

5.3.3. *Метаморфізм*

Гірські породи під впливом глибинних ендегенних факторів, таких як: висока температура, тиск, гарячі розчини, що містять іони натрію, калію, кальцію, фтору, бору та сірки, а також вода і вуглекислота, зазнають певних перетворень. Цей процес називається *метаморфізмом* (грецк. “*метаморфозис*” – *перетворення*), а породи, які виникають в результаті його проявлення – *метаморфічними породами*. Вони утворюються за рахунок перетворень вже існуючих осадових, магматичних, а також метаморфічних утворень і складають третій головний клас гірських порід.

Метаморфічні перетворення осадових порід є продовженням тих перетворень, які вони зазнали на стадіях метагенезу, катагенезу та епігенезу (див. розділ 5.2.11). Межа між катагенезом і метаморфізмом є дуже умовною. За даними Г.Вінклера метаморфічні перетворення в породах наступають при температурах 150-200 °С. М.Б.Вассоевич вважає, що температурна межа початку метаморфізму становить 300-350 °С. Мінералогічним підтвердженням початку метаморфізму є виникнення групи нових мінералів за рахунок перетворення вже існуючих. Так, наприклад, замість *каолініту* з'являється *дікіт*, *антрацит* переходить в *графіт*, а найбільш раннім з типових метаморфічних мінералів вважається *ломонтин*, який належить до водних алюмосилікатів кальцію з групи цеолітів.

Головним фактором метаморфізму є підвищення температури, яке визначається геотермічним градієнтом, який являє собою функцію теплового потоку і теплопровідності порід. Його величина не постійна і змінюється в межах від 6 до 150°С на 1 км. В зв'язку з цим і перехід від катагенезу до метаморфізму також може відбуватися на різних глибинах – від перших кілометрів до 15 км і навіть більше. Найменшою ця глибина є в межах осьових зон серединно-океанічних хребтів, де окрім високого теплового потоку метаморфізму сприяє циркуляція по тріщинах нагрітої до температури 300-350 °С морської води.

Підвищення температури призводить до заміни катагенезу метаморфізмом, а в подальшому, якщо процес підвищення температури продовжується, метаморфізм також поступово може змінюватися частковим і повним плавленням порід. Цей процес називається *анатексисом* (грецьк. “*тексис*” – плавлення, “*ана*” – *вища ступінь*). Він знаменує найвищу фазу метаморфізму і друга його назва *ультраметаморфізм*.

Нижньою термобаричною межею при якій починають відбуватися ультраметаморфічні перетворення є температури 680-700 °С і тиск 2-4 кбар. Відповідно, такі умови можуть мати місце тільки на глибинах не менше 6-8 км. Проте, породи основного складу багаті фемічними компонентами, такими як Fe і Mg, починають плавитися тільки при температурі близькій до 1000 °С. Це значно розширює температурний діапазон проявлення процесів метаморфізму від 150-200 °С до 700-1000 °С, а тиск при цьому змінюється від 2-3 до 10-15 кбар.

При метаморфізмі змінам підлягають структурні, текстурні особливості порід та мінеральний склад. Такі перетворення виражаються, перш за все, в перекристалізації порід: дрібнозерниста структура змінюється крупнозернистою, зникає пористість і породи ущільнюються. Прикладом можуть бути кварцові пісковини, вапняки та доломіти. Перші в процесі метаморфізму перетворюються в *кварцити*, а другі та треті, відповідно, в *кальцитові* та *доломітові мармури*. В глинистих та туфогенних породах, а також в мергелях при метаморфізмі розвивається сланцюватість, тобто паралельна структура, яка надає породі властивостей розщеплюватися на тонкі пластинки.

Перетворення мінерального складу порід в процесі метаморфізму призводить до зникнення одних та утворення інших мінералів, більш стійких до нових фізико-хімічних умов. При цьому зміна мінерального складу може відбуватися без зміни хімізму породи в закритій системі. Такий процес називається *ізохімічним метаморфізмом*. Проте, можливі випадки зміни хімічного складу породи завдяки приносу та виносу речовини у відкритій системі, в такому випадку слід говорити про *алохімічний метаморфізм*. Якщо цей вид метаморфізму

відбувається без зміни об'єму породи, він називається *метасоматозом*. При цьому явищі відбувається обмін іонами між породами, які підлягають метасоматозу та вміщуючими утвореннями.

В природі спостерігається два основних типи метаморфізму: локальний, який поділяється на контактний та дислокаційний, і регіональний.

Контактний метаморфізм пов'язаний з вкорінням у відносно холодні породи верхньої частини земної кори гарячої магми, яка застигає у вигляді інтрузивних масивів – плутонів. У даному випадку метаморфічні зміни відбуваються на межі магми та порід в які вона вкорінюється. Чинниками метаморфізму виступають висока температура та флюїди, джерелом яких є сама магма. Ділянка вміщуючих порід, яка зазнала метаморфічних змін, називається *ореолом контактно-метаморфізованих порід*. Його розміри залежать від розмірів магматичного тіла (у дайок він складає декілька метрів, а у великих батолітів досягає 3-5 км), глибини застигання плутону (ширина ореола зростає з глибиною), та складу магми (в плутонах, складених кислими породами, ширина ореолу більша в порівнянні з магматичними тілами основного та ультраосновного). Здебільшого ореол контактно-метаморфічних змін співпадає з зоною екзоконтакту (рис. 5.85).

У тих випадках, коли метаморфічні зміни вміщуючих порід відбуваються не тільки завдяки температурному фактору, а підсилюються ще й гарячими розчинами та газами, які виділяються з магми, контактний метаморфізм переходить у контактно-метасоматичний метаморфізм. Він супроводжується привнесом SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO та інших мінералів.

Основними продуктами контактного метаморфізму є *роговики, скарни та грейзени*. Перші утворюються завдяки метаморфічних перетворень піщано-глинистих порід, другі є результатом вкоріння магми в карбонатні відклади, а треті формуються в результаті пневматоліто-гідротермальних змін кислих порід.

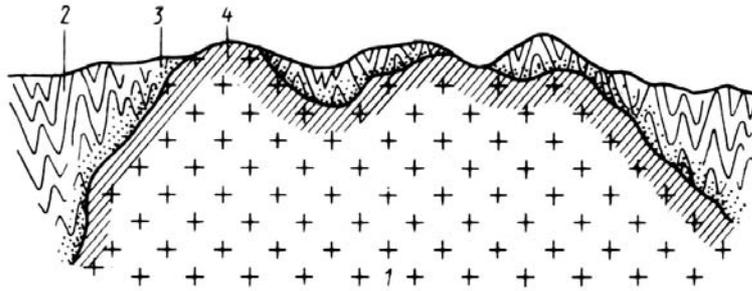


Рис. 5.85. Схема будови гранітного плутону
 1 – граніти; 2 – вміщуючі породи; 3 – зона екзоконтакту і метаморфічних змін вміщуючих порід (ореол контактово-метаморфізованих порід); 4 – зона ендоконтакту.

Дислокаційний метаморфізм, який ще називають **динамометаморфізмом**, відбувається під впливом локального підвищення спрямованого тиску, або стресу в зонах тектонічних розломів, тобто це прирозломний метаморфізм. Його проявлення призводить до зміни структури гірських порід. Старі структури руйнуються і виникають нові з чітко вираженим орієнтуванням мінералів. Крихкі мінерали зазнають перетирання та розвальцювання, а пластичні деформуються.

Зовнішнім вираженням дії динамометаморфізму на породу є сланцюватість, або кристалізаційна сланцюватість, яка підкреслюється певним орієнтуванням мінеральних зерен. Розрізняють також площинну, лінійну та лінзоподібну сланцюватість.

Динамометаморфізм може також проявлятися в руйнуванні мінералів і подрібненні породи. Такий тип перетворень первинних порід отримав назву **катакластичного динамометаморфізму**, а гірські породи, які несуть сліди подрібнення, називаються **катакластичними**, або **катаклазитами**. При сильному подрібненні та перетеранні дрібних часток утворюються розсланцьовані породи, які називаються **мілонітами**, а весь комплекс гірських порід, які

зазнали впливу динамометаморфізму, об'єднують під загальною назвою *тектоніти*.

Тектоніти здебільшого характеризуються низькими показниками фізико-механічних властивостей і легко руйнуються, в зв'язку з чим у місцях їх поширення є вірогідність виникнення обвалів, осувів, тощо.

До локального метаморфізму можна віднести також і **ударний метаморфізм**, спричинений різким підвищенням температури і тиску в гірських породах верхньої частини земної кори зумовленим падінням на її поверхню космічних тіл. При падінні метеорита за надзвичайно короткий час (менше 0,1 секунди) виділяється велика кількість кінетичної енергії. Ця енергія тратиться на механічні (стискання і подрібнення) і теплові (розплавлення та випаровування) перетворення речовини порід, які зазнали впливу ударної хвилі. Такі породи називаються *лішею*. В напрямку від епіцентру до периферії хвилі відбувається поступове зниження тиску та температури яке, відповідно, відображається в якісних і кількісних перетвореннях речовини, що носять зональний характер. Виділяються наступні зони: 1) зона випаровування, де тиск досягає 10^3 - 10^4 кбар, а температура 10^4 °C; 2) зона розплавлення, яка характеризується тиском $0,6 \cdot 10^3$ кбар на зовнішній межі та температурою – $1,5 \cdot 10^3$ °C; 3) зона поліморфних переходів, де тиск становить 100 кбар, а температура 1000 °C; 4) зона інтенсивного подрібнення гірських порід.

Метаморфічні породи, які утворюються в трьох останніх зонах, називаються *імпактітами* (англ. "імпакт" – ударна дія). Залежно від того переміщені породи або ні, а також від характеру перетворень серед імпактітів розрізняють: *катаклазити* – не переміщені продукти зі слідами подрібнення; *ударні брекчії* – сильно подрібнені породи; *псевдотахіліти* – не переміщені породи, які зазнали часткового плавлення з утворенням скла, та *тагаміти* – переміщені переплавленні породи, в складі яких присутнє скло. Змішані та переміщені продукти подрібнення називаються *зювітами*.

Тагаміти являють собою лавоподібні склуваті породи, які на 10-20% складаються з дрібних уламків вміщуючих порід занурених у склувату масу, яка є продуктом розплавлення порід мішені.

Зювіти – це брекчії, складені з уламків розкладеного скла та продуктів подрібнення порід мішені.

Однією з особливостей ударного метаморфізму, яка має вирішальне значення при встановленні метеоритної природи кратерних структур, є наявність новоутворених мінералів, породжених надвисокими, не характерними для земної кори, тисками. Такими “гіпербаричними” мінералами є поліморфні модифікації кремнезему — *коесит* та *стишовіт*, а також *алмаз* і *лонсдейліт*. Два останніх є високобаричними модифікаціями вуглецю.

Серед зазначених вище типів метаморфізму найважливіша роль у формуванні вигляду земної кори належить **регіональному метаморфізму**. На відміну від локального, який поширюється на обмежену територію, він охоплює площі в тисячі, десятки і навіть сотні тисяч квадратних кілометрів. При цьому спостерігається закономірність між розмірами територій, які зазнали регіонального метаморфізму, та віком порід. Так, утворення палеоархейської акротемі метаморфізовані повсюдно в умовах високих тисків і температур, породи протерозойського віку поліфаціально метаморфізовані, тобто при вертикальних і латеральних змінах тисків та температур, а серед фанерозойських геологічних споруд метаморфізм характерний лише для складчастих геоструктурних елементів.

Головними чинниками метаморфічних перетворення для більшості регіонально метаморфізованих порід, як це вже зазначалось вище, є температура та тиск. Метаморфічні породи нижнього і середнього архею, як правило, метаморфізовані відносно рівномірно на значних територіях, що зумовлено рівномірним високим тепловим потоком, який охоплював великі площі. Такий регіональний метаморфізм називається **ареальним**. Проте, починаючи з пізнього архею переважає **зональний**

регіональний метаморфізм, який характеризувався підвищенням його ступеню в одному районі та зниженням до периферії.

Закономірну зміну підвищення температури та тиску на ранніх стадіях розвитку вчення про метаморфізм пов'язували виключно з зануренням порід на значні глибини. Враховуючи це, У.Грубенман виділив в земній корі три зони, які відповідали різним температурам та тискам, як чинникам метаморфізму: епізону, мезозону та катазону.

Епізона, або сама верхня зона, характеризується слабким проявленням метаморфізму, який протікає при низьких температурах при низькому петростатичному і, значно вищому односторонньому, тектонічному тисках. У цій зоні утворюються такі метаморфічні породи, як *філіти*, *талькові*, *хлоритові* та інші *сланці*.

Мезозона, або середня зона, залягає нижче першої. Для неї характерні високі температури, значні петростатичні тиски, та досить інтенсивні односторонні тектонічні, які проявляються рідко. Характерними представниками цієї зони є *слюдяні сланці*, різноманітні *гнейси*, *кварцити*, *мармури* і *амфіболіти*.

Катазона, глибока зона, характеризується високим петростатичним тиском та дуже високими температурами. Односторонній тиск тут виражений слабо, в зв'язку з чим для порід практично не характерна сланцюватість. У цій зоні здебільшого утворюються *біотитові* та *піроксенові гнейси*, *амфіболіти*, *еклогіти*.

Така номенклатура до сьогоденного часу не втратила актуальності, проте детальне вивчення областей метаморфізму показало, що не існує безпосереднього зв'язку між глибиною та температурою, так як тепловий потік по площі суттєво змінюється. Враховуючи це, П.Ескола розробив класифікацію регіонально метаморфізованих порід, в основу якої були покладені тільки зміни температури та тиску. Так з'явилося поняття про метаморфічні фації.

Метаморфічна фація – це група метаморфічних порід, а точніше парагенезис мінералів, які утворилися в певному діапазоні температур і тисків. Фації називаються за найбільш

типовими для них типами порід або мінералів; наприклад, цеолітова, хлоритова, біотитова, мусковітова, тощо. На рис. 5.86. показана залежність фацій метаморфізму глинистих порід від температури, тиску та глибини.

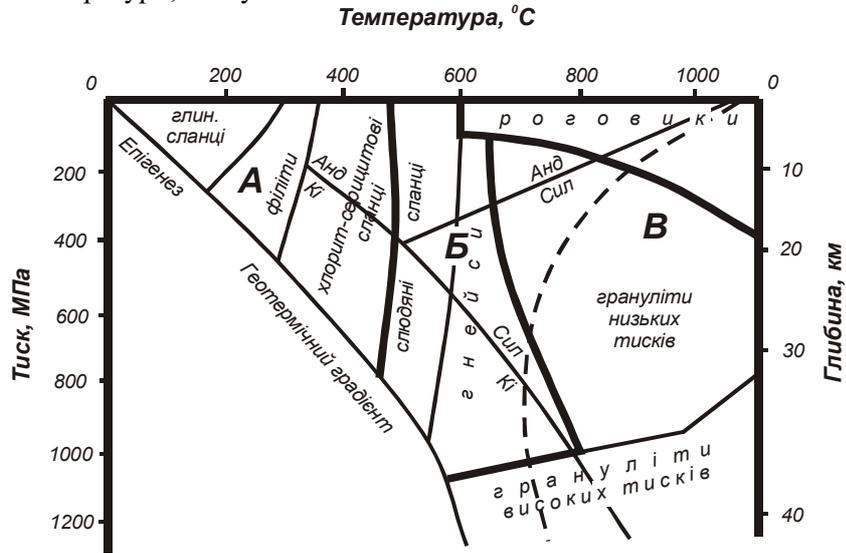


Рис. 5.86. Фації метаморфізму суттєво глинистих порід (за О.О.Маракушевим)

Жирні лінії – границі ступенів метаморфізм: А – низький (зеленосланцева), Б – середній (амфіболітові), В – високий (гранулітова). Тонкі лінії – границі фацій: Анд – андалузитова, Сил – силіманітова, Кі – кіанітові

Фації групуються в **ступені метаморфізму** – нижній, середній та високий, або за породною ознакою їх називають, відповідно, **гранулітова, амфіболітова та зеленосланцева**.

У випадках, коли первинна природа певної метаморфічної породи легко встановлюється за низкою ознак (структурою, текстурою), назву метаморфічної породи виводять від вихідної, додаючи до неї приставку “**мета**”; наприклад, метапісковик, метаконгломерат. Для високометаморфізованих порід використовують назву метаморфічної породи з приставкою

“орто”, якщо це первинно магматична порода, та “пара”, коли порода осадового походження (наприклад, орто- та параagneysi).

Перехід від низьких ступенів метаморфізму до високих називається *прогресивним метаморфізмом*. У випадках, коли порода утворилася при відносно високих температурах та тисках і повторно була метаморфізована в умовах більш низьких ступенів, говорять про *регресивний метаморфізм*, який ще називають *ретроградним метаморфізмом* або *діафторезом*.

До порід дуже низького ступеню регіонального метаморфізму, який іноді ототожнюють з метагенезом, або апокатагенезом, відносяться глинисті сланці. Це тонкозернисті породи, які легко розколюються на тонкі пластинки з гладкими поверхнями. Нерідко вони мають чорний колір, за що їх ще називають *аспідними сланцями*. Такому забарвленню вони завдячують наявності в вихідному первинному глинистому осадку органічної речовини, яка при метаморфізмі перетворилася на графіт.

До продуктів низького ступеню метаморфізму належать також *спіліти* і *кератофіри*. Перші утворюються в результаті метаморфізму лави основного складу, а другі – середнього. Такі ультраосновні породи як перидотити в умовах дуже низьких ступенів метаморфізму перетворюються на *серпентиніти*. Характерною властивістю всіх цих порід є їх зеленувате забарвлення, обумовлене наявністю таких новоутворених метаморфічних мінералів як *хлорит*, *епідот*, *серпентин* та інші.

При підвищенні ступеню метаморфізму від низьких субфацій до більш високих глинисті (аспідні) сланці перетворюються в *філіти*, які відрізняються від перших більш грубою сланцюватістю і характерною блискучою поверхнею, що зумовлене наявністю в їх складі макроскопічних лусок слюди.

Продуктом метаморфізму глинистих порід в умовах зеленосланцевої фації є *хлорит-серицитові сланці*, які складені з кварцу, хлориту і серициту. Але типові зелені сланці утворюються за рахунок метаморфічних перетворень вулканітів основного складу та їх туфів і завдячують своїм забарвленням хлориту, епідоту і, рідше, зеленій роговій обманці.

Типовими породами середнього ступеню метаморфізму (амфіболітові фація) є кристалічні сланці, гнейси та амфіболіти.

Кристалічні сланці – це середньо- і крупнозернисті чітко сланцюваті породи складені листовими силікатами (мусковіт, біотит, хлорит) та амфіболами. Вони є результатом метаморфічних перетворень глинистих порід і окрім зазначених мінералів до їх складу входять гранат, плагіоклаз і кварц.

Гнейси на відміну від кристалічних сланців містять значно менше слюд і складаються з кварцу та польових шпатів з підпорядкованим вмістом темnobарвних мінералів (біотиту, рогової обманки). Вони характеризуються своєрідною гнейсовою структурою, вираженою орієнтованим розташуванні слюд і рогової обманки. Утворюються гнейси по пісковиках (особливо аркозових), глинах, вулканітах кислого складу, а також по гранітах (гранітогнейси). Гнейси, які є метаморфічними аналогами осадових порід називають парагнейсами, а магматичних – ортогнейсами.

Амфіболіти – темно-зелені, зеленувато-чорні породи, складені з рогової обманки та плагіоклазу. До їх складу також можуть входити гранат, епідот і біотит, але в підпорядкованих кількостях. Утворюються амфіболіти при метаморфізмі магматичних порід основного складу – ортоамфідоліти, або карбонатно-глинистих осадків – параамфіболіти.

Метаморфізм амфіболітової фації може переростати в ультраметаморфізм, який супроводжується частковим, а пізніше і повним розплавленням порід (анатексис) з утворенням мігматитів і анатектичних гранітів.

Мігматити (грецьк. “мигма” – суміш) – це продукт часткового розплавлення порід, який супроводжується утворенням кварц-плагіоклазових, близьких за складом до гранітів, прошарків серед метаморфічних порід, які виявилися більш стійкими до плавлення. Такі утворення мають смугастий вигляд, зумовлений чергуванням світлих за забарвленням новоутворених гранітоїдних прошарків і темнозабарвлених смуг, складених метаморфічними породами. На думку

Д.С.Коржинського, утворення мігматитів можливе лише при активній участі глибинних флюїдів, і температурі 650-700 °С.

При повному розплавленні вихідних порід під впливом ультраметаморфічних процесів, утворюються анатектичні граніти, які за складом не відрізняються від інтрузивних.

Індикаторами вищого ступеню регіонального метаморфізму є грануліти і еклогіти.

Грануліти складаються з кварцу, ортоклазу, плагіоклазу ± гранат, кіаніт, силіманіт і піроксен. Піроксенові грануліти основного складу позбавлені кварцу та ортоклазу і утворюються в результаті метаморфізму основних магматитів (габро або базальтів). Вихідним матеріалом для формування кислих гранулітів є глинисті та піщано-глинисті осади. З гранулітами часто зв'язані своєрідні породи, які є перехідними між метаморфітами і магматитами. Вони складені з кварцу, калієвого польового шпату, кислого плагіоклазу, піроксену (гіперстену) та гранату і називаються *чарнокітами*.

Породи гранулітів фації найхарактерніші для архейських та, частково, протерозойських комплексів, і дуже рідко зустрічаються в палеозойських геологічних спорудах. У зв'язку з цим вони побічно можуть використовуватися як ознаки віку метаморфічних порід.

Окрім гранулітової до утворень високого ступеню метаморфізму відноситься також *еклогіти*. Це щільні (3,3-3,4 г/см³), з високою питомою вагою породи, основними мінералами яких є піроксени і гранат, а за складом вони відповідають основним магматитам (базальтам, габро). Утворюються еклогіти в умовах високих температур і тисків, характерних для нижньої частини континентальної кори та верхньої мантії. Їх уламки, що зустрічаються в трубках вибуху, нерідко містять алмази.

Основними областями розвитку метаморфічних порід є щити древніх платформ, а також, як вже зазначалося вище, ядерні частини складчастих споруд.

В межах території України метаморфічні породи складають Український щит, і користуються незначним поширенням у внутрішній зоні Карпат. На Українському щиті відомі утворення

всіх метаморфічних фацій. Комплекси високометаморфізованих порід (гранулітова фація) поширені на Побужжі та в Західному Приазов'ї, утворення амфіболітової фації складають кристалічну основу заходу Київщини та Середнє Придніпров'я, поліфаційно метаморфізовані породи (від гранулітової до зеленосланцевої фації) поширені на Волині і Кіровоградщині, утвореннями низьких ступенів метаморфізму складені розрізи Криворізької та низки зеленокам'яних структур Придніпров'я, а також Білокоровицько-Овруцької системи депресій Полісся.

Запитання для самоконтролю

- 1. Що таке метаморфізм ?*
- 2. Охарактеризуйте типи метаморфізму.*
- 3. Що таке локальний метаморфізм ? Дайте характеристику його видів.*
- 4. Наведіть приклади порід, які утворюються під впливом локального метаморфізму.*
- 5. Що таке регіональний метаморфізм, і на якому етапі розвитку Землі він проявився найкраще ?*
- 6. Наведіть приклади порід, які утворюються в результаті проявлення регіонального метаморфізму.*
- 7. Дайте загальну характеристику ударного метаморфізму.*
- 8. Охарактеризуйте основні продукти ударного метаморфізму.*
- 9. Що таке фації метаморфізму ?*
- 10. Назвіть райони поширення метаморфічних порід в межах території України.*