

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ЮРІЯ
ФЕДЬКОВИЧА

Географічний факультет

Кафедра фізичної географії, геоморфології та палеогеографії

«ЕВОЛЮЦІЯ ТА РОЗПОДІЛ УДАРНИХ СТРУКТУР
НА ПЛАНЕТІ ЗЕМЛЯ: РЕГІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ
ТА ОСВІТНІЙ АСПЕКТ»

Кваліфікаційна робота

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Виконала:

Студентка 4 курсу, 403 групи
Спеціальності 014 Середня освіта
(Географія)
Тихоліз Аліна

Керівник:

кандидат географічних наук,
доцент кафедри фізичної географії,
геоморфології та палеогеографії
Кирилюк Сергій Миколайович

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри №

від « » червня 2025 р.

Зав. кафедрою _____ проф. Рідуш Б.Т.

Чернівці 2025

АНОТАЦІЯ

Тихоліз А.О.

Еволюція та розподіл ударних структур на планеті земля: регіональний аналіз та освітній аспект. Чернівці: Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2025. 93 с.

У роботі досліджено еволюцію та просторовий розподіл ударних кільцевих структур на планеті Земля та в Україні. Розкрито їхню будову, літологічні особливості, картографування, ресурсний потенціал і значення для розвитку біосфери. Проаналізовано сценарії формування земної кори в період Важкого метеоритного бомбардування та вплив падіння астероїда на масове вимирання динозаврів. Робота включає 4 розділи, 4 таблиці, 26 рисунків, список із 96 джерел.

Ключові слова: ударні структури, імпактні кратери, метеорити, картографування, освітній аспект.

Tykheliz A.O.

Evolution and Distribution of Impact Structures on Planet Earth: Regional Analysis and Educational Aspect. Chernivtsi: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2025. 93 p.

The thesis explores the evolution and spatial distribution of impact ring structures on Earth and in Ukraine. It analyzes their structure, lithology, mapping methods, resource potential, and role in biosphere development. Scenarios of crust formation during the Late Heavy Bombardment and the asteroid-related extinction of dinosaurs are discussed. The thesis includes 4 chapters, 4 tables, 26 figures, and 96 references.

Keywords: impact structures, impact craters, meteorites, mapping, educational aspect.

Кваліфікаційна робота ОП «Бакалавр» містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ **Аліна Тихоліз**

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1	
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ГОЛОВНІ ПІДХОДИ	
У ВИВЧЕННІ ІМПАКТНИХ СТРУКТУР ЗЕМЛІ	8
1.1. Діагностика імпактних структур Землі та їхня будова	8
1.2. Літологія імпактних структур Землі	12
1.3. Способи картографування імпактних структур Землі	17
1.4. Корисні копалини в імпактних структурах Землі	21
РОЗДІЛ 2	
ГЕОГРАФІЯ НАЙБІЛЬШ ВІДОМИХ	
І НАЙБІЛЬШИХ ІМПАКТНИХ СТРУКТУР ЗЕМЛІ	24
2.1. Найбільші імпактні структури Землі	24
2.2. Найбільші імпактні структури України	44
РОЗДІЛ 3	
НАЙВАЖЛИВІШІ ПОДІЇ В ГЕОЛОГІЧНІЙ ІСТОРІЇ ЗЕМЛІ,	
ПОВ'ЯЗАНІ З ІМПАКТНИМИ СТРУКТУРАМИ	58
3.1. Формування земної кори і Місяця в догеологічний період у період Важкого метеоритного бомбардування	58
3.2. Зникнення динозаврів, як наслідок падіння астероїда та інші гіпотези	62
РОЗДІЛ 4	
ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	
В ШКІЛЬНИЙ ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС	72
4.1. Організація освітнього процесу під час вивчення ударних кільцевих структур	72
4.2. Плани уроків з вивчення ударних кільцевих структур	74
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	86

ВСТУП

Актуальність. Абсолютну більшість обсягу земної кори складають найрізноманітніші осадові, магматичні та метаморфічні гірські породи, серед них окремою групою вирізняються так звані імпакти й імпактні брекчії древніх ударних кратерів або, як їх ще називають, астроблем, які виникли під час ударів великих метеоритів, астероїдів і кометних ядер, яким вдалося пройти товщу земної атмосфери. Загалом вони мають доволі обмежене поширення і можуть розглядатися як акцесорні. Згадані геологічні імпактні структури вдалося достовірно діагностувати лише в середині минулого століття, їхнє виявлення і ретельне дослідження набуло відчутних масштабів у 60-80-х роках, практично одночасно з початком виходу людини у космос за допомогою автоматичних міжпланетних станцій і пілотованих місій. Геологічне вивчення імпактних структур має дуже коротку історію, що, в поєднанні з їх надзвичайно низькою концентрацією на земній поверхні, обмежує близьку взаємодію з ними більшої частини практикуючих геологів у світі. Хоча, імпактні структури в окремих випадках й вносять значний вклад в геологічну будову окремих регіонів, а іноді є коморю, часом унікальних родовищ різних корисних копалин. Слід зазначити, що помилки при розпізнаванні імпактних структур призводить до суттєвого перекручування під час побудови геологічних карт, а також до хибної оцінки мінералогічного потенціалу окремих регіонів.

Сучасні підходи та методики ідентифікації імпактних структур добре опрацьовані й неодноразово підтверджені практичними дослідженнями. В їхній основі лежить фізична теорія утворення імпактних кратерів, а також принципи детального аналізу гірських порід, які зазнали впливу екстремально високих тисків і температур – значно вищих за ті, що характерні для магматичних, метаморфічних або тектонічних процесів у земній корі та верхній мантії. Імпактне кратеротворення є ключовим геологічним процесом, що постійно відбувається в космічному просторі і має суттєвий вплив на формування рельєфу та орографії планет земного типу, а також супутників планет-гігантів. При цьому імпактне кратероформування не обмежується лише появою

концентричних западин з оточуючими валами – одночасно виникають значні структурні порушення у заляганні гірських порід у зоні удару. Це, передусім – дроблення, плавлення і випаровування, а також утворення покривних викидів із новоствореного кратера. Тому, дуже часто цей процес носить назву коптогенезу (від грец. копта – руйнувати ударами) за аналогією з осадонакопиченням, магматизмом і метаморфізмом. З аналогією з процесом імпактні гірські породи можуть називатися також коптогенними. Виявлення необхідних і достовірних ознак, що дають підстави надійно діагностувати коптогенні породи імпактних структур, оконтурювати і зображувати їх на великомасштабних геологічних картах, вимагає знань основ теорії імпактного кратероформування, подібно до того, коли під час картографування асоціацій осадових, магматичних і метаморфічних порід необхідно володіти основами структурної геології, тектоніки, літостратиграфії, петрографії і петрології.

Об’єкт і предмет дослідження. Об’єктом дослідження виступає планета Земля. Предметом – імпактні структури різного віку на її поверхні.

Мета. Простежити спільні й відмінні риси в будові й еволюції ударних кільцевих структур на планеті Земля та в Україні зокрема, а також встановити їхнє значення щодо формування й розвитку глобальної живої природи Землі. Для досягнення мети виконувалася низка **завдань**:

- визначити специфіку діагностики ударних кільцевих структур на планеті Земля та окреслити спільні й відмінні риси в будові різновікових імпактних структур;
- простежити характер літологічної будови типових кільцевих структур на планеті Земля;
- виробити модель способів картографування імпактних структур в умовах Землі;
- визначити наявність та характер покладів корисних копалин в імпактних структурах Землі;
- описати та встановити спільні й відмінні риси в будові й еволюції найбільших ударних кільцевих структурах Землі;

- описати та встановити спільні й відмінні риси в будові й еволюції найбільших ударних кільцевих України;
- простежити можливі сценарії формування земної кори і Місяця в догеологічний період у період Важкого метеоритного бомбардування;
- визначити і порівняти головні гіпотези щодо зникнення динозаврів, і довести, що їхнє масове вимирання відбулося внаслідок падіння астероїда.

Методична база. Опорними джерелами під час написання роботи були праці Вальтер А.А., Гурова Є.П., Гожики П.Ф., Довгалюка І.А., Масайтіса В.Л., Краюшкіна В.А., Нікольського А.П., Романюка П.М., Садовського М.А., Шкловського Й., Baratoux D., French B.M., Grieve R.A.F., Kelley S.P., O'Neill C., Vidmachenko A.P. і багатьох інших.

Наукова новизна і практичне значення. Відкриття факту астероїдного бомбардування нашої планети докорінно змінило стабільну систему поглядів на взаємодію Землі з навколишнім космічним простором і продемонструвало, що історія нашої планети напряму пов'язана, хіба що крім Сонця, з іншими як великими, так і малими об'єктами Сонячної системи. Відкриття з часом дало і свідчення того, що падіння великого астероїда може докорінно змінити і хід еволюції органічного світу, як це відбулося на межі мезозою і кайнозою, коли внаслідок падіння одного великого чи навіть декількох гігантських тіл відбулося масове вимирання цілих груп живих організмів, і яке повністю переформатувало видовий склад біоти у планетарному масштабі. Ударне кратероформування є головною причиною речовинного обміну між планетами у Сонячній системі. Завдяки ударно-вибуховим подіям шматки гірських порід викидаються з кратерів із високими швидкостями і отримують змогу назавжди покинути материнську планету. Дійсно, порівняно недавно в метеоритних колекціях було доведено присутність речовини з Місяця і Марса, яка була вибита з поверхні цих планет потужними ударами великих метеоритів або астероїдів. Що стосується практичного значення вивчення ударних кратерів, то насправді, вона не така вже й велика, і, звичайно, істотно поступається значенню вивчення інтрузивних порід з багатими на рудні корисні копалини покладами, нафтових шарів, алмазонасних вибухових трубок тощо. Однак

річний продукт від різносторонньої експлуатації метеоритних кратерів оцінюється в 5 млрд долларів. Основна продукція це будівельні матеріали, залізо-нікель-мідно-цинкові, залізні та уранові руди. Метеоритні кратери дуже часто є резервуарами високоякісної прісної води. Також вони використовуються як привабливі об'єкти туризму, кращим прикладам чого є Арізонський кратер в США і кратер Рис на території Німеччині.

Структура й обсяг роботи. Бакалаврська робота складається із Вступу, чотирьох розділів, Висновків, Додатків, Переліку використаних джерел (96 найменувань). Загальний обсяг роботи становить 93 сторінки, у т. ч. 80 сторінок основного тексту. Бакалаврська містить 4 таблиці і 26 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ГОЛОВНІ ПІДХОДИ У ВИВЧЕННІ ІМПАКТНИХ СТРУКТУР ЗЕМЛІ

1.1. Діагностика імпактних структур Землі та їхня будова

Для достовірного розпізнавання ударної структури чи не найважливішими є літологічні і петрографічні ознаки ударних перетворень гірських порід мішені, які разом складають окрему, специфічну групу порід до яких входять імпактити й імпактні брекчії, завдяки яким і вдається вирізнити імпактні структури серед інших геологічних і геоморфологічних об'єктів різного генезису (Вальтер, Гуров 1979; Райхлин, Селивановская 1979; Садовский 1983). Іноді в імпактних гірських породах завдяки низці геохімічних методів може бути встановлена певна частина розпорошеного залишку речовини ударника (Koeberl, 1998), однак для досягнення достовірності вони повинні бути спеціально зіставленими зі складом абсолютної більшості оточуючих гірських порід, оскільки під час визначення співвідношень окремих з них вдається виявити маркерні елементи (сидерофіли і платиноїди). Макроскопічно вдається встановити й ознаки безпосередніх ударних перетворень завдяки виявленню специфічної системи тріщинуватості гірських порід в місці передбачуваного місцезнаходження кільцевої структури, навіть якщо остання не проявляється в рельєфі. Додатковими маркерами також є виявлення так званих конусів руйнування, які можуть спостерігатися в товщах різних гірських порід (Baratoux, Reimold 2016). Проте найбільш поширеними ознаками ударного метаморфізму в гірських породах є окремі мінерали, що беруть участь у їхньому формуванні і які спостерігаються під мікроскопом (French, Koeberl, 2010). До таких належать ті, які вказують на присутність фаз високого тиску (коесит, стишовіт, алмаз), а також діаплектового скла в кварцитах, польових шпатах тощо. Подібними ознаками є і мономінеральне і полімінеральне високотемпературне скло. Однак найлегше діагностуються мікроскопічні ударні деформації в деяких породоутворюючих мінералах, зокрема в кварці. Це своєрідні деформаційні елементи у вигляді тонких

паралельних тріщин із чіткою і закономірною оптичною орієнтацією, що дозволяє достатньо точно оцінити величину ударного навантаження, якого зазнали гірські породи мішені. Інші геологічні, геоморфологічні і геофізичні особливості ударних структур, як і літологія гірських порід, беруться до уваги лише тоді, коли вже чітко визначені основні петрографічні або мінералогічні ознаки більшості наявних ударних перетворень гірських порід. Достатньо складна і неоднозначна діагностика докембрійських імпактних структур в областях розвитку регіонально метаморфізованих гірських порід, що загалом не є дивним ([Выявление докембрійских импактных структур и методы исследования... 1998](#)). Якщо не розглядати ознаки ударного метаморфізму, то деякі грубоуламкові і вулканічні утворення (наприклад, тектоніти, олістостроми, тіліти, відклади грязьових потоків, різноманітні пірокластичні формації тощо) можуть бути з великою ймовірністю інтерпретовані як окремі види коптогенних гірських порід.

Процес утворення імпактного кратера зазвичай розглядають як послідовність кількох етапів, які швидко змінюють один одного. Перший етап охоплює проникнення ударного тіла у верхні шари гірських порід – так звану породу-мішеню – та їхнє інтенсивне стискання. Другий етап включає екскавацію та безпосереднє формування кратерної чаші, супроводжуване викидом уламків, розплавлених і випарованих матеріалів породи-мішені. На третьому етапі відбувається модифікація кратера через зворотні рухи днища та бортів, що супроводжується поступовим заповненням кратера раніше викинутими уламками ([Мелюш, 1994](#)). Іноді останній етап ще розглядають як стадію ранньої модифікації молодшої імпактної структури, а вже до пізньої включають усі наступні процеси переміщення блоків, які, переважно, пов'язані з набуттям рівноваги в насипному матеріалі, а також перевідкладанні гірських порід мілководних морів і шельфів материків ресургентною хвилею, якщо кратер формується на мілководді. Речовина ударника зазвичай повністю випаровується і в розпиленому вигляді частково входить до складу імпактитів.

Утворення ударних кратерів діаметром понад сто метрів обумовлено переходом енергії космічного тіла, що летить зі швидкістю 15–20 км/с, у

теплову і, відповідно, яка призводить до потужного теплового вибуху. При падінні більших мас досягається тиск у декілька десятків гігапаскалів, залишкова температура поза фронтом ударної хвилі досягає кількох тисяч градусів за Цельсієм. Отже, імпульс стиснення, подальше розрідження, нагрів, диференціальний рух речовини є основними факторами різноманітних перетворень гірських порід (Геология астроблем, 1980; Мелош 1994; Садовский 1983), властивих виключно ударному кратероформуванню. Усі згадані параметри радикально відрізняють цей катастрофічний процес від усіх інших як в земній корі, так і на її поверхні.

У межах імпактної структури розрізняють так званий істинний кратер, або кратерну лійку, утворену в гірських породах цоколя і заповнену модифікованим матеріалом мішені і продуктами вибуху, і видимого кратера – округлої депресії у рельєфі, днище і борти якої утворені виверженим матеріалом, і де на схилах окрім того, досить часто на денну поверхню проступають деформовані гірські породи цоколя. Отже у цоколі кратера, або істинному кратері залягають імпакти і брекчії, а у видимій кільцевій структурі товщі відкладів, які утворюють різноманітні морфологічні і структурні елементи денної поверхні в межах структури. Імпактні структури поділяють на прості з чашоподібним профілем діаметром від 2 до 3 км і складні з центральним підняттям (у науковій літературі часто трапляється термін центральна гірка), діаметр яких досягає десятків і сотень кілометрів. Ударні структури порівняно часто можуть бути видозмінені тектонічними рухами і проявами регіонального метаморфізму, що загалом значно ускладнює їхню ідентифікацію і діагностику, навіть із використанням геологічного картування. У геологічній будові древніх, зокрема докембрійських, імпактних структур, які до того ж особливо великі, можуть бути виділені своєрідні структурно-літологічні комплекси, підрозділи і номенклатура яких засновані на їхньому зіставленні із зіткненням космічного тіла (Геология астроблем 1980). Згадані комплекси характеризуються автономною внутрішньою будовою, у складі якої зазвичай переважають різновікові і добре диференційовані за складом і генезисом гірські породи. Як вже згадувалося, у будові цокольного комплексу

ударної структури беруть участь різноманітні породи мішені, в яких і виник кратер. Зазвичай вони частково зруйновані та трансформовані (аутигенна літична імпактна брекчія), особливо характерна вона для центральних частин ударних кільцевих структур. Тут нерідко виникають й специфічні деформаційні структурні форми, які добре простежуються і по периферії кратера в оточуючих гірських породах. Більшість деформацій поступово слабшають у напрямках по радіусу і в глибину, що чітко доведено завдяки бурінню, наприклад, такі дані отримані з глибокої свердловини пробуреній в центральній частині Пучеж-Катунської імпактної структури (Масайтис, Певзнер 1999). Коптогенний комплекс представлений алогенною літичною імпактною брекчією і цілим комплексом імпактитів, де ці породи заповнюють западину кратера і поширюються у вигляді покривних викидів далеко за його межами. Внутрішня структура цього комплексу доволі часто набуває хаотичного характеру, проте, іноді може характеризуватися і так званою псевдостратифікацією. Так у верхній частині типового розрізу можна натрапити на неузгоджені уламкові гірські породи, які можуть бути сформованими і відкладеними ресургентною хвилею, і які перекривають товщі брекчій та імпактитів. Власне утворення коптогенного комплексу, навіть незважаючи на часом їхню значну потужність, виникають практично синхронно, тому до них не застосовуються типові принципи, які використовуються під час вивчення і картографування стратифікованих товщ гірських порід в межах кільцевих ударних утворень.

Різнманітні осадові гірські породи (гравеліти, пісковики, сланці та ін.), розповсюджені локально в межах похованих днищах старих кратерів, іноді вони відкладалися протягом тривалого часу після його безпосереднього утворення та залягають на брекчіях й імпактитах, і належать до так званого заповнюючого комплексу гірських порід. Заповнюючий комплекс – це регіонально поширені товщі гірських порід, зазвичай осадового генезису, які перекривають усі старіші породи і повністю приховують імпактну структуру на денній поверхні. Остання лише іноді ідентифікується у будові цих товщ порід, навіть у випадку їхньої значної потужності. Співвідношення згаданих вище комплексів можуть бути виявлені як за допомогою свердловин, так і прямими

геофізичними методами. Утворення перекриваючого, заповнюючого і цокольного (в частині, суттєво не порушеної ударними перетвореннями) зображуються на геологічних картах відповідно до способів, прийнятих для осадових, вивержених і метаморфічних гірських порід. Коптогенний ж комплекс, який іноді набуває надзвичайно складної будови, виділяється в якості зображуваної одиниці унікально й отримує власну назву.

1.2. Літологія імпактних структур Землі

Як вже частково згадувалося у попередньому параграфі, одним із найскладніших процесів під час вивчення ударних структур є картографування коптогенного комплексу, і хоча значної складності він набуває лише у межах порівняно великих структур, де розчленовування гірських порід потребує багаторівневого поділу на асоціативні групи і виділення чітких одиниць, які картографуються. Що ж стосується літології коптогенних порід і їх сукупностей, то вона визначається досить мінливими і порівняно незалежними групами чинників. Зовнішніми чинниками є швидкість і маса тіла, що впало на поверхню Землі (в меншій мірі до уваги беруться його склад і траєкторія входу в атмосферу), внутрішніми – склад, властивості, форма й умови залягання, розміри окремих товщ гірських порід мішені, їхня гідратація, а також. Не меншого значення має і палеогеографічна картина у місці ударної події. Важлива й початкова енергія ударника, яка визначає розмір імпактної структури, а також масштаби перетворень порід мішені і кількісні співвідношення гірських порід що випарувалися, розплавився і роздробилися, зокрема імпактитів і літичних брекчій. Вплив внутрішніх факторів поліваріантний, першорядного значення набувають взаємопов'язані склад і властивості гірських порід мішені, а також наявність водних мас, які також істотно впливають на характер й інтенсивність кратероформування, трансформацію нагрітої речовини гірських порід і на процеси подальшого розподілу й диференціації товщ брекчій й імпактитів. Однотипні гірські породи в межах ударних кратерів будь-якого діаметру, що сформувалися у відмінних

геологічних і палеогеографічних умовах, можуть істотно різнитися між собою за зовнішніми ознаками. Так, кількісні співвідношення імпактних гірських порід будь-яких типів також різнитимуться, тому розчленування і виділення одиниць, що картографуються у гірських породах коптогенного комплексу в кожному окремо взятому випадку представлятимуть особливе, нешаблонне завдання.

Слід зауважити, що сучасну класифікацію і номенклатуру видів імпактних брекчій й імпактитів не можна до кінця вважати повністю впорядкованою й узгодженою, особливо гостро ця проблема проявляється у міжнародному масштабі, як, для прикладу, це зроблено для більшості видів вивержених гірських порід ([Классификация магматических \(изверженных\) пород... 1997](#)). Для гірських порід ударних кратерів і можливих їхніх асоціацій було запропоновано велику кількість найрізноманітніших термінів, де автори різних країн незалежно один від одного вкладали у відповідні поняття конкретний зміст. Підрозділи більшості видів таких гірських порід базовано на конкретних ознаках – генезису, умовах залягання, гранулометрії уламків, петроструктурних особливостях тощо. Подібними недоліками характеризувалася і номенклатура одиниць, що картографуються. Низка таких невідповідностей збереглася і в рекомендаціях Підкомісії Міжнародного Союзу Геологічних Наук з систематики та номенклатури метаморфічних гірських порід ([Stöffler, Grieve 2007](#)). Наприклад, під терміном «Імпакт» пропонується розуміти взагалі всі породи, які зазнали ударних впливів, навіть слабо ударно-метаморфізованих пісковиків і сланців, які на макроскопічному рівні неможливо відрізнити від абсолютно незмінених. Гірські породи, що складаються переважно з застиглих і частково розкристалізованих продуктів плавлення, які утворюють своєрідну матрицю, названі «Імпактними расплавами гірських порід», що по суті є їхнім генетичним описом, а не терміном. Натомість у тих випадках, коли ці ж продукти плавлення проявляються у вигляді частинок й уламків й іноді навіть кількісно переважають в складі цих гірських порід, їх чомусь відносять вже не до «Імпактних расплавів гірських порід», а до поліміктових брекчій, які називаються «зювіти», а вони, як і прийнято в петрографії, отримують власної

назви. При загальній класифікації імпактних гірських порід будь-які кількісні співвідношення у межах їхніх різних мінеральних утворень (уламків окремих мінералів, гірських порід, скла, цементуючої маси тощо) в рекомендаціях згаданої вище Підкомісії взагалі не враховуються.

Перші геологічні карти імпактних структур були створені на територіях Рису, Сьєрра-Мадре, Манікуаган та інших регіонів. Більшість із цих карт виконані у середньому та великому масштабах і вперше опубліковані наприкінці 1960-х – на початку 1970-х років. Цікаво, що в той час природа більшості цих структур не завжди визнавалася або враховувалася повною мірою. На картах переважно відзначалися лише літичні алогенні брекчії та продукти застигання імпактного розплаву, а іноді й деякі їхні різновиди. У 1980 році вийшла перша детальна карта стародавнього Попігайського кратера з масштабом 1:200 000 (рис. 1.1.) (Геологическая карта Попигайского метеоритного кратера 1980). Карта цієї кільцевої структури складена завдяки спеціалізованому картуванню, під час якого були виділені різні за складом підрозділи коптогенного комплексу та їхні головні різновиди.

Виявлення та картування імпактних структур, яке розпочалося ще в 70-80-х роках минулого століття (Попігайської, Карської, Пучеж-Катунської й інших структур), потребували вже тоді розробки детальних схем розчленування і номенклатури імпактних утворень, які до того ж виявляли наростаючою швидкістю (Масайтис 1979; Райхлин, Селивановская 1979; Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов 1983). Ці схеми, звичайно, враховували петрографічну практику вивчення вивержених і метаморфічних гірських порід, особливо це стосується продуктів плавлення і кристалізації імпактних розплавів. Наразі такі схеми всебічно апробовано під час геологічного вивчення і картування низки імпактних структур на території Північної Азії (Петрографический кодекс... 2009). За основу класифікації у виділенні елементів, що картуються, як і для більшості типів гірських порід, використовуються загальноприйняті літолого-петрографічні ознаки. Схема класифікації головних видів коптогенних порід наведена в табл. 1. Ударно-метаморфізовані породи зазвичай зберігають вигляд вихідних, в той час як

ударно-метаморфічні повністю втрачають структуру гірських порід, завдяки яким вони й утворилися. До імпактитів належать лише гірські породи, які містять понад 10% продуктів ударного плавлення, що загалом узгоджується із початковим розумінням змісту цього терміна. У схему внесені лише гірські породи, що складають одиниці, які безпосередньо картуються. Що стосується окремих рідкісних видів гірських порід, які час від часу поширюються серед імпактитів й імпактних брекчій, не достатньо виразні. Різновиди коптогенних гірських порід можуть виділятися посередництвом особливостей складу, специфіки текстури і структури. До таких співвідношень можуть належати, наприклад, розміри певно частини різноманітних гірських порід і скла, ступінь розкристалізації окремих мінералів, їх текстура і структура, хімічний склад, наявність специфічних включень, бомб, імпактного скла тощо. Окремі групи коптогенних гірських порід, а також їхні різновиди, можуть залягати у вигляді лінз, шарів, дайок тощо, проте форма цих залягань ніколи не виступає критерієм подібної класифікації.

Таблиця 1

Основні групи та види коптогенних порід

Ударно-метаморфізовані породи (не переміщені або аутигенні)		Ударно-метаморфічні породи (переміщені або алогенні)		
Породи слабо, помірно та інтенсивно ударно-метаморфізовані	Ліричні брекчії (переважно мономіктові)	Ліричні брекчії (переважно поліміктові, вміщують 0-10% імпактного скла)	Імпактити (містять більше 10% імпактного скла)	
Різнорізнотні осадові, вивержені та метаморфічні породи, у тому числі брекчійовані	Мезо- та мегабрекчії	Мікро-, мезо- та мегабрекчії	Зювіти (містять імпактне скло у вигляді часток та уламків)	Тагаміти (імпактне скло або продукти його кристалізації утворюють матрицю)
Поділяються у відповідності до складу вихідних порід		Поділяються за складом уламків та наявністю домішок скла	Поділяються за вмістом та гранулометрії різноманітних кластів, за агрегатним станом матриці та її хімічним складом	

Імпактні літичні брекчії зазвичай прийнято поділяти на так звані непереміщені (аутигенні) і переміщені (алогенні) і які зображуються на геологічних картах окремими групами. Перші, здебільшого, мономіктові і залягають в складі товщ гірських порід цокольного комплексу, володіючи при

цьому поступовими переходами до слабо ударно-метаморфізованих і практично незміненим гірським породам мішені, інші, переважно поліміктові і містять частину домішок тонкодисперсного цементу, добре представлені у складі коптогенного комплексу і залягають у вигляді суцільних покривних товщ і лінз неправильної форми.

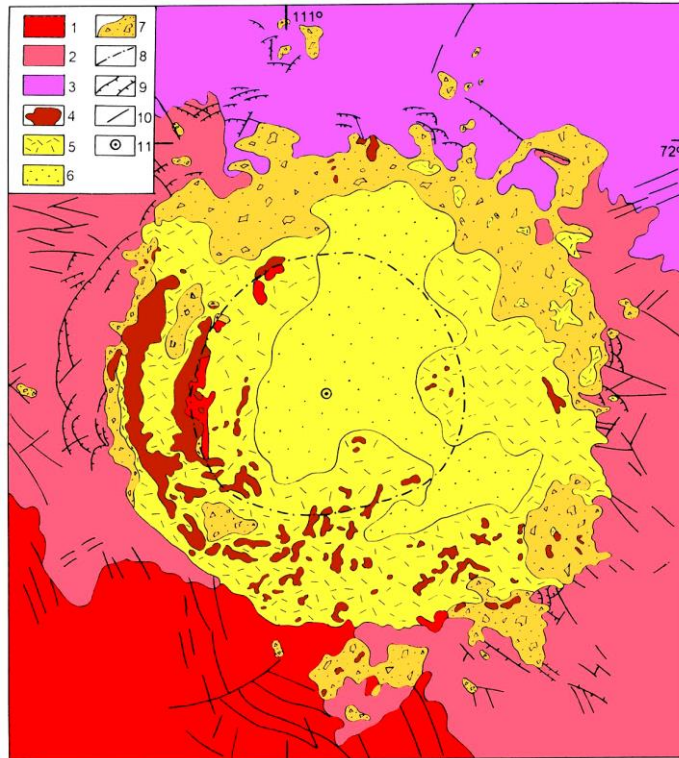


Рис. 1.1. Попігайська імпактна структура

Умовні позначення: 1 – кристалічні породи верхньоанабарської і хапчанської серій архею; 2 – осадові породи верхнього протерозою і нижнього палеозою; 3 – осадові і вулканогенно-осадові породи верхнього палеозою і мезозою; 4 – тагаміти; 5 – зювіти; 6 – псамміто-алевритові брекчії; 7 – алогенні брекчії; 8 – гребінь кільцевого підняття; 9 – насуви і скиди; 10 – розривні порушення невстановленої морфології; 11 – центр кратера

Важливо згадати і про матеріал викидів на найдальших периферіях тих чи імпактних структур, які можуть залягати у вигляді доволі тонких прошарків на порівняно великих відстанях від безпосередньої точки удару. Їхня приналежність до дистальних відкладів імпактних кратерів підтверджується завдяки наявності частинок і сферул імпактного скла з чіткими ознаками ударних деформацій або, іноді, на підставі певних геохімічних ознак, при умові, що саме ці методи, в конкретному випадку, виявляться найбільш

ефективними. Незважаючи на незначну потужність, такі прошарки мають надзвичайно важливе стратиграфічне значення маркерів імпактних подій. Час формування імпактної структури і гірських порід коптогенного комплексу зазвичай визначається комплексом геологічних методів, однак найчастіше все ж застосовуються різноманітні ізотопно-геохімічні методи по відношенню до деяких мінералів і скла.

Розчленування гірських порід коптогенного комплексу і виділення одиниць, що картографуються вимагають зваженого прийняття до уваги їх як загальних, так і прихованих особливостей, обумовлених генезисом й індивідуальними рисами тієї чи іншої імпактної структури, про що вже частково згадувалося вище. Загалом, така короткочасність процесу кратероформування характерна і для чіткої синхронності різних фаціальних умов під час формування матеріалу вихідних гірських порід, їхнього переміщення і відкладення. Звідси добре простежуються і прояви псевдостратифікації, неомогенності окремих імпактних тіл, складених різноманітними видами гірських порід, а також їхніми взаємними переходами, включенням одних в інші, наявністю у верхній частині загального розрізу коптогенних утворень з не до кінця з'ясованою шаруватістю, можливими поступовими переходами до верхніх відкладів ресургентної хвилі і до порід, які заповнюють комплекс загалом. До імпактних брекчій та імпактитів, що залягають у центральній частині кільцевих структур, неможливо застосовувати принцип суперпозиції під час оцінки співвідношень різних гірських порід, які, як правило, не є стратифікованими утвореннями (Масайтис 1979). Під час їхнього картографування використовуються підходи, аналогічні до тих, які застосовуються і для тіл плутонічних і гіпабісальних вивержених гірських порід, які по своїй суті є літодемами (King, Petruny 2003).

1.3. Способи картографування імпактних структур Землі

З попередніх параграфів стає зрозуміло, що картографування ударних кільцевих структур як конкретних об'єктів, хоч часто і прихованих і, які

характеризуються морфологічним, структурним і речовинним вираженням, можуть здійснюватися завдяки їхній точній діагностиці посередництвом визначення складу і умов залягання формацій наявного коптогенного комплексу. Кожна така структура повинна однозначно ідентифікуватися із застосуванням низки спеціальних методів геолого-геоморфологічного межування, які зазвичай базуються на відображенні змін геофізичних полів (магнітного, гравітаційного тощо). Під час визначення специфіки положення і меж ударної структури повсюдно використовуються і дистанційні методи. До них належать аналіз аерофотоматеріалів, зображень висотних зйомок, космічної зйомки, проаналізованих результатів гравітаційних і магнітних спостережень, сейсморозвідувальних й електророзвідувальних робіт, свердловинного каротажу тощо. Тут важливо розрізняти однозначно інтерпретовані морфологічні та структурні елементи, які не трансформувалися і не модифікувалися завдяки ерозії, а можуть бути легко реконструйованими і, які можуть бути відновлені під час тривимірного моделювання за низкою непрямих ознак. На геологічних картах різних масштабів імпактні структури відображаються по-різному залежно від їхнього розміру. В окремих випадках вони можуть бути позначені умовними символами, представлені суцільним забарвленням без деталізації коптогенного комплексу, або ж відображені з докладним виділенням окремих структурних елементів ударної структури (табл. 2). Поховані імпактні формації усіх діаметрів позначаються умовним знаком або зовнішньою межею структури, встановленої провідним методом.

Таблиця 2

Зображення імпактних структур на геологічних картах

Діаметр імпактної структури, км	На картах масштабу 1:200 000	На картах масштабу 1:1 000 000
1-3 та менше	Умовний знак або коптогенний комплекс нерозчленований	Умовний знак
3-10	Коптогенний комплекс нерозчленований або його підрозділи	Умовний знак або коптогенний комплекс нерозчленований
Більше 10	Підрозділи коптогенного комплексу	Коптогенний комплекс нерозчленований або його підрозділи

Імпактні структури, які зазнали інтенсивного ерозійного руйнування дають змогу вивчати і демонструвати на картах і будову деформованих гірських порід цокольного комплексу, наявні складки, розломи, вторгнення жил брекчій й імпактитів, а також безліч інших елементів. При цьому необхідно звертати увагу на загальний характер й орієнтацію деформацій, наприклад доцентрову в центральній частині ударної структури і відцентрову по всій периферії окружності зсуву гірських порід цоколя.

Імпактити й алогенні літичні брекчії найчастіше поділяються на одиниці, що картографуються по літологічним і петрографічним ознакам, а також за палеогеографічною будовою, яка відображає динаміку формування даного підрозділу гірських порід. Асоціації гірських порід близьких за мінералогічним складом виділяються в якості товщ, які у свою чергу складаються з конкретних геологічних тіл, складених якимось переважаючим видом гірських порід. Згадані товщі отримують назви відповідно до складу такої породи. В окремих тілах (пластах, лінзах тощо) завдяки застосуванню точкових знаків можуть бути показані особливості їх складу і будови. Час утворення ударної структури і гірських порід коптогенного комплексу встановлюється посередництвом геологічних методів, але дещо частіше різними специфічними ізотопно-геохімічними методами застосованими до деяких мінералів і скла.

На геологічних картах ударних кільцевих структур і в блоках легенд гірські породи коптогенного комплексу зафарбовуються відповідно до часу імпактної події зі збереженням загальноприйнятої геохронологічної кольорової шкали. З огляду на те, що формування імпактної структури, особливо в геологічному розумінні – миттєве, зафарбування полів викидів і розвитку окремих товщ гірських порід може здійснюватися з деякими варіаціями, так: безпосередні імпактити – густішим відтінком, переміщені брекчії – дещо блідим, точкові знаки, що наносяться блакитним кольором, використовуються для позначення відмінностей в літології брекчій й імпактитів і специфічних включень тощо.

Трапляються такі випадки, коли вдається встановити деякі інші структурні особливості, тоді на геологічних картах зображуються різновікові

розломи, наприклад такі, що виникли в цоколі до імпактної події; такі, що сформувалися одночасно з утворенням імпактної морфоструктури в стадії компресії, ексавації і ранньої модифікації; такі, що виникли під час фази пізнішої модифікації; ті, що пов'язані з подальшим геологічним розвитком. Розломи більшості цих груп характеризуються різним ступенем морфокінематики і на картах позначаються системами кольорових ліній. Розломи в гірських породах цоколя зазвичай набувають радіально-концентричного плану і для них характерне занурення на глибину, обмежуючи товщі гірських порід на полігональні блоки.

Глибинна будова ударних кільцевих структур демонструється на різних геологічних картах, схемах і розрізах, які будуються опираючись на конкретні спостереження і обов'язково враховують загальноприйняті моделі кратероформування. Так, наприклад, такими є геологічні карти зі знятим осадовим комплексом, зі знятим заповнюючим комплексом, зі знятим коптогенним комплексом і, які частково демонструють геологічну ситуацію, яка існувала ще до удару, і будову концентричних зон деформацій в цоколі. Часто будуються найрізноманітніші петрографічні і літологічні геологічні карти окремих комплексів, або товщ гірських порід окремих тіл. Можлива побудова численних структурних карт і схем, наприклад, гіпсометричної поверхні істинного днища (або, як ще можна віднайти в науковій літературі, підосви коптогенного комплексу), гіпсометричної поверхні первинного видимого днища (або, за іншою версією, покрівлі коптогенного комплексу), гіпсометричної поверхні підосви і покрівлі імпактитів або окремих великих геологічних тіл сформованих цими гірськими породами, ізопахіт окремих комплексів, що входять до складу їхнього основного тіла. Іноді складають структурні карти і схеми трансформованого і модифікованого цоколя завдяки конкретного маркуючого горизонту, схеми орієнтування конусів і векторів руйнування, зональності ударного метаморфізму тощо. Під час створення схем розрізів не рекомендується допускати перевищення в 2–3 рази вертикального масштабу над горизонтальним, оскільки це призводить до значних спотворень глибинної будови.

1.4. Корисні копалини в імпактних структурах Землі

Наразі вдається доволі легко встановлювати в імпактних структурах всього світу специфічні місця мінералізації, проявів і родовищ різноманітних рудних і нерудних мінеральних сировин, горючих корисних копалин, цінних джерел підземних вод. Дуже часто подібні родовища раніше вже тривалий час експлуатувалися, але лише порівняно недавно було достовірно встановлено, що такі геологічні структури мають імпактне походження (Grieve, Masaitis 1994; Masaitis 1989). Мінералогічне навантаження ударних кільцевих структур надзвичайно різноманітне і залежить як від масштабів окремої ударної події, геологічної і палеогеографічної картини, в якій вона відбувалося, так і від подальшого геологічного розвитку й історії формування топографії регіону. Сукупність усіх цих особливостей в тій чи іншій мірі відіграють роль рудогенних чинників. На картах і схемах корисних копалин і закономірностей їх поширення відповідними умовними знаками зображуються конкретні рудні об'єкти ударних структур, а також більшість інших елементів мінералогічного навантаження.

У табл. 3 зібрані види корисних копалин, встановлених і притаманних більшості імпактних структур світу. Звичайно, не має викликати сумнівів, що різноманіття видів мінеральної сировини цих структур може бути значно вищим. Корисні копалини, що поширені в імпактних структурах, поділяються на кілька груп виходячи зі співвідношення часу їх формування з ударним подією – це про-, син- й епігенетичні групи. До прогенетичних належать ті, які існували в товщах гірських порід місця удару і поклади яких або окремих їхніх частин були деформовані або переміщені під час екскавційної стадії або пізнішої модифікації кратера. До таких належить низка покладів імпактних структур: залізо, уран, золото й інші. Сингенетичні корисні копалини виникають безпосередньо під час кратероформування як його безпосередній наслідок. До них належать імпактні алмази, мідно-нікелеві руди з металами платинової групи, імпактне скло, що представляє значний інтерес як матеріал для ювелірних виробів. Епігенетичними є скупчення мінеральної сировини, що формувалася одразу по завершенню кратероформування або через якийсь час в

умовах переміщення флюїдних фаз в пористих товщах, наприклад при розмиванні імпаکتитів, під час подальшому осадонакопичення тощо. В числі епігенетичних видів корисних копалин перебувають і гідротермальні руди кольорових металів (свинець, цинк та ін.), урану, колчедан, агат, цеоліти, розсипи алмазів, бурштин, евапорити, горючі сланці, лігніти, діатоміти, фосфорити, а також нафта, природний газ, прісні та мінералізовані води. Крім того, гірські породи різних комплексів імпактних структур дуже часто використовуються як будівельні матеріали.

Види корисних копалин імпактних структур

Генетичні групи	Основні мінералогенічні процеси	Види корисних копалин	Локалізація покладів
Протогенетична	Брекчіювання та переміщення вихідних порід	Кремнезем Залізо, уран, золото	Цокольний та коптогенний комплекси
Сингенетична	Фазові переходи вихідної вуглецевої речовини Плавлення вихідних сульфідних залежів	Імпактні алмази Мідь, нікель, платиноїди, скло	Коптогенний комплекс, тіла імпаکتитів у цокольному комплексі
Епігенетична	Гідротермальні перетворення брекчій та імпаکتитів Розмив імпаکتитів та перевідкладення матеріалу Хімічна та біохімічна седиментація у кратерних озерах Підземна фільтрація у сприятливій пастки	Свинець, цинк, уран, цеоліти, агат Розсипи імпактних алмазів Цеоліти, бентоніти, евапорити, горючі сланці, діатоміти, лігніти, бурштин, фосфорити Нафта, газ, прісні та мінералізовані води	Заповнений комплекс, частково коптогенний та цокольний комплекси

Різні види мінеральної сировини, яка трапляється в ударних структурах, зазвичай локалізуються в гірських породах цокольного, коптогенного і заповнюючого структурно-літологічних комплексів. У гірських породах першого з них формуються такі корисні копалини, які спершу були притаманні гірським породам, в яких утворився сам кратер і які були трансформовані одночасно із конкретними покладами (тверді копалини) або ж пройшли через фільтрацію в щойно створеній структурній неоднорідності (рідини і газу), а також зазнали садження з розчинів (гідротермальні новоутворення). У гірських

породах коптогенного комплексу знаходяться ті види мінеральної сировини, які виникли безпосередньо при фазових перетвореннях вихідних гірських порід і мінералів або під час еволюції імпактного розплаву, а також при подальшій циркуляції чи фільтрації динамічних фаз. Наприклад, брекчії, що мають підвищену пористість, іноді є вмістилищем газоподібних і рідких вуглеводнів, що мігрують з оточуючих кратер нафтовмістих товщ гірських порід.

У брекчіях можуть також бути присутніми фрагменти і переміщені маси рудних формацій, що спершу належали до гірських порід цоколя. У товщах заповнюючого комплексу концентруються родовища і їхні прояви, що виникли завдяки перемиванню і перевідкладенню гірських порід цокольного і коптогенного комплексів, а також сингенетичним озерним або морським осадам каустобіоліти, евапорити тощо. Іноді ці осади можуть бути і нафтоматеринськими. Відомі приклади унікальних за масштабами родовищ корисних копалин, пов'язаних з імпактними структурами. Серед них найяскравішими є, наприклад, мідь і нікель імпактної структури Садбері в Канаді, увібрані поклади Мексиканської затоки, локалізовані у викидах брекчій з кратера Чиксулуб, родовища імпактних алмазів в імпактитах Попігайського кратера тощо ([Масайтис 2008](#); [Масайтис и др. 2013](#)).

Закономірності локалізації того чи іншого виду мінеральної сировини можуть значно відрізнятися, хоча їхня загальна приуроченість до гірських порід різних комплексів надзвичайно однозначна. Наприклад, сингенетичні корисні копалини найчастіше концентруються безпосередньо в імпактитах, а локалізація епігенетичних контролюються морфологічними, структурними і літологічними неоднорідностями гірських порід, які заповнюють коптогенний і цокольний комплекси. Якщо ж закономірності локалізації того чи іншого виду сировини достовірно встановлені, то вони можуть бути легко відображені на прогнозно-мінералогічній схемі малого масштабу.

РОЗДІЛ 2

ГЕОГРАФІЯ НАЙБІЛЬШ ВІДОМИХ І НАЙБІЛЬШИХ ІМПАКТНИХ СТРУКТУР ЗЕМЛІ

2.1. Найбільші імпактні структури Землі

Кратер Садбері (Sudbury Basin)

На території Канади, в штаті Онтаріо розташований один із найбільших ударних кратерів нашої планети – Садбері (рис. 2.1). Його діаметр сягає майже 250 км, саме тому ми маємо змогу в повній мірі оцінити масштаби цієї кільцевої структури, навіть тоді, коли просто розглядаємо знімки території, виконані за допомогою супутника (Walton et al. 2016). Кільцева структура має еліптичну форму, одну з її частин займає прісноводне озеро, діаметр якого не перевищує 8 км. Масштаби ж самого метеоритного кратера просто вражають, його довжина становить близько 65 км, а ширина до 25 км. Глибина проникнення ударного фронту приголомшливий і сягає глибини майже 14 км.

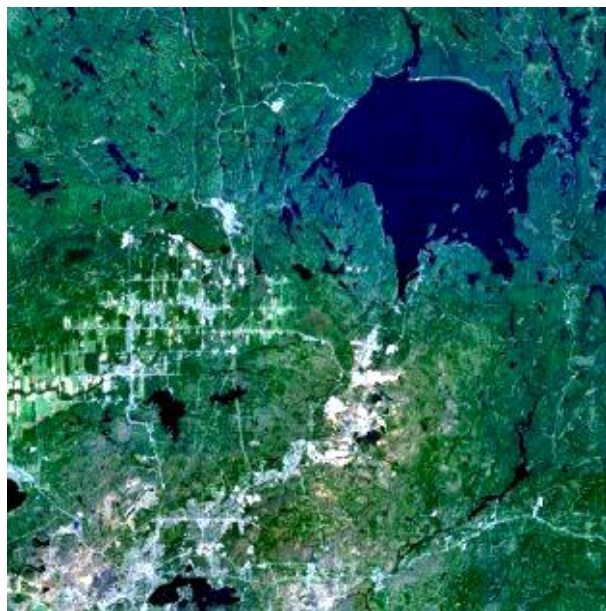


Рис. 2.1. Кратер Садбері (Sudbury Basin)

Вік кратера оцінюється в 1,85 мільярда років, причиною його формування стало зіткнення Землі з великою кометою чи астероїдом, діаметр яких міг

перевищувати 10 км. До 70-х років минулого століття ударна теорія походження кратера не викликала жодних сумнівів (Suorineni 2020). Однак, кілька десятиліть тому одній групі дослідників вдалося виявити, що в момент цієї катастрофи нинішня область навколо кратера Садбері була вулканічно-активною. Схожість метеоритних кратерів із вулканічними утвореннями завжди ускладнювало процес їхньої ідентифікації.



Рис. 2.2. Кратер Тенумер (Tenumer)

Одночасно, у більшості дослідників, які вивчають кільцеві ударні структури метеоритне походження кратера Садбері не викликає жодних сумнівів. Наразі ця область наукових пошуків представляє значний інтерес не лише з дослідницької, а й з промислової точки зору, оскільки по всій периферії імпактної структури були виявлені багаті родовища нікелю і міді. Це призвело до того, що рівень видобутку нікелю в межах Садбері становить майже 10% від загальносвітового. У безпосередній близькості від кратера на протязі останніх сто років відкрилася низка гірничодобувних підприємств, а в промисловому районі постійно проживає понад 160 000 чоловік.

Кратер Тенумер (Tenumer)

Структура розташована на території Мавританії в пустелі Сахара (рис. 2.2.). Його унікальна особливість полягає в тому, що він являє собою

майже ідеальне коло з поперечником 1.9 кілометрів і висотою валу до 100 метрів (Jaret, et al. 2009). І хоча деякі вчені досі сперечаються про умови походження кратера, абсолютна більшість геологічних даних свідчать, що Тенумер утворився від удару великого метеорита об земну поверхню. Вік кільцевої структури, за різними даними, оцінюється від 10000 до 30000 років, а вік гнейсів і гранітів оточуючої території, звичайно, незрівнянно більший (Schultze, et al. 2016).

Кратер Вулф Крік (Wolfe Creek)

Структура розміщена в Західній Австралії, на території Великої Піщаної пустелі (рис. 2.3). Сформувався приблизно 300 000 років тому внаслідок падіння метеорита вагою майже 5000 тонн (Guppy, Matheson 1950). Його діаметр не перевищує 880 метрів у найширшому місці, а глибина чаші сягає 60 метрів (O'Neill, Heine 2005).



Рис. 2.3. Кратер Вулф Крік (Wolfe Creek)

Кратер виявлений лише в 1947 році під час проведення аерофотозйомки Землі. У аборигенів, які живуть неподалік, вдалося дізнатися, що їм давно відомо про його існування (Staffieri, et al. 2019). Вони вважають це місце священним. У них навіть є легенда про його появу. Згідно неї, з кратера вийшла змія, яка є однією з покровительок світу.

Попігайський кратер (Popigai crater)

Один із найбільших кратерів на Землі знаходиться на території Росії в межах Таймирського автономного округу. Діаметр кратера Попігай сягає близько 100 км (рис. 2.4). Ця імпактна структура добре відома, оскільки вважається однією з найбільших в світі алмазних родовищ (Yelisseyev, et al. 2016). Сформувався кратер ще в епоху еоцену, і його вік оцінюється в 35 мільйонів років тому, а відкритий він був порівняно недавно – в 1946 році. Гіпотеза про те, що ця кільцева структура сформувалася завдяки удару великого метеорита, була висунута дещо пізніше – лише в 1970 році.



Рис. 2.4. Попігайський кратер (Popigai crater)

Ретельні дослідження в межах кратерної улоговини дозволили виявити специфічні відклади гірських порід, які сформувалися безпосередньо під час ударної події. Свою назву кратер отримав на честь протікаючої по його території річки Попігай. Наразі він вважається четвертим за величиною метеоритним кратером на нашій планеті (Yelisseyev, et al. 2018). Цікавим є й те, що відомості про наявність у районі кратера кількох найбільших родовищ алмазів, були оприлюднені порівняно недавно, лише у 2012 році, а до того часу вся інформація про родовища була засекречена, а їх вивчення і видобуток довелося відкласти на десятки років через те, що більша частина промислових

потужностей використовувалася на будівництво підприємств по виробництву синтетичних алмазів.

Та тепер дослідникам вдалося максимально точно і доволі детально описати процес формування самої структури ударного кратера. Отже, сформувався він завдяки падінню метеорита, діаметр якого міг перевищувати 8 км. Такий великий удар призвів до потужного вибуху, температура в епіцентрі якого очевидно перевищувала 2 000 градусів за Цельсієм. Під впливом високих температур розплавилася понад 1 700 кубометрів гірських порід, відбувся неймовірних масштабів викид у повітря мас пилу і газів. Після катастрофи атмосфера і стратосфера на всій Землі перебували в настільки великому забрудненні, що сонячні промені не могли проникати на земну поверхню, катастрофа очевидно стала точкою відліку початку льодовикового періоду.

Кратер Вредефорт (Vredefort Crater)

В Південноафриканській республіці знаходиться найбільший ударний кратер на Землі. Кратер Вредефорт є пам'яткою світового значення, яка у 2005 році була включена до об'єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО (рис. 2.5). Діаметр кільцевої структури сягає 380 км. Наразі в його межах розташоване однойменне місто (Kovaleva, et al. 2019). Сформувався кратер завдяки зіткненню із Землею великого астероїда, діаметр якого, за середніми оцінками вчених, перевищував 10 км.

Катастрофа, пов'язана з утворенням цієї кільцевої ударної структури була найбільшою за останні кілька мільярдів років. Відбулася вона, за осередненими оцінками, близько двох мільярдів років тому, наразі ми можемо лише припускати, наскільки руйнівними були наслідки цієї катастрофічної події (Fourie, et al. 2019). У даний час кратер Вредефорт привертає увагу не лише вчених найрізноманітніших природничих галузей і дослідників, а й численних туристів, які прагнуть прогулятися по унікальній території. Цілком природно, що оцінити масштаби кратера завдяки безпосередньому спостереженню практично неможливо, оскільки він надзвичайно великий.

Лише з допомогою знімків отриманих зі супутника вдається в повній мірі оцінити його масштаби, а бажаючи прогулятися його просторами пішки

вдасися тільки задовольнятися своєрідними пейзажами унікальної місцевості. Головною визначною пам'яткою гігантської імпактної структури є містечко Вредефорт, яке було засноване наприкінці 19 століття. Раніше на його місці розташовувалися декілька фермерських поселень, які з часом місцевими жителями було об'єднано в одне місто. Одним з найяскравіших і трагічних подій в історії Вредефорта був період Другої англо-бурської війни, коли на території міста розміщувався великий концентраційний табір. Тепер у мальовничому містечку проживає понад 3 000 мешканців, воно надзвичайно красиве і приваблює своєю самотністю.



Рис. 2.5. Кратер Вредефорт (Vredefort Crater)

Кратер Манікуаган (Manicouagan Reservoir)

Канада надзвичайно багата унікальними метеоритними кратерами. На території Квебеку розташований відомий у всьому світі кратер Манікуаган (рис. 2.6). Його діаметр сягає 100 км, а сформувався він, звичайно, під час падіння й удару астероїда, діаметр якого за осередненими оцінками міг перевищувати 5 км (Thompson, Spray 2017). Падіння астероїда відбулося близько 200 мільйонів років тому, за однією з версій вчених, саме ця катастрофа, пов'язана з виникненням Манікуагана, могла призвести до великих вимирань тварин протягом тріасово-юрського періоду.

За багато мільйонів років агресивне середовище, яке силами ерозії надало зовсім інших форм кратеру, які змінили його першопочатковий вигляд до непізнаваності. Наразі його видимий діаметр дещо більший за 70 км. У мажів імпактіної структури сформувалося мальовниче озеро, яке є важливою світовою природною пам'яткою. Манікуаган є п'ятим за величиною кратером у світі. Незважаючи на значну ерозію в його центральній частині зберігся центральний пік, який називається гора Вавилон. Незвичайний кратер є, ймовірно, одним із небагатьох у світі, метеоритне походження якого ніколи не викликало жодних питань і сумнівів. Манікуаган володіє доволі специфічною формою, яка яскраво підтверджує версію його виникнення завдяки зіткненню із Землею масивного космічного тіла.



Рис. 2.6. Кратер Манікуаган (Manicouagan Reservoir)

З історією відкриття і дослідження кратера пов'язана велика кількість цікавих і захоплюючих фактів. Так, спеціалісти з Канади і Сполучених Штатів висунули версію, що удар, який призвів до формування імпактіної структури Манікуагана, міг бути лише одним з епізодів цілої великої серії ударних подій, завдяки яким більш дрібні кратери сформувалися на територіях сучасних Франції, України та США ([Eitel, et al. 2016](#)). У межах Манікуагана знаходиться знакове місце, цікава пам'ятка – місто-привид Ганьон. Це доволі велике

промислове містечко було засноване ще в середині 20 століття поруч з родовищами залізної руди, проте через нерентабельність гірничого виробництва й малі запаси руди швидко занепало.

Кратер Чиксулуб (Chicxulub crater)

На території Центральної Америки в Мексиці півострові на кінчику півострова Юкатан розташований знаменитий кратер Чиксулуб, який сформувався завдяки падінню величезного метеорита приблизно 65 мільйонів років тому (рис. 2.7). У порівнянні з більшістю інших найбільших імпактних структур Землі Чиксулуб є порівняно молодим. За однією з версій вчених, його катастрофічне формування призвело до часткового або повного вимирання динозаврів (Lyons, et al. 2020). Ця катастрофа мала надзвичайно величезні масштаби, більшість вчених сходиться на думці і припускають, що метеорит, який зіткнувся із Землею міг викликати цунамі, висота якого, за найскромнішими оцінками, могла сягала 100 метрів.

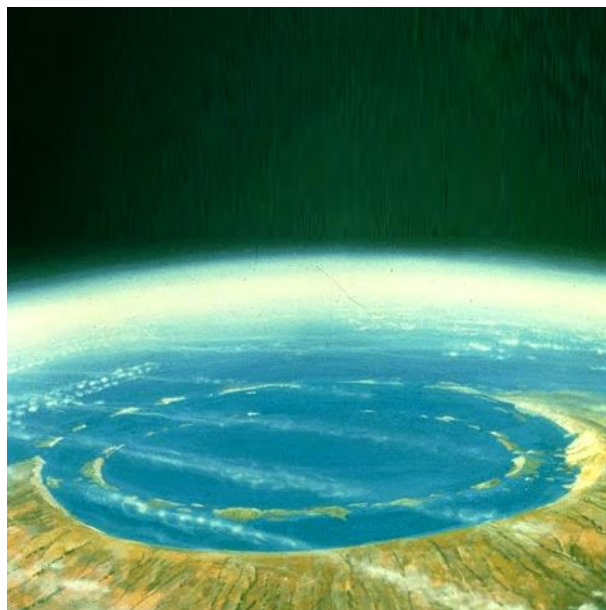


Рис. 2.7. Кратер Чиксулуб (Chicxulub crater)

Вся планета на довгий період часу була оповита густими пиловими хмарами, що перешкоджало проникненню на поверхню сонячних променів і, в результаті температура повітря у приземному шарі атмосфери різко знизилася. Однозначно оцінити масштаби катастрофи, як і початкові розміри кратера,

наразі неймовірно складно, оскільки за безліч мільйонів років завдяки ерозії та інших геологічних і геодинамічних чинників регіон ударної кільцевої структури постійно змінювався. Частина вчених переконана, що новостворений кратер мав діаметр, який міг досягати 300 км. Наріз видимий діаметр кільцевої структури не перевищує 180 км ([Christou, Bach 2019](#)).

Цікаво, що він був виявлений порівняно недавно – лише у 1987 році під час функціонування однієї з геофізичних експедицій, які були організовані з метою відкриття та розробки родовищ нафти. Під час виконання робіт членами експедиції на дні Мексиканської затоки вченими була виявлена незрозуміла симетрична дуга, яка мала фрагментарне продовження і на суші. Щойно виявлений кратер було вирішено назвати на честь розташованого неподалік поселення Чиксулуб, назва якого з мови племені майя дослівно можна перекласти як «демон кліщів». З моменту відкриття усесторонні масштабні дослідження ударної кільцевої структури не припиняються ні на хвилину, що дозволило отримати результати, які допомогли отримати масу прояснень в теорії крейдо-палеогенової кризи, коли відбулася масова загибель майже всіх, існуючих на той час, видів динозаврів, а також низки нечисленних і вразливих видів інших тварин і рослин.

Кратер Аорунга (Aorounga crater)

В межах республіки Чад, що в Африці розташований всесвітньо відомий кратер Аорунга ([рис. 2.8](#)). Він вважається унікальним у своєму роді імпактним формуванням. А унікальність ця полягає в тому, що ударна структура Аорунга, найімовірніше, є потрійною, і була сформована завдяки серії багаторазових зіткнень нашої планети із космічними тілами різного розміру ([Hoersch, et al. 2019](#)). Ще одна особливість в тому, що оцінити форму і сам сучасний вигляд кратера можливо лише завдяки радіолокаційним космічним знімкам, які отримуються завдяки спеціалізованих наукових штучних супутників.

В межах ударної структури Аорунга чітко простежуються концентричні кола, які могли сформуватися лише в результаті численних, послідовних ударів і вибухів. Слід підкреслити, що таке твердження цілком реалістичне, оскільки подібні структури у великій кількості відкриті на Місяці, Меркурії й інших

желеподібних планетах Сонячної системи. Звичайно, на перший погляд складно припустити, що в одну точку нашої планети з коротким інтервалом часу спромоглося впасти три різних астероїда. Та коли ми подивимося на цю ситуацію з іншого боку, і уявимо вже осколки одного космічного тіла, яке розірвалося перед зіткненням, то така теорія, яка поясню формування кратера і формування його характерних концентричних кілець вже не виглядає так дивно.



Рис. 2.8. Кратер Аорунга (Aorounga crater)

За осередненими оцінками вчених, діаметр космічного тіла, яке призвело до формування кратера Аорунга могло сягати 2 км. Сучасний діаметр видимої частини кратера не перевищує 12,6 км, а сам він сформувався близько 345 мільйонів років тому ([Cohen-Zada, et al. 2019](#)). Дослідникам, які відвідують цей унікальний геологічний району Африки, видається можливість паралельно вивчити й неймовірно мальовничі піщані дюни, адже піщані відклади в межах цієї імпактної структури мають незвичний і цікавий помаранчевий колір, що часом нагадує справжній марсіанський пейзаж.

Кратер Беррінджера або Арізонський кратер (Barringer Crater)

Чи не найяскравішим й одним із найбільш збережених на нашій планеті свідчень її зіткнень з космічними тілами є кратер Беррінджера, розташований

на території Сполучених Штатів, в Арізоні (рис. 2.9). Діаметр цієї невеликої ударної кільцевої структури порівняно невеликий і сягає лише 1,2 км, а його глибина всього 175 метрів. Той факт, що кратер надзвичайно добре зберігся і чітко простежується як на поверхні, так і на знімках і в наш час, дуже легко пояснити, адже він сформувався порівняно недавно, всього 50 000 років тому (Wulf, Kenkmann 2018). Вченим вдалося достовірно встановити, що в той час на Землю впав порівняно великий залізний метеорит, діаметр якого не перевищував 50 метрів.



Рис. 2.9. Кратер Беррінджера або Арізонський кратер (Barringer Crater)

Розміри такого космічного тіла можуть, на перший погляд, здатися багатьом людям зовсім скромними, проте маса цього залізного метеорита, навіть при таких невеликих розмірах очевидно сягала декількох сотень тисяч тонн. В області падіння цього метеорита й подальшого формування кратера Беррінджера було згодом виявлено безліч фрагментів метеорита загальною вагою майже 30 тонн, вага найбільшого уламка з-поміж них становив 693 кг (Mitchell, James 2020). Кратер Беррінджера також відомий і під іншою назвою – Арізонський кратер, а місцеві жителі й дослідники називають його Каньоном Диявола.

Вже багато років ця молода кільцева ударна структура залишається в полі зору туристів й науковців з усього світу, які з'їжджаються сюди, щоб помилуватися величезною природною земляною чашею, а також здійснити нові пошуки й відкриття. Розташована ця геологічна пам'ятка неподалік від містечка Флагстафф. Для зручності відвідувачів поруч з кратером були обладнані численні зручні для прогулянок мостики й оглядові майданчики, а в безпосередній близькості від об'єкту створений цікавий музей. Ще одна цікава особливість Арізонського кратера полягає в тому, що безпосередньо в кратері фіксують різні й часті геомагнітні аномалії.

Кратер Каракуль (Karakul Crater)

На території Таджикистану розташований великий і надзвичайно цікавий з наукової точки зору високогірний кратер Каракуль (рис. 2.10). Діаметр цієї ударної кільцевої структури сягає майже 45 км, а сама вона сформувалася приблизно 10 мільйонів років тому (Patil 2018). Головна особливість імпактної структури полягає в тому, що вона розміщена на висоті майже 4 000 метрів над рівнем моря, що дозволяє йому вважатися найвисокогірнішим метеоритним кратером у світі.

Виявити це надзвичайне й унікальне геологічне утворення вдалося лише завдяки якісним супутниковим зображенням. Відкриття відбулася лише кілька років тому. Ще однією не менш цікавою особливістю кратера є озеро, яке заповнює одну з частин кратерного днища. Діаметр озера не перевищує 25 км (Rioual, et al. 2020). Слід зауважити, що саме найбільше дослідників цікавить саме та частина ударної кільцевої структури, яка безпосередньо зайнята озером, оскільки всі інші частини кратера абсолютно порожні.

На узбережжі цього озера ростуть незначна кількість деяких видів рослин, серед яких переважають ковила і полин. Тат скрізь можна спостерігати простори, покриті сіллю, адже вода в озері дуже солоня. В нього впадає декілька річок, багатих рибою. Загалом, територію кратера Каракуль можна охарактеризувати як екстремально посушливу – тут випадає надзвичайно мала кількість опадів. У період з листопада по квітень озеро Каракуль скуто кригою,

проте і влітку вода в солоному озері може прогріватися лише до + 12 градусів за Цельсієм.

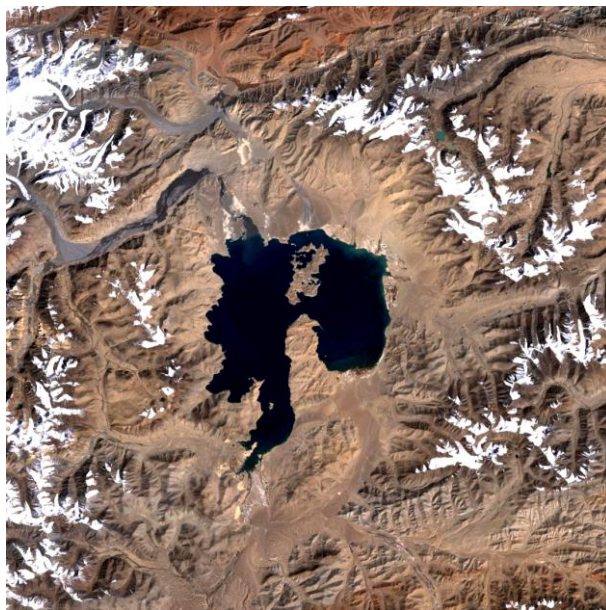


Рис. 2.10. Кратер Каракуль (Karakul Crater)

Кратер Босумтві (Lake Bosumtwi)

Чи не найкрасивіших серед метеоритних кратерів нашої планети по праву вважається ударна кільцева структура Босумтві, яка розташована в Гані (рис. 2.11). Цей порівняно невеликий кратер утворився завдяки зіткненню Землі з великим метеоритом приблизно 1,3 мільйонів років тому, а його сучасний діаметр не перевищує 10,5 км (Loh, et al. 2016). Наразі кратер заповнений озером Босумтві, яке вважається однією з головних природних пам'яток Гани.

Серед одних із найголовніших особливостей кратера є виявлені в його межах тектитів – специфічних осколків порівняно рідкісного виду так званих кометних метеоритів. Для повного розуміння можна лише сказати, що наразі на нашій планеті більш-менш добре вивчено лише близько 170 метеоритних кратерів, а тектити були виявлені в межах всього чотирьох із них, в тому числі і в кратері Босумтві. Саме такі рідкісні мінеральні відклади дозволили вченим максимально точно реконструювати імпактну катастрофу, яка сталася понад один мільйон років тому.

За однією з версій, об Землю врізався великий метеорит, розмір якого не перевищував 500 метрів. Він наближався до Землі зі сходу зі швидкістю майже 20 км/с (Sanful, et al. 2017). Незважаючи на те, що дана імпактна структура була виявлена порівняно давно, її сучасне дослідження продовжує бути утрудненим, оскільки вона розташована в неймовірно важкодоступній місцевості – посеред непрохідних вологих екваторіальних лісів. Окрім того, представники народності Ашанті, які проживають біля озера надзвичайно негативно ставляться до будь-яких спроб вивчення озера., оскільки вважають його священним і забороняють не просто плавати по ньому на човнах, а навіть наближатися до його узбережжя. Проте, вченим все-таки вдалося з'ясувати, що на дні озера приховані багаті поклади нікелю, розробку яких зі згаданих причин розпочати наразі неможливо.

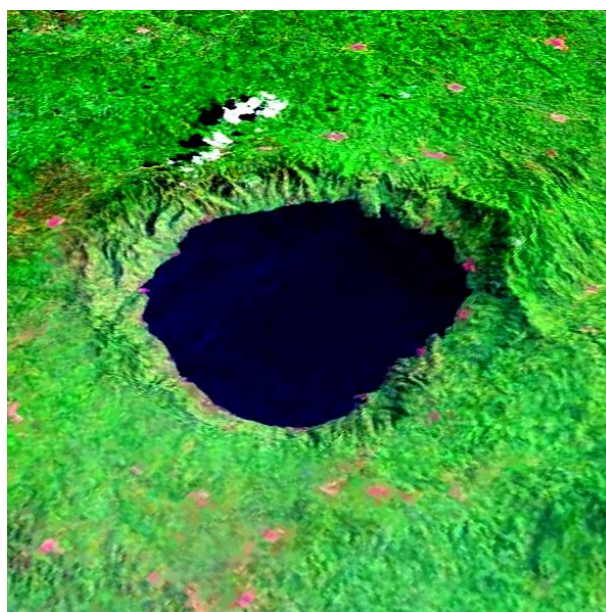


Рис. 2.11. Кратер Босумтві (Lake Bosumtwi)

Штайнхаймський кратер (Steinheim crater)

На території Німеччини усім бажаючим доступний для відвідування і навіть проживання в його межах – Штайнхаймський кратер. Практично вся кільцева структура розташована на території громади Штайнхайм-ам-Альбух (рис. 2.12). Проїжджаючи по території кільцевої ударної структури і поглядом милуючись зеленими луками та доглянутими будиночками місцевих жителів

неможливо навіть припустити, що саме в цей момент ти рухаєшся через самий центр гігантського метеоритного кратера. Масштаби його порівняно великі, видимий діаметр кратера дещо перевищує 3,8 км (Buchner 2018). Лише піднявшись на оточуючі кільцеву структуру підвищення, можна в повній мірі оцінити унікальність цього німецького ландшафту.

Утворилася Штайнхаймська імпактна структура понад 14 мільйонів років тому, дослідникам вдалося встановити під час її вивчення, що протягом багатьох мільйонів років його днище було повністю заповнено водою. До того моменту, коли в межах центральної частини кратера з'явилися перші поселення, озеро, звичайно, вже давно зникло, залишивши лише сліди у вигляді озерних відкладів. За мільйони років під впливом низки природних чинників, а також наростаючої людської діяльності ландшафт цього унікального регіону істотно трансформувався.

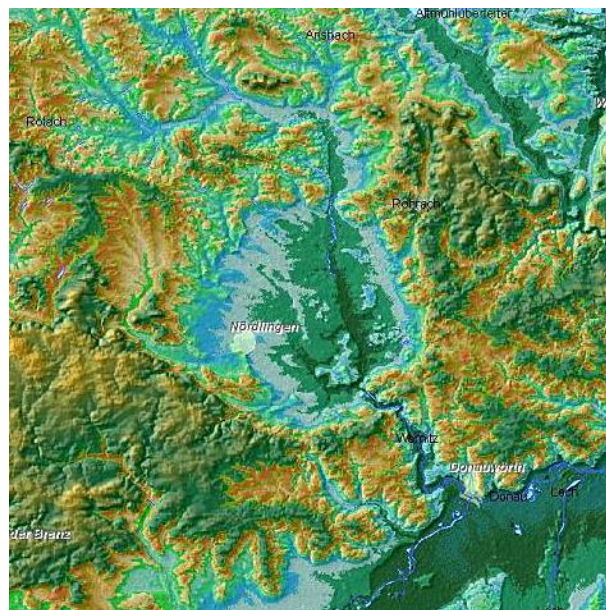


Рис. 2.12. Штайнхаймський кратер (Steinheim crater)

Вивченням Штайнхаймської ударної кільцевої структури вчені займаються вже багато десятиліть, наприклад ще в 1978 році для всіх, хто цікавиться історією падіння метеорита безпосередньо в кратері було створено музей (Buchner, Schmieder 2018). Окрім того, на території унікального геологічного утворення розташовано два маленький і надзвичайно мальовничих

містечка – Штайнхайм (за яким і названо кратер) і Зонтайм, а однією з чи не найголовніших визначних пам'яток цієї місцевості є старовинний монастир. З атрактивної точки зору Штайнхаймська імпактна структура вважається однією із найцікавіших і найпривабливіших на нашій планеті.

Кратер Рошшуар (Rochechouart crater)

Простори Франції теж досить багаті на ударні кратери, які заслуговують не лише уваги аматорів незвичайних екскурсій, а й досвідчених вчених. Найвідомішим серед них, звичайно є кратер Рошшуар (рис. 2.13). Ця територія, за назвою якого пізніше і назвали кратер, почала привертати увагу дослідників ще наприкінці 18 століття. Найбільше їх цікавила скеляста гірська порода, природу якої вони не могли до кінця пояснити і яку активно добували і використовували для будівництва місцевих фортець (Simpson, et al. 2017). Одна з таких величних споруд біля кратера замок Рошшуар, який добре зберігся до наших днів.

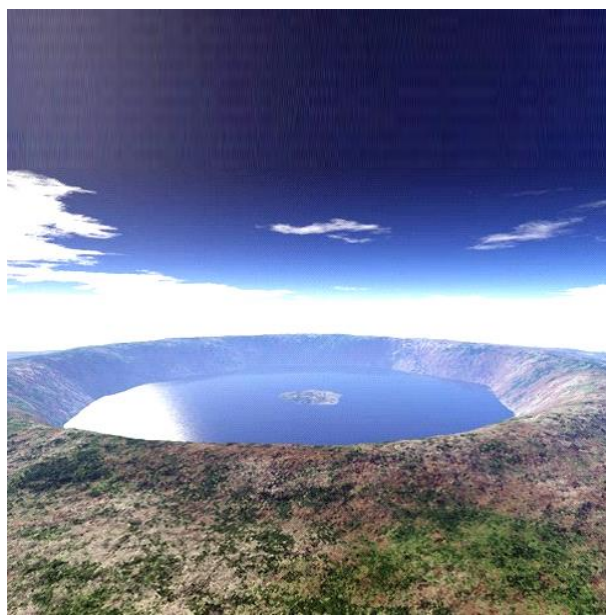


Рис. 2.13. Кратер Рошшуар (Rochechouart crater)

Кілька століть тому дослідники того часу дійшло до висновку, що ця дивовижна скеляста гірська порода є наслідком виверження доісторичного вулкана. І лише порівняно недавно вченим все-таки вдалося довести, що таємнича область є самим справжнім метеоритним кратером, а незвичайна

гірська порода – результатом надзвичайно потужного вибуху, який супроводжувався як колосальним підвищенням температури, так і значними руйнуваннями.

Геологу Франсуа Крауту, який займався геологічними й геоморфологічними дослідженням району Рошшуар, вдалося вперше довести теорію про формування цієї структури завдяки падінню метеорита в 1969 році. За результатами його досліджень, космічне тіло зіткнулося із нашою планетою близько 214 мільйонів років тому, що призвело до формування кратера, початковий діаметр якого міг сягати майже 23 км (Lambert, Lebreton 2019). Наразі чіткі межі кратера майже непомітні. Також надзвичайно важким завданням є і пошук в межах ударної структури розплавлених кам'янистих гірських породи, які б додатково свідчили про ударну катастрофу. Більшість з них були практично повністю вичерпані вже на початку 20 століття і використані на будівництво замків, фортець і місцевих житлових будинків.

Карський кратер (Kara crater)

На території Росії в межах Ненецького автономного округу розташований Карський кратер, який є результатом надзвичайно масштабної космічної катастрофи, яка відбулася майже 70 мільйонів років тому (рис. 2.14). Наша планета зазнала зіткнення із величезним метеоритом, завдяки чому на її поверхні сформувався гігантський ударний кратер діаметром понад 65 км (Shumilova, et al. 2020). Що ж стосується більш специфічних особливостей рельєфу імпактної структури, то він являє собою достатньо велику еліптичну западину, звернену в напрямку до Карському моря.

Під час безпосереднього дослідженні цієї западини було виявлено надзвичайно велику кількість уламків гірських порід і характерної для імпактних структур склоподібних мас, які сформувалися безпосередньо під час вибуху, спричиненого падінням ударника. Цікавим є той факт, що вченими геологами ця западина, яка розташована в басейні річки Кари, була виявлена вже достатньо давно, головною причиною її формування спершу вважали вулканічну активність, свідчення якої в даному регіоні численні. Після низки ретельних досліджень, які були проведені вченим Масловим, вдалося довести

метеоритне походження Карської ударної кільцевої структури (Shumilova, et al. 2018).

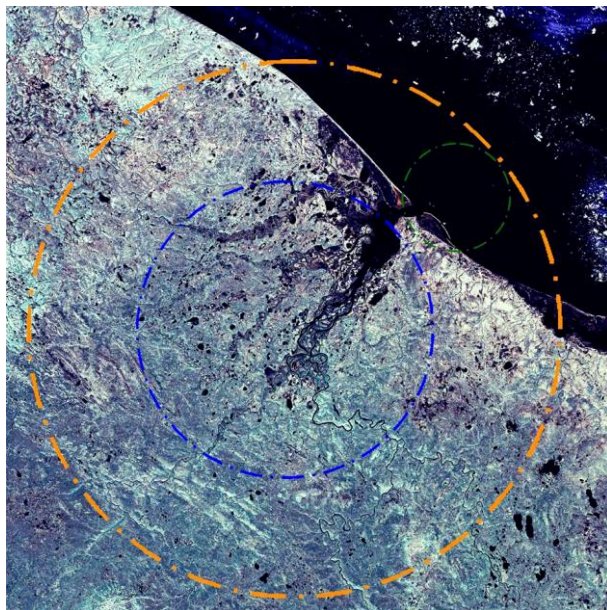


Рис. 2.14. Карський кратер (Kara crater)

Всім бажаючим, які захочуть побачити цю надзвичайно цікаву природну структуру, доведеться подолати зовсім непростий шлях, що мати змогу безпосередньо дістатися до території кратера, оскільки дістатися туди можливо лише на приватному вертольоті. Для більшості дослідників Карський кратер продовжує залишатися чи не найважливішим об'єктом, адже в його межах були виявлені багаті родовища алмазів. Величина окремих з них перевищує 4 мм, а загальний вміст цих дорогоцінних каменів у гірських породи оцінюється в 50 карат на тонну.

Кратер Арагуайна (Araguainha crater)

На території Бразилії на межі штатів Гояс і Мату-Гросу розташований найбільший ударний кратер країни – Арагуайна, який утворився майже 254 мільйонів років тому (рис. 2.15). Область, куди впав метеорит, за припущеннями більшості вчених, в той час існувало невелике, мілководне море (Silva, et al. 2016). З падінням метеорита Арагуайна також пов'язано низку цікавих гіпотез, які теж пояснюють причини масового вимирання видів – цілком ймовірно, що в результаті зіткнення саме цього метеорита із Землею

дійсно відбулися такі деградаційні зміни, які спонукали чималій кількості видів тварин і рослин припинити існування.

Діаметр імпактної структури Арагуайна сягає майже 40 км, цей кратер вирізняється поміж інших своєю достатньо складною будовою і специфічною структурою, якої додають численні радіальні і концентричні системи розломів. Перші масштабні дослідження на території ударної кільцевої структури розпочалися ще в 1969 році, та, що важливо, далеко не відразу вченим вдалося достовірно встановити метеоритне походження цієї імпактної структури. Спершу абсолютна більшість вчених інтерпретувала структуру, як криптовулканічну, і лише в 1973 році цю теорію спромігся спростувати вчений Роберт Даєтць.

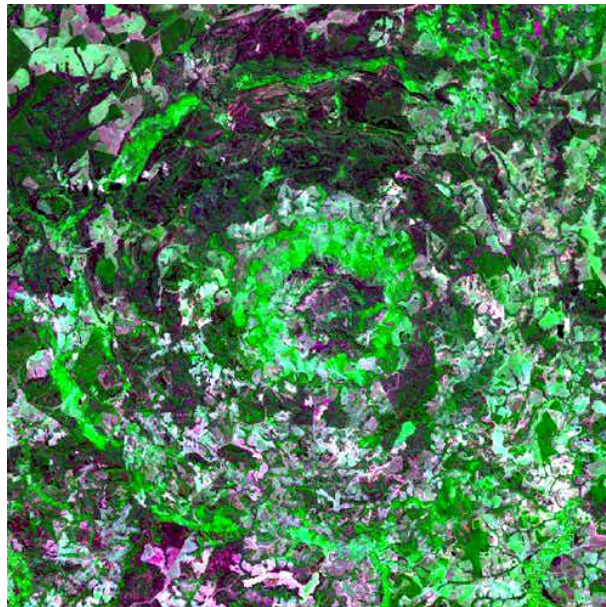


Рис. 2.15. Кратер Арагуайна (Araguainha crater)

Саме цим вченим були виявлені фрагменти ударного кварцу, а також багато інших гірських порід, які так чи інакше свідчили про лише метеоритне походження імпактної структури. У кратера Арагуайна спостерігається ще одна надзвичайно цікава особливість. Вченими було достовірно встановлено, що одразу після свого формування діаметр кратера не перевищував 24 км, а пізніше він зміг істотно розширитися завдяки циклам численних обвалів зовнішнього кратерного валу ([Yokoyama 2018](#)). Відвідувачам дістатися до

кратера порівняно не складно, поруч із структурою знаходяться кілька невеликих міст, серед яких найбільші – Куяба і Гоянія.

Кратер Шумейкера (Shoemaker crater)

На території австралійського континенту розташований кратер Шумейкер, який утворився близько 1 630 мільйонів років тому і є одним із найстаріших кратерів, які до певної міри зберегли свою первинну структуру (Ernst, et al. 2018). Ця структура належить до числа найбільших і найцікавіших у плані вивчення еволюції метеоритних кратерів в умовах нашої планети (рис. 2.16). Специфічна геологічна структура у формі майже ідеального кільця була виявлена вченими ще в середині 20 століття, а вже у 1974 році була запропонована перша гіпотеза про метеоритне походження кратера. Свою назву імпактна структура одержала на честь всесвітньо відомого американського геолога Юджина Шумейкера, який є засновником надзвичайно важливого наукового напрямку, як астрогеологія.



Рис. 2.16. Кратер Шумейкера (Shoemaker crater)

Окрім того, Юджин Шумейкер був першою людиною, яка була похована на Місяці. Саме він першим запропонував гіпотезу про те, що кометні ядра й астероїди протягом тривалої геологічної історії нашої планети випадають на її поверхню, залишаючи при цьому характерні сліди, які вирізняються з поміж

інших елементів безліччю унікальних особливостей. Багатьом вченим його гіпотеза видавалася чистою фантастикою, проте багаторічні вивчення кратерів на Місяці і на Землі дали змогу вченому повністю довести свою правоту. А з початком роботи штучних супутників неймовірна теорія Шумейкера вже ні в кого не викликала сумнівів. Про важливу наукову працю вченого сьогодні нагадує великий австралійський кратер, діаметр якого сягає 30 км.

2.2. Найбільші імпактні структури України

Іллінецька імпактна структура

На вододільних просторах між річками Соб і Сибок, а також між населеними пунктами Лугове в Іллінецькому районі та Іваньки Липовецького, в межах східної частини Вінницької області розташована стародавня Іллінецька ударна кільцева структура – яка вважається не лише однією із найдревніших ударних структур на нашій планеті, а й найстаршою у Європі імпактною структурою, яка сформувалася завдяки зіткненню із Землею астероїдного тіла діаметром від 230 до 300 метрів, яке з величезною швидкістю вдарилося об поверхню тодішнього кристалічного щита, знаного тепер як Український кристалічний щит (рис. 2.17).

Цікаво, що наразі в межах Українського кристалічного щита вченими-геологами виявлено сім кільцевих структур, які однозначно мають ударне походження (Довгалюк, 2017).

Вперше про імпактне походження геологічної морфоструктури Іллінецького ударного кратера сказав професор Київського університету Костянтин Феофілактів. Ще у 1851 р. він досліджував й оцінював на території ще невідомої на той час імпактної структури родовища корисних копалин. У долині невеликої річки Собик вчений досліджував кристалічні породи у численних відслоненнях на крутих схилах по обидва боки широкої долини. Звичайно й прогнозовано, що в нього виникло здивування, коли перед його зором постали незвичайної форми деякі мінерали тутешніх гірських порід. Складалося враження, що немов завдяки дії неймовірної сили тиску були

приплюснуті, а ще через якийсь кілометр вверх по течії на денну поверхню виходила надзвичайно крихка гірська порода, яка безумовно була змінена, інтенсивним впливом високих температури, які могли досягатися лише в результаті потужного ударного вибуху і яку Феофілактів нарік фельзитовими порфірами ([Vidmachenko 2016](#)).



Рис. 2.17. Іллінецька імпактна структура

Дещо пізніше, приблизно наприкінці того ж століття, цю гірську породу точно визначили і нею виявився вулканічний туф. Починаючи з 1898 року першим, хто порівняно детально дослідив хімічний та мінералогічний склади гірських порід Іллінецької ударної структури був Тарасенко, який додатково виділив тут ортофіри й деякі специфічні вулканічні туфи, хоча їхня присутність у зоні суцільних товщ кристалічних порід Українського щита досі залишається дивною і не до кінця з'ясованою. Проте, вже у 1973 році Вальтер і Рябенко класифікували ці гірські породи як клас імпактитів й алогенних брекчій Іллінецької кільцевої ударної структури.

Було достовірно встановлено, що сам кратер утворився завдяки зіткненню великого метеорита, масою приблизно 40 млн тонн і діаметром від 230 до 300 м із Землею в районі сучасного Українського кристалічного щита ще у ранньому девоні майже 400 млн років тому назад. Завдяки цьому зіткненню

сформувалася кратерна лійка, яка одразу після утворення сягала діаметру майже 7 км і була завглибшки від 600 до 800 м. передбачається, що під час падіння метеорит розколовся на три частини. Один з великих шматків упав у районі місцезнаходження сучасного кратера поблизу населеного пункту Іваньки, а решта уламків зіткнулися із Землею в районі населеного пункту Лугове. Метеорит при подоланні атмосферного шару розжарився до температур плавлення, а після зіткнення об поверхню, вибухнув. Вивільнена від удару потужна енергія, за осередненими даними була еквівалентною вибуху 120-мегатонної ядерної бомби, а температура могло перевищувати відмітки в 4–5 тисяч градусів за Цельсієм. Завдяки такій надзвичайно високій температурі, поверхневі граніти повністю змінили свої фізичні характеристики і стали надзвичайно крихкими. Також змінилися їхня густина і колір, який наблизився до кольорової гами типових пісковиків на оточуючих територіях. Потрапивши на території Іллінецької ударної кільцевої структури, неможливо віднайти жодного вцілілого шматка гірської породи. На перший погляд міцні скелі можна розколоти простим дотиком пальців. Саме з цього буро-коричневого понівеченого метеоритним вибухом постелено бруківку в населеному пункті Іваньки. Місцеві жителі в повному обсязі використовують гірські породи й глинистий матеріал з імпактної структури для приватного будівництва. Наприклад сусідній населений пункт із Луговим називається Жорнище. Саме тут колись з окремих гірських порід ударного кратера виготовляли високоякісні жорна. На правобережжі річка Сибок на смузі в 2 м у при поверхневих невеликих загальною площі близько 0,3 гектарів у приватних кар'єрах добувають імпакти – червоно-бурі, буро-сірі, пористі, з порожнинами до 2 см, тріщинуваті, добре збереженому стані, надзвичайно щільні, із включеннями шматків кристалічних гірських порід, серед яких переважають граніти і гнейси, зерна польового шпату і кварцу. У 1975 році в гірських породах ударної кільцевої структури були відкриті надзвичайно крихітні, всього перші долі міліметра за діаметром, імпактні алмази, які сформувалися з графіту, що містився у гірських породах кристалічного щита – їх ще називають алмазоснодейлітові параморфози по графіту, завдяки яким Іллінецький

кратер займає друге в світі після Попігайського кратера за покладами ударних алмазів в корінних гірських породах. Одразу після виявлення алмазів кратер і всі дослідження, пов'язані з ним, було засекречено. У гірських породах Іллінецької ударної кільцевої структури виявлено підвищений, у порівнянні із фоновим земним, вміст нікелю, іридію, кобальту саме в тих співвідношеннях, які характерні для так званої «забрудненої» метеоритною речовиною гірської породи. Тут також інколи вдається віднайти й уламки самого метеорита. Це важливо, якщо знати, що іони не є дешевими, наприклад у США всього 1 грам коштує близько тисячі доларів, а 3-кілограмовий уламок у Вінницькому планетарії оцінюється у 200 тисяч доларів. До речі - найбільший на планеті монолітний агат розмірами $14,5 \times 25 \times 32$ см було знайдено в межах Іллінецької імпактної структури. Наразі ця знахідка зберігається в одному із природничих музеїв Берліна. Цікави є і той факт, що унікальній геологічній пам'ятці України – Іллінецькій ударній кільцевій структурі було присвячено тираж українських поштових марок, випущених у 1998 році.

Іллінецька імпактна структура отримала статус об'єкта природно-заповідного фонду місцевого значення і є національною геологічною пам'ятки природи.

Бовтиська імпактна структура

Бовтиська імпактна структура вважається не лише найбільшою ударною спорудою в межах Українського кристалічного щита, а й на всій території південної частини Східно-Європейської рівнини (рис. 2.18). Надзвичайний інтерес щодо дослідження цієї імпактної структури розпочався завдяки встановленню її достовірного формування на межі крейди і палеогену одночасно зі знаменитим кратером Чиксулуб, що в Мексиці, і який, як ми вже згадували у попередньому розділі викликав серію катастрофічних подій, які, врешті-решт і призвели до масового вимирання частини біоти наприкінці крейдяного періоду (Kelley, Gurov 2002).

Бовтиська ударна кільцева структура розташована в межах центральної частини Українського кристалічного щита в басейні річки Тясмин, яка є правою притокою річки Дніпро. Ударний кратер безпосередньо сформовано у

кристалічних гірських породах кристалічного щита, які у місці імпактної структури у своєму складі містять переважно граніти і гнейси, сформовані ще у протерозойський час. Діаметр кільцевої структури сягає 24 км. Головними структурними елементами, завдяки яким кратер ідентифікується є його центральне підняття, яке з усіх боків оточене глибокою центральною депресією, а також фрагментарними периферійними западинами. Кільцева структура також оточена понівеченим довготривалою ерозією напірним валом, релікти якого виклинюються на денну поверхню в межах північно-східної периферії кільцевої структури безпосередньо на території басейну річки Тясмин (Гуров, Гурова 1991; Gurov, Ryabenko 1984).



Рис. 2.18. Бовтиська імпактна структура

Внутрішня частина ударного кратера заповнена специфічними гірськими породами, серед яких вирізняються звичні для таких структур зювіти й імпактитами зі слідами інтенсивного плавлення і які залягають у вигляді концентричного шару діаметром близько 12 км приблизно на однаковій відстані від центрального підняття. Більшість цих товщ гірських порід, які залягають субгоризонтально до рівневої поверхні демонструють те, що високотемпературна надзвичайно рухлива ударна хвиля призвела до майже миттєвого формування розплавів, які й утворили кільцеподібне озеро

розплавленого матеріалу навколо центрального піку. У структурі розплавлених імпаکتитів представлені здебільшого мікропорфірові гірські породи з численними включеннями мікролітів ромбічного піроксену та плагіоклазу. Хімічний склад більшості з цих гірських порід чітко корелює з подібним складом суміші Кіровоградських гранітів і гнейсів у пропорції 5 до 1 ([Масайтіс і ін. 1980; Grieve et al. 1987; Гуров, Гурова 1991](#)).

Цікаво й те, що основним джерелом акцесорної мінералізації платини і міді в імпактитах Бовтиської імпактної структури безпосередньо є матеріал астероїда ([Gurov et al., 2015](#)).

Одразу після формування, коли більшість ударних розплавів застигло, глибина ударної кільцевої структури оцінюється вченими в її центральній частині від 500 до 550 м. Поступово відбулося заповнення кратерної депресії внаслідок ерозійного й гравітаційного руйнування напірного валу і товщі полів викидів новостворених брекчій. Після істотного зниження температури поверхні товщі розпечених імпаکتитів і зювітів нижче +100 °C в найглибшій частині кратерної лійки рівновіддалено від центрального піку утворився прісноводний басен ([Gurov et al., 2003, 2006](#)). Накопичення озерних відкладів в кратерному озері призвело до формування точкових родовищ горючих сланців, розвідані запаси яких наразі перевищують 4 млрд т ([Grieve, Masaitis, 1994](#)).

Бовтиська імпактна структура по всій периферії оточена фрагментарно збереженим покривом кратерних викидів у вигляді достатньо потужної товщі брекчій, які загалом спостерігаються на площі понад 6500 км². Ці відклади, як демонструють численні дослідження, найкраще збереглися у північно-східному напрямку від кратера в межах басейну річки Тясмин, де на поверхні часто спостерігається велика кількість виходу імпактних брекчій на денну поверхню. При середньому радіусі Бовтиської ударної кільцевої структури близько 12 км, протяжність покривних викидів віддалена від її центральної частини на різних напрямках від 3 до 5 її радіусів. Згідно з оцінкою й осередненими розрахунками початкової потужності покривних викидів за звичайною емпіричною формулою, їхня потужність сягала від 300 м в межах напірного валу імпактної структури до 10 м загальною площею понад 7000 км², покривні викид ж на

крайній околиці периферії сягали потужності від 10 до 1 м, проте охоплювали значно більшу площу, яка за найскромнішими оцінками сягала понад 25 000 км² (Гуров, Хмельницький, 1996). Збільшення уваги і якості дослідження гірських порід Бовтиської ударної кільцевої структури відбулося лише після того, як було встановлено, що вона сформувалася в один й той же час із знаменитим кратером Чиксулуб наприкінці крейдяного часу, завдяки чому відклади імпактної структури можуть бути легко синхронізовані із глобально поширеними на планеті викидами з Чиксулуба на межі крейди і палеогену (Гуров, Гожик, 2015).

Час формування Бовтиської ударної кільцевої структури й оцінка її ізотопного віку переплавлених гірських порід за даними К-Аг методу спершу був визначений із великим діапазоном від 55–56 до 170 млн років. Вік цих же переформатованих імпактитів ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом у Відкритому Університеті (Великобританія) визначено значно точніше – в межах 65,17±0,64 млн років тому. Оскільки вік кратера Чиксулуб оцінено в 65,46±0,6 млн років, то одночасне утворення цих двох ударних структур наразі ні в кого не викликає сумніву (Kelley, Gurov, 2002). До речі, Відкритим Університетом було здійснене фінансування розробки низки свердловин в межах Бовтиської структури у 2009 році до глибини 598 м і виконано ретельне дослідження керна товщі накопичених в кратері осадових гірських порід. Головним результатом виконаних досліджень було більш точне визначення ймовірного формування Бовтиського метеоритного кратера, яке наразі свідчить, що він сформувався на 2000–5000 років раніше за кратер Чиксулуб (Jolley et al., 2010).

Ротмістрівська імпактна структура

Наприкінці 1975 року в центральній частині Українського кристалічного щита на території басейну річки Тясмин була детально описана Ротмістрівська імпактна структура (Масайтіс і ін., 1976). Ударна кільцева структура являє собою простої будови чашоподібне заглиблення з середнім діаметром приблизно 3 км і найбільшою глибиною в центральній частині від 380 до 400 м. Вік ударного кратера відповідно до даних К-Аг методу не перевищує 130±10 млн років (Valter, Plotnikova, 2003).

У фундаменті геологічного розрізу ударної структури знаходиться товща алогенних брекчій і зювітів загальною потужністю, яка не перевищує 80 м. Ближче до денної поверхні кратер заповнений товщею осадових відкладів, які подекуди сягають потужності 300 м. Цікавою особливістю товщі цих гірських порід є хороше збереження в них тонкого горизонту брекчій, які діагностовано як периферійні покривні викиди з Бовтиської ударної кільцевої структури (Гуров, Гурова, 1991; Gurov et al., 2003). Слід зазначити, що під час дослідження ударних структур на поверхні Землі цей факт, наразі, є єдиним достовірно встановленим випадком перекривання старшої імпактної структури викидами з більш молодого кратера.



Рис. 2.19. Ротмістрівська імпактна структура

Зеленогайська імпактна структура

Зеленогайська ударна кільцева структура має діаметр, який сягає 1,4 км. Кратер ідентифіковано й описано Вальтером і його колегами у 1976 році під час дослідження керн однієї з свердловин, пробурених Брянським у межах поширення місцевої, негативної гравітаційної аномалії (рис. 2.20). Ударна структура розташована на відстані 50 км на південний схід від центрального піднесення Бовтиської імпактної структури, що може свідчити про їхнє синхронне формування (Вальтер та ін., 1976; Вальтер, Рябенко, 1977). Завдяки

аналізу гірських порід зі згаданої свердловини у фундаменті кратера ідентифіковано товщу аутигенних похованих брекчій, вище яких поширюються галогенні брекчії з чіткими ознаками ударного метаморфізму мінералів у гірських породах. На поверхні імпактних гірських порід залягають і товщі пізніше сформованих осадових гірських порід, вік яких за осередненими даними палінологічних апробацій відповідають третинному, ймовірно, палеогеновому часу (Valter et al., 1997). Автори згаданої вище роботи моделюють значно складнішу будову ударної структури у вигляді двох наближених кратерних лійок, сформованих двома уламками астероїда. Вік імпактної структури наразі достовірно нез'ясований. В праці (Масайтіс і ін., 1980) прогнозується її формування дещо швидше за Бовтиську імпактну структуру.

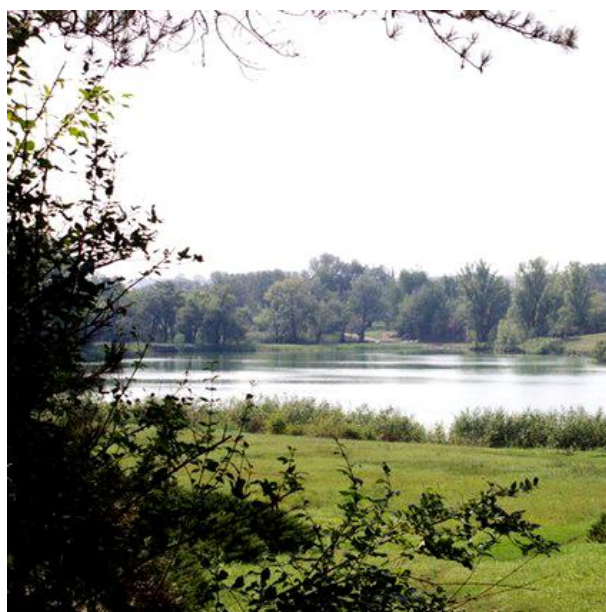


Рис. 2.20. Зеленогайська імпактна структура

Оболонська імпактна структура

Оболонська ударна кільцева структура розташована на північно-східному схилі Українського кристалічного щита на вододільній поверхні між річками Сула та Хорол (рис. 2.21). Оболонській імпактній структурі притаманна гравітаційна аномалія, яка була виявлена Шерешевським, в межах якої, дещо пізніше, Ванденко були пробурені дві достатньо глибокі свердловини (Вальтер,

Рябенко, 1977). Подібність у будові й характеристиках гравітаційних аномалій Бовтиської й Оболонської структур дало вагомі підстави для сміливого припущення про ударне походження останньої. Вивчення кернів зі свердловин довело правильність попередніх припущень щодо ударно-вибухового генезису Оболонської імпактної структури. З їх же допомогою були встановлені особливості її будови (Масайтіс і ін., 1976; Вальтер та ін., 1977).



Рис. 2.21. Оболонська імпактна структура

Оболонська імпактна структура структурно складається із кратерної лійки з чітким центральним піднесенням, діаметр якого на периферії лійки сягає майже 17 км. Оболонський кратер – єдина ударна кільцева структура в межах Українського кристалічного щита, формування якої відбулося в умовах тодішнього мілководного морського басейну (Гуров, Гожик, 2006; Gurov et al. 2009). Ударна кільцева структура перекрита потужною товщею мезокайнозойських осадових гірських порід. Поверхня кристалічного фундаменту занурена на глибину від 450 м на південно-західній периферії структури до 800 м на її північно-західній околиці. Слабко виражене центральне піднесення оточене концентричними структурами, складеними переважно алогенними літичними брекчіями і зювітами. Гірські породи і мінерали більшості брекчій мають чіткі ознаки ударного метаморфізму

(Вальтер та ін., 1977; Гуров і ін., 1995; Гуров, Гожик, 2006). На поверхні гірських порід аллогенного комплексу сформувалися поклади порід, що перекривають основний комплекс осадових гірських порід потужністю до 700 м. Характерною ознакою його будови є наявність в основній товщі пісковиків тонкого горизонту брекчій, сформованих внаслідок зворотного падіння в щойно сформовану кратерну лійку матеріалу покривних викидів. Утворення кільцевої ударної структури в мілководному морському басейні, очевидно супроводжувалося формуванням потужної хвилі цунамі, сліди якої у вигляді спорадичних горизонтів брекчій та конгломератів простежено завдяки свердловинам та профілям, побудованими з їхньою допомогою, на відстань до 38 км від центру імпактної структури. Вік кратера за осередненими стратиграфічними даними відповідає байоському часу; а ізотопний вік імпактного скла, визначений за допомогою К-Аг методу, становить (169 ± 7) млн років (Gurov et al. 2009).

Географічне положення Оболонського кратера на схилі кристалічного щита поблизу його межі з Дніпровсько-Донецьким басейном дало підстави розглядати його як одну з перспективних нафтогазоносних структур нашої країни (Краюшкин, Гуров, 1989). Її разюча схожість із окремими нафтогазоносними імпактними структурами Північно-Американського континенту, особливо такими як кратери Еймс й Авак, може бути вагомим доказом підтвердження подібних висновків (Гуров і ін., 2011).

Тернівська імпактна структура

Метеоритне походження Тернівської імпактної структури, розташованої на сході центральної частини Українського кристалічного щита в басейнах річок Інгул і Саксагань, було переконливо доведено ще у 1979 році Нікольським (Никольский та ін., 1982) (рис. 2.22). Тернівська імпактна структура представляє собою сильно деградовано кратерну лійку з центральним піднесенням, у якому на денній поверхні виклинюється складний комплекс імпактитів, у складі якого переважають алогенні літичні брекчії і посічені дайкоподібними геологічними тілами імпактити, що піддавалися плавленню. Діаметр ударної кільцевої структури оцінюється від 11 до 15 км.

Тернівська імпактна структура розташована в північній частині Криворізького залізорудного басейну. У будові фундаменту ударного кратера переважають метаморфічні формації криворізького комплексу нижнього протерозою з віком у діапазоні від 1900 до 2600 млн років. Південна частина ударної структури розкрита Первомайським залізорудним кар'єром. Вік Тернівської структури за даними К-Ar методу оцінюється в 350 млн років (Никольский та ін., 1982).



Рис. 2.22. Тернівська імпактна структура

Кам'янецька імпактна структура

На території Українського кристалічного щита була ідентифікована нова ударна кільцева структура – Кам'янецька імпактна структура (Гуров і ін., 2018; Gurov et al. 2017) (рис. 2.23). В межах Кіровоградського блоку Українського кристалічного щита та Кам'янецької структури в тому числі виявлено негативну гравітаційну аномалію співробітниками експедиції № 37 Комунального підприємства «Кіровгеологія» у 2004 року, які спершу дали їй назву «Кам'янецька ендегенна експлозивна структура», а також «Кам'янецька палеовулканічна структура» (Романюк та ін., 2006). Авторами цієї роботи відзначалася разюча схожість Кам'янецької структури з уже відомими імпактними структурами на території Українського кристалічного щита, ударне походження яких, до речі цими дослідниками заперечується (Романюк та ін.,

2006). У зв'язку з ознаками, які вказували на схожість Кам'янецької структури з достовірними імпактними кратерами співробітниками ІГН НАН України були проведені серії досліджень гірських порід ударної структури для можливості перегляду її генезису. Ними було виявлено сліди ударного метаморфізму і доведено її ударно-метеоритне походження (Гуров і ін., 2018).



Рис. 2.23. Кам'янецька імпактна структура

Кам'янецька ударна кільцева структура являє собою інтенсивно еродований, не складної будови чашоподібний кратер діаметром від 1,0 до 1,2 км і глибиною, яка не перевищує 130 м. До теперішнього часу завдяки ерозії у кратері збереглася нижня частина товщі алогенних брекчій, які включають ударно-метаморфізовані гірські породи та мінерали. Верхня частина розрізу повністю заповнює комплекс і товщу пізніше сформованих еродованих осадових гірських порід. Глибинний зріз кратера дає підстави припустити його древній, ймовірно, палеозойський вік (Gurov et al. 2017).

Маневицька імпактна структура

Одна з найбільших на теренах України ударних кільцевих структур, вважається Маневицька (рис. 2.24). Вона розташована на території Волинській області, неподалік від населеного пункту Кримно. Її діаметр оцінюється близько 45 км, а час формування, ймовірно, від 60 до 65 млн. років тому.

Походження даної ударної кільцевої структури продовжує бути предметом дискусій.



Рис. 2.24. Маневицька імпактна структура

РОЗДІЛ 3

НАЙВАЖЛИВІШІ ПОДІЇ В ГЕОЛОГІЧНІЙ ІСТОРІЇ ЗЕМЛІ, ПОВ'ЯЗАНІ З ІМПАКТНИМИ СТРУКТУРАМИ

3.1. Формування земної кори і Місяця в до геологічний період у період Важкого метеоритного бомбардування

Геологічну історію нашої планети зазвичай ведуть від раннього архею, тобто приблизно від 4 мільярдів років тому – часу, з якого збереглися найдавніші гірські породи Землі. Однак, у західній Австралії, неподалік від місцевості Jack Hills, були виявлені конгломерати, у яких детритовий цирконій має вік близько 4,4 мільярдів років. Це відкриття свідчить про існування твердої земної кори вже на такому ранньому етапі, що відсуває початок формування Землі як повноцінної планети Сонячної системи в часові межі між 5,5 та 4,7 мільярда років тому. Адже перед появою порівняно тонкого і нестабільного первинного шару кори, який легко руйнувався, розплавлявся та заново формувалася, минуло кількасот мільйонів років інтенсивних геологічних процесів. У цей період, через складну мережу глобальних тріщин, величезні маси магми проривалися на поверхню, утворюючи масштабні “лавові моря” – явище, яке схоже на збережені нині лавові платформи на видимій півкулі Місяця. Ці процеси заклали основи для подальшої еволюції планети, створивши передумови для формування сучасної земної кори і розвитку життя.

Цей еон називають Катархеєм, Гадеєм або Азоєм. Це перший еон у геологічній історії Землі, який не розділений на ери та періоди ([O'Neill, et al. 2017](#)).

Найважливішими подіями ранньої геологічної історії Землі стало формування самої планети та її супутника – Місяця – у проміжку приблизно від 4,7 до 4,5 мільярдів років тому. У той час поверхня Землі перебувала в розплавленому, магматичному стані, а за своїм хімічним складом нагадувала сучасний місячний реголіт – тонкий шар пилу і уламків, що вкриває поверхню Місяця. Відсутність стабільної атмосфери та гідросфери в сучасному розумінні була характерною для цього періоду. Більшість наукових досліджень свідчать

про високу вулканічну активність із потужними викидами газів, що формували примітивні атмосферні шари, хоча деякі альтернативні теорії припускають, що жодних подібних процесів тоді ще не відбувалося.

Саме в цей ранній період, який називають Катархеєм, утворився Місяць – супутник, який став одним із найбільш загадкових об'єктів Сонячної системи і суттєво вплинув на подальший розвиток Землі. Існування Місяця порушує багато традиційних уявлень про формування планет і супутників. Через це виникає питання: звідки ж насправді з'явився наш супутник?

Протягом тривалого часу вчені пропонували три основні гіпотези походження Місяця. Перша з них стверджувала, що Місяць сформувався із матеріалу, який обертався навколо Землі, подібно до того, як виникли інші небесні тіла в протопланетарному диску. Проте головним недоліком цієї теорії було те, що у ранній Сонячній системі значна частина "космічного каміння" і пилу вже була витрачена на формування внутрішніх планет. Тому було важко пояснити, як навколо Землі могло залишитись таке велике кільце матеріалу, з якого б утворився Місяць.

Друга гіпотеза передбачала, що Місяць сформувався окремо від Землі – у внутрішній частині Сонячної системи – і лише згодом, наблизившись до земної орбіти, був «захоплений» силою тяжіння нашої планети. Проте ця теорія також має суттєві недоліки. По-перше, нині Місяць віддаляється від Землі зі швидкістю близько 3,5 сантиметрів на рік, що важко пояснити у рамках гіпотези захоплення. По-друге, ймовірність того, що супутник міг бути захоплений Землею без значних змін у самій орбіті планети, є надзвичайно низькою. Це ставить під сумнів правдоподібність такої моделі формування Місяця.

Третя, найбільш відома гіпотеза, була запропонована Джорджем Дарвіном – сином Чарльза Дарвіна. Вона пояснювала спіральну траєкторію місячної орбіти та поступове уповільнення обертання Землі. Сучасні дані свідчать, що тривалість доби збільшилася приблизно на дві години за останні 600 мільйонів років, а у Катархейському еоні доба, ймовірно, тривала лише близько шести годин. Згідно з цією теорією, на початковому етапі формування

Земля оберталася значно швидше, що призвело до відокремлення частини речовини від її екваторіальної зони. Цей відокремлений матеріал потрапив на орбіту та з часом трансформувався у Місяць. Англійський геолог і геофізик Осмонд Фішер навіть висунув припущення, що саме внаслідок цього процесу сформувався Тихий океан – величезний океанський басейн на поверхні Землі. Проте подальші дослідження показали, що Земля не могла обертатися з такою надзвичайною швидкістю, що поставило під сумнів цю теорію.

Окрім цих ідей були ще гіпотеза випаровування, гіпотеза метеоритного бомбардування та гіпотеза багатьох місяців ([Tian Wisdom 2020](#)).

Програма «Аполлон» принесла науковцям вагомі докази на користь ще однієї, сьогодні найбільш прийнятої гіпотези походження Місяця. Згідно з нею, рання Земля зазнала зіткнення по дотичній з великим небесним тілом розміром із Марс, яке називають Тейєю. Внаслідок цієї катастрофічної події величезна кількість матеріалу, зірваного як з Землі, так і з Тейї, опинилася на земній орбіті. Саме цей об'ємний обертовий диск із розплавлених і уламкових порід і став сировиною для швидкого формування нашого супутника – Місяця.

Після цього ударного процесу формування, значна частина речовини, що перебувала поблизу поверхні Землі, знаходилася у газоподібному стані, створюючи так звану первинну, дуже важку атмосферу. Цей атмосферний шар складався не лише з парів легких металів, але й включав водяну пару та молекулярний водень. Така атмосфера мала суттєвий вплив на подальший розвиток планети, зокрема, на охолодження її поверхні і формування наступних геологічних і кліматичних умов.

У цей період грандіозна вулканічна активність на Землі відбувалася одночасно з інтенсивним метеоритним бомбардуванням (рис. 3.1), яке постійно підсилювало енергетичний вплив на поверхню планети. Земна кора поступово ставала товстішою і міцнішою, при цьому виверження лави відбувалися вже не хаотично, а переважно концентрувалися вздовж великих тектонічних розломів, що свідчить про зародження структурної організації земної кори. Атмосфера продовжувала змінюватися і суттєво відрізнялася від сучасної азотно-кисневої атмосфери. Основним джерелом газів, які формували її склад, були потужні

вулканічні виверження, що постачали на поверхню азот, аміак, вуглекислий газ, водяну пару, метан, водень, інертні гази, а також різні кислоти – соляну, борну і фтористоводневу.

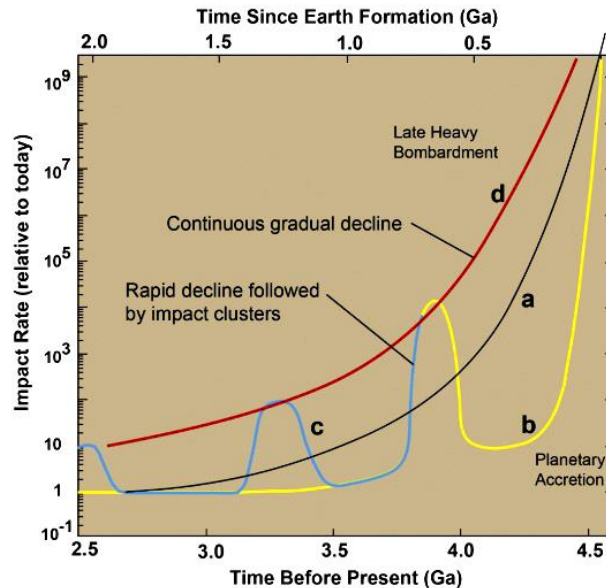


Рис. 3.1. Місце важкого метеоритного бомбардування в геологічній історії Землі

Катархейська атмосфера майже не містила кисню, а її верхні шари інтенсивно втрачали гелій і водень у космос через процес дисипації, що істотно впливало на подальший хімічний розвиток планети. Після того, як земна кора охолола до температури, при якій вода лише починає кипіти, на Землі утворилися умови, сприятливі для накопичення води у вигляді перших озерних і морських басейнів. Цей етап ознаменувався початком активних процесів розмиву, ерозії та транспортування матеріалу, що сприяло формуванню перших товщ осадових гірських порід.

Таким чином, догеологічний період розвитку Землі, який іноді називають також Місячним етапом, був надзвичайно коротким – від початку формування первинної земної кори до появи перших гідросферних систем, які заклали фундамент для подальшої еволюції планети.

3.2. Зникнення динозаврів, як наслідок падіння астероїда та інші гіпотези

Французький учений Жорж Кюв'є, який вважається засновником палеонтології – науки, що вивчає організми, які населяли Землю в її геологічному минулому, – у своєму трактаті «Міркування про перевероти на поверхні земної кулі» (1830 р.) виклав власні уявлення про взаємозв'язок між глобальними змінами у флорі та фауні і масштабними геологічними трансформаціями, що супроводжувалися масовим зникненням живих істот на планеті. Ці ідеї отримали широке визнання і увійшли в історію науки як теорія катастроф, згідно з якою геологічні катаклізми виступали основними рушіями змін у живому світі.

Проте навіть до появи еволюційного вчення Чарльза Дарвіна багато провідних біологів сумнівалися у правильності катастрофічної концепції. Після того, як у геології утвердилися еволюційні ідеї Чарльза Лайеля, а в біології – Дарвіна, теорія катастроф залишилася переважно історичним артефактом. Дарвінівське вчення пояснювало розвиток рослинного і тваринного світу через природний відбір – процес, що усуває менш пристосовані генетичні варіанти та сприяє виживанню і розмноженню тих, які краще відповідають умовам навколишнього середовища.

Однак пояснення еволюції живої природи виключно через природний відбір стикається з низкою проблем. Зокрема, рослини, які порівняно з тваринами мають набагато пасивніший спосіб життя, теоретично мали б розвиватися повільніше. Насправді ж наймолодша і найбільш високоорганізована група рослин – квіткові – налічує незрівнянно більше видів, ніж, наприклад, ссавці. Саме через подібні парадокси в останні роки спостерігається відродження інтересу деяких палеонтологів до теорії катастроф, які намагаються з її допомогою пояснити раптові та різкі зміни у формуванні флори і фауни в геологічному минулому Землі.

Найпопліднішими прихильниками цього погляду в палеонтології є німецький вчений Оскар Шіндевольф та його послідовники. Вони вважають, що масштабне катастрофічне вимирання значних груп організмів відбулося

наприкінці пермського періоду, приблизно 230–250 мільйонів років тому. У цей час зникло близько 24 різних загонів фауни, а протягом наступних 10 мільйонів років спостерігалось значне, але поступове збіднення живого світу. Ще більш кардинальні зміни у флорі та фауні сталися наприкінці мезозойської ери, коли вимирання охопило не лише морські види, а й домінуючу групу сухопутних тварин – динозаврів.

Шиндевольф пов'язує ці різкі періоди вимирання не з внутрішньоземними геологічними процесами, а з раптовими зовнішніми факторами – потужними спалахами на Сонці або раптовими надходженнями космічної радіації. Вважається, що такі вибухи спричиняли загибель одних груп організмів і водночас стимулювали підвищення частоти мутацій у інших, що могло сприяти їх швидкій еволюції.

Ідея про катастрофічний характер окремих етапів розвитку флори і фауни не полишає наукову думку вже тривалий час. Навіть сьогодні серед вчених існує значна частина прихильників цієї концепції, які досліджують і розвивають її, намагаючись пояснити складні закономірності палеонтологічного літопису Землі.

Слід відразу ж зазначити, що абсолютна більшість палеонтологів, хоча і не заперечують вплив різних змін фізико-географічних умов на розвиток життя на Землі, вважають, що катастрофічні фактори не могли відігравати визначальної чи домінуючої ролі у глобальній еволюції живих організмів. Вони послідовно відстоюють позиції класичної дарвінівської концепції, за якою вимирання видів є природним і необхідним процесом – наслідком природного відбору, безперервним і невід'ємним супутником еволюції живої матерії. Найбільш переконливо цю точку зору було аргументовано ще видатним радянським вченим Давіташвілі, який підкреслив, що не слід остаточно вважати доведеним факт одночасного, у геологічному сенсі, зникнення великих систематичних груп організмів.

Важливо розуміти, що навіть ті вчені-палеонтологи, які не підтримують ідеї раптових катастрофічних вимирань окремих видів у минулому, визнають можливість досить швидкого вимирання певних систематичних груп у

специфічних фізико-географічних умовах. Такий локальний або регіональний ефект може бути пов'язаний з різкими змінами клімату, геологічною активністю, або іншими екологічними факторами, що створювали несприятливі умови для життя.

Протягом багатьох десятиліть провідні дослідники з різних наукових галузей – геологи, палеонтологи, біологи, астрономи – невтомно працюють над розгадкою таємниці загибелі динозаврів і багатьох інших рептилій, що настала наприкінці крейдяного періоду, приблизно 80 мільйонів років тому. Цей феномен залишається однією з найцікавіших загадок історії життя на Землі.

Однією з характерних особливостей динозаврів було те, що більшість з них пересувалися на двох ногах – тобто були біпедальними істотами, що забезпечувало їм певну мобільність і швидкість. Птеродактилі, які належали до летаючих рептилій, володіли здатністю до польоту, що робило їх унікальними серед інших динозаврів. Тиранозаври, що могли досягати 14 метрів у довжину, вважаються найбільшими серед усіх м'ясоїдних тварин, які коли-небудь існували на суші.

Найбільшими ж представниками динозаврів, які пересувалися на чотирьох ногах, були трав'яїдні зауроподи. Вони досягали в довжину від голови до кінця хвоста понад 25 метрів – розмір, що вражає уяву. Ці гіганти мали невеликі голови, дуже довгі шиї, масивні тулуби, надзвичайно довгі хвости та міцні стовпоподібні ноги. Для забезпечення їхніх величезних тіл природа передбачила особливий анатомічний адаптаційний механізм – окрім звичайного головного і спинного мозку, у них був ще один так званий «хвостовий мозок», розташований у області таза, який за розмірами значно перевищував головний мозок. Це допомагало ефективно координувати рухи такого величезного тіла.

Наприкінці мезозойської ери всі ці різноманітні і в більшості своїй чудово пристосовані до навколишнього середовища тварини масово вимерли. Одночасно з ними вимерла і низка інших морських і наземних тварин. Вчені по-різному оцінювали й продовжують оцінювати це явище. Проте головною причиною загибелі все-таки вважають суттєву зміну кліматичних умов, які проявилися у значному похолоданні. Як писав Мензбір: «Знаючи

сприйнятливість рептилій до змін температури, причину вимирання можна було б шукати в різкому або навіть достатньо поступовому, проте значному зниженні температури; хоча флора і не надає доказів такого припущення ні в Європі, ні в Америці» (Кривошеина 2019). Цікаві міркування з цього приводу висловив й академік, геолог Павлов: «Звичайно, кліматичні зміни мали великий вплив на долю органічного світу стародавніх континентів та окремих їхніх частин частини. Але ж клімат Землі не змінювалися раптово і повсюдно... У більшості випадків тварини і рослини могли при погіршенні клімату мігрувати в інші широти... і якщо в окремих випадках це було неможливо, у тих районах могло відбутися масове вимирання, але воно однозначно мало мати місцевий, а не глобальний на Землі характер і не могло бути причиною повного зникнення якоїсь із повсюдно поширених груп живих організмів. Ще важче застосувати це твердження до вимирання глобально поширених груп морських тварин, на долю яких зміни рельєфу поверхні суші не могли здійснити фатальний вплив» (Sakamoto, et. al. 2016). Існувало і припущення, що загибель трав'янистих динозаврів наприкінці крейди була спричинена зміною головних типів рослинності, зокрема розквітом дводольних покритонасінних, які сильно збагатили атмосферу киснем і викликали зниження в атмосфері вільної вуглекислоти. Однак і ця причина вимирання стосується лише однієї групи тварин і навряд чи могла настільки істотно вплинути на зміну всього тваринного світу планети, оскільки зміна рослинності відбулася ще на початку пізньої крейди, а різке вимирання динозаврів – лише наприкінці періоду. Цілком очевидно, що причину загибелі варто шукати не в дії того чи іншого чинника, а в різких змінах фізико-географічних умов у цілому. Вимирання низки груп за часом припадає на ларамійську орогенічну фазу. Ларамійський орогенез, який співпав із великою регресією мілководних морів, повинен був надзвичайно сильно трансформувати рельєф поверхні земної кори. Це, звичайно, не могло не вплинути на вологість і загальний характер клімату, а також на розподіл рослинності як в широтному так і вдовготному напрямках. Для масивних сухопутних форм тодішніх рептилій, що жили, безсумнівно, на плоских повернях, швидке пристосування до нових умов було надзвичайно

важким завданням і, можливо, такі умови виявилися для них фатальними. Та Шіндевольф й інші вчені піддають сумніву збіг періоду ларамійської складчастості з вимиранням живих організмів наприкінці мезозою. Існують й інші гіпотези, які пояснюють цю найбільшу кризу в історії органічного життя Землі. До їхнього числа можна віднести найбільш, на наш погляд, цікаву гіпотезу, висунуту ще в 1957 році радянськими вченими Красовським і Шкловським. Ця гіпотеза припускає істотний вплив спалахів наднових зірок на еволюцію життя на Землі. Автори стверджують, що кожен спалах наднових дає величезну кількість космічних променів надзвичайно високих енергій. Сонце, що рухається разом з оточуючими його планетами навколо центральної частини Галактики, могло потрапляти у такі області космічного простору, де щільність космічних променів була в сотні разів вищою, ніж сучасна. Це відбувалося тоді, коли наднові спалахували в безпосередній близькості від Сонця. Аналізуючи частоту таких спалахів у межах Галактики, Красовський і Шкловський прийшли до висновку, що приблизно один раз на 200 млн років у безпосередній близькості до Сонця спалахували наднові зірки – на осередненій відстані менше 8 парсек (Шкловский 2019). Потік жорсткого, наприклад рентгенівського, випромінювання при цьому був надзвичайно великої інтенсивності, перевищуючи звичайний рівень сучасних космічних випромінювань, що досягають поверхні Землі, в десятки, якщо не в сотні разів. Важливо, що такі епохи могли тривати кілька тисячоліть поспіль.

Дія спалахів наднових могла і мусила мати серйозні біологічні, і також генетичні, наслідки. Мала б зрости частота мутацій, які, як відомо, особливо відбиваються на довгоживучих організмах. При спалахах наднових поблизу Сонячної системи відбувався тривалий вплив космічних променів, який продовжувався тисячоліттями, на живі організми з інтенсивністю в десятки і сотні разів більше сучасного, звичайного, фонового надходження. Красовський і Шкловський припустили, що з цим процесом і пов'язана загибель динозаврів наприкінці крейдяного періоду. Вони вважають, що збільшення потоку космічних променів при спалахах наднових іноді могло навпаки – бути сприятливим чинником еволюційного процесу. Так, не слід забувати, що

потужний розквіт рослинності в межах кам'яновугільного періоду було викликане підвищенням рівня жорсткої радіації космічного походження. Можливо, цей фактор стимулював у певні періоди геологічної історії і появу з простих органічних сполук більш складних органічних комплексів, з яких і розвивинулося все життя на нашій планеті. Як вже йшлося вище, наприкінці крейдового періоду окрім динозаврів щезли й інші групи живих організмів, наприклад амоніти – молюски, які нагадували сучасних наутилусів і які мали подібну спіральню закручену раковину. Аммоніти, що з'явилися наприкінці силурійської епохи, приблизно 400 млн років тому, надзвичайно швидко еволюціонували й безліч їхніх видів поширилися в древніх морях того періоду. А от напередодні їхнього повного вимирання у крейдовому періоді, а особливо це стосується кінця крейди, раковини абсолютної більшості амонітів набувають незвичайних, характерних химерних форм. Поява таких «аномальних» раковин найлегше можна пояснити зростанням кількості мутацій викликаних істотним збільшення потоку космічної радіації, яка безперешкодно й у великих кількостях сягала поверхні нашої планети. Слід наголосити і на тому факті, що амоніти були поширені на поверхні морів, тобто не були захищені від прямого впливу космічної радіації тонким шаром води. В такому разі, ця обставина, навпаки, мала б сприяти виробленню значно більшої стійкості організмів наприкінці крейдового періоду саме у морських тварин ніж у сухопутних. Американський вчений Брамлет вважає, що близько до того часу відбулося масове вимирання фітопланктону – однієї з надзвичайно важливих форм мікроорганізмів, які населяли морську поверхню і були головним продуктом харчування для більшості великих тварин. Варто згадати і про інші гіпотези, що пояснюють масове вимирання окремих груп живих організмів. Перша категорія серед цих гіпотез ґрунтується на твердженні, що утворення гірських систем на поверхні нашої планети відбувалося відносно швидко, у вигляді так званих орогенних революцій. До цих гіпотез належить і пояснення причин масового вимирання, запропоноване Личковим. На його переконання, в геологічній історії розвитку Землі відбулося шість великих геологічних циклів, що, відповідно, завершувалися шістьма трансформаційними революціями, які

повністю перформатували поверхню нашої планети. Кожна така революція створювала контрастний рельєф на поверхні, що сприяв інтенсифікації ерозійної діяльності посередництвом поверхневих вод і надходженню в понижені й замкнуті частини як суші, так і морів великої кількості солей. Ця важлива обставина істотно впливала на розквіт рослинності і тваринних організмів. Пізніше відповідно до згладжування контрастності земного рельєфу кількість речовин, що виносяться у згадані пониження, зменшувалася доти, доки не набувала мінімального характеру. В такі періоди і відбувалися масові вимирання, за висловом Личкова «менш пластичних форм живих організмів». Нові ж орогенічні рухи приводили до нового циклу розквіту тих форм життя, які змогли пережити тривалі несприятливі зміни фізико-географічного середовища. Зникнення фітопланктону, про яке згадувалося вище, Брамлет пояснює з позицій, які дуже близькі до гіпотези Личкова. Наприкінці крейдяного періоду наша планета увійшла в епоху тектонічного спокою, внаслідок чого рельєф її поверхні виявився більш плоским, ніж зазвичай, і відповідно надходження в океани мінеральних речовин, необхідних для життєдіяльності морських мікроорганізмів, істотно зменшився.

Однак гіпотеза Личкова, як і багато інших дотичних до неї гіпотез, спростовується тим, що у сучасній геологічній парадигмі немає жодних даних про формування гірських систем на поверхні Землі у формі глобальних трансформацій. Більше того, навпаки зібралось досить багато достовірних фактів вважати горотворні рухи тривалими і розтягнутими протягом геологічного часу і, які відбувалися так повільно, що за протягом такого часу фауна і флора могла б поступово як перебудуватися, так і перерозподілитися на планеті. Ще одна група досить поширених гіпотез пояснює вимирання живих організмів порівняно різкою зміною складу земної атмосфери. Так, Павлов вважав, що дві великі епохи вимирання живих організмів (одна наприкінці палеозойської ери – 200 млн років тому й друга наприкінці мезозойської – 70–80 млн років тому, хронологічно відповідають двом «великим геологічним трансформаціям» – герцинській і ларамійській. У цей час на планеті активно проявлявся вулканізм як наземний, так і підводний, який призводив до істотних

змін газового складу атмосфери і сольового складу океанів і морів. На думку Павлова, ці зміни, очевидно, і були головним чинником вимирання великих груп живих організмів. Нарешті, існують численні гіпотези, які пов'язують вимирання великих груп організмів з коливанням рівня Світового океану і зі зміною його солоності, а також із динамікою кількості мікроелементів у ґрунті і водах. У той же час варто звертати увагу і на те, що геологічний літопис життя на Землі досі не є повним, і в більшість тих подій, які видаються нам раптовими і катастрофічними, насправді могли бути обумовлені поступовими змінами геолого-географічної ситуації і супроводжувалися не лише зникненням, а й появою цілих нових груп організмів.

Наразі ні в кого не приховується, що в академічному товаристві точаться суперечки, щодо встановлення істини: «Що ж дійсно призвело до глобального вимирання динозаврів наприкінці крейдяного періоду близько 65 мільйонів років тому?». І дійсно, порівняно недавно з'явилися хороші гіпотези, відповідно до яких динозаври та інші групи живих організмів повінстю могли загинути ще до формування ударної кільцевої структури Чиксулуб. Адже через надзвичайно масштабну вулканічну активність, викликану падінням такого масивного тіла та безпосередньо матеріалом від самого вибуху в атмосфері Землі надзвичайно сильно зросла концентрація ртуті. Однак дані найновіших досліджень, схоже, остаточно пояснюють справжні причини цієї масштабної катастрофи, і ставлять крапку на багаторічних дебатах між вченими різних напрямків.

Як всім відомо наприкінці крейдяного періоду 65 мільйонів років тому астероїд діаметром, за осередненими оцінками, близько 10 км впав на північно-східну окраїну півострова Юкатан, що в Мексиці і призвів до масового вимирання більшості видів великих тварин на нашій планеті (Gu 2020). Завдяки падінню і вибуху в земну атмосферу потрапила надзвичайно велика кількість розплавленого матеріалу і різноманітних газів, що сукупно призвело до випадіння глобальних концентрованих кислотних дощів, які істотно підкислили поверхневі води океанів, а також викликало раптове потепління, яке тривало

кілька років поспіль і яке змінилося, врешті-решт, ядерною зимою, яка тривала кілька десятиліть.

Однак, як вже можна було зрозуміти з прочитаного вище, вчені не завжди притримувалися думки, що саме падіння великого астероїда призвело до масового вимирання динозаврів. Частина наукового товариства вважала, а деяка пордовжує вважати, що потужна вулканічна активність також могла стати причиною деградації дикої природи. Отже, порівняно недавно експерти вдалося з'ясувати, що активний вулканізм наприкінці крейдового періоду за часом дійсно збігся масовим вимиранням. І дійсно, ці дві події мали глобальний характер. Така їхня синхронність, породила дискусію про те, яка саме з цих двох потужних подій стала головною причиною зникнення і чи міг вплив вулканізму настільки послабити екосистеми? Такі ж питання ставилися і до можливостей наслідків падіння великого метеорита.

Відповідно до даних сучасних досліджень, опублікованих в рейтингових світових наукових журналах, вулканічна активність не відігравала головної ролі в масовому вимиранні динозаврів. За словами команди вчених з Єльського університету, єдиною ймовірною причиною загибелі динозаврів і деградації більшої частини екосистем у дикій природі міг бути лише великий астероїд. Як зазначають ці ж вчені, вулкани справді могли б бути причиною масового вимирання окремих груп живих організмів, оскільки продукують велику кількість різноманітних газів, серед яких переважають оксид сірки і вуглекислий газ і які можуть докорінно змінити клімат й окислити гідросферу й ґрунти на планеті. Однак вулканічна активність і пов'язане з нею глобальне потепління відбулося як до, так і після удару, а не безпосередньо під час масового вимирання.

Як демонструють головні результати цих досліджень, зі зникненням динозаврів співпадає лише час падіння астероїда. Згодом нові вулканічні цикли навпаки, призвели до поступового відновлення екосистем на нашій планеті. Загалом вулканічна активність в межах крейдового періоду сприяла поступовому глобальному потеплінню на 2°C, але не призводило до розвитку масового вимирання живих організмів. Щоб отримати такі висновки, вченим

довелося проаналізувати дані, отримані завдяки аналізу великої кількості зібраних в океанах й об'єднаних комплексних записів кліматичних, біотичних і вуглецевих циклів, з осадових відкладів і морських скам'янілостей, серед яких переважають зуби і раковини молюсків, і ретельному їхньому порівнянню з різними сценаріями вивержень вулканів і їхнього впливу на навколишнє середовище ([Kaiho, Oshima 2017](#)). Врешті-решт дослідники змогли побудувати детальну реконструкцію розподілу глобальної температури на планеті в той період.

Отже, вчені продемонстрували, що значна частина викидів газів відбулася ще задовго до безпосереднього удару астероїда, і що саме Чиксулуб був головною причиною, яка і призвела до зникнення динозаврів й інших груп живих організмів на нашій планеті.

РОЗДІЛ 4

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ В ШКІЛЬНИЙ ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС

4.1. Організація освітнього процесу під час вивчення ударних кільцевих структур

У рамках сучасної шкільної освіти важливо розширювати уявлення учнів про різноманіття природних процесів, які формують обличчя Землі, включаючи ті, що мають позаземне походження. Однією з таких тем є вивчення природи імпактних структур – геологічних утворень, що виникають внаслідок падіння метеоритів. Цей освітній компонент може бути представлений як інтегрований урок або цикл занять, що поєднує елементи географії, астрономії, природознавства та навіть історії Землі. Його головна мета полягає у формуванні в учнів цілісного уявлення про роль метеоритних ударів у геологічній історії планети, їхній вплив на рельєф, клімат і біосферу.

На уроці учні ознайомлюються з тим, що таке метеорит, як він поводить себе при вході в атмосферу Землі та як формується ударний кратер. Їм демонструють наочні відео, де змодельовано процеси зіткнення великих небесних тіл із поверхнею планети. У ході пояснення вчитель звертає увагу на фази формування імпактної структури: контактну, компресійну, вибухову та модифікаційну, пояснюючи фізичну суть кожної з них. Учні дізнаються про утворення шоккових хвиль, розплавів, брекчій – характерних продуктів таких подій. Для поглиблення знань наводяться приклади найвідоміших кратерів у світі: Чіксулуб у Мексиці, який, за однією з провідних гіпотез, став причиною зникнення динозаврів; Берингер у США – класичний простий кратер із добре збереженим рельєфом; Вредефорт у ПАР – найдавніший і найбільший на Землі. Особливу увагу приділяють українським об'єктам, зокрема Бовтиській структурі в Кіровоградській області та Іллінецькому кратеру на межі Вінницької та Кіровоградської областей, які є важливими об'єктами для геонаукових досліджень і шкільної освіти.

Після теоретичної частини учні беруть участь у простому демонстраційному експерименті: у посудину з піском або борошном кидаються дрібні камінці, що імітують метеорити. Це дозволяє наочно побачити, як утворюється кратер, які чинники впливають на його розміри та форму. За наявності доступу до цифрових ресурсів, школярі можуть за допомогою Google Earth або інших картографічних сервісів спробувати знайти реальні імпактні кратери на поверхні Землі, порівнюючи їхню будову та розміри. У якості інтерактиву можна провести гру або вікторину на розпізнавання кратерів, або організувати міні-дебати на тему «Чи можуть падіння метеоритів бути корисними для людства?». У такий спосіб формується не лише пізнавальний інтерес, а й критичне мислення.

Розгляд імпактних подій у контексті історії біосфери дозволяє інтегрувати тематику з біологією: зокрема, розглянути гіпотезу щодо зв'язку метеоритного удару з масовим вимиранням наприкінці крейдового періоду. Учні обговорюють роль імпактів як чинників глобальних змін клімату, потенційних катастроф, але також і як факторів, що могли сприяти виникненню життя – наприклад, шляхом доставлення води або органічних сполук на молоду Землю. У підсумку учні створюють постери, комікси або короткі есе, де узагальнюють отримані знання, висловлюють власні міркування про майбутні загрози та способи їх запобігання. Такий урок відповідає вимогам компетентнісного навчання, дозволяє інтегрувати різні предмети, стимулює інтерес до геонаук і дає змогу побачити Землю як частину космічного простору, у якому вона не є ізольованою – а постійно перебуває під впливом зовнішніх процесів.

4.2. Плани уроків з вивчення ударних кільцевих структур

Календарно-тематичне планування

№	Тема уроку	Дата	Час
1	Вступ до теми. Що таке ударні кільцеві структури?	03.05.2025	45 хв
2	Ударні кратери світу: де і як їх знаходити?	05.05.2025	45 хв
3	Наслідки падіння метеоритів та їхній вплив на екосистему	07.05.2025	45 хв
4	Ударні кратери та їхнє значення для вивчення історії Землі	10.05.2025	45 хв
5	Технічні аспекти вивчення ударних структур: від лабораторії до супутників	12.05.2025	45 хв

Урок 1: Вступ до теми. Що таке ударні кільцеві структури?

Тема: Ударні кратери – вікна в історію Землі

Тип уроку: Комбінований (вступний, пояснення нового матеріалу, закріплення) **Тривалість:** 45 хв **Мета:**

- Ознайомити учнів з поняттям "ударна кільцева структура".
- Пояснити механізм утворення ударних кратерів.
- Розвинути інтерес до геологічних явищ і процесів.

Обладнання:

- Мультимедійна презентація з фото кратерів.
- Коротке відео з NASA або National Geographic.
- Карта світу з позначеними кратерами.

Хід уроку:

1. Організаційний момент (2 хв)

- а. Привітання, перевірка присутності.
- б. Мотивація до теми: «Сьогодні ми поговоримо про те, як метеорити можуть змінити нашу планету. Хто з вас бачив кратер або чув про нього?»

2. Мотивація (5 хв)

- a. Запитання до учнів: «Що ви знаєте про метеорити? Як вони можуть впливати на Землю?»
- b. Виставлення на екран фотографій метеоритів та кратерів.

3. Вивчення нового матеріалу (20 хв)

a. Що таке метеорити та як вони взаємодіють із Землею?

- i. Метеорити — це космічні об'єкти, які можуть залишати слід у вигляді кратерів.

b. Утворення кратера:

- i. Метеорит падає на Землю, і його удар утворює ударну хвилю, яка призводить до деформації земної кори.
- ii. Різні типи ударних структур (простий, складний кратер, кільцевий вал).

c. Сутність ударних кільцевих структур:

- i. Роз'яснення, чому деякі кратери мають кільцеву форму, а інші — просто вдавнені ділянки.

4. Візуалізація (5 хв)

- a. Перегляд відео з NASA або National Geographic про падіння метеорита і утворення кратерів.

5. Закріплення (10 хв)

- a. Робота в парах: кожен учень отримує картку з поняттям (метеорит, кратер, ударна хвиля) і має дати його визначення.

6. Підсумок і домашнє завдання (3 хв)

- a. Домашнє завдання: знайти інформацію про один ударний кратер на Землі (включаючи його географічне положення, розміри) та підготувати презентацію на 5 слайдів або зробити плакат.

Урок 2: Ударні кратери світу: де і як їх знаходити?

Тема: Відомі кратери Землі: Чиксулуб, Берингер, Вулф-Крік

Тип уроку: Дослідницько-

практичний **Тривалість:** 45 хв **Мета:**

- Ознайомити учнів із прикладами найбільших та найвідоміших кратерів.
- Навчити користуватись картами, супутниковими знімками та онлайн-ресурсами.
- Розвинути навички пошуку та аналізу інформації.

Обладнання:

- Доступ до інтернету або підготовлені супутникові знімки (Google Earth).
- Плакати або картки з описами кратерів.

Хід уроку:

1. **Актуалізація знань (5 хв)**
 - a. Презентація учнів про домашнє завдання.
 - b. Огляд найвідоміших кратерів (Чиксулуб, Берингер, ВулфКрік).
2. **Вивчення нового матеріалу (15 хв)**
 - a. Опис великих ударних кратерів:
 - i. **Чиксулуб** (Мексика): викликало масове вимирання динозаврів.
 - ii. **Берингер** (США): один з найкраще збережених кратерів.
 - iii. **Вулф-Крік** (Австралія): менший, але цікавий для дослідження.
 - b. Як геологи ідентифікують ударні структури, використовуючи супутникові знімки, геофізичні дослідження.
3. **Практична частина (20 хв)**

а. Робота в групах: кожна група отримує опис кратера без назви і має знайти його на мапі або за допомогою супутникових знімків. Завдання — визначити місце розташування та описати географічні характеристики.

4. Презентація результатів (5 хв)

а. Кожна група представляє знайдений кратер та обговорює його важливість.

5. Підсумок уроку (5 хв)

а. Обговорення отриманих результатів, підкреслення значення цих структур для науки.

Урок 3: Наслідки падіння метеоритів та їхній вплив на екосистему

Тема: Ударні події та масові вимирання

Тип уроку: Дискусійно-

аналітичний **Тривалість:** 45 хв **Мета:**

- Пояснити екологічні й глобальні наслідки падіння великих метеоритів.
- Розглянути Чиксулубський кратер і його зв'язок з вимиранням динозаврів.
- Формувати вміння висловлювати та аргументувати власну думку.

Обладнання:

- Відео про масове вимирання.
- Схема "причина → наслідок".
- Картки з фактами.

Хід уроку:

1. Вступ (мотивація) (5 хв)

а. Цікаві факти про динозаврів та їхнє вимирання через падіння метеорита.

2. Новий матеріал (15 хв)

а. Опис події: падіння метеорита в районі Чиксулуб 66 млн років тому.

б. Види наслідків для екосистеми Землі: зміни клімату, знищення рослинності, масове вимирання тварин.

3. Групова робота / рольова гра (20 хв)

а. Учні поділяються на групи і виконують роль:

- i. Геологи
- ii. Палеонтологи
- iii. Екологи
- iv. Журналісти

Завдання — підготувати інтерв'ю або репортаж про падіння метеорита і його вплив.

4. Підсумок і рефлексія (5 хв)

а. Обговорення результатів, оцінка аргументів.

Урок 4: Ударні кратери та їхнє значення для вивчення історії Землі

Тема: Ударні кратери як джерела інформації про минулі події на Землі

Тип уроку: Лекція-дискусія
Тривалість: 45 хв

Мета:

- Ознайомити учнів з тим, як ударні кратери використовуються для вивчення історії Землі.
- Пояснити, як геологи використовують кратери для розуміння процесів, які відбувались на планеті в різні етапи її розвитку.
- Підвищити цікавість до геологічних досліджень та наукових методів.

Обладнання:

- Мультимедійна презентація.
- Картки з фактами та прикладами.
- Відео з досліджень науковців.

Хід уроку:

1. **Організаційний момент (2 хв)**
 - a. Привітання, перевірка присутності.
2. **Актуалізація знань (5 хв)**
 - a. Запитання до учнів: «Що можна дізнатися про планету за допомогою ударних кратерів?»
 - b. Огляд попередніх уроків.
3. **Вивчення нового матеріалу (20 хв)**
 - a. **Ударні кратери як архіви історії:**
 - i. Як ударні структури можуть зберігати сліди стародавніх змін на Землі (зміни клімату, вимирання видів).
 - ii. Приклад: кратер Чиксулуб та його зв'язок із масовим вимиранням динозаврів.
 - b. **Як геологи досліджують кратери:**
 - i. Використання різних методів дослідження (спутникові знімки, геофізичні дослідження).
 - ii. Аналіз мінералів та інших залишків після падіння метеорита.
 - c. **Підтвердження теорій через аналіз кратерів:**
 - i. Як відкриття нових кратерів дозволяє вченим підтверджувати чи спростовувати теорії щодо розвитку Землі.
4. **Обговорення (5 хв):**
 - a. Клас ділиться думками щодо того, як кратери можуть допомогти у вивченні кліматичних змін або вимирань.
5. **Практична частина (10 хв)**
 - a. Робота в групах. Завдання: кожна група отримує картку з описом певного кратера (наприклад, Чиксулуб, Вулф-Крік) і має представити, як цей кратер міг би допомогти в дослідженні історії Землі.

6. Підсумок уроку та домашнє завдання (3 хв)

- а. Домашнє завдання: підготувати дослідження про будь-який інший ударний кратер (інформація, що він допомагає з'ясувати щодо історії Землі).

Урок 5: Технічні аспекти вивчення ударних структур: від лабораторії до супутників

Тема: Методи дослідження ударних кратерів

Тип уроку: Практично-лабораторний **Тривалість:** 45 хв **Мета:**

- Ознайомити учнів з сучасними методами вивчення ударних структур.
- Показати використання різних наукових підходів у вивченні метеоритних кратерів (лабораторні дослідження, супутникові знімки, геофізичні методи).
- Розвинути навички роботи з науковими джерелами.

Обладнання:

- Доступ до інтернету для перегляду наукових статей.
- Комп'ютери або планшети для пошуку супутникових знімків.
- Лабораторне обладнання (за потреби) для демонстрації аналізу метеоритів.

Хід уроку:

1. Організаційний момент (2 хв)

- а. Привітання, перевірка присутності.

2. Вступ до теми (5 хв)

- а. Коротке введення: «Сьогодні ми поговоримо про те, як науковці вивчають ударні кратери. Які методи використовуються для дослідження таких структур?»

3. Вивчення нового матеріалу (20 хв)

- а. Лабораторні дослідження:

- i. Як геологи використовують лабораторні дослідження метеоритів та матеріалів з кратерів.
 - ii. Приклади методів: спектрометрія, аналіз складу порід.
 - b. **Супутникові знімки та геофізичні методи:**
 - i. Використання супутників для отримання точних карт кратерів.
 - ii. Як геофізичні методи дозволяють створювати тривимірні моделі ударних структур.
 - c. **Сучасні інструменти дослідження:**
 - i. Приклади нових технологій, які використовуються для вивчення метеоритних кратерів.
4. **Практична частина (10 хв)**
- a. Робота в групах: кожна група має знайти супутникові знімки відомого кратера (можна використати Google Earth або інші ресурси) та зробити висновки про те, як ці знімки допомогли вивчити кратер.
5. **Презентація результатів (5 хв)**
- a. Кожна група представляє свою роботу і пояснює, який метод дослідження був використаний.
6. **Підсумок уроку та домашнє завдання (3 хв)**
- a. Домашнє завдання: підготувати невелике дослідження (2-3 сторінки) на тему «Як супутникові технології допомагають вивчати ударні кратери».

ВИСНОВКИ

Просторовий діапазон трансформації геологічних тіл у земній корі під впливом ударів малих і великих космічних тіл надзвичайно великий – від деформацій кристалічних решіток окремих мінералів до формування гігантських кільцевих структур, які подекуди сягають кількох сотень кілометрів в поперечнику. На різноманітних картографічних зображеннях як у середньому, так і дрібному масштабах, ці імпактні концентричні структури, незважаючи на незначну поширеність, привносять певний внесок у розуміння геологічної будови і розвитку окремих територій нашої планети. Незважаючи на специфічний характер їх генезису, діагностика більшості таких утворень, базована на структурно-речовинних ознаках, і достатньо надійною, що загалом визначає можливість і навіть необхідність відображення цих об'єктів на тематичних фізико-географічних і геологічних прикладних картах, тим пача що імпактні концентричні структури досить часто є своєрідними мінералогенічним центрами. Методи такого картографування відрізняються певною особливістю і, на жаль, ще недостатньо розроблені і поширені серед практикуючих геологів, що іноді призводить до інтерпретації однохначно космогенних кільцевих структур до вулcano-тектонічних, тектонічних чи, навіть, до появи помилково виділених об'єктів нібито позаземного походження. І те й інше веде до часом невірної оцінки перспектив окремих територій нашої планети щодо розробки найрізноманітніших корисних копалини.

На території України під час вивчення кільцевих ударних структур, були виявлені алмази в гірських породах Іллінецького кратера, а дещо пізніше подібні утворення були виявлені і в Західній, Оболонській та інших імпактних структурах. Найкраще вивчено геологічну будову й алмазоносність Західної ударної кільцевої структури. На території південно-західної окраїни Українського кристалічного щита пошуки точкових родовищ розсипних алмазів періодично здійснюються ще з кінця 1960-тих років. Головними результатами виконання цих робіт стало підтвердження алмазоносності Зеленоярського і Тарасівського титан-цирконієвих розсипів, Іллінецької і

Білилівської ударних кільцевих структур, а також значне поширення по всій території, кі зазнали ударного метаморфізму дрібних зерен алмазів і їхніх супутніх мінералів.

Знайти докази періоду Важкого метеоритного бомбардування на Землі завдання надзвичайно складне. Наша планета постійно змінює свою поверхню завдяки геодинамічним й ерозійним процесам. Тому віднайти на ній чіткі сліди настільки древніх подій, які можуть привідкрити для вчених таємницю про вік таких катастроф, що відбулися, дуже непросто. Проте на інших планетах, наприклад на Меркурії, Марсі та інших землеподібних планетах або крижаних місяцях у зовнішній Сонячній системі ці сліди добре збереглися. І вченим залишається лише вивчати кратери на цих тілах. Та варто зазначити, що такий метод датування вельми неточний. Але у розпорядженні вчених є й інший варіант – можна використовувати метод непрямого визначення геологічного віку. Наприклад, якщо зробити радіоізотопне датування гірських порід на тілах, які зберігають чистіші записи, ніж, скажімо, подібні на Землі. І такими доказами якраз і є метеорити й астероїди, або їхні частини, які падають на Землю, і сприяють розвитку таких досліджень.

Вимирання динозаврів наразі напряму пов'язують із формуванням ударної кільцевої структури Чиксулуб. Ця катастрофа призвела до глобальної деградації рослинних угруповань, що підтверджується різким зниженням концентрації пилку у тогочасних гірських осадових гірських породах і яка загалом призвела до незворотного порушення екологічних зв'язків. На окремих територіях густі тропічні ліси змінилися на папоротеві савани. Масштаби деградації рослинності підсилили оло і подальша довголітня ядерна зима і глобальні пожежі. За розрахунками, від одного до трьох років на Землі було так темно, як у сучасну місячну ніч, що завдало колосальної шкоди фотосинтезуючим організмам. Загибель рослинності привела до майже повного знищення кормової бази трав'яних тварин. Про це додатково свідчить і те, що жодна з рослиноїдних видів птахів або ссавців не пережили катастрофу. Але найбільше постраждали динозаври.

Першими вимерли травоїдні динозаври, пристосовані до харчування певними типами рослинності. Дещо пізніше слідом за ними вимерли великі і середнього розміру хижаки. Непоганий шанс пережити катастрофу був у дрібних оперених тероподів. Та, очевидно, ссавці і птахи такого шансу їм не залишили. Самим ссавцям також довелося не легко: за деякими даними, вимерло до 93% усіх їх видів. Схожа ситуація була і у птахів, окремим видам яких вдалося вижити завдяки всеїдності.

Імпактні структури – це особливі геологічні утворення, які формуються внаслідок падіння метеоритів на поверхню Землі. Важливо, щоб учні зрозуміли, що це не просто випадкові кратери, а свідки масштабних природних процесів, які мають величезне значення для історії нашої планети. Під час зіткнення небесного тіла з Землею відбувається вибухоподібне вивільнення енергії, що не лише формує сам кратер, але й змінює структуру і властивості гірських порід у зоні удару. Для школярів це можливість на практиці уявити силу природи і побачити, як події у космосі безпосередньо впливають на поверхню Землі. Відомі імпактні кратери, такі як Чіксулуб у Мексиці, Вредефорт у Південній Африці та Берингер у США, а також наші вітчизняні – Бовтиська структура та Іллінецький кратер, є відмінними прикладами для демонстрації учням реальних доказів цих процесів. Вони можуть стати основою для проєктної роботи, досліджень або екскурсій, що стимулюють допитливість і формують науковий світогляд. Учням важливо усвідомити, що метеоритні удари можуть мати далекосяжні наслідки – від глобальних змін клімату та масових вимирань до створення сприятливих умов для появи нових форм життя. Такий зв'язок між астрономічними подіями і розвитком біосфери допомагає формувати цілісне розуміння природних явищ і усвідомлення взаємозалежності у природі. Вивчення імпактних структур сприяє розвитку критичного мислення, умінню аналізувати комплексні природні процеси, а також розвиває міждисциплінарні зв'язки між геологією, астрономією та екологією. Для педагогів ця тема є унікальною можливістю зацікавити учнів наукою, залучити їх до активної пізнавальної діяльності через експерименти, роботу з картами, інтерактивні ігри та обговорення, що стимулює розвиток навичок комунікації, співпраці та

наукового мислення. Таким чином, вивчення імпактних структур не лише розширює знання про Землю, а й допомагає формувати цінні компетентності, необхідні в сучасному світі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вальтер А.А., Гуров, Е.П. (1979). Ударный метаморфизм ударное плавление – уникальные геологические процессы, связанные с образованием взрывных метеоритных кратеров. *Метеоритные структуры на поверхности планет*. 81–98.
2. Вальтер, А.А., Брянский, В.П., Рябенко, В.А., Лазаренко, Е.Е. (1976). О взрывной (метеоритной) природе Зеленогайской структуры на Украинском щите. *Докл. АН СССР*. 229(1), 160–162.
3. Вальтер, А.А., Рябенко, В.А. (1973). Петрографические признаки ударнометеоритного происхождения Ильинецкой структуры (Винницкая область). *Геол. журн.* 6(153), 142–144.
4. Вальтер, А.А., Рябенко, В.А. (1977). *Взрывные кратеры Украинского щита*. Киев: Наук. думка.
5. Вальтер, А.А., Гуров, Е.П., Рябенко, В.А. (1977). Оболонский метеоритный кратер на северо-восточном склоне Украинского щита. *Докл. АН СССР*. 232(1), 170–173.
6. *Выявление докембрийских импактных структур методы исследования обломочных импактитов: Методическое руководство*. (1998). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
7. Гуров, Е.П., Гурова, Е.П. (1991). *Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур*. Киев: Наук. Думка.
8. Гуров, Е.П., Хмельницкий, А.Ф. (1996). Распространение и сохранность выбросов из импактных структур на примере кратеров Болтышского и Экремен. *Астроном. вестн.*, 30, 19–24.
9. Гуров, Е.П., Гожик, П.Ф. (2015). Болтышская импактная структура и мел-палеогеновый рубеж. *Геол. журн.*, 3(352), 7–16.
10. Гуров, Е.П., Гожик, П.Ф. (2006). *Импактное кратерообразование в истории Земли*. Киев: ИГН НАН Украины.

11. Гуров, Е.П., Гурова, Е.П., Ракицкая, Р.Б., Ямниченко, А.Ю. (1995). Расплавные импактиты Оболонской астроблемы. *Доп. НАН України*. 8, 81–83.
12. Гуров, Е.П., Гожик, П.Ф., Гладун, В.В., Багрий, И.Д. (2011). Сравнительная характеристика Оболонского кратера на Украинском щите и нефтегазоносной импактной структуры Эймс на Канадском щите. *Геол. журн.* 1(334), 14–20.
13. Гуров, Е.П., Николаенко, Н.Ф., Шевчук, Е.А., Ямниченко, А.Ю. (2018). Каменецкая импактная структура на Украинском щите. *Доп. НАН України*. 1, 53–59.
14. *Геология астроблем*. (1980). Ленинград: Недра.
15. Довгалюк, І.А. (2017). Особливості унікальної геологічної структури Іллінецького метеоритного кратеру і його промислове освоєння. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 50, 48–56.
16. Масайтис, В.Л. (1980). *Геологическая карта Попигаевского метеоритного кратера: 1 : 200 000*. Ленинград: Аэро-геология.
17. Масайтис, В.Л., Певзнер, Л.А. (1999). *Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре*. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
18. Иванов, Б.А. (2005). Удары космических тел как геологический фактор. *Катастрофические воздействия космических тел*, 118–150.
19. *Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты России масштаба 1:1 000 000 (третьего поколения)*. (2003). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
20. *Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов. Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород МСГН*. (1997). Москва: Недра.
21. Краюшкин, В.А., Гуров, Е.П. (1989). К перспективе поисков нефти и газа в астроблемах Украины. *Геол. журн.* 1 (244), 17–27.
22. Кривошеина, Г.Г. (2019). Московские естественно-научные общества и их президенты: М.А. Мензбир и А.Н. Северцов. In *Институт истории*

естествознания—и—техники им. СИ Вавилова. Годичная научная конференция, 494-497.

23. Масайтис, В.Л., Данилин, А.Н., Карпов, Г.М., Райхлин, А.И. (1976). Карлинская, Оболонская и Ротмистровская астроблемы в Европейской части СССР. *Докл. АН СССР.*, 230(1), 174–177.
24. Масайтис, В.Л. (1979). Методы изучения астроблем. *Метеоритные структуры на поверхности планет*, 53–64.
25. Масайтис, В.Л. (2004). Импактное кратерообразование. *Планета Земля: Энциклопед. справочник. Том «Тектоника и геодинамика»*, 221–226.
26. Масайтис, В.Л. (2008). Минерагенические следствия притока космического вещества. *Планета Земля: Энциклопед. справочник. Том «Минерагения»*, 249–260.
27. Масайтис, В.Л., Данилин, А.Н., Мащак, М.С., Райхлин, А.И., Селивановская, Т.В., Шаденков, Е.М. (1980). *Геология астроблем*. Ленинград: Недра.
28. Масайтис, В.Л., Кириченко, В.Т., Мащак, М.С., Федорова, И.Г. (2013). Коренные месторождения и россыпи импактных алмазов Попигайского района (Северная Сибирь). *Региональная геология и металлогения*, 54, 89–98.
29. Мелощ, Г. (1994). *Образование ударных кратеров: геологический процесс*. Москва: Мир.
30. *Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третьего поколения)*. (2010). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
31. *Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:20 000 (второго издания)*. (2010). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
32. Никольский, А.П., Наумов, В.П., Мащак, М.С., Масайтис, В.Л. (1982). Ударно-метаморфизованные породы и импактиты Терновской

- астроблемы (Северное Криворожье). *Проблемы регионального и ударного метаморфизма*, 238, 132–142.
33. *Петрографический кодекс. Издание третье.* (2009). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
34. Райхлин, А.И., Селивановская, Т.В. (1979). Брекчии и импактиты взрывных метеоритных кратеров и астроблем. *Метеоритные структуры на поверхности планет*, 65–80.
35. Романюк, П.М., Василенко, Є.С., Корнієнко, А.І., Ніколаєнко, М.А. (2006). Кам'янецька структура – нова палеовулканічна споруда на Українському щиті: результати попереднього вивчення та порівняльна характеристика. *Зб. наук. пр. УкрДГРІ*, 32–45.
36. *Стратиграфический кодекс. Издание третье.* (2006). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.
37. *Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов.* (1983). Ленинград: Недра.
38. Садовский, М.А. (1983). *Ударные кратеры на Земле и планетах.* Москва: Наука.
39. Шкловский, И. (2019). *Вселенная, жизнь, разум.* Litres.
40. Baratoux, D., Reimold, W.U. (2016). The current state of knowledge about shatter cones: Introduction of special issue. *Meteoritics and Planet. Sci.* 51(8), 1389–1434.
41. Buchner, E. (2018). An approach towards the projectile trajectory during the oblique Steinheim meteorite impact by the interpretation of structural crater features and the distribution of shatter cones. *Geological Magazine*, 155(1), 193–202.
42. Buchner, E., Schmieder, M. (2018). Rare metals on shatter cone surfaces from the Steinheim Basin (SW Germany)–remnants of the impacting body?. *Geological Magazine*, 155(6), 1205–1229.
43. Christou, E. V., Bach, W. (2019). Post-Impact Habitability at the Chicxulub Crater. *LPICo*, 82(2157), 6100.

44. Cohen-Zada, A. L., Maman, S., & Blumberg, D. G. (2019). Comparison of remote sensing observations of planetary wind streaks. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111342.
45. Eitel, M., Gilder, S. A., Spray, J., Thompson, L., Pohl, J. (2016). A paleomagnetic and rock magnetic study of the Manicouagan impact structure: Implications for crater formation and geodynamo effects. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(2), 436–454.
46. Ernst, C. M., Cho, Y., Morota, T., Barnouin, O. S., Hirata, N., Sugita, S., ... & Honda, R. (2018). The distribution of crater morphologies across Ryugu: Implications for seismic shaking. *AGUFM, 2018*, P33C–3857.
47. Fourie, F. D., Huber, M. S., & Kovaleva, E. (2019). Geophysical characterization of the Daskop granophyre dyke and surrounding host rocks, Vredefort impact structure, South Africa. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(7), 1579–1593.
48. French, B.M., Koeberl, C. (2010). The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: what works, what doesn't, and why. *Earth-Sci. Rev.* 98, 123–170.
49. Grieve, R.A.F., Masaitis, V.L. (1994). The economic potential of terrestrial impact craters. *Intern. Geol. Rev.* 36, 105–151.
50. Grieve, R.A.F., Reni, G., Gurov, E.P., Ryabenko, V.A., (1987). The melt rocks of the Boltysh impact crater, Ukraine, USSR. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 96, 56–62
51. Gu, H. T. (2020). Ecological Mechanism of Dinosaur Extinction. *American International Journal of Biology and Life Sciences*, 2(1), 1–5.
52. Guppy, D. J., Matheson, R. S. (1950). Wolf Creek meteorite crater, Western Australia. *The Journal of Geology*, 58(1), 30–36.
53. Gurov, E.P., Ryabenko, V.A. (1984). Excursion 098: Impact structures of the Ukrainian Shield. *International Geological Congress, XXVII Session. Ukrainian Soviet Socialist Republic. Consolidated Guidebook*, 143–159.

54. Gurov, E.P., Schekhunova, S.B., Permyakov, V.V. (2015). Accessory and opaque minerals in impact melt rocks of the Boltysh impact structure, Ukraine. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(6), 1139–1155.
55. Gurov, E.P., Kelley, S.P., Koeberl, C. (2003). Ejecta of the Boltysh impact crater in the Ukrainian Shield. *Impact Markers in the Stratigraphic Record*. Eds. C. Koeberl, F.C. Martinez-Ruiz. Berlin: Springer, 179–202.
56. Gurov, E.P., Kelley, S.P., Koeberl, C., Dykan, N. (2006). Sediments and impact rock filling the Boltysh impact crater. In: *Geological processes associated with impact event*. Eds. C. Cockel, C. Koeberl, Gilmour. Berlin: Springer, 335–53.
57. Gurov, E.P., Gurova, E.P., Chernenko, Y.A., Yamnichenko, A.Y. (2009). The Obolon impact structure, Ukraine, and its ejecta deposits. *Meteoritics & Planetary Science*. 44(3), 389–404.
58. Gurov, E.P., Nikolaenko, N.A., Shevchuk, E.A., Yamnichenko, A.Yu. (2017). Kamenetsk – a new impact structure in the Ukrainian Shield. *Meteoritics & Planetary Science*, 51, 2461–2469.
59. Hoersch, B., Ramoino, F., Gascon, F., & Desnos, Y. L. (2019). Observation from Space: Optical Systems. In *Encyclopedic Atlas of Terrestrial Impact Craters*, 51–57.
60. Jaret, S. J., Kah, L. C., & French, B. M. (2009). Petrographic Investigation of Ejecta from the Tenoumer Impact Crater, Mauritania. *LPI*, 1281.
61. Jolley, D., Gilmour, I., Gurov, E., Kelley, S., Watson, J. (2010). Two large meteorite impacts at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Geology*, 38, 835–838.
62. Kaiho, K., Oshima, N. (2017). Site of asteroid impact changed the history of life on Earth: the low probability of mass extinction. *Scientific reports*, 7(1), 1–12.
63. Kelley, S.P., Gurov, E.P. (2002). Boltysh, another end Cretaceous impact. *Meteoritics & Planetary Sciences*, 37, 1031–1043
64. King, D.T., Petruny, L.W. (2003). Application of stratigraphic nomenclature to terrestrial impact derived and impact related materials. *Impact Markers in the Stratigraphic Records*, 41–64.

65. Koeberl, C. (1998). Identification of meteoritic component in impactites. *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects. Geol. Soc.* 140. 133–153.
66. Kovaleva, E., Zamyatin, D. A., & Habler, G. (2019). Granular zircon from Vredefort granophyre (South Africa) confirms the deep injection model for impact melt in large impact structures. *Geology*, 47(8), 691–694.
67. Lambert, P., Lebreton, J.P. (2019). The Rochechouart impact geosite for research, education and training. *EPSC, 2019*, EPSC-DPS2019.
68. Loh, Y. S. A., Yidana, S. M., Banoeng-Yakubo, B., Sakyi, P. A., Addai, M. O., & Asiedu, D. K. (2016). Determination of the mineral stability field of evolving groundwater in the Lake Bosumtwi impact crater and surrounding areas. *Journal of African Earth Sciences*, 121, 286–300.
69. Lyons, S. L., Karp, A. T., Bralower, T. J., Grice, K., Schaefer, B., Gulick, S. P., ... & Freeman, K. H. (2020). Organic matter from the Chicxulub crater exacerbated the K–Pg impact winter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(41), 25327–25334.
70. Masaitis, V.L. (1989). The economic geology of impact craters. *Intern. Geol. Rev.* 31, 922–933.
71. Masaitis, V.L. (2005). Morphological, structural and lithological records of terrestrial impacts: an overview. *Australian J. of Earth Sci.* 52(4/5), 509–528.
72. Mitchell, C. D., James, P. B. (2020). A Gravity Survey of Barringer Crater: Data Reduction and Preliminary Analysis. *LPI*, (2326), 2868.
73. O'Neill, C., Heine, C. (2005). Reconstructing the Wolfe Creek meteorite impact: deep structure of the crater and effects on target rock. *Australian Journal of Earth Sciences*, 52(4-5), 699–709.
74. O'Neill, C., Marchi, S., Zhang, S., & Bottke, W. (2017). Impact-driven subduction on the Hadean Earth. *Nature Geoscience*, 10(10), 793–797.
75. Patil, M. U. (2018). Disintegrated Comet Trail in Southern Tibet. *Open Journal of Geology*, 8(12), 1102–1112.
76. Rioual, P., Peng, Y., Jin, Z., Lami, A., Marchetto, A., Mischke, S., ... & Yang, X. (2020). Re-examination of *Cyclotella lacunarum* Hustedt (Bacillariophyta) from lakes in the Pamir Mountains, western China, and description of two

- similar *Lindavia* taxa collected from Tajikistan and Nepal. *Diatom Research*, 35(1), 63–84.
77. Sakamoto, M., Benton, M. J., & Venditti, C. (2016). Dinosaurs in decline tens of millions of years before their final extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), 5036–5040.
 78. Sanful, P. O., Aikins, S., Frempong, E., Hall, R. I., & Hecky, R. E. (2017). Temporal dynamics and relationship between climate, limnological variables and zooplankton composition in climate-sensitive Lake Bosumtwi, Ghana. *African Journal of Aquatic Science*, 42(1), 21–33.
 79. Schultze, D. S., Jourdan, F., Hecht, L., Reimold, W. U., & Schmitt, R. T. (2016). Tenoumer impact crater, Mauritania: impact melt genesis from a lithologically diverse target. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(2), 323–350.
 80. Shumilova, T. G., Isaenko, S. I., & Zubov, A. A. (2020). Topographic View Through Drone Observations at the Giant Kara Meteorite Crater, Pay-Khoy, Russia. *LPI Contributions*, 2251, 2047.
 81. Shumilova, T. G., Lutoev, V. P., Isaenko, S. I., Kovalchuk, N. S., Makeev, B. A., Lysiuk, A. Y., ... & Ernstson, K. (2018). Spectroscopic features of ultrahigh-pressure impact glasses of the Kara astrobleme. *Scientific reports*, 8(1), 1–11.
 82. Silva, D., Lana, C., & de Souza Filho, C. R. (2016). Petrographic and geochemical characterization of the granitic rocks of the Araguainha impact crater, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(3), 443–467.
 83. Simpson, S. L., Boyce, A. J., Lambert, P., Lindgren, P., & Lee, M. R. (2017). Evidence for an impact-induced biosphere from the $\delta^{34}\text{S}$ signature of sulphides in the Rochechouart impact structure, France. *Earth and Planetary Science Letters*, 460, 192–200.
 84. Staffieri, S., Coletta, A., Battagliere, M. L., Virelli, M. (2019). Wolfe Creek, Australia. In *Encyclopedic Atlas of Terrestrial Impact Craters*, 315–318.
 85. Stöffler, D., Grieve, R.A.F. (2007). Impactites: Chapter. Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological Sciences, 82–92.

86. Suorineni, F. T. (2020). The Sudbury Basin stress tensor—a critical review. *CIM Journal*, 11(3), 198–212.
87. Thompson, L. M., Spray, J. G. (2017). Dynamic interaction between impact melt and fragmented basement at Manicouagan: The suevite connection. *Meteoritics & Planetary Science*, 52(7), 1300–1329.
88. Tian, Z., Wisdom, J. (2020). Vertical angular momentum constraint on lunar formation and orbital history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(27), 15460–15464.
89. Valter, A.A., Moseychuk, M.A., Kalashnik, A.A. (1997). The new interpretation of structure of Zeleny Gay astrobleme on Ukrainian Shield. *Vernadsky Institute – Microsymposium 26, October 13–17. Moscow*, 127–128.
90. Valter, A., Plotnikova, L. (2003). Biostratigraphic indications of the age of the Boltys impact crater, Ukraine. *Impact markers in the Stratigraphic record*. Eds. C. Koeberl, F. Martinez-Ruiz. Berlin: Springer, 163–178.
91. Vidmachenko, A.P. (2016). Impact craters at falling of large asteroids in Ukraine. In *XVIII International scientific conference Astronomical School of Young Scientists, the program and abstracts*. 27–30.
92. Walton, G., Diederichs, M., Punkkinen, A., Whitmore, J. (2016). Back analysis of a pillar monitoring experiment at 2.4 km depth in the Sudbury Basin, Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 33–51.
93. Wulf, G., & Kenkmann, T. (2018). Barringer Impact Crater, AZ, USA: A Terrestrial Rampart Crater?. *LPICo*, 81(2067), 6284.
94. Yelisseyev, A. P., Afanasiev, V. P., Panchenko, A. V., Gromilov, S. A., Kaichev, V. V., & Saraev, A. A. (2016). Yakutites: Are they impact diamonds from the Popigai crater?. *Lithos*, 265, 278–291.
95. Yelisseyev, A. P., Afanasyev, V. P., & Gromilov, S. A. (2018). Yakutites from the Popigai meteorite crater. *Diamond and Related Materials*, 89, 10–17.
96. Yokoyama, E. (2018). Trama magnética do núcleo soerguido da estrutura de impacto de Araguinha (MT/GO). *Brazilian Journal of Geophysics*, 27(3), 512.