

## ГЕОФІЗИКА

УДК 550.834

Г. Продайвода, д-р фіз.-мат. наук, проф., А. Онанко, канд. фіз.-мат. наук, О. Шабатура, канд. геол. наук, Ю. Онанко, асп.

### РЕКОНСТРУКТИВНІ МОЖЛИВОСТІ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ЗМІНАХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ КВАРЦВІСНИХ ПОРІД КРИВОРІЗЬКОЇ НАДГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижевою)

*Досліджено ефект акустичної емісії, що виникає під впливом лазерних термомеханічних напруг у пісковиках. Виявлено імпульси пружних хвиль від мікротріщин-емітентів, які зв'язані із існуванням пружної рівноваги в пісковиках.*

*Effect of acoustic emission under laser thermal-mechanical strains in sandstones are investigated. Elastic waves pulses are discovered from microfractures that of probably connected with elastic balance in sandstones.*

**Вступ.** Дана робота присвячена вивченню динаміки неоднорідного термального впливу створеного потужним імпульсним наносекундним неодимовим лазером у дисперсних твердих тілах – у пісковиках Криворізької надглибокої свердловини (КНГС). З точки зору фізики твердого тіла, кварцвісні матеріали є добрим індикатором напружено-деформаційних процесів, з огляду на їх надзвичайну чутливість до крихких деформацій. В той же час інтенсивний динамотермальний метаморфізм, що накладається на породи Кривбасу, призводив до структурно-механічного перетворення її при різних рівнях тисків та температур в анізотропних полях напружень  $\sigma_1$ . Безумовно, ці перетворення мали свій відбиток у структурно-текстурних особливостях порід. Планальна структура означає, що породи в момент свого утворення перебували в умовах літостатичного тиску. Враховуючи складну геологічну будову району КНГС, наявність древніх глибинних розломів, архейських зон зміщення та складчастих зон, можна припустити, що дані породи дійсно утворились при регіональному метаморфізмі, тобто при дії літостатичного тиску, а вже потім, в процесі свого існування опинилися в умовах бокових напружень. Орієнтована мікротріщинуватість зразків обумовлена міжзерновими мікротріщинами, які присутні в усіх зразках, і підкреслює аксіальний або планальний характер симетрії текстур.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Мала тривалість генеруючого і високий передній фронт збудженого імпульсу створює гарні передумови використання ефектів акустичної емісії (АЕ) для вивчення зразків гірських порід. Передусім, це стосується кристалічних порід, які мають широкий діапазон структурно-текстурних ознак, високі дисперсії пружних коливань, тріщинуватості і пористості [1–3, 5, 8–10, 14, 16, 19–24]. Добра інформативність АЕ була показана при дослідженні розподілу акустичних неоднорідностей в зразках гірських порід, оцінки їх розмірів і форми, динаміки відклику сигналу [4, 15, 17, 21] на міжблокових областях ієрархічних багаторівневих систем, якими власне є геологічні середовища. Особливо корисним метод АЕ може стати при вивченні змін тріщинуватості і пористості порід, оскільки генерація тріщин супроводжується зменшенням  $V_{||}$ ,  $V_{\perp}$ , супроводжується поглинанням енергії внаслідок росту тріщин і відповідної зміни структури геологічного середовища в околиці берегів тріщин при різних величинах флюїдного потенціалу середовища. Відомо, що різке затухання поперечних хвиль відбувається саме при сумісному впливі підвищених температур, диференційних напруг і води. Жоден фактор окремо не викликає розкриття міжзернових границь [1], тобто не здатен проявитися у спектрі АЕ. Тому аналіз останніх може стати в нагоді при вивченні динаміки як

термальних, пружних, і навіть фізико-хімічних чинників тріщиноутворення [5; 6, 15, 20–23].

На даний час зазначений метод АЕ знаходить все більше застосування в геологічних та суміжних дисциплінах; причому використовуються різноманітні апаратурні розробки реєстрації і обробки сигналів [4, 6, 22, 23]. Зокрема можна зауважити, що метод АЕ зарекомендував себе при встановленні напружено-деформованого стану гірських масивів [2, 3, 9, 15, 16], дослідження характеристик нафтогазових колекторів [10, 22], пружної анізотропії [5; 6, 14, 20–22]; проведення структурних і тектонофізичних реконструкцій [11, 12], ідентифікацій порід [21, 23, 24], розв'язання задач прогнозуванню і моніторингу [7, 8] тощо.

**Задачі досліджень.** Використання чутливого методу АЕ дає змогу встановити основні риси розвитку тріщиноутворення в умовах напружено-деформованого стану гірських порід. Тому задачею нашого дослідження є показ ефективності застосування методу акустичної емісії з точки зору встановлення основних генетичних типів тріщинуватості, динаміки їх утворення, і за можливістю, кількісних співвідношень між ними. Всі ці характеристики несуть інформацію про історію формування породи.

**Методика досліджень.** Для досліджень були обрані зразки пісковиків із розрізу (КНГС). Зазначимо, що дані породи неодноразово привертали на себе увагу з точки зору своєрідності їх пружних властивостей і їх ролі в оцінці колекторної здатності. Так, ретельний аналіз пружних властивостей пісковиків можна знайти у роботі [14], в якій відмічено широку варіацію коефіцієнтів анізотропії пружних і акустичних параметрів, на природу якої істотний вплив має текстурний фактор, що домінує над фактором пружної симетрії (ромбічної і триклінної) зерен кристалів кварцу у пісковіку.

В текстурному малюнку досліджуваних дрібнозернистих пісковиків спостерігався перехід від брекчіювання до часткової мілонітизації та філонітизації. Розмір пор у дрібнозернистих пісковиків складав близько  $d \approx 50$  мкм. Дрібнозернисті пісковики з тонкошаровою текстурою характеризуються чергуванням дрібнозернистих напівокатаних зерен ламаного кварцу і польового шпату та шарів глинистого цементу і гідрослюдами. Прошарки збагачені бітумом до 10%. Уламки кварцу і гідрослюд орієнтовані вдовж шаруватості. Цемент глинистий, регенераційно-корозійний. Катагенічні зміни проявляються в ущільненні зерен за рахунок регенерації кварцу. Спостерігається утворення орієнтованих лусок біотиту і мікротріщинуватість. Поверхні дрібнозернистих пісковиків були сильно неоднорідні за коефіцієнтом поглинання для лазерного випромінювання.

**Результати і обговорення.** На рис. 1(а) наведена фотографія акустичного відгуку із дрібнозернистого пісковіку

з КНГС №12704.1, насиченим водним розчином NaCl з концентрацією  $c \approx 38,125$  г/л, що супроводжувалось утворенням неоднорідних термомеханічних напруг з проплавом кратеру і викидом на поверхню зразка розплаву.

Співставлення акустичного відгуку в дрібнозернистому пісковикі, (рис. 1(а)), з часовим терміном дії імпульсу ( $\tau \approx 18$  нс) та розмірами зразка ( $L \approx 0,03$  м) вказують на формування II та III "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.

Створений лазером короточасний термічний вплив на пісковик призвів до локального розплаву поверхні. Після припинення дії лазерного випромінювання, застигання розплаву почалося саме з поверхні зразка (де тепловідвод найефективніший), а розширена (розплавлена) нижня частина кратеру створила додаткові стискаючі механічні напруги, що "втягнули" центральну частину поверхні кратеру у глибину пісковика. Глибина проплавлення внаслідок релаксації термопружних напруг  $\sigma_i$  при великих часових  $\Delta T/\Delta t = (55 \pm 100) \cdot 10^9$  К/сек та просторових  $\Delta T/\Delta x = (1 \pm 2) \cdot 10^4$  К/см градієнтах температур на поверхні пісковика оцінена у  $\Delta h \approx 10$  мкм. Глибина кратеру проплаву  $\Delta h$  при сталій потужності і час опромінення лазером лімітовані локальною теплопровідністю та встановленням "тимчасово-рівноважного" розподілу градієнтів температур  $\Delta T$  перпендикулярних до осі кратера та вздовж неї. Це відповідає наближенню при якому ширина стимулюючого імпульсу більша ніж глибина кратера, який утворюється під дією цього імпульсу, а сам імпульс не має вираженої поперечної структури. В

цьому випадку динаміка тиску  $P$ , в залежності від часу, наступна: на початку руйнування тиск  $P$  швидко зростає, а по завершенню дії імпульсу зменшується миттєво на величину створеного лазером світлового тиску. Далі зменшення тиску  $P$  стає більш повільним, для наносекундних часів впливу лазера важлива поява акустичного відгуку АЕ в часовому діапазоні  $\tau \approx 200$  мікросекунд. Кількість відображень  $N = \tau/t \approx 200$  мкс/20 мкс = 10, складає приблизно 10 разів вперед-назад по зразку.

Важливим є правильне визначення можливих механізмів АЕ при описаних вище процесах. Послідовність в часі є наступна: 1) АЕ при розплаві поверхні пісковика (фазовий перехід: тверда фаза – рідка фаза), 2) АЕ при застиганні розплаву (фазовий перехід: рідка фаза – тверда фаза), 3) АЕ при тріщиноутворенні. Процесами при фазових переходах; тверда фаза – газ та газ – тверда фаза через відносно "довгий" (наносекундний) імпульс лазера можна знехтувати. За умов експерименту фазові переходи відбуваються достатньо швидко – за час, що може бути порівняний з часом лазерного впливу ( $\tau \approx 18$  нс). Вірогідно, що формування "акустемісійної частини" акустичного відгуку пов'язано саме із тріщиноутворенням. Підхід до АЕ як до емісії двох типів – дискретної (високоенергетичної) та неперервної (низькоенергетичної) нівелюється для тих випадків, коли часові довжини окремих актів АЕ ( $\tau$ ) перевищують час проходження хвилі по зразку  $t: \tau > t$ , а лінійні довжини цугів хвиль  $\lambda$  – лінійні розміри породи  $L: \lambda > L$ . Тому на рис. 1(а) спостерігаються "накладені" імпульси високоенергетичної дискретної АЕ з великим часом загасання, сформовані в суттєво різні моменти часу від різних джерел АЕ.

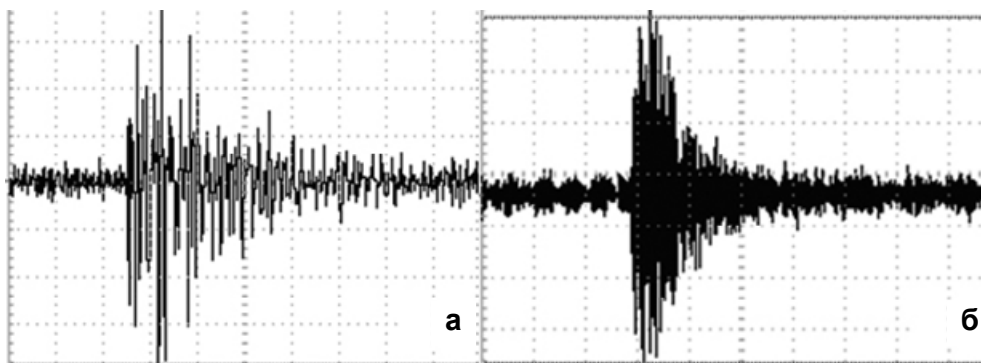


Рис. 1. Акустичні спектри отримані від опромінення лазером зразків пісковиків:

а) №12704.1 (інтенсивність  $I \approx 110$  МВт/см<sup>2</sup>; 2 В/под, 25 мкс/под); б) №12050 (76612) ( $I \approx 300$  МВт/см<sup>2</sup>; 2 В/под, 250 мкс/под). Загальне підсилення реєструючої апаратури на основі спеціалізованого акустемісійного приладу АФ-15 було 68 дБ.

Потужність імпульсу неодимового лазера (а)  $I \approx 110$  МВт/см<sup>2</sup>. Тривалість дії імпульсу рубінового лазера (б)  $\tau = 15 \pm 18$  нсек з довжиною хвилі  $\lambda = 1060$  нм. Площа лазерної плями була  $S_0 \approx 1 \times 1$  мм<sup>2</sup>

Таблиця 1

Пружні властивості дрібнозернистих зразків пісковиків

Зразок	C (наcl), г/л	V <sub>л</sub> , м/с	V <sub>г</sub> , м/с	ρ, кг/м <sup>3</sup>	E, гпа	Особливість
12704.1	38,125	2160	-	2630	12,26	шаруватість ⊥ осі керна
4975	без насичення	2910	-	2631	22,29	
12050(76612)	без насичення	2730	-	2633	19,62	
12097(59979)	без насичення	2750	-	2629	19,88	
12072(38833)	38,125	2640	-	2639	18,39	
38820	38,125	2830	-	2637	21,12	
27959	без насичення	3520	2300	2630	31,72 <sub>  </sub> – 13,54 <sub>⊥</sub>	

Своєрідністю спектру АЕ дрібнозернистих пісковиків – цементованих осадових порід із гранулярною пористістю та магматичних порід з низькою первинною пористістю є наявність багатьох вторинних максимумів. Їх присутність свідчить як про розмаїття речовинного складу і структури породи, своєрідного набору аллотипних і аутигенних мінералів, складу цементу, текстурних особливостей, так і передає, певною мірою, харак-

тер перебігу діа- і катагенетичних процесів. Гірські породи, з яких відібрані зразки, зазнавали механічних деформацій різної інтенсивності, що привело до формування характерних структурно-текстурних особливостей. В умовах всебічних розтягів або стисків формувалися масивні текстури, які в спектрах АЕ досить помітно відрізнялися високими амплітудами основних (перших) піків разом з більшими їх осциляціями. Зразки із дирек-

тивними структурами, загалом, мають нижчі усереднені амплітуди сигналів АЕ, що особливо проявляється у дрібнозернистих зразках. Іншою характерною особливістю зразків із директивними текстурами (порід, що сформовані в нерівноважних полях деформацій) є переважання спектрів АЕ із різко неоднорідними, розтягнутими кривими з декількома цугами сигналів.

В умовах незворотних деформацій вплив флюїдонасичення проявляється у формі диференціально-пружних ефектів, які обумовлюються як кристалічно-пружними ефектами, так і типом міжфазового зв'язку, температурою, тиском та іншими параметрами. В усередненому наближенні АЕ сигнал передає зростання швидкості  $V_{\parallel}$ .

Іншим формоутворювальним фактором спектру АЕ став механізм емітування пружних хвиль від утворення тріщин в період становлення пружної рівноваги. На відміну від магматичних порід [4] для пісковиків більш характерним є наявність дворівневої ієрархії тріщин.

**Висновки.** З огляду на велику інформаційну насиченість методу АЕ, що показано на прикладі генезису пісковиків, є доцільним і виправданим використання цього методу для здійснення неруйнівного контролю структури зцементованих осадових дрібнозернистих пісковиків із гранулярною пористістю з точки зору розвитку теорії деформації геологічного середовища, утворення і розповсюдження тріщин, відновлення полів механічних напружень (стиск-розтяг) тощо. До очевидних переваг геологічного застосування методу АЕ можна віднести наступне: встановлення інтегральних змін напружено-деформаційного стану, які відображаються через структурно-текстурні особливості зразків порід, їх флюїдонасиченість, ієрархічну структуру тріщиноутворення та ін.; а також виразну кореляцію амплітуд АЕ з рівнями тектонофацій.

1. *Абрахимов М.З.* Роль физико-химических процессов в развитии межзерновой деструкции в силикатных горных породах: Автореф. дис. к.геол.-мин. наук. – М., 1988. 2. *Александров К.С., Продайвода Г.Т.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Н., 2000. 3. *Астафьев С.В., Шилько Е.В., Ружин В.В., Псахье С.Г.* Исследование влияния напряженного состояния на отклик границ раздела блоков в геологических средах при динамических воздействиях // Геология и

геофизика. – 2008. – Т. 49, № 1. – С. 67–77. 4. *Безродний Д.А., Шабатура О.В., Ляшенко О.В., Велешук В.П. та ін.* Акустична емісія в гетерозернистих плагіогранітах при неоднорідному термічному впливі // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2007. – Вип. 41. – С. 37–39. 5. *Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И.* Влияние текстурных особенностей образцов алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2002. №2. – С.27–31. 6. *Беспалько А.А., Хорсов Н.Н.* Аппаратурный комплекс для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород в шахтах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Международной конференции. – Новосибирск. 2004. – С. 210–213. 7. *Вишва С.А.* Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. – К., 2004. 8. *Ипатенко С.П., Ипатенко А.С.* Новое о физике Земли (Начала геоними). – К., 2002. 9. *Качарян Г.Т., Сливак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М., 2003. 10. *Кузнецов О.Л., Симкин О.Л., Чилингаар Дж.* Физические основы вибрационного и акустического воздействий на нефтегазовые пласты. М.: Мир, 2001. – 260 с. 11. *Лукієнко О.І.* Структурна геологія. – К., 2008. 12. *Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Вишва С.А.* Новый метод математического моделирования процессов разрушения в литосфере // Геоинформатика. 2006, №13, с.53–61. 13. *Павлюшин В.І., Матковський О.І., Довгий С.О.* Генезис мінералів. – К., 2003. 14. *Продайвода Г.Т., Вишва С.А., Куликов О.А.* Пружні постійні і анізотропія об'ємних пружних хвиль пісковиків // Вісник КУ Вісник. 1995. №13. с.38–54. 15. *Продайвода Г.Т., Маслов Б.П., Вишва С.А.* Акустопружні ефекти в мікротрещиноватой геологической среде // Геофизический журнал, 2001, т. 23, № 5, с. 92–100. 16. *Савич А.И., Коптев В.И.* Изучения напряженного состояния пород сейсмоакустическими методами // Физика Земли, 1991, № 9, с. 60 – 72. 17. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. Наука, М., 1987, 100 с. 18. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с. 19. *Толстой М.І., Гасанов Ю.Л., Костенко Н.В., Гожик А.П., Шабатура О.В.* Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання : Довідник-навч. посібник. – К., 2003. 20. *Томилині Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И.* Статистическая кинетика разрушения горных пород и прогноз сейсмических явлений // Физика твердого тела, 2005, Том 47, Вып. 5. С.955–959. 21. *Томилині Н.Г., Куценко В.С.* Иерархическая модель разрушения горных пород. Науки о Земле: Физика и механика геоматериалов, Вузовская книга, М., 2002, с.116. 22. *Хисматуллин Р.К.* Динамика напряженно-деформированного состояния горной породы при разных типах насыщенности // Нефтегазовое дело, 2006. С. 1–14. 23. *Шкуратник В.Л., Вознесенский А.С., Набатов В.В., Вильямов С.В.* Об идентификации генотипов горных пород по их акустоэmissionsному отклику на термическое воздействие // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. №5, Ч.1, 2009, С.225–233. 24. *Vogonolov L.M., il'ichev P.V., Novikov V.A. et al.* AE response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. V.47. N.1. P. 65–72.

Надійшла до редколегії 28.05.09

УДК 550.832

В. Курганський, д-р геол.-мінералог. наук, проф.  
В. Колісниченко, канд. геол.-мінералог. наук, В. Малияр, асп.

## ГЛИНИСТІТЬ ПОРІД КАРТАМИШСЬКОЇ СВІТИ КОБЗІВСЬКОГО ГКР ТА ЇЇ ВПЛИВ НА КОЛЕКТОРСЬКІ ВЛАСТИВОСТІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії з-ром геол.-наук, проф. О.М. Карпенком)

*На основі лабораторних досліджень керна та геофізичних досліджень свердловин вивчається вплив глинистості на фільтраційно-ємнісні та промислові властивості порід картамишської світи Кобзівського ГКР. Описані моделі типу "Керн-ГДС" для встановлення значення глинистості досліджуваних відкладів за методом ГГ. Зроблені відповідні висновки щодо кореляційних зв'язків між смісними властивостями та параметрами глинистості порід-колекторів картамишської світи Кобзівського родовища.*

*On the basis of laboratory investigation the core and well logging influence of clayness is probed on lauter-capacity properties of rocks kartamishs sedimentary complex Kobzivske deposit. The models of type "Core-Log" for establishment of value clayness after the method Gamma Ray the investigation deposits are described. The proper conclusions to correlation connections between capacity properties and parameters of clayness reservoirs rocks kartamishs sedimentary complex of Kobzivske deposit are done.*

**Вступ.** Ефективна розробка покладів вуглеводнів і подальший підрахунок запасів неможливі без уявлення про геологічну будову родовища та фільтраційно-ємнісні властивості порід (ФЕВ). Останні десятиліття відзначаються бурхливим розвитком досліджень в області об'ємного геологічного моделювання. В цей період суттєво збільшились можливості сейсмічних методів завдяки застосуванню тривимірної сейсморозвідки та сучасних методів вертикального сейсмічного профілювання. Проте, застосування лише даних сейсморозвідки

при вирішенні задач побудови моделей прогнозних параметрів геологічного середовища може призвести до неоднозначних результатів. Тому, з метою підвищення надійності та достовірності результатів нафтогазорозвідувальних робіт на сучасному етапі найбільш ефективною є методика та технологія комплексної багатфакторної інтерпретації матеріалів сейсморозвідки, геофізичних досліджень в свердловинах, лабораторного аналізу керна, результатів буріння та ін. Як показує світовий досвід, на основі сформованої комплексної фізи-