

УДК 550.834

Д.А. Безродний, асист., О.В. Шабатура, канд. геол. наук, О.В. Ляшенко, канд. фіз.-мат. наук, В.П. Велешук, асп., А.А. Байдуласва, канд. фіз.-мат. наук, А.П. Онанко, канд. фіз.-мат. наук, Ю.А. Онанко, студ.

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ В ГЕТЕРОЗЕРНИСТИХ ПЛАГІОГРАНІТАХ ПРИБЕЗРОДНОМУ ТЕРМІЧНОМУ ВПЛИВІ

Досліджено ефекти акустичної емісії, що виникає під впливом термомеханічних напруг у плагіогранітах різних структур. Виявлено імпульси пружних хвиль від, щонайменше, двох, ієрархізованих рівнів мікротріщин-емітентів, які, вірогідно, зв'язані із існуванням пружної рівноваги системи "мінеральне зерно – гірська порода".

Effects of acoustic emission under thermal-mechanical strains in heterogeneous plagiogranites are investigated. Elastic waves pulses are discovered from two hierarchical layers microcracks that of probably connected with elastic balance of system "grain-rocks".

Вступ. Неоднорідні термомеханічні напруги, що створюються локально-перегрітими областями твердих тіл, призводять у випадку анізотропних гірських порід з недоскональностями будови, зокрема з мікротріщинами, до непрогнозованих зривів. Результати цих зривів відомі як акустична емісія (АЕ) матеріалів – спонтанне хаотичне випромінювання імпульсних пружних хвиль, що мають шумовий характер. Під джерелом АЕ розуміють локальний об'єм породи, в якому відбувається необоротна динамічна локальна перебудова структури породи. Основними джерелами АЕ є утворення тріщин, міжзернові процеси тертя, фазові перетворення, двійникування кристалічної решітки, залишкові механічні напруги на границях розділу. Джерела АЕ, а також структура породи, її фізичні властивості, особливості ініціюючого впливу визначають динаміку процесу локальної перебудови та тип АЕ – неперервна чи дискретна. Важливо відмітити, що для виникнення АЕ звичайно потрібна зовнішня (ініціююча АЕ) сила, що безпосередньо, або за рахунок певних фізичних механізмів, призводить до надлишкових локальних деформацій породи [1-4].

Навіть за відсутності стрункої загальної теорії явища акустичної емісії (АЕ), окремі моделі явища, що відповідають певному визначеному виду впливу на деякі, з відомою структурою, матеріали дозволяють отримувати додаткову унікальну інформацію [2], що не може бути отримана іншими методами, зокрема різноманітними акустичними та сейсмоакустичними (наприклад – інваріантно-поляризаційним). Так, ці (інші) методи дають можливість визначати пружні сталі та пружну симетрію гірських порід, оцінювати кількісно диференціальний і інтегральний коефіцієнт пружної анізотропії A та параметри анізотропії розповсюдження швидкості пружних хвиль, розрізняти вплив недосконалості будови та регулярної упорядкованості структурних елементів гірської породи і їх неоднорідностей, але точної інформації про поточний стан (точніше – зміну станів) локальної підсистеми дефектів чи порушень структури (на відміну від АЕ) не дають.

Особливий інтерес з точки зору фізики твердого тіла викликають гранітоїди [5], найбільш поширені кристалічні породи земної кори, оскільки ці гетерогенні матеріали є також невпорядкованим дисперсним середовищем з усіма відомими структурними дефектами, яке, одночасно, достатньо точно імітує складний розподіл у земній корі різноманітних гірських порід із відмінними фізико-хімічними властивостями.

Дана робота присвячена вивченню динаміки неоднорідного термічного впливу створеного потужним наносекундним рубіновим лазером у дисперсних твердих тілах, зокрема у кристалічних гірських породах, та у їх найбільш розповсюджених відмінах – гранітоїдах.

Зразки. Зразки досліджуваних плагіогранітів відносяться до інгулецького комплексу. Дані плагіограніти у тектонічному плані приурочені до східної границі Західно-Інгулецької зони Українського щита і характеризуються деякими відмінностями як мінералогічного скла-

ду, фізичних характеристик, так і термобаричними і геодинамічними умовами формування тощо [5].

Експеримент. Потужність імпульсу рубінового ($\lambda = 695$ нм, $\tau = 20$ нсек) лазера $I = 200$ МВт/см². Площа лазерної плями була менше площі зерен (менше 1×1 мм²) у крупнозернистих зразках (плагіограніти гранобластової структури) та, відповідно, більше площі зерен у дрібнозернистих (плагіограніти підіоморфнозернистої структури) зразках. Поверхня досліджених зразків була строго неоднорідна як за коефіцієнтом поглинання для заданої λ (695 нм) випромінювання лазера, так і за морфологією. Загальне підсилення реєструючої апаратури на основі спеціалізованого акустоемісійного приладу АФ-15 було 60-72 дБ.

Виміряна в імпульсному режимі усереднена групова швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль в досліджених зразках крупнозернистих плагіогранітів була $V_{гб} = 5400$ м/с. Для дрібнозернистих плагіогранітів – $V_{гб} = 5260$ м/с.

Неоднорідний короточасний термічний вплив на зразок, створений лазером, призвів до локального розповсюдження поверхні. Після припинення дії лазерного випромінювання застигання розплаву почалося саме з поверхні (найефективніший тепловідвід), а розширена (розплавлена) нижня частина кратеру створила додаткові стискаючі механічні напруги, що "втягують" центральну частину поверхні кратеру у глибину зразка.

При локальних розплавах двох мінеральних складових крупнозернистих плагіогранітів (кварц, біотит) суттєвих відмінностей виявлено не було, що вказувало на вірогідно єдиний механізм трансформації лазерного впливу у акустичний відгук. Але вищий рівень поглинання (та наступний нагрів з розплавом) очевидно відбувався у оптично-непрозорому для лазерного випромінювання мінералі (біотиті) ніж у оптично-прозорому (кварцу).

Слід відмітити, що при опроміненні протилежних сторін дрібнозернистого зразка амплітуда акустичного відгуку значно відрізнялася. Причинами цього могли бути значна анізотропність досліджуваної породи, зокрема вздовж вісі лазерного променя.

Обговорення. На рис. 1а наведена фотографія акустичного відгуку при лазерному опроміненні, що супроводжувалось створенням неоднорідних термомеханічних напруг з проплавом кратеру та викидом на поверхню зразка розплаву. Глибина кратеру проплаву очевидно (при сталій потужності і часі опромінення лазером) лімітована теплопровідністю (зокрема – локальною) та встановленням "тимчасово-рівноважного" розподілу градієнтів температур перпендикулярних до вісі кратеру та вздовж неї. В наших дослідів глибина проплавлення оцінена у 500 мкм оптично-прозорої фази (кварцу) та у 10 мкм оптично-непрозорої фази (біотит) (рис. 1б).

Це відповідає наближенню, що ширина стимулюючого імпульсу більша ніж глибина кратеру, який утворюється під дією цього імпульсу, а сам імпульс не має вираженої поперечної структури [4].

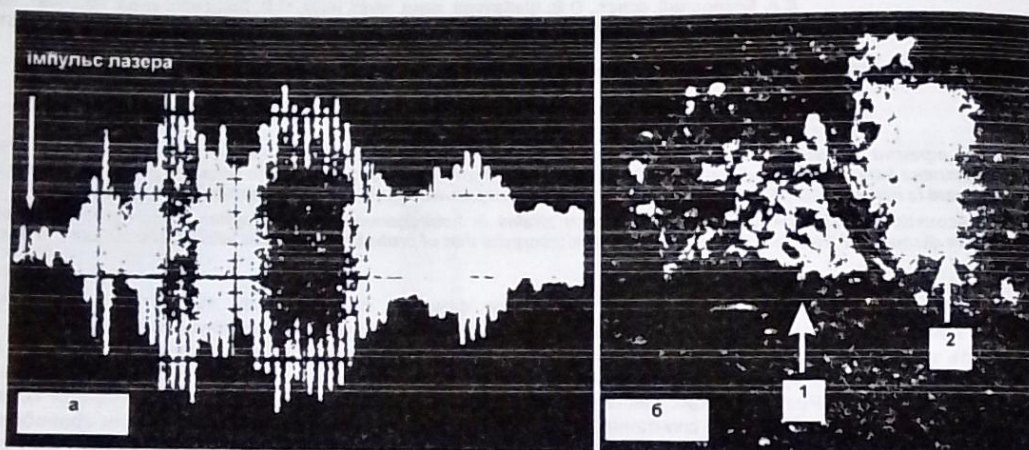


Рис. 1. А – Складна форма зареєстрованого акустичного відгуку вказує на кілька діючих одночасно або почергово механізмів трансформації (опромінення у зерно біотиту, 50 мВ/под, 10 мкс/под); Б – Характерні кратери оплавлення після опромінення у зерно біотиту з появою мікротріщин (1) та зерно кварцу (2) із інтенсивністю $I=200 \text{ МВт/см}^2$ (x98)

В цьому випадку динаміка тиску (в залежності від часу) наступна: на початку руйнування тиск швидко зростає, а по завершенню дії імпульсу зменшується миттєво на величину створеного лазером світлового тиску. Далі зменшення тиску стає більш повільним, тим не менш, для наносекундних часів впливу, поява акустичного відгуку в часовому діапазоні 10-100 мікросекунд не є очевидною.

Таким чином, складна форма зареєстрованого акустичного відгуку вказує на кілька діючих одночасно, або почергово в часі механізмів трансформації неоднорідного термічного впливу в механічні хвилі напруг (акустичні хвилі). Співставлення акустичного відгуку на рис.1а з часовим терміном дії імпульсу лазера та розмірами зразка вказують на імовірне формування 2-го та 3-го "максимумів" (накладених в часі імпульсів) через механізм АЕ, оскільки часові затримки їх появи та довжина кінцевого сформованого імпульсу не можуть бути пояснені в рамках фототермопружного механізму [7].

Важливим є правильне визначення можливих механізмів акустичної емісії при описаних вище процесах. Вірогідним на нашу думку є наступна послідовність в часі – акустична емісія при розплаві поверхні зразка (фазовий перехід тверда-рідка фаза), АЕ при застиганні розплаву (фазовий перехід рідка-тверда фаза), АЕ при тріщиноутворенні та АЕ при русі дислокацій. Процесами при фазових переходах тверда фаза-газ та газ-тверда фаза через відносно "довгий" (наносекундний) імпульс лазера можна знехтувати.

Оскільки за вибраних умов експерименту фазові переходи відбуваються достатньо швидко (за час, що може бути порівняний з часом лазерного впливу, рис.1а), вірогідно, що формування "акустоemisійної частини" акустичного відгуку пов'язано саме із тріщиноутворенням. Варто зауважити, що традиційний підхід [1,2] до АЕ як до емісії двох типів – неперервної (низькоенергетичної) та дискретної (високоенергетичної) нівелюється для випадків, коли часові довжини окремих актів АЕ перевищують час проходження хвилі по зразку, а лінійні довжини цугів хвиль – лінійні розміри зразків.

Саме цьому на рис. 1а спостерігаються "накладені" імпульси високоенергетичної дискретної АЕ з великим часом загасання, сформовані в суттєво різні моменти часу (від різних джерел АЕ). Неперервною АЕ при русі дислокацій доводиться нехтувати через значно менший

рівень цих сигналів, ніж сигналів АЕ при тріщиноутворенні (10^3+10^5 разів [1]).

Як відомо, амплітуда сигналів АЕ пропорційна як початковому розміру мікротріщин, так і площі їх розкриття [1, 8]. Якщо вважати, що перша стадія локального руйнування плагіогранітів є накопичення невзаємодіючих тріщин першого рівня, то початкове джерело локального руйнування формується, коли концентрація мікротріщин у породі досягає значення $C_{кр1}$, при якому середня відстань між ними \bar{L} більше їх середнього розміру \bar{l} в e разів:

$$\bar{L}/\bar{l} = 1/C_{кр1} = e. \quad (1)$$

При виконанні умови (1) тріщини починають збільшуватися, ініціюючи формування нових тріщин, які утворюють другий рівень. Накопичення тріщин триває доки, поки їх концентрація знову не досягне нового критичного значення $C_{кр2}$, що призводить до виникнення тріщин третього рівня. Таким чином мікротріщини наступного ієрархічного рівня формуються тільки з мікротріщин попереднього.

Найбільш швидко відбувається заселення першого ієрархічного рівня. Цей процес готує створення мікротріщин наступного ієрархічного рівня. На його заселення витрачається частина мікротріщин першого рівня, що призводить до протифазних змін їх числа на сусідніх рівнях. Мікротріщини встигають сформуватися за час, який значно менше інтервалу спостереження, що пояснює існування "рівноважної" форми розподілу в нерівноважному стані. Можливі зміни форми розподілу (від гамма-функції до функції Гауса) при зростанні розмірів і концентрації мікротріщин (від 10^2 до 10^7) може бути обумовлена різким зростанням взаємодії між ними поблизу границь розділу. Такими границями розділу, в основному, є міжзернові контакти (або вже існуючі порушення), а також більш пластичні сусідні мінерали.

Середні розміри різних структурних спотворень в гірських породах співвідносяться як 2+7, а середні розміри мікротріщин на сусідніх ієрархічних рівнях розрізняються в ~3 рази [8]. Таке співвідношення середніх розмірів \bar{l} є наслідком допущення про те, що об'єкти наступного ієрархічного рівня створюються з об'єктів початкового, та, що за час спостереження на кожному з ієрархічних рівнів встигає накопитися статистично значне число таких об'єктів. Все це є підтвердженням моделі [9] про існування пружної рівноваги у твердому тілі

внаслідок гальмування деформаційної тріщинуватості неоднорідностями структури останнього.

На найнижчому ієрархічному рівні (умовна назва – "рівень мікро тріщин") найімовірнішими причинами виникнення тріщин є локальні порушення, які виникають у результаті концентрації напружень на обмежених ділянках внаслідок пружної анізотропії мінеральних складових. Наслідком цього є розвиток крихких порушень у вигляді тріщин сколювання. Частина таких тріщин утворюється шляхом "сповзання" дефектів у зону найбільших сколюючих напруг кристалу, який потрапив у поле неоднорідних напруг (найбільш поширеними дефектами для кристалів кварцу і польових шпатів – основних мінералів гранітоїдів – є газопо-рідинні включення, які шикуються у субпаралельні ланцюжки у зоні сколювання) [8]. При злитті дефектів утворюються тріщини, емітуючі при цьому імпульсні пружні хвилі – АЕ.

Амплітуда сигналів високоенергетичної дискретної з великим часом загасання АЕ при тріщино утворенні, яка пропорційна розміру мікротріщин і площі їх розкриття, більше в 10^3 - 10^5 разів в порівнянні з неперервною АЕ при русі дислокації. Особливістю прояву АЕ є важливими для розвитку теорії пластичної деформації геологічного середовища, утворення і розповсюдження тріщин, тому необхідні для фізичного обґрунтування використання методу АЕ для здійснення неруйнівного контролю структури гірської породи.

1. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1982. – 108 с. 2. Велешук В.П., Ляшенко О.В. Акустична емісія світловипромінювальних структур на основі сполук A^2B^3 обумовлена постійним прямим струмом // Український фізичний журнал. – 2003. – Т.48. – С. 981-985. 3. Kravtsov M.V., Lyashenko O.V., Onanko A.P. Relaxation of defect structure in ultrasonic wave field and acoustic emission in LiF single crystals // Functional materials. – 2004. – v.11, № 2. – P. 353-355. 4. Kravtsov M.V., Lyashenko O.V. Acoustic emission caused by mechanical stress relaxation at oscillations of piezo-dielectric plates // Functional materials. – 2005. – v.12, № 1. – P. 133-135. 5. М.І.Толстой, Ю.Л.Гасанов, Н.В.Костенко та ін. Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання: Довідник-навчальний посібник. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2003. – 329 с. 6. Шмельова Л.В., Єжов С.М., Супрун А.Д. та ін. Динаміка локально-фазових переходів, зумовлених інтенсивним лазерним випромінюванням // Український фізичний журнал. – 2006. – Т.51. – С. 788-794. 7. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 304 с. 8. Веттегрей В.И., Куксенко В.С., Томшин Н.Г. и др. Статистика микротрещин в гетерогенных материалах (граниты) // Физика твердого тела. – 2004. – Т.46, вып.10. – С. 1793-1796. 9. Зявигинцев Л.И. Деформации горных пород и эндогенное радиобразование. – М.: Наука. 1978. – 181 с.

Надійшла до редколегії 14.02.07

УДК 551.3:550.83

І.І. Онищук, канд. геол. наук

ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЬОВИХ ЕЛЕКТРОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ

Розглядаються особливості методики геофізичних досліджень при вивченні техногенного забруднення геологічного середовища. Наведені геоелектричні параметри різних типів ґрунтів і порід верхньої частини розрізу в залежності від інтенсивності забруднення.

The features of geophysical prospection methods for studying of geological environment technogenic pollution are shown. The geoelectrical parameters of various types of soils and rocks of profile's upper part are revealed with regarding of pollution intensity.

Вступ. Зростаюча роль екології в житті людей, громадський рух за збереження навколишнього середовища та складність поставлених проблем, призводять до необхідності створення окремих науково-прикладних дисциплін – екологічної геології та екологічної геофізики, так само тісно зв'язаних між собою, як і фундаментальні науки – геологія та геофізика.

Приповерхнева частина геологічного середовища потужністю в десятки, рідше перші сотні метрів ідентифікується як верхня частина розрізу (ВЧР). Вона включає ґрунти, гірські породи, поверхневі, ґрунтові та підземні води, приповерхневі фізико-геологічні явища (зсуви, карст тощо). ВЧР найбільшою мірою піддана екзогенним (атмосферним, поверхневим) і техногенним (фізико-хімічним, енергетичним) процесам, а також впливу ендегенних (внутрішньоземних) факторів. ВЧР характеризується екстремальним проявом процесів, як природних (різкою геологічною, петрофізичною та фізичною неоднорідністю в просторі та у часі), так і техногенних (максимальним проявом різноманітних штучних фізичних полів). Тому характерною особливістю верхньої частини геологічного середовища є яскраво виражена залежність всіх його характеристик від координат точок спостережень. При цьому властивості і стан ґрунтів та гірських порід ВЧР помітно змінюються від точки до точки як по латералі, так і по вертикалі. Різко також змінюється в просторі і часі поведінка різних геофізичних полів. ВЧР, як специфічна частина геологічного простору, є об'єктом вивчення і основним джерелом інформації, одержуваної екогеофізикою про навколишнє середовище.

Геофізичне середовище, як частина літосфери, характеризується нелінійністю й мінливістю в часі параметрів. Нелінійність проявляється в тензочутливості

(залежності пружних параметрів гірських порід від тиску), флюїдоцутливості (залежності пружних, електромагнітних та інших параметрів не тільки від геохімічного складу твердої фази гірських порід, але й складу флюїдів (вода, нафта, газ), їхніх переміщень) і неадекватній реакції середовища на зовнішні впливи [1-3].

Варіації космічних полів у часі призводять як до ритмічних (упорядкованих), так і хаотичних (випадкових) змін параметрів природних і техногенних земних фізичних полів та процесів, що їх супроводжують. Таким чином, геологічне середовище залежить від фізичних і хімічних властивостей, геометричних параметрів твердої фази та флюїдів, а також від варіацій природних і усе більше зростаючих за інтенсивністю техногенних фізичних полів.

При геогеологічних дослідженнях основними завданнями є:

1. Вивчення змін ВЧР під впливом природних і техногенних як катастрофічних, так і повільних процесів та оцінка їх екологічних наслідків.

2. Створення методів оцінки екологічної стійкості літосфери та способів збереження її екологічних функцій.

3. Медико-біологічне та соціально-екологічне забезпечення діяльності людей, пов'язаної з геологічним середовищем.

Предметом дослідження екогеофізики є фізичний стан і властивості, зміна в просторі та у часі природних (космічних і земних), штучних (антропогенно-техногенних) фізичних полів навколишнього середовища.

Екогеофізична інформація відрізняється досить високою інформативністю, відтворюваністю та експресністю зйомок, одержанням великої кількості параметрів, можливістю проведення дистанційних і повторних вимірів, розробленістю комп'ютерних технологій одержання "помето-