre\\_Earthquake\\_Thermodynamics\\_and\\_Phases?id=z0x5Z4EjP6QC](https://play.google.com/store/books/details/Roman_Teisseyre_Earthquake_Thermodynamics_and_Phases?id=z0x5Z4EjP6QC).



10. Foulger G. Plates vs plumes: a geological controversy / G.R. Foulger. – John Wiley & Sons, 2011. – 364 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Gillian\\_R\\_Foulger\\_Plates\\_vs\\_Plumes?id=TAAd7gt607-MC](https://play.google.com/store/books/details/Gillian_R_Foulger_Plates_vs_Plumes?id=TAAd7gt607-MC)

11. Frisch W. Plate tectonics: Continental Drift and mountain building / Wolfgang Frisch, Martin Meschede, Ronald C. Blakey. – Springer Science & Business Media, 2010. – 212 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Wolfgang\\_Frisch\\_Plate\\_Tectonics?id=vx1oiTMOTRcC](https://play.google.com/store/books/details/Wolfgang_Frisch_Plate_Tectonics?id=vx1oiTMOTRcC)

12. Glassmeier K.H. Geomagnetic field variations / Karl-Heinz Glassmeier, Heinrich Soffel, Jorg Negendank / Springer Science & Business Media, 2008. – 213 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/K\\_H\\_Gla%C3%9Fmeier\\_Geomagnetic\\_Field\\_Variations?id=0j8vRZmBXd4C](https://play.google.com/store/books/details/K_H_Gla%C3%9Fmeier_Geomagnetic_Field_Variations?id=0j8vRZmBXd4C)

13. Haapala I. From the Earth's Core to Outer Space: Lecture Notes in Earth Sciences / Ilmari Haapala. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2012. – 340 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Ilmari\\_Haapala\\_From\\_the\\_Earths\\_Core\\_to\\_Outer\\_Spac?id=KrgBGDjwXuUC](https://play.google.com/store/books/details/Ilmari_Haapala_From_the_Earths_Core_to_Outer_Spac?id=KrgBGDjwXuUC)

14. Hanyga A. Seismic wave propagation in the Earth / Andrzej Hanyga. – Elsevier, 2013. – 495 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/A\\_Hanyga\\_Seismic\\_Wave\\_Propagation\\_in\\_the\\_Earth?id=xtT-BAAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/A_Hanyga_Seismic_Wave_Propagation_in_the_Earth?id=xtT-BAAAQBAJ)

15. Karato S.I. Superplumes: beyond plate tectonics / Shun-Ichiro Karato, Shigenori Maruyama, Brian F. Windley. – Berlin: Springer, 2007. – 569 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/David\\_A\\_Yuen\\_Superplumes\\_Beyond\\_Plate\\_Tectonics?id=-BnTZbh6FJMC](https://play.google.com/store/books/details/David_A_Yuen_Superplumes_Beyond_Plate_Tectonics?id=-BnTZbh6FJMC)

16. Kono M. Geomagnetism: Treatise on Geophysics / Masaru Kono. – Elsevier, 2010. – 7000 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Masaru\\_Kono\\_Geomagnetism?id=YDNCgAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/Masaru_Kono_Geomagnetism?id=YDNCgAAQBAJ)

17. Lang K. Sun, Earth and Sky / Kenneth Lang. – Springer Science & Business Media, 2007. – 284 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Kenneth\\_Lang\\_Sun\\_Earth\\_and\\_Sky?id=WIHNCRwbQdUC](https://play.google.com/store/books/details/Kenneth_Lang_Sun_Earth_and_Sky?id=WIHNCRwbQdUC)

18. McFadden L.-A. Encyclopedia of the solar system / Lucy-Ann McFadden, Torrence Johnson, and Paul Weissman. – Academic Press, 2006. – 992 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Lucy\\_Ann\\_McFadden\\_Encyclopedia\\_of\\_the\\_Solar\\_System?id=G7UtYkLQoYoC](https://play.google.com/store/books/details/Lucy_Ann_McFadden_Encyclopedia_of_the_Solar_System?id=G7UtYkLQoYoC)

19. Melchior P. The physics of the earth's core: an introduction. Elsevier, 2013. – 265 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/P\\_Melchior\\_The\\_Physics\\_of\\_the\\_Earths\\_Core?id=HhEBBQAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/P_Melchior_The_Physics_of_the_Earths_Core?id=HhEBBQAAQBAJ)

20. *Morra G.* Subduction Dynamics: From Mantle Flow to Mega Disasters / Gabriele Morra et al. – John Wiley & Sons, 2015. – Vol. 211. – 210 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Gabriele Morra Subduction Dynamics From Mantle Flo?id=GLiTCgAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/Gabriele+Morra+Subduction+Dynamics+From+Mantle+Flo?id=GLiTCgAAQBAJ).

21. *Olson P.* Core Dynamics: Treatise on Geophysics / Peter Olson. Elsevier, 2010. – 7000 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Peter Olson Core Dynamics?id=s4DNCgAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/Peter+Olson+Core+Dynamics?id=s4DNCgAAQBAJ)

22. *Price D.G.* Mineral Physics: Treatise on Geophysics / David G. Price. Elsevier, 2010. – 7000 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/G David Price Mineral Physics?id=joDNCgAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/G+David+Price+Mineral+Physics?id=joDNCgAAQBAJ)

23. *Price N.* Major Impacts and Plate Tectonics: A Model for the Phanerozoic Evolution of the Earth's Lithosphere / Neville Price. – CRC Press, 2003. – 368 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Neville Price Major Impacts and Plate Tectonics?id=pTTbeD5QCRMC](https://play.google.com/store/books/details/Neville+Price+Major+Impacts+and+Plate+Tectonics?id=pTTbeD5QCRMC)

24. *Prolss G.W.* Physics of the Earth's space environment: an introduction / Gerd W. Prolss, Michael K. Bird. – Springer, 2004. – 513 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Gerd Pr% C3% B6lls Physics of the Earth s Space Environme?id=HvD9CAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/Gerd+Pr%C3%B6lls+Physics+of+the+Earth's+Space+Environment?id=HvD9CAAQBAJ)

25. *Romanowicz B.* Seismology and Structure of the Earth: Treatise on Geophysics / Barbara Romanowicz, Adam Dziewonski. – Elsevier, 2010. – Vol. 1. – 700 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Barbara Romanowicz Seismology and Structure of the?id=5DEBDsisDEQC](https://play.google.com/store/books/details/Barbara+Romanowicz+Seismology+and+Structure+of+the?id=5DEBDsisDEQC).

26. *Schön J.H.* Physical properties of rocks: A workbook / Jürgen H. Schön. – Elsevier, 2011. – Vol. 8. – 494 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Juergen H. Sch% C3% B6n P hysical Properties of Rocks?id=L11GJItCu-AC](https://play.google.com/store/books/details/Juergen+H.+Sch%C3%B6n+Physical+Properties+of+Rocks?id=L11GJItCu-AC)

27. *Spohn T.* Planets and Moons: Treatise on Geophysics / Tilman Spohn. – Vol. 10. – Newnes, 2010. – 7000 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Tilman Spohn Planets and Moons?id=xqxFMGC1gucC](https://play.google.com/store/books/details/Tilman+Spohn+Planets+and+Moons?id=xqxFMGC1gucC).

28. *Stein S.* An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure / Seth Stein, Michael Wysession. – John Wiley & Sons, 2009. – 512 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Seth Stein An Introduction to Seismology Earthquak?id=-z80yrwFsqcC](https://play.google.com/store/books/details/Seth+Stein+An+Introduction+to+Seismology+Earthquak?id=-z80yrwFsqcC).

29. *Stevenson D.* Evolution of the Earth: Treatise on Geophysics / David Stevenson. – Elsevier, 2010. – 7000 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/David Stevenson Evolution of the Earth?id=aYDNCgAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/David+Stevenson+Evolution+of+the+Earth?id=aYDNCgAAQBAJ)

30. Teisseyre R. Gravity and low-frequency geodynamics / Roman Teisseyre. – Elsevier, 2013. – 493 p. *Режим доступу\**:

[https://play.google.com/store/books/details/Roman Teisseyre Gravity and Low Frequency Geodynam?id=f89GBQAAQBAJ](https://play.google.com/store/books/details/Roman_Teisseyre_Gravity_and_Low_Frequency_Geodynam?id=f89GBQAAQBAJ)

---

\* *Передбачено режим доступу зі сайту <https://play.google.com/>. Придбану або безкоштовну іноземну літературу можна переглядати у пристроях (смартфонах, планшетах та ін.) за допомогою встановленого додатку **Google Play Книги** для Android чи iPad/iPhone навіть без Інтернету. У портативних і настільних комп'ютерах її можна читати за допомогою веб-переглядача.*



**Програми-додатки для смартфонів / айфонів /  
планшетів, що працюють на  
OS Android (Google), OS Windows Phone  
(Microsoft Corporation) або Apple iOS (Apple)**



*Прості у використанні програми-додатки з фізичними формулами, зображеннями та простими задачами дають змогу легко, доступно і швидко пригадати й засвоїти основні закони фізики Землі. Вони містять інформацію про нашу планету, її характеристики, властивості оболонок Землі, основні глобальні геологічні та геофізичні процеси, що відбуваються у них, тощо. Такі безкоштовні програми-додатки, наприклад, у пристроях з OS Android, можна встановити за допомогою магазину додатків **Google Play**, перейшовши на сайт <https://play.google.com/> і задавши їх у пошуку або в телефонах з OS Windows Phone за допомогою встановленого додатку **Windows Store** (Магазин Windows).*

1. Basic Physics. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.zayaninfotech.physics.app>

2. Earth EBook та переглядач Alphonso EBook Viewer. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=code.alphonso.android.booviewer.books.earth> та

<https://play.google.com/store/apps/details?id=ebook.epub.download.reader>

3. Learn Physics. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.iphonedevro.learnphysics>

4. PHUSICSBook. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=ru.example.PHUSICSBook>

5. Physics. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mapdroidteam.physics>

6. Physics: Electricity. *Режим доступу:*

[https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai\\_au93e6mi.](https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_au93e6mi.AppPhysicsElectricity)

[AppPhysicsElectricity](https://play.google.com/store/apps/details?id=appinventor.ai_au93e6mi.AppPhysicsElectricity)

7. Physics Formulas. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.thiagobell.fisica>

8. Physics Formulas Free 1.1. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nsc.pf.free>

9. Physics Reference. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.stevekb.physics>

10. Pocket Physics. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=Gecko.Droid.PhysicsHelper>

11. Ultimate Physics Formula. *Режим доступу:*

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vegantaram.android.physicsformula>

Багато аудіо-, відеоматеріалів та інформації (англ. мовою) можна переглядати у програмі **iTunes**, завантаживши її зі сайту **App Store** (<https://www.apple.com/itunes/>) або за допомогою відповідного встановленого додатку в айфонах iPhone. Ось деякі із програм-додатків:

1. *Earth Sciences*

2. *Earth: Science in Action*

3. *Fundamentals of Physics I*

4. *Geology and Earth Sciences*

5. *Geology and Geophysics*

6. *Physics*

7. *Physics (Audio)*

8. *Principles of Physics*

## ДОДАТКИ

### Додаток А. Основні фундаментальні та додаткові константи природи

<i>Назва константи</i>	<i>Позначення</i>	<i>Значення константи</i>
Гравітаційна стала	$G, \gamma$	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Прискорення вільного падіння	$g$	$9,807 \text{ м/с}^2$
Магнітна стала	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Електрична стала	$\varepsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
	$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$	$9 \cdot 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2)/\text{Кл}^2$
Елементарний електричний заряд	$e$	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса спокою електрона	$m_e$	$9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4858 \text{ а.о.м.}$
Енергія спокою електрона	$m_e c^2$	$0,511 \text{ МеВ} = 8,187 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$
Маса спокою протона	$m_p$	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007 \text{ а.о.м.}$
Енергія спокою протона	$m_p c^2$	$938,2796 \text{ МеВ} = 1,5033 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$
Маса спокою нейтрона	$m_n$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,009 \text{ а.о.м.}$
Енергія спокою нейтрона	$m_n c^2$	$939,5731 \text{ МеВ} = 1,5054 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$
Питомий заряд електрона (відношення заряду електрона до його маси)	$-e/m_e$	$-1,7588047 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/кг}$
Питомий заряд протона (відношення маси протона до маси електрона)	$m_p/m_e$	$1836,1515$
Швидкість світла у вакуумі	$c$	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнетон Бора	$\mu_B$	$9,2741 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерний магнетон	$\mu_N$	$5,0508 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$
Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Стала Авогадро	$N_A$	$6,0220 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Фарадея	$F$	$9,6485 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Стала Больцмана	$k$	$1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Стала Планка	$h$	$6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Стала Дірака	$\hbar$	$1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Універсальна газова стала	$R$	$8,3144 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Молярний (нормальний) об'єм ідеального газу (н.у.)	$V_m$	$22,4138 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{моль}$
Стала Рідберга	$R$	$1,09737 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

<i>Назва константи</i>	<i>Позначення</i>	<i>Значення константи</i>
Радіус першої борівської орбіти	$\alpha_0$	$0,52917706 \cdot 10^{-10}$ м
Радіус електрона класичний	$r_e$	$2,8180 \cdot 10^{-15}$ м
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda_e$	$2,4263 \cdot 10^{-12}$ м
Магнітний момент електрона	$\mu_e$	$9,2848 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнітний момент протона	$\mu_p$	$1,4106 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл
Магнітний момент нейтрона	$\mu_n$	$0,9662 \cdot 10^{-26}$ Дж/Тл
Стала Стефана – Больцмана	$\sigma$	$5,6703 \cdot 10^8$ Вт/(м <sup>2</sup> К <sup>4</sup> )
Стала в законі зміщення Віна	$b$	$2,8978 \cdot 10^{-3}$ м·К
Енергія іонізації атома водню	$E_i$	$2,1799 \cdot 10^{-18}$ Дж = 1,3605 еВ
1 електронвольт	–	$1,6022 \cdot 10^{-19}$ Дж
Абсолютний нуль температури	–	– 273,15 °С
Атмосфера нормальна	–	101 325 Па (760 мм рт. ст.)
Потрійна точка води	–	273,16 К
Напруженість магнітного поля на магнітних полюсах	$H_p$	0,66 е (Ерстед)
Напруженість магнітного поля на магнітному екваторі	$H_e$	0,34 е (Ерстед)

### **Додаток Б. Параметри деяких фізичних величин**

<i>Величина</i>	<i>Значення</i>	<i>Величина</i>	<i>Значення</i>
<i>Густина рідин, твердих тіл і газів <math>\rho</math>, <math>\cdot 10^3</math> кг/м<sup>3</sup> (за н.у.)</i>			
Вода (при +4 °С)	0,998	Платина	21,5
Вода морська	1,030	Золото	19,3
Лід	0,900	Срібло	10,5
Гас	0,8	Мідь	8,9
Нафта	0,8	Алюміній	2,7
Гліцерин	1,2	Кухонна сіль	2,2
Ртуть	13,6	Корок	0,2
Повітря	1,29	Кисень	0,00143
Водень	0,09	Гелій	0,00018

<i>Величина</i>	<i>Значення</i>	<i>Величина</i>	<i>Значення</i>
<b><i>Коефіцієнт тертя спокою деяких матеріалів <math>\mu</math></i></b>			
Бетон (мокрый) – Гума	0,30	Бетон (сухий) – Гума	1,0
Бетон – Деревина	0,62	Дерево – дерево	0,25–0,5
<b><i>Питома теплоємність твердих тіл і рідин <math>C_v</math>, Дж/(кг·°C)</i></b>			
Алюміній	880	Вода	4200
Лід	2100	Ртуть	120
Сталь	460	Спирт	2400
Чавун	550	Нафта	880
<b><i>Питома теплота плавлення твердих тіл і рідин <math>\lambda</math>, кДж/(кг·°C)</i></b>			
Алюміній	380	Вода	2260
Лід	332	Ртуть	290
Сталь	82	Спирт	850
<b><i>Питома теплота пароутворення <math>r</math>, кДж/(кг·°C)</i></b>			
Вода	2 300	Ртуть	290
<b><i>Температура плавлення твердих тіл і рідин <math>t_{пл}</math>, °C</i></b>			
Алюміній	660	Вода	100
Лід	0	Ртуть	357
Сталь	1 400	Вольфрам	3 410
Золото	1 063	Платина	1 755
Срібло	961	Мідь	1 083
Озокерит	50	Кварц	1 710
<b><i>Питома теплота згоряння палива <math>q</math>, МДж/кг</i></b>			
Бензин	46	Гас	46
Дерево	10	Нафта	43
Дизельне паливо	42	Спирт	29
Природний газ	44	Вугілля	27
<b><i>Поверхневий натяг на межі рідина – повітря <math>\sigma</math>, мН/м (при 20 °C)</i></b>			
Вода (70 °C)	64	Гас	30
<b><i>Діелектрична проникність речовин <math>\epsilon</math></i></b>			
Вода	81	Слюда	6
Гас	2	Скло	5,5–10
Ебоніт	3	Фарфор	6
Парафін	2	Бурштин	2,8
<b><i>Динамічна в'язкість рідин <math>\eta</math>, Па · с</i></b>			
Повітря	$1,78 \cdot 10^{-15}$	Вода	$1,14 \cdot 10^{-15}$
<b><i>Питомий опір металів і сплавів <math>\rho</math>, Ом · м (при 20 °C)</i></b>			
Срібло	1,6	Сталь	12
Мідь	1,7	Нікелін	42
Вольфрам	5,5	Ніхром	110
<b><i>Період піврозпаду деяких радіоактивних ізотопів</i></b>			

<i>Величина</i>	<i>Значення</i>	<i>Величина</i>	<i>Значення</i>
Радон $^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8 доби	Кобальт $^{60}_{27}\text{Co}$	5,3 року
Фосфор $^{32}_{15}\text{P}$	14,3 доби	Стронцій $^{90}_{38}\text{Sr}$	27 років
Церій $^{144}_{58}\text{Ce}$	285 діб	Радій $^{226}_{88}\text{Ra}$	1 620 років

### **Додаток В. Короткі відомості про фізичні й орбітальні властивості деяких небесних тіл Сонячної системи**

#### **Основні властивості планети Земля**

*Земля – єдина планета, на якій відоме життя. Вона є третьою від Сонця планетою Сонячної системи. Земля належить до планет земної групи і є найбільшою з цих планет у Сонячній системі. Найвищою вершиною на Землі є гора Джомолунгма, або Еверест, або Сагарматха (Гімалаї, 8 848 м). Найглибша западина – Маріанський жолоб (11 022 м) у Тихому океані. Форма поверхні Землі – геоїд. Зміна дня і ночі викликана обертанням Землі навколо своєї осі, а зміна пір року – нахилом осі до екліптики разом з обертанням навколо Сонця. Земля має маснітне і тісно пов'язане з ним електричне поля. Інше (гравітаційне) поле зумовлює існування атмосфери. Земля має земну кору, розплавлену мантію, зовнішнє (рідке) та внутрішнє (тверде) ядро. Густина, тиск, температура зростають від поверхні до центру Землі внаслідок диференціації речовини у Землі й ущільнення під дією гравітаційного поля.*



**Земля  $\oplus$**   
(фото з Вікіпедії)

Екваторіальний радіус Землі  $R_{\oplus}$  –  
6,3781 км  
Полярний радіус Землі  $R_{\oplus}$  –  
6 356,8 км  
Середній радіус Землі  $R_{\oplus}$  –  
6 371,3 км  
Довжина обводу на екваторі –  
40 075,16 км  
Довжина обводу на меридіані –  
40 008,00 км

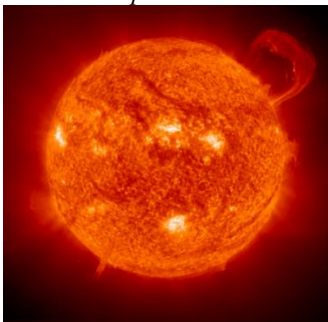
Об'єм Землі  $V_{\oplus}$  –  $1,0832 \cdot 10^{12}$  км<sup>3</sup>  
Маса Землі  $M_{\oplus}$  –  $5,972 \cdot 10^{24}$  кг  
Середня густина  $\rho_{\oplus}$  –  
 $5,515 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  
Густина у центрі планети –  
 $12,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  
Середня щільність поверхневих порід –  $2,7-2,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  
Об'єм ядра  $V_{\oplus}$  –  $1,77 \cdot 10^{12}$  км<sup>3</sup>  
Радіус ядра  $R_{\oplus}$  – 3 466 км  
Радіус внутрішнього ядра  $R_{\oplus}$  –  
1 217 км  
Об'єм мантії  $V_{\oplus}$  –  $9,06 \cdot 10^{11}$  км<sup>3</sup>  
Маса ядра  $M_{\oplus}$  –  $1,9 \cdot 10^{24}$  кг  
Маса мантії  $M_{\oplus}$  –  $4,1 \cdot 10^{24}$  кг  
Маса земної кори  $M_{\oplus}$  –  $2,6 \cdot 10^{22}$  кг  
Прискорення вільного падіння на поверхні Землі на широті Парижа  
 $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>  
Середня орбітальна швидкість –  
29,785 км/с  
Орбітальний період (рік) –  
365,3 дня



Перша космічна швидкість – 7,9 км/с	Відстань до Сонця $R_{\oplus}^{\odot}$ – 149,6 млн км
Друга космічна швидкість – 11,2 км/с	(або 1 а.о. – астрономічна одиниця)
Період обертання (доба) – 23 год 56 хв 4,1 с	Середня відстань до Місяця $R_{\oplus}^{\text{л}}$ – 384 467 км
Нахил осі – 23°26'21,4119"	Температура поверхні – від +56,7 до -91,2 °С
Площа поверхні – $5,10 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$	Альbedo – 0,367 (геометричне)
Площа суші – $1,48 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$	Температура в центрі Землі – 5 000 – 6 000 °С
Площа континентів з континентальними країнами – $2,0 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$	Тиск (нормальний) на поверхні $P_{\oplus}$ – 101,325 кПа (1 бар)
Площа поверхні води – $3,63 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$	Тиск у центрі планети – $3,6 \cdot 10^{11} \text{ Па}$
Площа океанів без континентальних країн – $3,1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$	Екваторіальний момент інерції – $8,0115 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Середня висота суші – 825 м	Полярний момент інерції – $8,0378 \cdot 10^{11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Середня глибина океанів – 3770 м	Природний супутник – Місяць
Середній поверхневий тепловий потік – $75 \text{ Вт/м}^2$	Вік – 4,5 мільярда років
Повний тепловий потік з поверхні – 38 ТВт	

### Властивості Сонця

**Сонце** – зірка у центрі Сонячної системи, що має форму кулі та складається в основному з водню (73,46 % маси) і гелію (24,85 % маси), а решта (близько 2 %) припадає на кисень, вуглець, залізо, неон, азот, кремній, магній, сірку. Навколо Сонця обертаються інші об'єкти Сонячної системи: планети і їхні супутники, карликові планети і їхні супутники, астероїди, комети й космічний пил. Сонце обертається довкола центру нашої Галактики – Чумацького (Молочного) шляху і робить повний оберт за 225-250 млн років.



**Сонце**



(фото з Вікіпедії)

Радіус Сонця $R_{\odot}$ – 695 800 км
Маса Сонця $M_{\odot}$ – $1,98 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Об'єм Сонця $V_{\odot}$ – $1,41 \cdot 10^{18} \text{ км}^3$
Середня густина $\rho_{\odot}$ – $1,41 \text{ г/см}^3$
Площа поверхні Сонця $S_{\odot}$ – $6,09 \cdot 10^{12} \text{ км}^2$
Середня орбітальна швидкість – 217 км/с
Період обертання на екваторі – 25,38 дня
Швидкість обертання на екваторі – 7174 км/год

Друга космічна швидкість –  
 $617,54 \text{ км/с}$   
 Нахил до екліптики –  $7,25^\circ$   
 Галактичний період –  
 $2,26 \cdot 10^8 \text{ років}$   
 Температура на поверхні  
 $T_{\odot} - 5780 \text{ К}$

Температура корони –  $5 \text{ МК}$   
 Спектральний клас –  $G2V$   
 («жовта зоря головної послідовності»)  
 Інтенсивність сонячного випромінювання –  $1,38 \text{ кВт/м}^2$

### Властивості супутника Місяця

**Місяць** – єдиний природний супутник планети Земля. Він є другим за яскравістю об'єктом на земному небосхилі після Сонця і п'ятим за величиною природним супутником планет Сонячної системи. Мінералогічний склад, який вивчає наука селенологія, близький до планет земної групи разом із Меркурієм, Венерою, Землею, Марсом. Ділянки суші – місячні материки – складені анортозитами, а місячні моря, що є величезними кратерами, – базальтами, але з підвищеним вмістом титану і заліза. Крім того, на Місяці є об'єкти з підвищеною щільністю – маскони, які зумовлюють гравітаційні аномалії, що у багато разів більші, ніж на Землі. Місяць має кору, товщина якої сягає 68 км, частково розплавлену мантію (на відміну від мантії Землі) і невелике ядро зі сірчистого заліза. Супутник не має ні атмосфери, ні магнітного поля. Проте на поверхні Місяця активний вплив має сонячний вітер.



**Місяць**  
 (фото з Вікіпедії)

Екваторіальний радіус Місяця  $R_{\ell}$  –  
 $1738,14 \text{ км}$   
 Полярний радіус Місяця  $R_{\ell}$  –  
 $1735,97 \text{ км}$   
 Середній радіус Місяця  $R_{\ell}$  –  
 $1737,1 \text{ км}$

Довжина обоводу на екваторі –  
 $10917 \text{ км}$   
 Маса Місяця  $M_{\ell} - 7,3477 \cdot 10^{22} \text{ кг}$   
 Об'єм Місяця  $V_{\ell} - 2,1958 \cdot 10^{10} \text{ км}^3$   
 Середня густина  $\rho_{\ell} - 3,3464 \text{ г/см}^3$   
 Площа поверхні Місяця  $S_{\ell} -$   
 $3,793 \cdot 10^7 \text{ км}^2$   
 Прискорення вільного падіння на  
 поверхні Місяця  $g = 1,622 \text{ м/с}^2$   
 Орбітальний період –  $27,322 \text{ доби}$   
 Доба –  $708 \text{ год}$   
 Нахил осі –  $1,5424^\circ$   
 Середня орбітальна швидкість –  
 $1,023 \text{ км/с}$   
 Перша космічна швидкість –  
 $1,68 \text{ км/с}$   
 Друга космічна швидкість –  
 $2,38 \text{ км/с}$   
 Середня відстань до Землі  $R_{\oplus} -$   
 $384400 \text{ км}$   
 Температура на поверхні  $T_{\ell} -$   
 від  $-173$  до  $+120^\circ \text{С}$   
 Альbedo –  $0,12$

## Властивості планети Марс

**Марс** (або “червона планета”) є четвертою планетою Сонячної системи за відстанню від Сонця та сьома за розміром і масою. Поверхня планети має червонуватий колір, що спричинений наявністю оксиду заліза ( $Fe_2O_3$ ). Основною породою, що формує поверхню, є базальт із підвищеним вмістом кварцу, уламкові пористі породи, еолові піски. Сучасні дослідження стверджують, що на Марсі глибинна будова подібна до будови Землі: є залізне ядро, що перебуває у рідкому стані й оточене мантією. Товщина кори планети від 50 до 125 км. Висота однорідної атмосфери, що складається в основному з вуглекислого газу (95 %), азоту (3 %), аргону (1,6 %), а також зі слідів кисню та води, на планеті Марс сягає 11 км (натомість на Землі – 6 км) через нижчу гравітацію. Рівнева поверхня Марса – ареоїд. Магнітне поле слабе. Найглибша (до 6 км) рифтоподібна долина зі системою каньйонів – Долина Марінер, завдовжки 4 000 км. Найвища вершина на Марсі – гора Олімп (висота сягає 25 км над середнім рівнем поверхні) вулканічного походження, що є найвідомішою найвищою горою у Сонячній системі. Вона простягається на 540 км в ширину і має круті схили по краях, висотою до 7 км, походження яких досі залишається невідомим до кінця. Довжина вулканічної кальдери – 85 км, ширина – 60 км, глибина сягає 3 км. Для порівняння – у найбільшого на Землі вулкану Мауна-Лоа на Гавайських островах діаметр кратера становить 6,5 км.



### Марс ♂

(з Вікіпедії; фото зроблене космічним телескопом Хаббл, 2001)

Екваторіальний радіус Марса  $R_{\delta}$  –  
3 396,2 км

Полярний радіус Марса  $R_{\delta}$  –  
3 376,2 км

Маса Марса  $M_{\delta}$  –  $6,4185 \cdot 10^{23}$  кг

Об'єм Марса  $V_{\delta}$  –  $1,63 \cdot 10^{11}$  км<sup>3</sup>

Середня густина  $\rho$  – 3,9335 г/см<sup>3</sup>

Площа поверхні Марса  $S_{\delta}$  –  
 $1,44 \cdot 10^8$  км<sup>2</sup>

Прискорення вільного падіння на  
поверхні Марса  $g = 3,71$  м/с<sup>2</sup>

Орбітальний період (рік) –  
686,971 дня

Період обертання (доба, або сол) –  
24 год 37 хв

Нахил осі – 29,15°

Друга космічна швидкість –  
5,027 км/с

Мінімальна відстань до Землі  $R_{\sigma}^{\oplus}$  –  
56–101 млн км

Відстань до Сонця  $R_{\sigma}^{\odot}$  –  
207–250 млн км

Температура на поверхні  $T_{\zeta}$  –  
від -87 до -5 °С

(середня температура – -60 °С)

Альbedo – 0,15

Атмосферний тиск – 0,636 кПа

Супутники – 2 (Фобос, Деймос)

**Значення астрономічних та інших величин, що використовуються у  
практичних завданнях**

<i>Величина</i>	<i>Значення</i>	<i>Величина</i>	<i>Значення</i>
Середній радіус Сонця, $R_{\odot}$	$6,958 \cdot 10^8$ м	Інтенсивність випромінювання Сонця	1,38 кВт/м <sup>2</sup>
Маса Сонця, $M_{\odot}$	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг	Середня густина Землі, $\rho_{\oplus}$	5,515 г/см <sup>3</sup>
Середній радіус Землі, $R_{\oplus}$	$6,371 \cdot 10^6$ м	Перша космічна швидкість (відносно Землі)	7,9 км/с
Маса Землі $M_{\oplus}$	$5,972 \cdot 10^{24}$ кг	Друга космічна швидкість (відносно Землі)	11,2 км/с
Середній радіус Місяця, $R_{\lrcorner}$	$1,737 \cdot 10^6$ м	Широта Києва, $\varphi_1$	50,4546600°
Маса Місяця, $M_{\lrcorner}$	$7,348 \cdot 10^{22}$ кг	Широта Одеси, $\varphi_2$	46,4774700°
Відстань від центру Землі до центру Сонця, $R_{\oplus\odot}$	$1,496 \cdot 10^{11}$ м	Прискорення вільного падіння: на широті Парижа на рівні моря ( <i>a</i> ); на полюсі ( <i>b</i> ); на екваторі ( <i>e</i> )	9,807 м/с <sup>2</sup> ( <i>a</i> ) 9,83 м/с <sup>2</sup> ( <i>b</i> ) 9,78 м/с <sup>2</sup> ( <i>e</i> )
		Прискорення вільного падіння на поверхні Місяця	1,623 м/с <sup>2</sup>
		Довжина меридіана у межах України	$1,112 \cdot 10^5$ м
Період обертання Місяця навколо Землі	27 діб 7 год 43 хв	Висота г. Говерли Висота г. Еверест	2 061 м 8 848 м
		Маса атмосфери	$\approx 5,1-5,3 \cdot 10^{18}$ кг
Електричний заряд Землі	588 000 Кл	Електричний заряд Сонця	0,08 Кл
<b><i>Прискорення вільного падіння (середнє) на поверхні небесних тіл, м/с<sup>2</sup></i></b>			
Меркурій	3,307	Венера	8,872
Марс	3,728	Юпітер	25,93
Сатурн	11,19	Уран	9,01
Нептун	11,28	Сонце	274,1
<b><i>Прискорення вільного падіння для деяких міст України, м/с<sup>2</sup></i></b>			
Львів	9,80954	Одеса	9,80735
Київ	9,81054	Сімферополь	9,80551

**Додаток Г. Префікси та позначення для утворення кратних і частинних одиниць Міжнародної системи СІ**

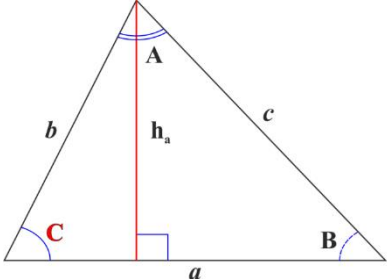
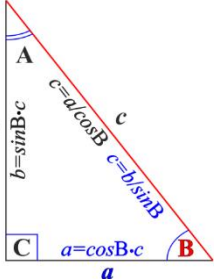
<i>Кратні одиниці</i>			<i>Частинні одиниці</i>		
Кратність	Префікс (укр. / міжнар.)	Позначення (укр. / міжнар.)	Частка	Префікс (укр. / міжнар.)	Позначення (укр. / міжнар.)
<b>10<sup>1</sup></b>	дека / deca	да / da	<b>10<sup>-1</sup></b>	деци / deci	д / d
<b>10<sup>2</sup></b>	гекто / hecto	г / h	<b>10<sup>-2</sup></b>	санти / centi	с / c
<b>10<sup>3</sup></b>	кіло / kilo	к / k	<b>10<sup>-3</sup></b>	мілі / milli	м / m
<b>10<sup>6</sup></b>	мега / mega	М / M	<b>10<sup>-6</sup></b>	мікро / micro	мк / μ
<b>10<sup>9</sup></b>	гіга / giga	Г / G	<b>10<sup>-9</sup></b>	нано / nano	н / n
<b>10<sup>12</sup></b>	тера / tera	Т / T	<b>10<sup>-12</sup></b>	піко / pico	п / p
<b>10<sup>15</sup></b>	пета / peta	П / P	<b>10<sup>-15</sup></b>	фемто / femto	ф / f
<b>10<sup>18</sup></b>	екса / exa	Е / E	<b>10<sup>-18</sup></b>	ато / atto	а / a
<b>10<sup>21</sup></b>	зета / zetta	З / Z	<b>10<sup>-21</sup></b>	zepto / zepto	з / z
<b>10<sup>24</sup></b>	йота / yotta	Й / Y	<b>10<sup>-24</sup></b>	йокто / yocto	й / y

**Додаток Д. Грецький і латинський алфавіти**

<i>Грецький алфавіт</i>								
1.	<b>Αα</b>	(альфа)	9.	<b>Ιι</b>	(йота)	17.	<b>Ρρ</b>	(ро)
2.	<b>Ββ</b>	(бета)	10.	<b>Κκ</b>	(каппа)	18.	<b>Σσ, ζ</b>	(сігма)
3.	<b>Γγ</b>	(гамма)	11.	<b>Λλ</b>	(лямбда)	19.	<b>Ττ</b>	(тау)
4.	<b>Δδ</b>	(дельта)	12.	<b>Μμ</b>	(мю (мі))	20.	<b>Υυ</b>	(іпсилон)
5.	<b>Εε</b>	(епсилон)	13.	<b>Νν</b>	(ню (ні))	21.	<b>Φφ</b>	(фі)
6.	<b>Ζζ</b>	(дзета)	14.	<b>Ξξ</b>	(ксі)	22.	<b>Χχ</b>	(хі)
7.	<b>Ηη</b>	(ета)	15.	<b>Οο</b>	(омікрон)	23.	<b>Ψψ</b>	(псі)
8.	<b>Θθ</b>	(тета)	16.	<b>Ππ</b>	(пі)	24.	<b>Ωω</b>	(омега)

<i>Латинський алфавіт</i>								
1.	<b>A a</b>	(а)	10.	<b>J j</b>	(йот)	19.	<b>S s</b>	(ес)
2.	<b>B b</b>	(бе)	11.	<b>K k</b>	(ка)	20.	<b>T t</b>	(те)
3.	<b>C c</b>	(це)	12.	<b>L l</b>	(ель)	21.	<b>U u</b>	(у)
4.	<b>D d</b>	(де)	13.	<b>M m</b>	(ем)	22.	<b>V v</b>	(ве)
5.	<b>E e</b>	(е)	14.	<b>N n</b>	(ен)	23.	<b>W w</b>	(дубль ве)
6.	<b>F f</b>	(еф)	15.	<b>O o</b>	(о)	24.	<b>X x</b>	(ікс)
7.	<b>G g</b>	(ге)	16.	<b>P p</b>	(пе)	25.	<b>Y y</b>	(ігрек)
8.	<b>H h</b>	(аш)	17.	<b>Q q</b>	(ку)	26.	<b>Z z</b>	(зет)
9.	<b>I i</b>	(і)	18.	<b>R r</b>	(ер)			

## Додаток Е. Деякі відомості з математики

<b>Сталі числа та деякі відомості з геометрії</b>			
$\pi = 3,1416$	$e = 2,7183$	$\ln 10 = 2,3026$	$\lg e = 0,4343$
$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$		$(a - b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$	
$a^2 - b^2 = (a - b)(a + b)$		$(a + b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$	
Теорема косинусів $c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos C$	Теорема синусів $\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$	Косинус кута В $\cos B = \frac{a}{c}$ $a = \cos B \cdot c$ $c = \frac{a}{\cos B}$	Синус кута В $\sin B = \frac{b}{c}$ $b = \sin B \cdot c$ $c = \frac{b}{\sin B}$
де a, b, c – сторони трикутника; А, В, С – відповідні їм кути (для будь-якого трикутника)		a – прилеглий катет, b – протилежний катет, c – гіпотенуза, В – кут (для прямокутного трикутника)	
			
Тангенс кута В $tg B = \frac{\sin B}{\cos B} = \frac{b}{a}$		Котангенс кута В $ctg B = \frac{\cos B}{\sin B} = \frac{a}{b}$	
Площа трикутника	$S = \frac{1}{2} a h_a$ дорівнює половині добутку довжини сторони трикутника та довжини висоти, проведеної до цієї сторони	Площа трикутника	$S = \frac{1}{2} a b \sin C$ дорівнює половині добутку двох його сторін, помноженого на синус кута між ними
Довжина кола	$L = 2\pi R$	Радіан	$1 \text{ рад} = 360^\circ / 2\pi = 180^\circ / \pi = 57^\circ$

**Сталі числа та деякі відомості з геометрії**

Площа кола	$S = (\pi d^2)/4$ $= \pi R^2$	Площа поперечного перерізу циліндра	$s = \frac{\pi d^2}{4}$
Об'єм циліндра	$V = SH = \pi R^2 H$		
Площа поверхні сфери	$S = 4\pi R^2$	Площа поверхні тора	$A = 4\pi^2 Rr = (2\pi r)(2\pi R)$
Об'єм кулі	$S = \frac{4}{3}\pi R^3$	Об'єм тора	$V = (\pi r^2)(2\pi R)$ $V = 2\pi^2 Rr^2$

**Деякі похідні основних елементарних функцій**

$C' = 0, (C = const)$	$x' = 1$	$(x^n)' = nx^{n-1}$	$\left(\frac{1}{x}\right)' = -\frac{1}{x^2}$
$(\sqrt[n]{x})' = \frac{1}{n \cdot \sqrt[n]{x^{n-1}}}$	$(\sqrt{x})' = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{x}}$	$(a^x)' = a^x \ln a$	$(e^x)' = e^x$
$(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$	$(\ln x)' = \frac{1}{x}$	$(\sin x)' = \cos x$	$(\cos x)' = -\sin x$
$(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$	$(\operatorname{ctg} x)' = \frac{1}{\sin^2 x}$	$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$

**Правила диференціювання**

$(u \pm v)' = u' \pm v'$	$(u \cdot v)' = u' \cdot v + v' \cdot u$	$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u' \cdot v - v' \cdot u}{v^2}$	$(C \cdot u)' = C \cdot u'$
--------------------------	--	---	-----------------------------

**Деякі інтеграли**

$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}, (n \neq -1)$	$\int \frac{dx}{\sqrt{x}} = 2\sqrt{x}$
$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x}$	$\int \frac{dx}{x} = \ln x $
$\int e^x dx = e^x$	$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a}$
$\int \sin x dx = -\cos x$	$\int \cos x dx = \sin x$

### Деякі інтеграли

$$\int \operatorname{tg} x \, dx = -\ln|\cos x|$$

$$\int \operatorname{ctg} x \, dx = \ln|\sin x|$$

$$\int \sin^2 x \, dx = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4}\sin(2x)$$

$$\int \cos^2 x \, dx = \frac{1}{2}x + \frac{1}{4}\sin(2x)$$

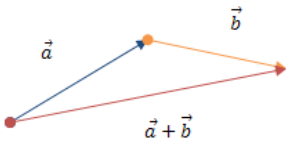
$$\int_{x_1}^{x_2} C \frac{dx}{x^2} = C \cdot \left(-\frac{1}{x}\right) \Big|_{x_1}^{x_2} = C \cdot \left(-\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1}\right) = -C \cdot \left(\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_1}\right),$$

де  $C = \text{const}$

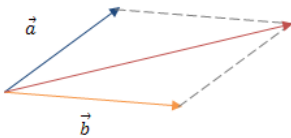
### Довідка про вектори

Додавання векторів

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$$



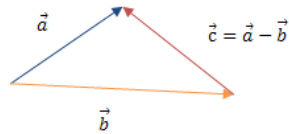
Правило трикутника



Правило паралелограма

Різниця векторів

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$$



Скалярний добуток

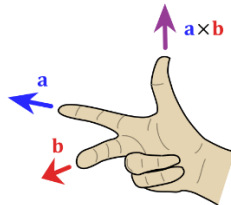
$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\vec{a} \wedge \vec{b})$$

Скалярний добуток векторів дорівнює добутку їх довжин на косинус кута між ними

Векторний добуток

$$\vec{a} \times \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin(\vec{a} \wedge \vec{b})$$

Векторний добуток дорівнює добутку довжин векторів на синус кута між ними



Напрямок векторного добутку знаходимо за правилом правої руки



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО НАВЧАЛЬНИЙ КУРС.....	2
2. ПРОГРАМА ЛЕКЦІЙНОГО КУРСУ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ГЕОФІЗИКИ».....	4
3. ТЕМИ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ПРАКТИЧНОГО КУРСУ.....	5
4. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ФІЗИКО- МАТЕМАТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДЛЯ ГЕОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР І ПРОЦЕСІВ В ОБОЛОНКАХ ЗЕМЛІ.....	6
4.1. Деякі загальні поняття фізики Землі / основ геофізики.....	8
4.2. Ідеалізація задач з фізики Землі / основ геофізики.....	10
4.3. Класифікація задач з фізики Землі / основ геофізики.....	12
4.4. Етапи розв'язання поставленої задачі з фізики Землі.....	15
4.5. Метод аналізу фізичної ситуації в задачах.....	18
4.6. Метод спрощення й ускладнення.....	19
4.7. Універсальні методи – метод диференціювання й інтегрування.....	19
5. СПОСОБИ ТА ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ З ПРАКТИЧНОГО КУРСУ.....	22
5.1. Основні фізичні властивості Землі, Місяця, Сонця та інших космічних об'єктів.....	22
5.1.1. <i>Методи визначення радіусів і відстаней між космічними тілами.....</i>	24
5.1.2. <i>Маса Землі та інших планет.....</i>	34
5.1.3. <i>Знаходження маси оболонок, густини середовищ і її розподілу в Землі, Сонячній системі.....</i>	39
5.1.4. <i>Момент інерції Землі та її оболонок.....</i>	45
5.1.5. <i>Тиск усередині Землі.....</i>	49
5.1.6. <i>Температура у внутрішніх оболонках Землі.....</i>	53
5.1.7. <i>Температура, тиск в атмосфері та її маса.....</i>	55
5.1.8. <i>Висота гір на планетах Сонячної системи.....</i>	62
5.2. Фізичні процеси у системі «Земля – космічні тіла».....	67
5.2.1. <i>Рух космічних тіл (астероїдів, комет, космічного пилу) в бік Землі.....</i>	67
5.2.2. <i>Сонце, сонячне випромінювання.....</i>	74
6. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	82
ДОДАТКИ.....	91

<i>Додаток А.</i> Основні фундаментальні та додаткові константи природи .....	91
<i>Додаток Б.</i> Параметри деяких фізичних величин .....	92
<i>Додаток В.</i> Короткі відомості про фізичні й орбітальні властивості деяких небесних тіл Сонячної системи .....	94
<i>Додаток Г.</i> Префікси та позначення для утворення кратних і частинних одиниць Міжнародної системи СІ .....	99
<i>Додаток Д.</i> Грецький і латинський алфавіти .....	99
<i>Додаток Е.</i> Деякі відомості з математики .....	100