

ЗЕМЛЯ – НАША

РІДНА

ПЛАНЕТА

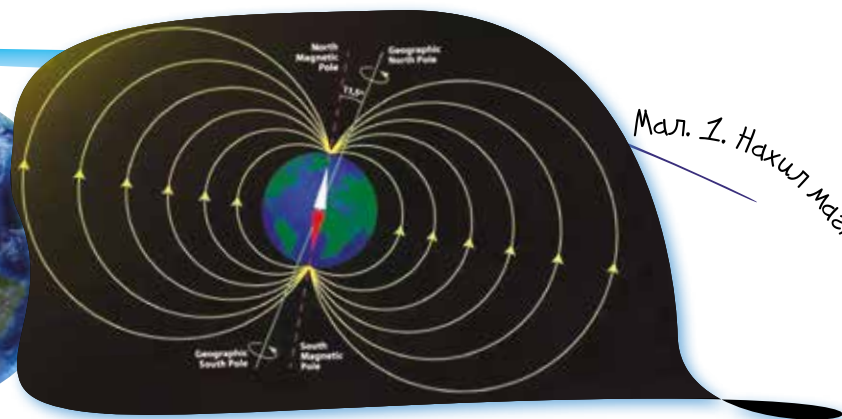
ЧАСТИНА 2

ОЛЕКСАНДР ШЕВЧУК

Земля – велетенський магніт

Про те, що Земля має власне магнітне поле, люди знали здавна. Ще до нашої ери вони помітили, що деякі матеріали можуть за певних умов розташовуватися строго визначеним способом відносно сторін горизонту. Це спостереження наштовхнуло на думку, що таку властивість можна використати для орієнтування на місцевості. Так з'явився пристрій для орієнтування у магнітному полі Землі – компас. Його винайшли китайці. Найдавнішу писемну згадку про компас, датовану 4 ст. до н. е., знаходимо в Книзі володаря долини Диявола (鬼谷子). Пізніше винахід китайців потрапив до Європи, можливо, за посередництва арабів.

У 1831 році англійський полярний дослідник Джон Росс відкрив у Канадському архіпелазі область, де магнітна стрілка приймала вертикальне положення. Це була область Північного магнітного полюса Землі. У 1841 році Джеймс Росс (племінник Джона Росса) досяг Південного магнітного полюса Землі, розташованого в Антарктиді. Зауважимо, що з фізичної точки зору Північний магнітний полюс насправді є Південним, адже саме на нього вказує північна стрілка компаса, а, як відомо, магніти притягуються різноименними полюсами. Тому Південний магнітний полюс слід було б назвати Північним, але історично склалося так, що назви магнітних полюсів відповідають півкулям, в яких вони розташовані.



Мал. 1. Нахил магнітної осі до осі обертання Землі

Магнітні полюси не збігаються з географічними. Тому стрілка компаса не вказує точно на північ. Якщо з'єднати магнітні полюси умовною лінією, вона не пройде через центр Землі, тому що магнітне поле планети несиметричне. Кут нахилу цієї лінії відносно осі добового обертання Землі в нашу епоху становить приблизно $11,5^\circ$ (мал. 1).

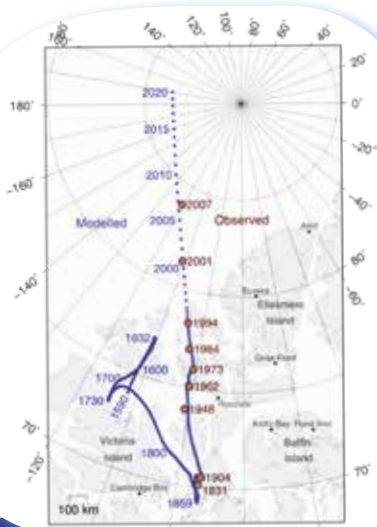
Досі не з'ясовано, з яких причин магнітні полюси Землі перебувають в постійному русі. Приблизно з початку XVII ст. Північний магнітний полюс розташовувався під паковими льодами в межах сучасної канадської Арктики. Північний магнітний полюс рухається по гвинтоподібній траєкторії, зсуваючись в північному й північно-західному напрямку зі швидкістю приблизно 60 км на рік. З другої половини XX ст. Північний магнітний полюс досить швидко переміщується в бік Таймиру (Росія). У 2005 році Північний магнітний полюс Землі, який щонайменше 400 років розташовувався на території Канади, вийшов за її межі. На мал. 2 показано дрейф Північного магнітного полюса Землі в період з 1632 до 2020 року (прогноз).

Під час магнітних бур, викликаних спалахами на Сонці¹, положення магнітних полюсів зазнає значних хаотичних коливань. На мал. 3 показані коливання Північного магнітного полюса під час сильної магнітної бурі 29 жовтня 2013 року. Для порівняння на тому ж малюнку зеленою лінією позначено дрейф Північного магнітного полюса за 1954–2013 роки. Станом на 2015 рік координати Північного магнітного полюса – $86,29^\circ$ пн. ш., $160,06^\circ$ зх. д., а Південного – $64,28^\circ$ пд. ш., $136,59^\circ$ сх. д.

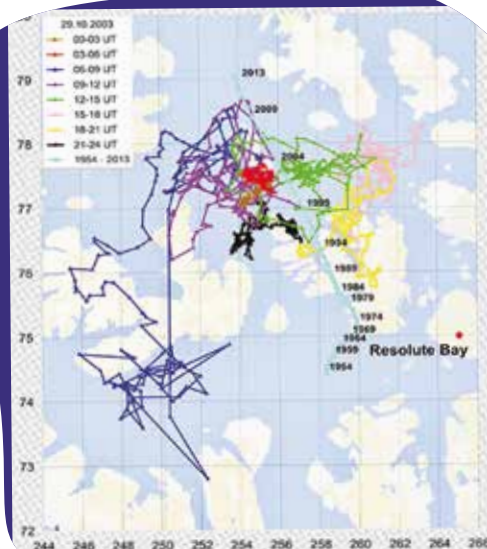
Природа земного магнетизму

Вперше пояснити існування магнітного поля Землі спробував ірландський фізик Дж. Лармор у 1919 році. Він запропонував теорію **магнітного динамо**, яке функціонує в надрах Землі. Ця теорія досі є загальноприйнятною і найбільш вірогідною.

¹Читай статтю Олександра Шевчука „Сонце – наша рідна зоря” („КОЛОСОК” №10/2017).



Мал. 2. Дрейф Північного магнітного полюса



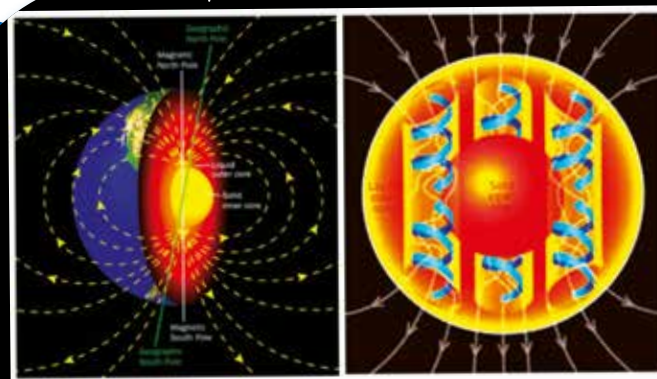
Мал. 3. Колівавання магнітного полюса

Умови для виникнення магнітного динамо створюються в рідкому зовнішньому електропровідному ядрі Землі. Воно складається в основному із заліза і має температуру приблизно 4 000–6 000 °С. Саме тут утворюються **конвективні** потоки, що переносять тепло від твердого внутрішнього ядра назовні внаслідок перепаду температур між ядром та зовнішніми частинами Землі. Сили, які виникають внаслідок добового обертання Землі, – **сили Коріоліса** – закручують ці потоки в гвинтоподібні лінії (мал. 4). Завдяки тертю між струменями в цих потоках вони набувають електричного заряду. Напрялений рух заряджених частинок називають струмом. Оскільки конвективні потоки мають переважний напрямок руху від ядра назовні, то утворюються **конвективні струми**. Ці струми, як і струми довільної природи, створюють магнітне поле, яке підсилює початкове поле, а воно підсилює конвективний потік. Такий процес і є магнітним динамо. Посилення конвективних струмів триває доти, поки зі збільшенням сили струму втрати на теплове випромінювання не зрівняються з енергією конвективних потоків, що надходить від ядра.

Зовнішнє магнітне поле Землі

За межами поверхні Землі її магнітне поле разом з плазмою сонячного вітру² формує в космічному просторі структури, які утворюють її **магнітосферу** (мал. 5). Отже, магнітосфера – це область простору навколо планети або іншого намагніченого небесного тіла, яка утворюється, коли потік заряджених частинок (наприклад, сонячного вітру) відхиляється від своєї первісної траєкторії під впливом внутрішнього магнітного поля цього тіла.

Мал. 4. Магнітне динамо Землі



Мал. 5. Магнітосфера Землі



У верхній частині атмосфери (понад 100 км) під впливом сонячного випромінювання молекули втрачають частину електронів – іонізуються, формуючи щільну холодну плазму. Цю частину магнітосфери Землі, що простягається на відстань до трьох її радіусів, називають **плазмосферою**.

Далі від поверхні Землі магнітне поле дуже несиметричне. Його спотворює сонячний вітер: з боку Сонця магнітосфера Землі стискається, а в напрямку від Сонця – простягається на сотні тисяч кілометрів (мал. 6). Область навколоземного космічного простору, в якій ще переважають процеси, пов'язані з магнітним полем Землі, називають **магнітопаузою**. Магнітопауза в середньому простягається на відстань 10 земних радіусів.

Магнітне поле Землі – своєрідна пастка для заряджених частинок сонячного вітру та космічних променів. За оцінками вчених, загальна маса частинок, які утримує магнітосфера Землі, становить приблизно 10 кг! Уявіть лише, якою величезною є кількість заряджених частинок, захоплених магнітним полем Землі, зважаючи на їхню мізерну масу! Можливо, спробуєте оцінити кількість цих частинок?³

Зони захоплення заряджених частинок сонячного вітру та космічних променів формують так звані **радіаційні пояси** в магнітосфері (мал. 7). Радіаційні пояси Землі теоретично передбачені ще на початку ХХ ст., проте відкриті та досліджені лише з початком космічної ери.

³**Інформація для допитливих.** Давайте разом оцінимо кількість заряджених частинок, які утримують радіаційні пояси Землі. З досліджень, проведених за допомогою супутників, відомо, що концентрація електронів, захоплених радіаційними поясами Землі, у десять разів перевищує концентрацію протонів. Вмістом інших заряджених частинок нехтуємо через їхню дуже малу концентрацію. Нехай маса електрона m_e , маса протона m_p , а кількість протонів в радіаційних поясах N . Тоді загальна маса всіх електронів буде $10 \times N \times m_e$, а загальна маса всіх протонів – $N \times m_p$. Отже, загальна маса всіх заряджених частинок, захоплених в радіаційні пояси, буде: $M = N \times m_p + 10 \times N \times m_e = 10$ (кг). Оскільки $m_p \approx 2 \cdot 10^{-27}$ кг, а $m_e \approx 10^{-30}$ кг, то $N \approx M/m_p \approx 5 \cdot 10^{27}$ (5 октильйонів) штук!

Радіаційні пояси Землі умовно поділяють на дві частини – внутрішню і зовнішню. Нижня межа внутрішньої частини радіаційного поясу розташована на висоті приблизно 500 км. Товщина цієї області становить кілька тисяч кілометрів. Зовнішня частина радіаційного поясу розташована на висоті від 10 000 до 20 000 км. Заряджені частинки великої енергії, які захоплюють радіаційні пояси, становлять небезпеку для космонавтів, якщо траєкторії руху космічних апаратів проходять в цій зоні космічного простору.

Полярні сяйва

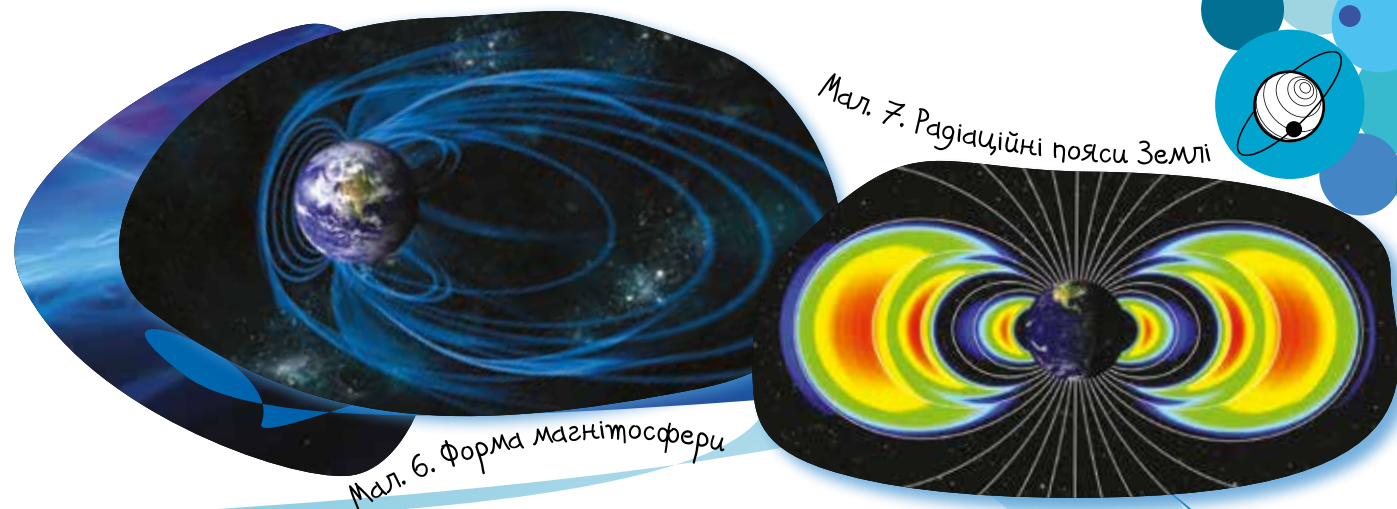
Магнітосфера Землі є „винуватицею” красивого та в чомусь таємничого оптичного явища – **полярного сяйва**. Полярне сяйво – світіння окремих ділянок нічного неба, що швидко змінюється (мал. 8). На Землі такі сяйва спостерігають на відстані 20–35° від магнітних полюсів (північне полярне сяйво і південне полярне сяйво), але під час спалахів на Сонці і спричинених ними магнітних бур полярні сяйва можна побачити практично на всіх широтах.

Полярні сяйва пояснюються світінням розріджених шарів атмосфери на висотах від 60 до 100 км під дією заряджених частинок сонячного вітру та космічних променів. Заряджені частинки, захоплені магнітосферою, рухаються до магнітних полюсів, потрапляють в атмосферу Землі і стикаються з молекулами або атомами атмосфери. Водночас відбувається передача енергії від заряджених частинок атомам та молекулам атмосфери. Останні збуджуються, а повертаючись у свій „нормальний” стан, випромінюють видиме світло. Тривалість полярного сяйва – від декількох хвилин до декількох діб. Полярні сяйва спостерігають і на інших планетах Сонячної системи⁴. Особливо величні та грандіозні полярні сяйва фіксують в атмосферах планет-гігантів: Юпітера та Сатурна.

Атмосфера Землі

Атмосфера – суміш газів, що оточують планету та утримуються завдяки її силі тяжіння. Атмосфера Землі складається з азоту (78,08 % від об’єму атмосфери) і кисню (20,95 %). Решта газів – це аргон (0,93 %), вуглекислий газ (0,03 %), неон, гелій, метан, криптон, водень та невеликі домішки інших газів (разом до 0,01 %). Крім того, атмосфера Землі містить приблизно $1,4 \cdot 10^{16}$ кг води.

⁴Читай статті Олександра Шевчука „Гігант з червоною ознакою”, „У полоні кілець” („КОЛОСОК” №1, 2/2014).



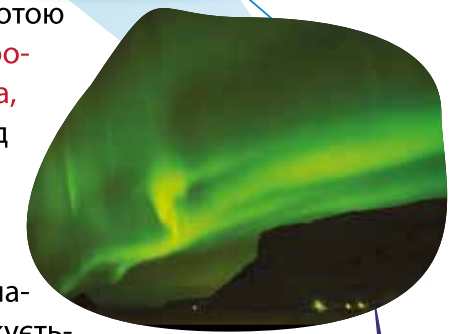
Відповідно до зміни температури з висотою в атмосфері Землі виокремлюють такі шари: **тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, екзосфера** (мал. 9). Товщина тропосфери – від 8 до 10 км у полярних областях та до 18 км над екватором. У тропосфері зосереджено майже 80 % атмосферного повітря, майже вся водяна пара, тут утворюються хмари і випадають опади. З висотою температура у тропосфері знижується в середньому на 6 °С на 1 км висоти, а тиск – в середньому на 11 мм рт. ст. на кожні 100 м. Умовна межа між тропосферою та стратосферою, у якій зниження температури з висотою припиняється, називається **тропопаузою**.

Стратосфера – шар атмосфери між тропопаузою та **стратопаузою**. Вона простягається над поверхнею Землі на висоті від 20 до 55 км. Стратосферний шар характеризується незначним збільшенням температури з висотою. На висоті 20–25 км у стратосфері розташований шар озону, який захищає живі організми від згубного впливу ультрафіолетового випромінювання Сонця.

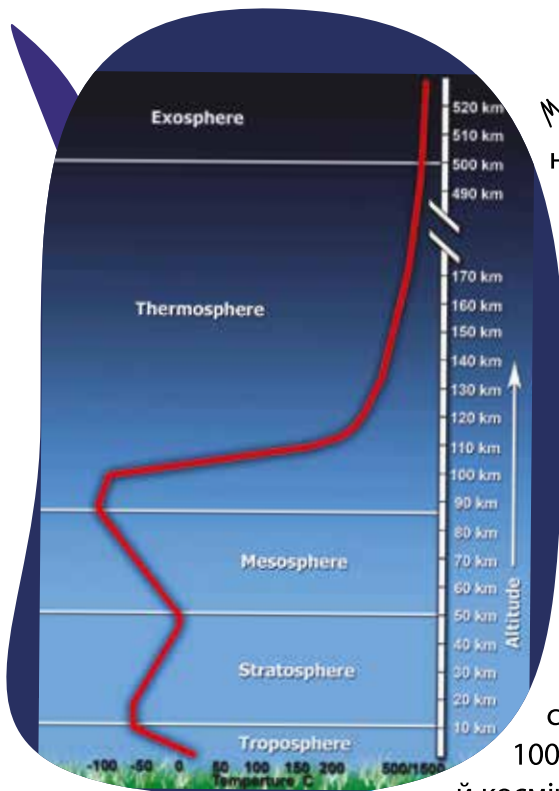
Мезосфера – шар земної атмосфери, що розташований на висотах від 55 до 85 км. Температура в межах мезосфери поступово падає від 0 °С у стратопаузі до мінус 70–90 °С у **мезопаузі** (шарі атмосфери, який відокремлює мезосферу від термосфери).

Термосфера пролягає на висотах від 85 до 400–800 км. Температура в межах термосфери зростає з висотою від -90 °С до 2 000 °С у термопаузі (шарі атмосфери, який відокремлює термосферу від екзосфери).

Екзосфера – зовнішній шар земної атмосфери, в якому атмосфера поступово переходить у міжпланетне середовище. Екзосфера почи-



Мал. 8. Полярне сяйво



Мал. 9. Шари атмосфери Землі

нається на висоті приблизно 550 км і складається переважно з Гелію та Гідрогену.

За ступенем іонізації атмосферних газів виділяють нейтральний атмосферний шар – **нейтросферу** – від поверхні Землі до висот 90 км, та іонізований шар – **іоносферу** – вище 90 км.

За однорідністю хімічного складу атмосферу поділяють на **гомосферу** (однорідну частину атмосфери майже постійного хімічного складу) та **гетеросферу** (тут склад атмосфери змінюється з висотою та залежно від сонячної активності). Межею між гомосферою та гетеросферою є **гомопауза** на висоті приблизно 100 км. Гомопауза – умовна межа атмосфери й космічного простору. Її часто називають **лінією**

Кармана на честь Теодора фон Кармана – американського інженера і фізика угорського походження, фахівця в галузі повітроплавання, який передбачив існування такої межі та розрахував її характеристики. Вище цієї межі неможливі польоти літаків внаслідок надто низької густини атмосфери, тому на цих висотах літають лише ракети. Перша така ракета була побудована під керівництвом німецького вченого-ракетобудівника Вернера фон Брауна на північному сході Німеччини на полігоні неподалік від містечка Пенемюнде. Перша в світі балістична ракета А-4, більш відома як Фау-2 (Мал. 10), на чергових випробуваннях у першій половині 1944 року досягнула висоти 188 км. Таким чином, ракета А-4 стала першим штучним об'єктом, що здійснив суборбітальний космічний політ.

Атмосфера Землі захищає нас від згубного впливу ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, яке надходить в околиці Землі від Сонця та інших об'єктів космосу. Крім того, атмосфера захищає нас від **мікрометеороїдів**⁵ – дрібних твердих частинок, які, не будь атмосфери, „посікли” б вщент усі живі організми. Влітаючи на великих швидкостях (від 12 до 73 км/с) в атмосферу, вони дуже швидко нагріваються внаслідок тертя до високих температур і випаровуються, не долітаючи до земної поверхні декілька десятків кілометрів. Якщо це сталося вночі за ясного неба, ми бачимо явище ме-



Мал. 10. Фау-2



Мал. 11. Метеорний дощ



Мал. 12. Болід

теору – короткочасний спалах, останній „салют” загиблої в атмосфері частинки. В народі кажуть, що „впала зоря”, але тепер ви знаєте, що ж відбулося насправді.

Іноколи впродовж години в атмосферу Землі влітають декілька десятків, сотень, а іноді й тисяч пилових частинок та метеороїдів. Тоді на Землі можна спостерігати красиве, зазвичай періодичне, явище **метеорного потоку**. Час його „життя” – від декількох днів до декількох тижнів. Метеорні потоки активні щороку приблизно в один і той же час. Причиною метеорних потоків є комети, які руйнуються. Багаторазово повертаючись до Сонця, комета поступово втрачає свою речовину, випаровується від нагрівання сонячними променями, поступово втрачає міцність і руйнується. Уламки комет формують **метеорний рій** уздовж її орбіти. Ми спостерігаємо на небі метеорні потоки, які перетинають орбіту Землі. Метеори в потоці летять практично паралельно, але внаслідок ефекту перспективи здається, наче вони вилітають з однієї невеликої ділянки неба, яку називають **радіантом потоку**.

Метеорні потоки здебільшого називають за сузір'ями, в яких розташовано їхні радіанти. У разі зустрічі Землі з особливо щільним метеорним роєм трапляються короткочасні **метеорні дощі** (Мал. 11), під час яких кількість метеорів значно збільшується. Наприклад, метеорний дощ Леонідів 16 грудня 1966 року був такий рясний, що за годину спостерігачі налічували до 70 тисяч метеорів!

Іноді можна побачити набагато більш рідкісне явище, ніж явище метеору та метеорного потоку, – **болід**. Болід – великий яскравий метеор, схожий на вогняну кулю, що рухається в небі (Мал. 12). Це явище обумовлене потраплянням у щільні шари атмосфери великих твердих частинок, які називаються **метеорними тілами**.

⁵Читай статтю Олександра Шевчука „Малеча Сонячної системи” („КОЛОСОК” №12/2016).



Рухаючись в атмосфері зі швидкістю в декілька десятків кілометрів за секунду, частинка нагрівається внаслідок тертя, і навколо неї утворюється світна оболонка з розжарених газів. Боліди часто мають значний кутовий діаметр, і їх видно навіть

удень. Політ боліда часто супроводжується звуками, що нагадують грім. Нагріваючись, метеорне тіло розколюється, і на Землю з гуркотом падають чисельні уламки. Залишки метеорних тіл, що впали на Землю, називають **метеоритами**. 15 лютого 2013 року над територію Челябінської області (Росія) пролетів болід. Від бурхливого нагрівання болід вибухнув на висоті декількох кілометрів. Ударна хвиля, яка при цьому утворилася, завдала помітних руйнувань. Вікна у тисячах будинків залишилися без скла.

Дуже рідко спостерігають явище **електрофонного боліду**. Політ такого боліда супроводжується звуковими ефектами, наприклад, потріскуванням. Дивовижність явища полягає в тому, що цей звук не може виникати від тертя метеорного тіла об повітря, оскільки його чути одночасно з прольотом, тобто набагато раніше, ніж звук від самого тіла дійде до спостерігача (боліди рухаються в атмосфері з надзвуковими швидкостями). Природа явища електрофонного боліду поки що не зрозуміла.

Іноді космічне тіло, досягнувши поверхні Землі, залишає в місці падіння кратер. На щастя, такі події трапляються рідко, адже атмосфера надійно захищає нас. Що було б, якби не вона? Погляньте на „побиті“ поверхні космічних тіл, позбавлених атмосфери, наприклад, на поверхню Місяця. Кратери від падінь метеоритів на поверхню Землі називають **астроблемами**. Найвідомішою астроблемою є кратер Беррінджера, або Аризонський кратер (мал. 13). Станом на 2017 рік налічується 182 підтверджені астроблеми, найбільшими серед яких є: Вал Вредефорта в ПАР (діаметром 160 км), кратер Чіксулуб (на Юкатані, 150 км), Садбері (Канада, 130 км), Попігайська западина (Росія, 90 км), озеро Манікуаган (Канада, 85 км), озеро Каракуль (Таджикистан, 52 км), кратер Нордлінгер Ріс (Німеччина, 25 км). В Україні налічується сім підтверджених астроблем, до яких, зокрема, зараховують Бовтиську (діаметром 25 км), Оболонську (12 км) та Іллінецьку (7 км).

Мал. 13
Кратер Беррінджера