

зма. Ч.2. — Баку, 1973. — С. 47-49. 13. Тектоника Украины / Под ред. С.С.Круглова, А.К.Цыпко. — М., 1988. 14. Толстой М.И., Шабатура О.В. Онишук І.І., Бичок В.Д. Вивчення неогеодинамічних особливостей порід фундаменту за даними екогеофізичних досліджень // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. — 2002. — № 2. — С. 40-45. 15. Толстой М.И., Шабатура О.В. Онишук І.І., Бичок В.Д. Неогеодинамічні особливості порід кристалічного фундаменту природного заказни-

ка "Жуків Хутір" за даними екогеофізичних досліджень // Вісник Київського університету. Геологія. — 2003. — № 25. — С. 64-68. 16. Хоменко В.І. Глибинна будова Закарпатського прогину. — К., 1971. 17. Хоменко В.І. Глибинна структура юго-западного края Восточно-Европейской платформы. — К., 1987. 18. Шолло Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. — Л., 1977.

Надійшла до редколегії 27.09.08

УДК 550.83

В. Андрущенко, пров. інж., В. Курганський, д-р геол.-мінералог. наук,
В. Роман, ст. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, П. Сиротенко, зав. лаб.,
І. Тішаєв, асист., В. Бугрій, асп.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СЕЙСМОКОМПЛЕКС "КНУ-УКРДГРІ" ТА ЙОГО МОЖЛИВОСТІ ПРИ ВИРІШЕННІ ГЕОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ

Розглянуто призначення та можливості експериментального свердловинного сейсмокомплексу КНУ-УкрДГРІ. Наведено результати випробування сейсмокомплексу та порівняння його характеристик із зарубіжними аналогами.

Possibilities and destination of experimental seismocomplex "KNU-UkrSPI" are considered. Result of its tests and comparison with foreign analogues are shown.

Вступ. Одним з найважливіших джерел інформації про внутрішню будову середовища при пошуках покладів нафти і газу є збір, обробка та інтерпретація даних свердловинних досліджень. Серед численних геофізичних методів дослідження свердловин особливе місце займає метод вертикального сейсмічного профілювання (ВСП), що застосовується на сьогоднішній день практично в усіх розвідувальних свердловинах [3]. Метод ВСП дозволяє вирішувати широкий спектр геологічних задач на різних етапах геологорозвідувальних робіт (при пошуках, розвідці та дорозвідці нафтогазових родовищ) [5]. Незважаючи на інтенсивні дослідження в галузі свердловинної сейсморозвідки, існує ряд актуальних проблем, які стосуються даної тематики: вдосконалення існуючих та розробка нових модифікацій методу (зокрема, міжсвердловинного сейсмічного профілювання та ВСП під час буріння), впровадження нових апаратних рішень [1, 2, 5] та підходів до обробки та інтерпретації даних ВСП [3].

Що стосується вдосконалення апаратури методу ВСП, то сучасні досягнення комп'ютерних та інформаційних технологій і потреби сейсморозвідки дають підстави для здійснення в перспективі інтеграції польової і камеральної стадій сейсморозвідувального процесу, тобто створення сейсморозвідувальних комплексів, що дозволяють виконувати, принаймні, доінтерпретаційну обробку спостережуваної інформації в процесі спосте-

режень (табл.). Сейсморозвідувальні комплекси є однією із різновидностей активних багатоканальних систем збирання інформації, які будуються за загальнотехнічними принципами і стандартизованими схемами.

Метою статті є розгляд питань, які стосуються розробки і випробування експериментального зразка свердловинного збуджувально-приймального сейсмокомплексу. Розробка свердловинного сейсмокомплексу (рис. 1) була ініційована відділом сейсморозвідки УкрДГРІ на підставі досвіду обробки та інтерпретації матеріалів сейсморозвідки складнобудованих геологічних об'єктів [4]. Основним призначенням сейсмокомплексу є виявлення і дослідження субвертикальних поверхонь і контактів порід в наволоосвердловинному просторі, недоступних для вивчення існуючими засобами наземної і свердловинної сейсморозвідки. Базова конфігурація експериментального зразка свердловинного сейсмокомплексу складається з одного свердловинного збуджувального модуля і одного свердловинного приймального модуля та відповідних свердловинних і наземних засобів підтримки їх функціонування. Мінімальний за складом базовий зразок є достатнім для обґрунтування основних положень конструювання більш складних свердловинних збуджувально-приймальних сейсмокомплексів та експериментальної оцінки вирішального показника їх призначення — можливої дальності зондування наволоосвердловинного середовища.

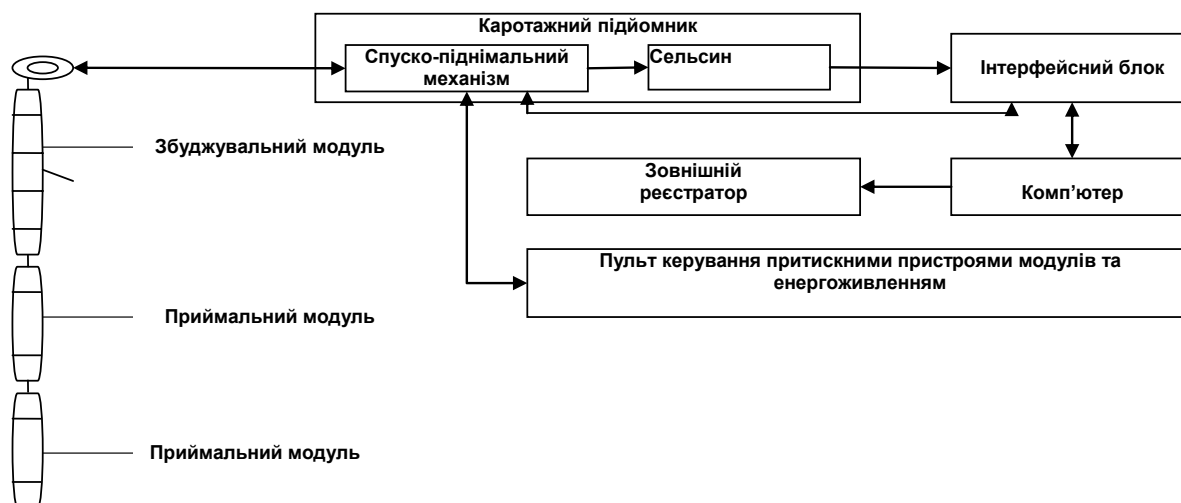


Рис. 1. Структурна схема свердловинного сейсмокомплексу

Експериментальний зразок сейсмокомплексу розрахований на роботу із стандартним допоміжним геофізичним обладнанням для досліджень у свердловинах.

Теоретично експериментальний зразок сейсмокомплексу у повному складі або окремо його збуджувальна і приймальна системи можуть бути використані для робіт

за усіма відомими методиками свердловинних і свердловинно-наземних досліджень: ближнього і дальнього зондування навколосвердловинного середовища шляхом збудження і приймання коливань у одній свердловині, прямого і оберненого сейсмічного профілювання, міжсвердловинного зондування. Вирішальною умовою здійснення кожної з названих схем досліджень є достатня потужність використовуваних сейсмоджерел. Найменшою мірою ця умова стосується використання свердловинної приймальної системи для робіт методом ВСП, оскільки при цьому використовуються наземні сейсмоджерела. Немає принципових перешкод доопрацюванню експериментального зразка системи для її виробничого застосування у складі сейсмокомплексів для ВСП.

Приймальна система свердловинного сейсмокомплексу призначена для роботи у складі свердловинних або свердловинно-наземних сейсморозвідувальних комплексів і забезпечує проведення досліджень у вертикальних відкритих або обсаджених свердловинах [1]. Приймальна система (рис. 2) складається з свердловинних сейсмоприймачів, з'єднаних з наземними комп'ютеризованим реєстратором та пультом керування. В залежності від структури сейсморозвідувального комплексу і використовуваної методики досліджень використовується три- або семижильний геофізичний кабель. Свердловинні приймальні модулі забезпечують виконання таких операцій:

- чотирикомпонентну реєстрацію сейсмічних коливань в кожному модулі;
- попереднє підсилення і фільтрацію сигналів сейсмоприймачів та їх аналого-цифрове перетворення і накопичення або кореляційну обробку в цифровій формі у разі імпульсного або кодоімпульсного збудження сейсмічних коливань;
- визначення внутрішньої температури та параметрів просторового положення (у відкритих свердловинах)

кожного з приймальних модулів і передавання відповідної інформації через телеметричну лінію зв'язку в наземний комп'ютеризований реєстратор.

Наземна частина приймальної системи забезпечує виконання таких операцій:

- керування роботою свердловинних приймальних модулів і наземних блоків, у тому числі сейсмоджерел;
- збирання, зберігання, обробку і відображення інформації, що отримана від приймальних модулів та іншого обладнання сейсморозвідувального комплексу;
- запис даних на жорсткому магнітному диску та диску CD/DVD-R/RW у форматі SEG Y для подальшої обробки та архівування.

Для оцінки створеної приймальної системи у таблиці її параметри і характеристики порівнюються з відповідними показниками зарубіжних аналогів. Більшість основних параметрів системи відповідає кращим світовим зразкам, частина потребує покращення. В першу чергу, це стосується швидкості обміну інформацією в телеметричному каналі, повноти контролю функціонування і тестування системи, маси і розмірів свердловинних модулів.

Усунення існуючих недоліків створеної системи потребує певного часу її опрацювання і висновків з досвіду експлуатації. Низька швидкість обміну інформацією в телеметричній лінії зумовлена спроектованою високою надійністю передавання даних (імовірність похибки 10^{-12} порівняно з 10^{-6} для аналогів). Корегування жорсткості захисту інформації і відповідно швидкості її передавання планується виконати після випробування створеної приймальної системи у комплексі із свердловинним сейсмоджерелом на спільному семижильному кабелі. В разі застосування системи у складі сейсмокомплексів для ВСП захист і швидкість передавання інформації можуть бути прийняті у відповідності з нормами для існуючих аналогів.

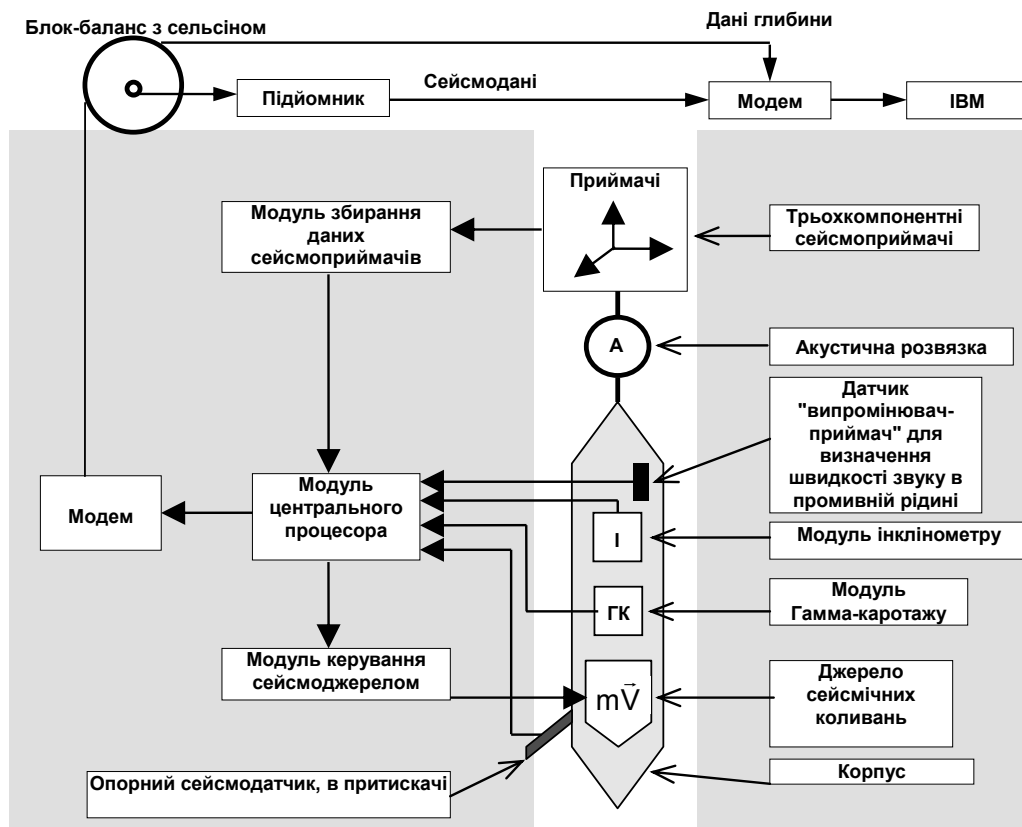


Рис. 2. Функціональна схема приймальної частини свердловинного сейсмокомплексу

Отримані результати. Підсумковим етапом створення свердловинного сейсмокомплексу є випробування його в реальних умовах свердловин. Виходячи з організаційних і фінансових можливостей розробників, випробування свердловинного сейсмокомплексу були проведені у дослідних свердловинах ВАТ "Київський завод Геофізприлад".

Експериментальні випробування сейсмокомплексу виконувалися у двох вертикальних свердловинах з використанням трижильних кабелів. Відстань між свердловинами становить близько 6 м. Свердловина № 1 має проектну глибину 600 м. В інтервалі глибин 0-320 м свердловина обсаджена сталевією трубою діаметром 168 мм, нижче – необсаджена ділянка діаметром 150 мм (інтервал 320-400 м) і 118 мм (інтервал 400-600 м). Проектна глибина свердловини № 2 становить 240 м, від устя до забою вона обсаджена асбестоцементною трубою діаметром 188 мм. Вода в свердловинах знаходиться на глибині приблизно 80 м. Геологічний розріз свердловин до глибини приблизно 320 м представлений осадовими породами (кварцевим піском, мергелем, крейдою, глиною), нижче – гранітами. Дослідні випробування сейсмокомплексу склалися з двох етапів: попередніх випробувань лише приймальної системи за методикою неповздовжнього ВСП та випробувань експериментального сейсмокомплексу в повному складі.

На першому етапі експериментальних досліджень приймальна система сейсмокомплексу була випробувана за методикою прямого неповздовжнього ВСП. При цьому збудження коливань відбувалось наземним малопотужним електромагнітним імпульсним сейсmodжерелом, розміщеним на відстані 20 м від устя свердловини № 1, а сама приймальна система переміщувалась по стовбу свердловини в інтервалі глибин 0-520 м з кроком 20 м. Наземне імпульсне сейсmodжерело при

дослідженнях працювало в режимі безперервного збудження з різною кратністю імпульсів: 64 (в інтервалі 0-100 м), 1 (в точці 120 м), 128 (в інтервалі 140-500 м).

При аналізі сейсмограм варто відмітити високу якість записів, які дозволяють практично у всіх випадках виділяти корисний сигнал на фоні різних регулярних і випадкових завад. Співставлення записів першого каналу (вертикальної компоненти) і сьомого каналу (середнього квадратичного записів ортогональної трійки сейсμοприймачів) свідчить про хорошу ідентичність каналів і достовірність зареєстрованих сигналів. При подальшому розгляді результатів ВСП у свердловині № 1 було побудовано сейсмограми-монтажі записів вертикальної компоненти і ортогональних компонент коливань (рис. 3). Особливо показово, зважаючи на методику проведення дослідження, є сейсмограма вертикальної компоненти. Верхні чотири траси на цій сейсмограмі (записи в безводній частині свердловини) характеризуються наявністю досить інтенсивних хвиль-завад, природу яких визначити однозначно досить важко, хоча можна припустити, що походження цих хвиль пов'язане із взаємодією прямої хвилі з обсадною колоною свердловини. На решті сейсмічних трас досить впевнено можна виділити пряму хвилю. Сейсмограми ортогональних компонент не наводяться, оскільки при збудженні коливань з ближнього пункту не є показовими, слід лише зауважити, що вони характеризуються досить стійким розподілом завад практично на всіх трасах і частковою кореляцією (в межах окремих інтервалів) прямої хвилі. Годограф прямої хвилі на сейсмограмі вертикальної компоненти коливань (рис. 4а) чітко відображає межу осадові породи – гранітний масив і межі пластів осадові товщі. Побудова кривої зміни пластової швидкості (рис. 4б) з глибиною дозволяє досить впевнено співставити отримані дані з геологічним розрізом свердловини.

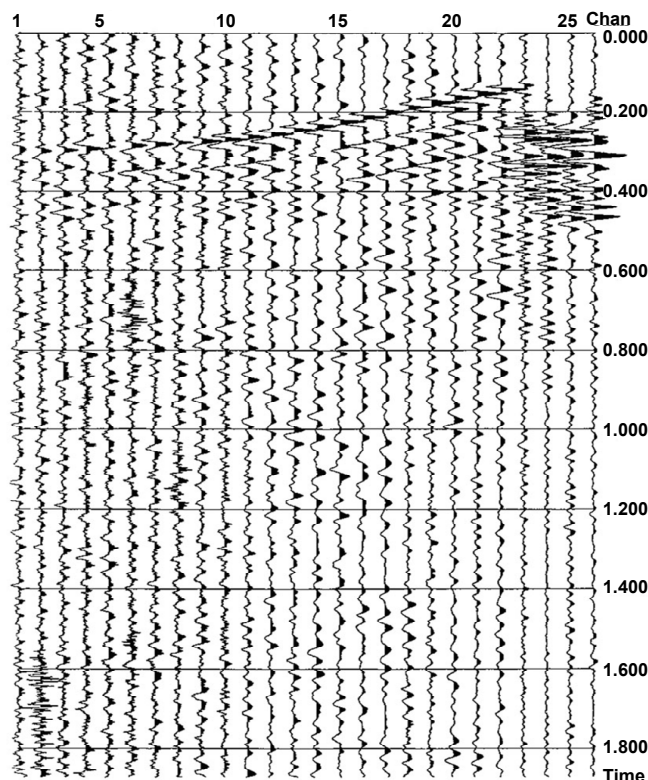


Рис. 3. Сейсмограма-монтаж трас вертикальної складової коливань, обчисленої за записами компонент симетричної ортогональної установки сейсμοприймачів

На наступному етапі випробування експериментального сейсмокомплексу відбувалось в повному складі

(з використанням свердловинного сейсmodжерела) за наступною методикою: приймальний модуль був роз-

міщений у фіксованій точці свердловини № 2 на глибині 200 м (з метою послаблення поверхневих завад), сейсмоджерело переміщувалося у свердловині № 1 в інтервалі глибин 130-280 м з кроком 5-10 м. У складі свердловинного сейсмокомплексу у дослідних свердловинах випробувані герметичний (умовно низькочастотний) і бойковий (умовно високочастотний) варіанти свердло-

винного сейсмоджерела. Випробування сейсмоджерел виконані за однаковою схемою: з дублюванням їх позицій у свердловині, з однаковою кількістю накопичень сигналів і з однаковими параметрами реєстрації сигналів. Виконані експерименти дають можливість розрахунково оцінити дальність зондування навколосвердловинного середовища.

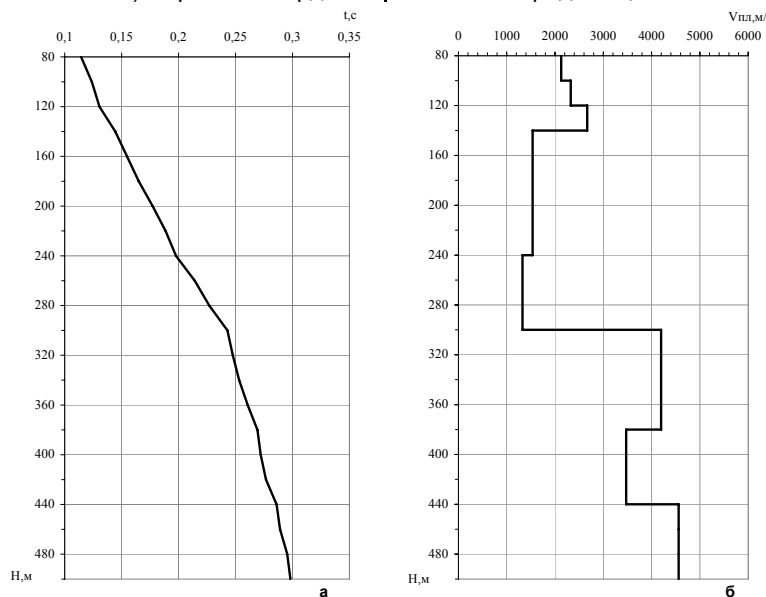


Рис. 4. Годограф прямої хвилі (а) та графік зміни пластової швидкості (б)

Таблиця. Порівняльна характеристика сучасних цифрових систем ВСП

Параметр	Системи ВСП				
	АМЦ-ВСПЗ-48	SST-500	WR-MSR	CSI	КНУ- УкрДГРІ
1. Кількість модулів	(3-20)+ ретранслятор	12+головний	12	1-3(у відкритій свердловині)	1(з можливістю нарощування)
2. Система датчиків приймального модуля	3-компонентна ортогональна хуз або однокомпонентна	3-компонентна ортогональна хуз+гідрофон	3-компонентна ортогональна хуз, зафіксована або підвісна	3-компонентна ортогональна хуз з орієнтацією в кожному модулі	3-компонентна ортогональна иметрична+вертикальний сейсмоприймач
3. Притискний пристрій	Електромеханічний	Гідравлічний	Гідравлічний	-	Електромеханічний
4. Рівень апаратних шумів, мкВ	0,1	-	-	0,4	0,14
5. Крок дискретизації, мс	0,5;1,0;2,0;4,0	0,25;0,5;1,0;2,0	0,25;0,5;1,0;2,0	0,5;1,0;2,0;4,0	0,5;1,0;2,0;4,0
6. Стандарт запису інформації	СЦС-3, SEG-Y	-	-	-	SEG-Y
7. Наявність системи визначення глибини	Є	Є	-	-	Є
8. Наявність системи визначення орієнтації модулів	Немає	Немає	-	Є	Для необсажених свердловин
9. Наявність засобів контролю і тестування	Вбудований калібратор	-	-	Повна калібровка системи	Неповне тестування
10. Швидкість обміну між головним модулем і наземним реєстратором, кбіт/с	(1/24...1/3)*1000 (оптимізується комп'ютером системи)	-	64;128;256;512	-	2,29
11. Габаритні розміри, головного модуля, мм	Ø48×1460	-	-	Ø117×5340	Ø89×3360
12. Маса головного модуля, кг	11	-	27,5	123	80
13. Максимальна робоча температура, °С	120	-	170	175	175
14. Максимальний робочий тиск, Мпа	80	-	140	140	100
15. Матеріал корпусу модуля	Титан	-	Титан	-	Нержавіюча сталь

Досягнуте відношення сигнал-завада для прямих хвиль в середньому складає приблизно 7 одиниць. Зовнішні завади в умовах дослідних свердловин перевищують власні шуми приймальної системи в середньому більш ніж в 70 разів. В разі здійснення проектної норми

накопичення 5000 реалізацій сигналів (покращення відношення сигнал-завада в три рази) і роботи в спокійних свердловинах (покращення відношення сигнал-завада в 70 разів) досягнуте значення сигнал-завада для прямих хвиль становитиме приблизно 1500 одиниць. Для

хвилі, відбитої (коефіцієнт відбиття 0,05) вертикальною поверхнею, віддаленою від свердловини на 300 м (амплітудний коефіцієнт розходження і поглинання порівняно з умовами експерименту приблизно 15), амплітуда має бути в 300 раз меншою. В стільки ж разів зменшиться відношення сигнал-завада і становитиме приблизно 5 одиниць, що достатньо для виділення відбитої хвилі. На основі проведених експериментів є підстави для проведення дослідних робіт у глибоких нафтогазових свердловинах з метою прямого підтвердження можливостей свердловинного сейсмокомплексу у вирішенні завдань дальнього зондування навколосвердловинного середовища.

Висновки. Виконані у дослідних свердловинах випробування дають підстави для позитивних розрахункових оцінок можливості дальнього зондування навколо-

свердловинного простору в радіусі перших сотень метрів. Зроблені оцінки потребують підтвердження шляхом проведення спостережень у глибоких свердловинах та експериментального виділення відбитих хвиль.

1. Андрущенко В.О., Улітко А.Ф. Розробка, виготовлення і випробування приймальної системи комп'ютеризованого свердловинного сейсмокомплексу / Звіт про НДР. – К., 2001. 2. Аппаратура АМЦ-ВСП-3-48, ее особенности, опыт применения и перспективы использования / Мамлеев Т.С., Даниленко В.Н., Дмитриев В.В. и др. // Гальперинские чтения: Матер. конф. – М., 2001. – С.14-17. 3. Воронина Т.А., Черверда В.А. Оптимизационный подход к обработке данных метода вертикального сейсмического профилирования // Геология и геофизика. – 1994. – №5. – С.127-139. 4. Роман В.И., Пиганастий С.С., Сиротенко П.Т. та ін. Створення експериментальних зразків технічних і програмних засобів польової і свердловинної сейсморозвідки / Звіт про НДР. – К., 2003. 5. Шехтман Г.А. Состояние и перспективы развития модификаций метода ВСП // Гальперинские чтения: Матер. конф. – М., 2001. – С.2-7.

Надійшла до редколегії 15.09.08

УДК 550.344

Д. Малицький, канд. фіз.-мат. наук, Е. Козловський, пров. інж., О. Хитряк, асп.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ СЕЙСМОГРАМ

Автори пропонують програмне забезпечення для розрахунку сейсмічних полів у горизонтально-шаруватому середовищі на базі матричного методу Томпсона-Хаскела та матриць шостого порядку. Джерело сейсмічних хвиль розміщене в одному із шарів і представлене тензором сейсмічного моменту. Одержані результати математичного моделювання є простими у використанні і можуть застосовуватися для інтерпретації сейсмічних записів. На прикладі землетрусу 11.07.2001 р (m=2,3) показана можливість використання програмного забезпечення для вирішення оберненої задачі сейсмології з визначення компонент тензора сейсмічного моменту за даними однієї станції.

The software for the seismic wave field modeling on a free surface of a layered half-space using the Thompson-Haskell method and 6-th order matrices is suggested. The seismic-wave source is located in the homogeneous isotropic layer and is represented by seismic moment tensor. The results of mathematical modeling are sufficiently simple for utilization and can be used for interpretation of seismic records. On the example of the 11.07.2001 earthquake with m=2,3 the possibility of applying of the software for solving of seismology inverse problem of the seismic moment tensor's components determination with one station data using was shown.

Вступ. Математичне моделювання хвильових процесів у неоднорідних середовищах має важливе значення для вирішення як прямих, так і обернених динамічних задач сейсміки. Розв'язуючи пряму динамічну задачу ми отримуємо компоненти поля переміщення на вільній поверхні шаруватого півпростору. Іншими словами, розв'язок прямої задачі дає нам зміщення ґрунту під час землетрусу, спричинене деяким сейсмічним джерелом, розташованим на певній глибині і збуджуваним пружні хвилі. Для математичного моделювання такого процесу необхідно мати наступні вхідні дані: швидкісну модель середовища та модель сейсмічного джерела. Середовище моделюють по-різному: системою плоско-паралельних однорідних ізотропних шарів, системою тих же шарів, але розділених криволінійними границями. Часто всередині шарів задають деякі неоднорідні включення. Джерело сейсмічних хвиль, з одного боку, можна задавати у вигляді однонаправленої сили або тензора сейсмічного моменту, а з іншого боку – у вигляді стрибка переміщень-напружень. При цьому джерело розглядається як ефективно-точкове.

Слід відзначити, що методи розрахунку теоретичних сейсмограм являються ефективним інструментом для вивчення структури досліджуваного середовища та фізичних процесів у вогнищі землетрусу. Існує безліч методів вирішення прямої динамічної задачі сейсміки, найвідомішими із них є матричний, рефлексивний та променевий методи, а також такі числові методи, як метод скінчених елементів та метод скінчених різниць [1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 14]. Незважаючи на різноманіття постановок математичних задач та методів їх розв'язування, всі вони мають на меті знайти поле переміщення на вільній поверхні. У цьому аспекті важливим є використання декількох методик для побудови сейсміч-

них полів, їх порівняння між собою і реальними записами з метою інтерпретації характеристик джерела.

Геофізичні спостереження, зазвичай, інтерпретуються через вирішення прямої динамічної задачі сейсміки. Для цього створюється спрощена модель середовища, проводяться теоретичні та практичні модельні розрахунки, а отримані величини хвильових полів порівнюють із даними, спостережуваними в ході польового експерименту.

Метою роботи була розробка програмного комплексу для розрахунку сейсмічних полів на основі матричного методу та порівняльний аналіз одержаних з його допомогою результатів з результатами програми ISOSYN [13] і реальними записами конкретної події 11.07.2001 р в районі РГС "Королеве" для вирішення оберненої задачі визначення компонент тензора сейсмічного моменту. На основі теоретичних розрахунків поля переміщень для горизонтально-шаруватого середовища нами розроблено програмний пакет у системі Matlab. У комп'ютерних обчисленнях ми використали реально відому швидкісну модель середовища в районі станції Королеве району Закарпаття [4] та сейсмограму землетрусу, зареєстрованого на РГС "Королеве" (11.07.2001 р, m=2,3). На наш погляд, розв'язання такої проблеми за сейсмічними записами на одній станції є актуальною задачею, що цікавить багатьох сейсмологів [3, 12].

У своїх дослідженнях для пошуку розв'язку прямої динамічної задачі сейсміки ми використовуємо підхід, розроблений нами на базі класичного матричного методу Томсона-Хаскела та його модифікації [1, 2, 7, 9, 10], для випадку коли середовище задане системою однорідних ізотропних плоско-паралельних шарів (рис. 1).

Постановка задачі. Точкове джерело в даній роботі задається у вигляді тензора сейсмічного M_{ij} і розміщу-