

ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.834+550.34.016+550.34.013.4

Д.А. Безродний, к.геол.н., доцент,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ АКУСТИЧНОГО ТЕКСТУРНОГО АНАЛІЗУ

Розглянуто особливості технології вивчення пружної анізотропії гірських порід, яка базується на петроакустичних дослідженнях. Проаналізовано переваги наведеної технології порівняно з іншими методами петрофізичних досліджень. Методика експериментальних вимірювань швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль залежить від характеру анізотропності породи. Зразки можуть досліджуватися у формі циліндра, куба, або куборомбододекаедра. Це дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, акустичну та пружну симетрію та текстуру порід.

Наведена методика дає можливість проведення акустичного текстурного та тектонофаціального аналізу гірських порід, відтворювати тектонічну природу умов їх формування і перетворення, вирішує інші геологічні задачі.

Ключові слова: анізотропія, пружні постійні, тектонофаціальний аналіз.

Д.А. Безродний. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОГО ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА. Рассмотрены особенности технологии изучения упругой анизотропии горных пород, которая базируется на петроакустических исследованиях. Проанализированы преимущества приведенной технологии по сравнению с другими методами петрофизических исследований. Методика экспериментальных измерений скоростей квазипродольных и квазипоперечных волн зависит от характера анизотропности породы. Образцы могут исследоваться в форме цилиндра, куба или куборомбододекаедра. Это дает возможность получать исчерпывающую информацию об анизотропии упругих волн в горных породах, акустической и упругой симметрии и текстуры пород.

Приведенная методика дает возможность проведения акустического текстурного и тектонофациального анализа горных пород, воспроизводит тектоническую природу условий их формирования и преобразования, решает другие геологические задачи.

Ключевые слова: анизотропия, упругие постоянные, тектонофаціальний аналіз.

Стан проблеми Дослідження анізотропії пружних хвиль гірських порід – джерело цінної інформації про геодинамічні умови їх формування і представляє інтерес до з'ясування сейсмічної анізотропії земних надр. Наявність анізотропії пружних хвиль свідчить про наявність в геологічному середовищі впорядкованостей різноманітної фізичної природи. Типи упорядкованості визначаються механізмом деформації геологічного середовища.

Багаточисельні ультразвукові дослідження гірських порід, які активно розпочалися в середині ХХ-го сторіччя і пов'язані з іменами Александрова К.С., Бабушки В., Баяк Є.І., Белікова Б.П., Берча І., Горбацевича Ф.Ф., Крістенсена Н., Продайводи Г.Т., Проса З. та інших показали, що для вичерпної характеристики азимутальної анізотропії швидкостей різних типів пружних хвиль необхідно застосовувати методи, які забезпечують визначення повного набору компонент матриці пружних постійних гірської породи.

Для експериментального дослідження анізотропії пружних постійних гірських порід в різних модифікаціях, в основному, застосовують наступні методи [1]:

- метод ортогональних напрямків;
- метод сфери;
- акустополаризаційний метод;
- метод особливих напрямків;

- інваріантно-поляризаційний метод.

В методі ортогональних напрямків (Берч Ф. та інші) експериментальні вимірювання швидкостей повздовжніх та поперечних хвиль здійснюють у трьох взаємно ортогональних орієнтованих циліндричних зразках, що виготовлені з одного блоку породи, і їхня орієнтація узгоджена із елементами текстури гірської породи. Це дає можливість виявити наявність анізотропії і зробити наближену оцінку коефіцієнту анізотропії пружних хвиль, проте метод не забезпечує просторовий аналіз швидкостей пружних хвиль та визначення повного набору матриці пружних постійних.

Визначення анізотропії швидкостей повздовжніх хвиль у методі сфери (Прос З., Бабушка В. та інші) здійснюється на зразках, що мають форму кулі. Метод забезпечує визначення детального просторового розподілу швидкостей квазіповздовжніх хвиль та кількісну оцінку коефіцієнта анізотропії квазіповздовжніх хвиль, але неможливість дослідження швидкостей поперечних хвиль не забезпечує розрахунку пружних модулів та повного набору компонент матриці пружних постійних гірських порід.

В акустополаризаційному методі (Горбацевич Ф.Ф. та інші) дослідження пружної анізотропії мінералів і гірських порід базується на вивченні явища розщеплення хвиль тільки поперечної поляризації. Визначається наявність анізотро-

пії, число і просторова орієнтація елементів пружної симетрії середовища. Суттєвим недоліком методу є складність розрізнення ефектів лінійної анізотропії поглинання та пружної анізотропії, а також неможливість отримання повного набору матриці компонент пружних постійних для випадку низькосиметричних середовищ.

В методі особливих напрямків (Александров К.С., Беліков Б.П., Кристенсен Н., Рамананатандро Р., Рижова Т.В., Шабанова А.О. та інші) [2] швидкості розповсюдження пружних хвиль вимірюються в особливих напрямках, що суворо узгоджені із елементами симетрії структури мінералів і текстури гірських порід. Це забезпечує якісні результати при вивченні гірських порід, елементи симетрії текстур яких відомі. Безперечною перевагою методу є можливість отримання повного набору пружних постійних для текстур гірських порід із відомою просторовою орієнтацією елементів симетрії. Але у випадку, коли симетрія текстури гірської породи і просторова орієнтація її елементів невідомі, то метод особливих напрямків застосовувати неможливо.

Інваріантно-поляризаційний метод (Продайвода Г.Т., Вижва С.А., Безродний Д.А.) [1] забезпечує можливість визначення повного набору пружних постійних і симетрії текстури гірських порід шляхом вимірювання фазових швидкостей різної поляризації в 9-ти напрямках куборомбодекаедра. Навіть за відсутності апріорної інформації про симетрію текстури гірської породи немає необхідності узгодження напрямків вимірювання швидкостей із просторовим положенням елементів симетрії. Визначення повного набору матриці регулярної складової ефективного тензора пружних постійних текстур гірських порід забезпечує повний розв'язок задачі визначення параметрів анізотропії пружних хвиль, включаючи побудову стереопроєкцій ізоліній індикатрис фазових швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль, диференціального коефіцієнту пружної анізотропії, кута відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі. Безперечною перевагою інваріантно-поляризаційного методу є можливість кількісної оцінки регулярної і флуктуаційної складових ефективною фазовою швидкістю пружної хвилі, що забезпечує розрізнення ефектів анізотропії неоднорідностей та можливість визначення акустичної і пружної симетрії текстури гірських порід при відсутності апріорної інформації і довільній орієнтації лабораторної системи координат.

В роботі розглядаються можливості та особливості застосування сейсмоакустичного інваріантно-поляризаційного методу для вирішення задач текстурного аналізу деформацій гірських порід.

Тектонічні деформації гірських порід проявляються в орієнтації кристалографічних осей мінералів, у видовженні або сплющуванні породотвірних мінералів та формуванні макро- і мікротріщин, які залежать від інтенсивності деформацій і термодинамічних умов (температури, напруженого стану). Для їхнього вивчення застосовують методи структурного і тектонофаціального аналізу. В основу останнього покладено кількісні ознаки деформацій, текстурно-структурні та мінеральні зміни порід, які супроводжують ці деформації.

Між структурою, складом і ступенем деформації, існує закономірна відповідність. Так, сильно деформовані породи формуються в умовах більш низьких тисків і температур, ніж менш деформовані породи [3 – 5]. Процеси катаклазу характеризуються текстурними змінами порід і мінералів (зокрема кварцу): розгнейсуванням, переорієнтацією кристалів мінералів і зміною їх розмірів та форми.

Розроблена методика акустичного текстурного аналізу дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, визначати пружну симетрію та текстуру порід. Ця інформація особливо важлива при інтерпретації геофізичної інформації, отриманої при дослідженнях порід на значних глибинах і в складних геологічних умовах, зокрема, для тектонофаціальних досліджень метаморфічних порід.

Технологія таких досліджень (рис. 1) включає в себе 2 блоки:

- експериментальні вимірювання швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль;
- обробка і інтерпретація експериментальних результатів.

У квазіоднорідному анізотропному середовищі спостерігаються досить інтенсивні ефекти акустичного двопробеневого заломлення, особливі напрямки визначити важко. Крім того при вимірюваннях необхідно використовувати імпульси великої тривалості, і тому задача виміру фазових ефективних квазіпоперечних хвиль вважається особливо важкою. Від точності вимірювання фазових швидкостей пружних хвиль істотно змінюються в більшій або меншій мірі фактично всі параметри акустичної і пружної анізотропії, що вносить суттєвий вплив на інтерпретацію даних спостережень.

Методика експериментальних вимірювань швидкостей

З штуфа гірської породи на каменерізному верстаті виготовляється зразок. Форма зразка залежить від характеру анізотропності породи, що досліджується.

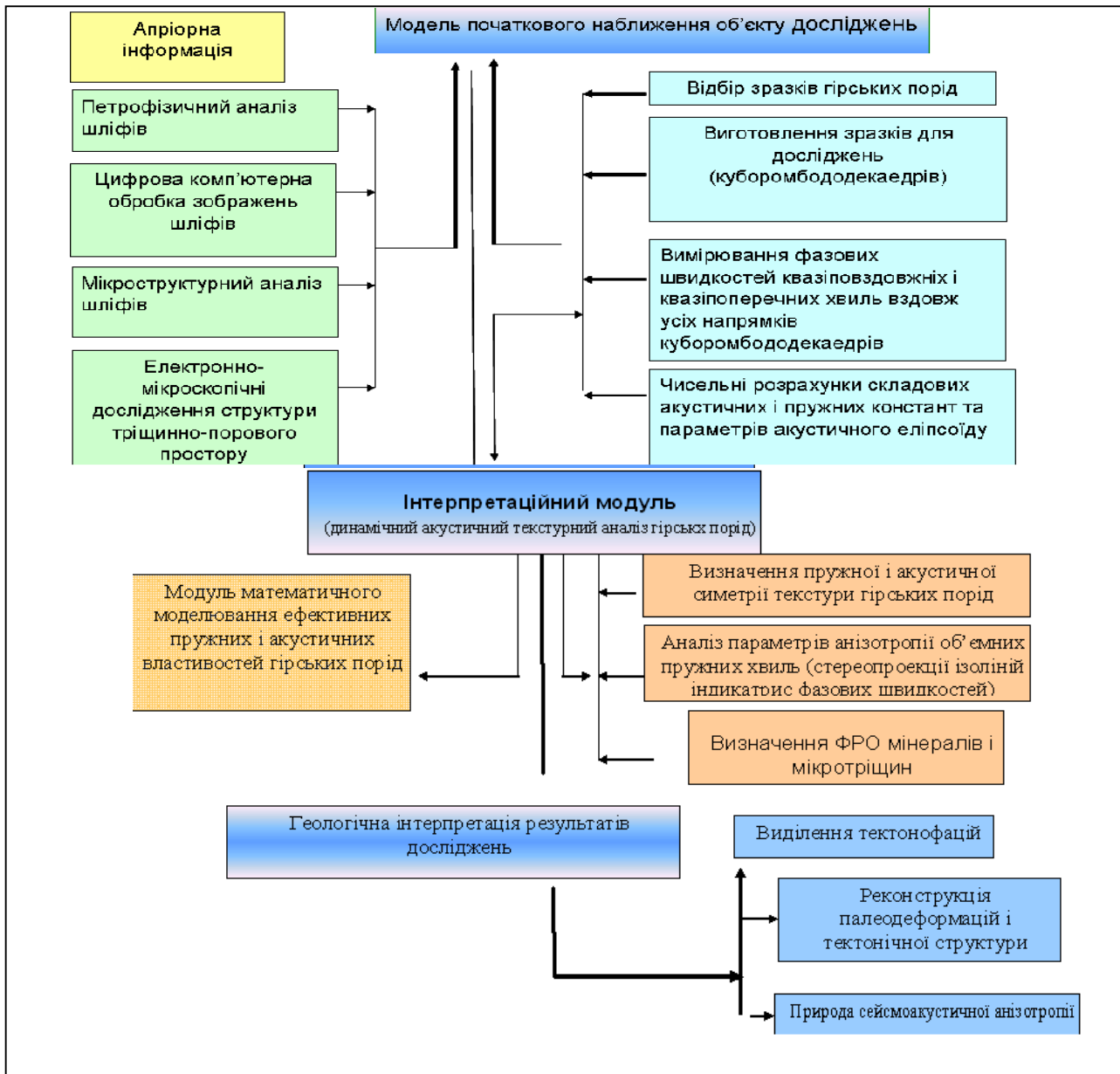


Рис. 1. Схема технології акустичного текстурного аналізу.

У випадку, коли геологічне середовище можна прийняти як ізотропне, достатньо проводити вимірювання швидкостей повздовжньої та поперечних хвиль в одному напрямку, форма зразка має бути циліндричною.

У випадку, коли група симетрії породи описується кубічною, проводяться вимірювання у трьох взаємно ортогональних напрямках і форма зразка рекомендується у вигляді куба, або 3 циліндрів вздовж трьох взаємно ортогональних напрямків.

У решті випадків, коли тип симетрії нижче або невідомий, геологічне середовище можна вважати анізотропним і зразок виготовляють у вигляді куборомбододекаедра.

Ультразвукова апаратура для вимірів швидкості забезпечує формування достатньо широкого набору частот заповнення і тривалості

акустичних імпульсів, що застосовуються при вимірюваннях. Діапазон частот заповнення імпульсів від 0,25 МГц до 5 МГц забезпечує успішне дослідження фазових швидкостей на зразках практично будь-яких генетичних типів гірських порід [1, 2].

Середньоквадратична похибка визначення швидкостей повздовжніх і поперечних хвиль у кристалічних зразках не перевищує 0,4% для повздовжніх і 0,5% для поперечних хвиль. У осадових породах вона дещо вища: 0,5% для повздовжніх і 0,9% для поперечних на частоті 0,4–0,8 МГц.

Розроблений алгоритм і програма інверсії азимутальної залежності квазіповздовжніх і квазіпоперечних швидкостей у функцію розподілу орієнтації мікротріщин і мінералів (рис. 1).

На цьому етапі проводиться визначення акустичних констант [1, 6], яке має важливе значення для вирішення цілого ряду задач:

- вибору стандартної акустичної системи координат,
- визначення підсистеми симетрії,
- обґрунтування методики урівноваження фазових швидкостей і т.і.

Для згладжування флуктуаційної складової ефективної фазової швидкості, яка обумовлена недосконалістю текстур гірських порід, застосовується інваріантно-поляризаційний метод [1,6].

Для аналізу деформацій і ступенів дислокаційних перетворень в акустичному текстурному аналізі використовуються параметри акустичного еліпсоїду (акустична лінійність L_μ і акустична сланцюватість S_μ), інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_μ та пружні постійні геологічного середовища C_{mn} .

Обробка і інтерпретація результатів петроакустичних досліджень

Згортка акустичного тензору μ_i є інваріантом. Отже, в будь-яких трьох взаємно ортогональних напрямках хвильової нормалі сума квадратів фазових швидкостей ізонормальних хвиль буде постійною величиною. Ця фундаментальна властивість будь-якого анізотропного середовища використовується для урівноваження ефективних фазових швидкостей в робочих системах координат куборомбододекаедра [1].

Величина коефіцієнта відносної середньоквадратичної акустичної анізотропії (A_μ) визначається як міра відхилення акустичних констант анізотропної текстури від найближчої до неї ізотропної текстури та розраховується за формулою:

$$A_\mu = \sqrt{\frac{F_{\min}^{(\mu)}}{(\mu_{il}^2)_c}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\text{де } (\mu_{il}^2) = \mu_{11}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{33}^2; \quad (2)$$

$\mu_{11}^2, \mu_{22}^2, \mu_{33}^2$ - власні значення акустичного тензора.

Параметри акустичної лінійності L_μ і сланцюватості S_μ розраховуються за допомогою власних значень акустичного тензора і характеризують параметри акустичного еліпсоїду:

$$L_\mu = \frac{\mu_q}{\mu_m}; S_\mu = \frac{\mu_m}{\mu_p}, \quad (3)$$

де μ_q, μ_m, μ_p – найбільше, проміжне і найменше значення акустичного тензора [1,6–8].

Співставлення власних значень з урахуванням їхніх довірчих границь дозволяє стверджувати, що симетрія акустичного тензора досліджених зразків метаморфічних порід є не вище ромбічної.

Проводиться аналіз параметрів акустичного еліпсоїду: акустичної лінійності і акустичної сланцюватості. Графік залежності $L_\mu = f(S_\mu)$ характеризує ступінь упорядкованості елементів текстури породи вздовж окремих напрямків (акустична лінійність) або розміщення на площині (акустична сланцюватість).

На наступному етапі обчислюються усереднена (регулярна) складова $\langle C_{mn} \rangle$ ефективного тензору пружних постійних, яка дає оцінку дисперсії згладженої флуктуаційної складової.

На останньому етапі досліджень виконується аналіз параметрів пружної анізотропії, а саме, стереопроекцій ізоліній індикатрис фазових швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль, диференціального коефіцієнту пружної анізотропії, кута відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі.

Результати випробування методики За даною методикою отримані експериментальні дані про пружні постійні зразків:

- метаморфічних порід Криворізької надглибокої свердловини і її полігону,
- теригенних глибозалягаючих порід Лисівської надглибокої свердловини,
- карбонатних складнопобудованих порід Дніпровсько-Донецької западини тощо.

Отримані матеріали дозволяють зробити певні висновки відносно пружної симетрії порід, які відібрані зі значних глибин. Розглянуті кристалічні сланці, залістисті кварцити, амфіболіти, плагіограніти і плагіомігматити, гнейси, пісковики різного складу, вапняки, доломіти та інші осадові породи [1, 7, 9].

Текстури досліджених порід відносяться до класу планальних і аксіальних текстур моноклінної, тетрагональної та ромбічної симетрії. В досліджених зразках порід, які неодноразово зазнавали впливу тектонічних деформацій, анізотропія викликана впорядкованістю мікротріщин і мінералів за формою та кристалографічною орієнтацією мінералів. Впорядкованість мікротріщин, яка викликана залишковими напруженнями, змінюється в межах зразка та відображає зміну локальних полів мікронапруг, які обумовлені будовою петроструктури.

Висновки. Таким чином, наведена в статті технологія акустичного текстурного аналізу

повністю враховує особливості пружної анізотропії геологічного середовища, базується на оригінальних петроакустичних дослідженнях і обробці отриманих матеріалів за допомогою інверсії азимутальної залежності квазіповздовжніх і квазіпоперечних швидкостей у функцію розподілу орієнтації мікротріщин і мінералів.

Технологія дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, пружну симетрію та текстуру порід, відтворює розвиток деформацій та тектонічну природу умов їхнього формування і перетворення, вирішує інші геологічні задачі.

Література

1. Продайвода, Г.Т. Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя : монографія / Г.Т. Продайвода, С.А. Вишва, Д.А. Безродний, І.М. Безродна. – К. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. 378 с.
2. Александров, К.С. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород / К.С.Александров, Г.Т. Продайвода // - Новосибирск, Изд. СО РАН, 2000. - 354с.
3. Лукиєнко, О.І. Тектонофаціальна структура Кривбасу / О.І.Лукиєнко // Вісник Київ. ун-ту, Геологія, 2000, вип.17. - С.8-13.
4. Паталаха, Е.И. Тектонофазии мезозоны (атлас микроструктур) / Е.И.Паталаха, А.И.Лукиенко, В.А.Дербенев // Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР, 1987. – 184 с.
5. Паталаха Е.И. Тектонические потоки как основа понимания геологических структур / Е.И.Паталаха, А.И.Лукиенко, В.В.Гончар // – К.: НАНУ, 1995. – 159 с.
6. Продайвода, Г.Т. Акустика текстур гірських порід: Навч. посіб. / Г.Т. Продайвода. // К.: ВГЛ "Обрії", 2004. — 142 с
7. Продайвода Г.Т. Пружна симетрія і параметри анізотропії метаморфічних порід Криворізької надглибокої свердловини / Г.Т.Продайвода, Д.А.Безродний, І.М.Безродна, О.М. Кожан // Вісник Київськ. ун-ту, Геологія. 2001. - № 24. - С. 91-95.
8. Продайвода Г.Т. Акустический метод определения функции распределения ориентации минералов и микротрещин полиминеральных горных пород / Г.Т.Продайвода, Д.А.Безродний, Т.Г. Продайвода // Геофізичний журнал, 2005. - №3. – С.54-61.
9. Продайвода Г.Т. Упругая симметрия и параметры анизотропии образцов архейских гнейсов и амфиболитов Кольской сверхглубокой скважины / Г.Т.Продайвода, К.С. Александров // Геология и геофизика. – 1998. – 39, № 3. – С. 377-387.

УДК 553.981:550.8

*О.Л. Василенко, ст. наук. співроб.,
*О.В. Барташук, к.геол.н., зав. відділу,
**В.В. Панасенко, начальник відділу,
***М.М. Здоровенко, головний геолог,
*Український науково-дослідний інститут природних газів,
**ТОВ «Ю.БИ. СЕЙСМИК УКРЕИИ»,
***ТОВ «ЮСЕЙС»

ЕЛЕМЕНТИ ЗДВИГОВОЇ ТЕКТОНІКИ В ФОРМУВАННІ СХІДНО-МЕДВЕДІВСЬКОГО ПІДНЯТТЯ

Розглянуто особливості геологічної будови Східно-Медведівського підняття, наведені докази його здвигової природи. По відкладах середнього карбону виділений новий тип структур – соляно-здвигові структури (СЗС).

Ключові слова: родовище, горизонт, конседиментаційний розмив, підкид, здвиг, соляно-здвигова структура (СЗС)

А.Л. Василенко, А.В. Барташук, В.В.Панасенко, М.М. Здоровенко. ЭЛЕМЕНТЫ СДВИГОВОЙ ТЕКТониКИ В ФОРМИРОВАНИИ ВОСТОЧНО-МЕДВЕДОВСКОГО ПОДНЯТИЯ. Рассмотрены особенности геологического строения Восточно-Медведовского поднятия, приведены доказательства сдвиговой природы его формирования. По отложениям среднего карбона выделен новый тип ловушек, приуроченных к соляно-сдвиговым структурам (ССС).

Ключевые слова: месторождение, горизонт, конседиментационный размыв, взброс, сдвиг, соляно-сдвиговая структура (ССС).

Актуальність.

Дніпровсько-Донецька западина – це крупний прогин, який утворився в тілі Сарматського щита. Тривалий час панувало уявлення про те, що в геологічно-історичному розвитку западини переважну роль відігравали процеси горизон-

тального розтягнення, зумовлені коливальними низхідними рухами земної кори [3, 6].

Теоретичні основи горизонтальних тектонічних рухів розроблені в наукових працях О.В. Пейве, С.В. Руженцова, М.Г. Леонова, В.М. Павлінова та ін. вчених. Ряд дослідників робить висновок про формування ряду структур в умо-