

терметалічних сполук міді та олова може свідчити про те, що золоторудна мінералізація формувалася у відновних умовах, а виявлені у рудопрояві мінеральні комплекси з телуrom є типовими індикаторами верхніх горизонтів золоторудних родовищ [7]. У досить схожих умовах формувалася й золоте зруденіння у раніше відкритому та детально описаному Капітанівському рудопрояві (Голованівський блок) [3, 4, 5]. Беручи до уваги світові тенденції щодо сталої динаміки росту цін на золото можна зробити висновок, що відношення до рентабельності та перспектив розробки багатьох подібних до Бандурківського прояву рудних об'єктів може з часом кардинально змінитися.

1. Бондаренко С.М., Грінченко О.В., Іванов Б.Н., Сьомка В.О. Мінерало-геохімічні особливості уранового та золотого зруденіння Братсько-

Звенигородської металогенічної зони. // Геологія та генезис рудних родовищ України (сучасний стан, нові підходи, проблеми, рішення): Зб. матеріалів науково-техн. наради (Київ, 27-29 квітня 2004 р.). – К., 2004. – С. 81-83. 2. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины / Отв. ред. Я.Н. Белевцев, В.Б. Коваль. – К., 1995. 3. Грінченко А.В., Бондаренко С.Н., Семка В.А. благороднометаллическая минерализация в эндогенных и гипергенных рудах Капитановского массива (Украинский щит) // Металлогения древних и современных океанов. 2006: XII Научная студенч. школа, 24–28 апр. 2006 г. – Мюсс, 2006. – С. 60-63. 4. Мельничук Э.А., Нечаев С.В., Бондаренко С.Н., Семка В.А. Новое рудопроявление благородных металлов на Украинском щите // Докл. АН УССР. – 1989. – № 2. – С. 15-18. 5. Сьомка В.О., Бондаренко С.М., Павлюк В.М. Золотоносні скарни Капітанівського рудного поля (Дністровсько-Бузький район Українського щита) // Мінерал. журн. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 94-107. 6. Щербаків І.Б. Петрологія Українського щита. – Львів, 2005. 7. Groves D.I., Condie K.C., Goldfarb R.J., Hronsky J.M.A., Velreicher R.M. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits // Economic Geol. – 2005. – Vol. 100. – P. 203-224.

Надійшла до редколегії 06.09.10

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.334

О. Муйла, пров. інж,
Д. Малицький, доц. фіз.-мат. наук

МЕХАНІЗМ ВОГНИЩА ЗЕМЛЕТРУСУ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОЛОГІЇ

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

Розглядається задача представлення механізму джерела землетрусу. Показано основні моделі сейсмічних джерел з діаграмами випромінювання. Обчислено відсотковий вклад кожної компоненти в загальний тензор сейсмічного моменту та побудовано відповідні діаграми випромінювання.

The problem of representing the mechanism of earthquake source is considered. Basic models of seismic sources and radiation patterns are analyzed. Fraction of each a component in the tensor of seismic moment is estimated and corresponding radiation patterns plotted

Вступ. Моделювання джерел землетрусів і визначення їх параметрів є одними з головних завдань, якими займається сейсмологія. З точки зору математичного моделювання динамічні задачі механіки руйнування виявились невіршувальними класичними методами. Тому, слід розробляти нові підходи, в рамках яких можна розглядати процеси поширення розривів у неоднорідних середовищах. До останнього часу ведуться дискусії про точкову модель джерела. Розвиток чисельних методів привів до удосконалення і узагальнення результатів, що дало можливість визначити параметри джерела, використовуючи метод підбору для багаторазового розв'язання прямої задачі. Використання функції Гріна дозволяє отримати вираз для поля переміщень у довільній точці через вектор стрибка переміщень. Зазначимо, що ряд закордонних та вітчизняних учених запропонував підходи для визначення механізмів вогнищ землетрусів [3, 5-9].

Механізм вогнища землетрусу. Вперше концепцію тензора сейсмічного моменту як фізичного представлення джерела землетрусу було розроблено в 70-і рр ХХ ст. Використовувалась подвійна пара сил і полярність вступу прямої Р-хвилі. Цієї простої моделі було достатньо для опису механіки тектонічних процесів у межах земної кори. Однак, для більш детального аналізу внутрішніх геологічних процесів необхідна додаткова інформація, яку можна отримати із сейсмограм.

Тензор сейсмічного моменту як математичний опис еквівалентних сил і моментів точкового джерела добре підходить для дослідження процесів у джерелі. Загальне пружно-динамічне джерело в об'ємі V можна представити як суму простих сил f_n , що залежать від координати ξ і часу t . Переміщення U_i як функцію координати x і часу t представимо в такому вигляді [1]:

$$U_i(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V G_{in}(x, t, \xi, \tau) f_n(\xi, \tau) dV d\tau, \quad (1)$$

де G_{in} - функція Гріна.

Просторове інтегрування в (1) можна спростити, якщо задати функцію Гріна плавною в околі джерела. Використання точкового джерела, нехтування всіма зовнішніми силами та введення часової функції джерела дає:

$$U_i(x, t) = M_{nj} [G_{in,j} * s(t)], \quad (2)$$

де M_{nj} - компонента тензора сейсмічного моменту; $s(t)$ - часова функція джерела.

Тензор M_{nj} є симетричним і містить дев'ять компонент, шість з яких є незалежними [1]:

$$M_{nj} = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{pmatrix}$$

Фізичний зміст елементів тензора сейсмічного моменту показано на рис. 1. Компоненти тензора можна представити як диполі, орієнтовані в трьох напрямках.

Симетрія тензора дає загальний нульовий момент сили. Тоді приходимо до моделі подвійних пар сил. На рис. 2 показано принцип подвійної пари для елементів M_{yz} та M_{zy} . Два елементи тензора створюють подвійну пару сил, яка викликає чистий зсув, коли напруження в породі перевищують критичний механічний поріг. Залежно від загального напруження чи структури породи, розрив буде виникати в площині xy або xz . Ці дві площини називаються нодальними. Вони поділяють середовище на чотири частини: по дві зони стиску і розтягу. Вздовж нодальних площин амплітуди сейсмічних хвиль є нульовими. Паралельні до осі T амплітуди є позитивними, а вздовж осі P - негативними.

Інтерпретація. Використовуючи задачу на власні значення і власні вектори, розкладаємо механізм джерела на основні моделі механіки тріщин.

На рис. 3 показано деякі основні моделі сейсмічних джерел та відповідні їм діаграми випромінювання. Систе-

ма координат зліва допомагає пов'язати верхні і нижні моделі. Діаграми випромінювання дають важливу інформацію про просторове поширення сейсмічної енергії в уявній фокальній сфері довкола точкового джерела.

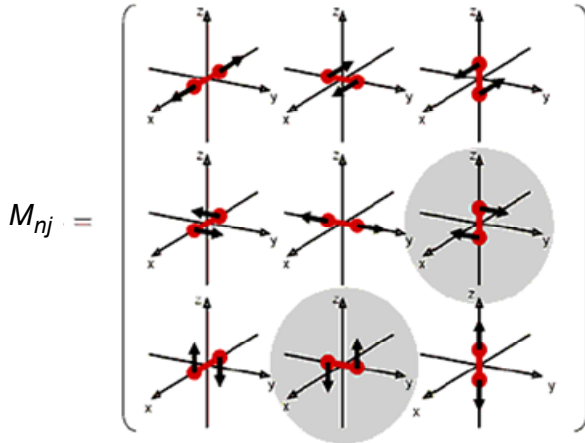


Рис. 1. Елементи тензора сейсмічного момента – силовий еквівалент довільно орієнтованого розриву

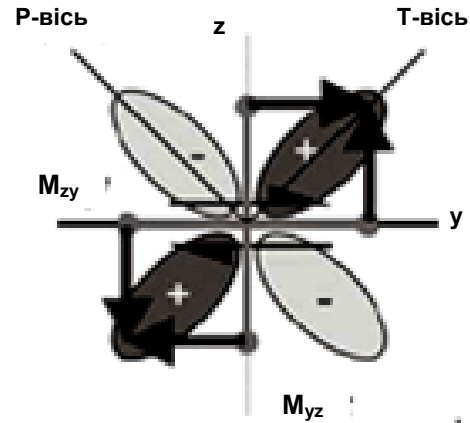


Рис. 2. Подвійна пара сил як еквівалент компонент тензора сейсмічного момента

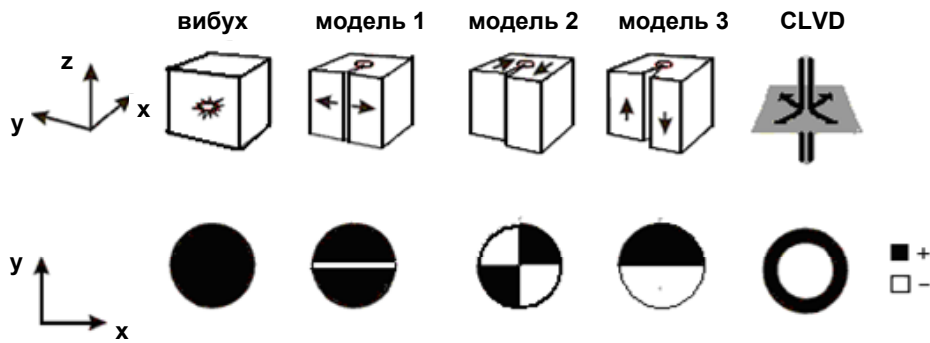


Рис. 3. Моделі сейсмічних джерел і діаграми випромінювання

Найпростішою моделлю є чисте ізотропне джерело з постійною енергією в усіх напрямках (подібно до вибуху). Модель 1 показує випадок розтягу, коли розкривається тріщина. Тут рух частинок відбувається паралельно до осі напруження. Моделі 2 та 3 представляють чистий зсув і утворення подвійної пари сил. Вони відрізняються між собою тільки напрямком руху частинок відносно площини розриву. Модель CLVD (компенсаційний лінійний векторний диполь) являє собою зміну об'єму, що компенсується за рахунок руху частинок у площині, паралельній до найбільшого напруження. Ця модель запропонована при глибокому землетрусі, завдяки мінералогічним процесам [9]. У реальних умовах механізм джерела є суперпозицією цих основних механізмів.

Відомо, що приведення матриці до діагонального вигляду здійснюється за допомогою такого перетворення [8]:

$$M = A^{-1}m A, \quad (3)$$

де m – діагональна матриця, елементами головної осі якої є власні значення матриці M , A – матриця, стовпцями якої є власні вектори матриці M .

Матрицю m можна розкласти на складові [9]:

$$m = m^{ISO} + m^{Dev}. \quad (4)$$

Фізично компонента m^{ISO} відповідає за вибух і її можна обчислити таким чином [9]:

$$m^{ISO} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Tr(M) & 0 & 0 \\ 0 & Tr(M) & 0 \\ 0 & 0 & Tr(M) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де $Tr(M)$ – слід матриці M_j .

У свою чергу, m^{Dev} складається із суми двох компонент [6]:

$$m^{Dev} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = m^{DC} + m^{CLVD}, \quad (6)$$

де m^{DC} – компонента, що відповідає за вклад подвійної пари сил, а m^{CLVD} – за вклад компенсаційного лінійного векторного диполя.

Діагональні елементи m^{Dev} відповідають такій умові:

$$|m_3| \geq |m_2| \geq |m_1|,$$

де $m_1 = x_1 - 1/3Tr(M)$, $m_2 = x_2 - 1/3Tr(M)$, $m_3 = x_3 - 1/3Tr(M)$, x_1, x_2, x_3 – власні значення матриці M .

Введемо коефіцієнт $\epsilon = -\frac{m_1}{m_3}$.

Зауважимо, що значення ϵ знаходиться в діапазоні від 0 до 0.5. При чистому DC механізмі ϵ дорівнює 0 і 0.5 при чистому CLVD механізмі. Тоді m^{Dev} запишемо у вигляді [6]:

$$m^{Dev} = m_3(1-2\epsilon) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + m_3\epsilon \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Відсотковий вклад, який дає кожна складова в загальний тензор сейсмічного моменту M обчислюється таким чином [4]:

$$\begin{aligned} \%ISO &= \frac{\text{Tr}(M)}{|\text{Tr}(M)| + \sum_{i=1}^3 |m_i|} * 100\%, \\ \%DC &= \frac{m_3(1-2\varepsilon)}{|m_3(1-2\varepsilon)| + |2m_3\varepsilon|} * (100 - \%ISO)\%, \\ \%CLVD &= \frac{2m_3\varepsilon}{|m_3(1-2\varepsilon)| + |2m_3\varepsilon|} * (100 - \%ISO)\%. \end{aligned} \quad (8)$$

Слід відзначити, що компоненти тензора сейсмічного моменту M_{ij} визначаються за формулами [1]:

$$\begin{aligned} M_{xx} &= -M_0(\sin \delta \cos \lambda \sin 2\varphi_s + \sin 2\delta \sin \lambda \sin^2 \varphi_s), \\ M_{xy} &= M_0(\sin \delta \cos \lambda \cos 2\varphi_s + 1/2 \sin 2\delta \sin \lambda \sin 2\varphi_s), \\ M_{xz} &= -M_0(\cos \delta \cos \lambda \cos \varphi_s + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \varphi_s) = M_{zx}, \\ M_{yy} &= M_0(\sin \delta \cos \lambda \sin 2\varphi_s - \sin 2\delta \sin \lambda \cos^2 \varphi_s), \\ M_{yz} &= -M_0(\cos \delta \cos \lambda \sin \varphi_s - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \varphi_s) = M_{zy}, \\ M_{zz} &= -M_0 \sin 2\delta \sin \lambda \end{aligned} \quad (9)$$

де δ – кут падіння; φ_s – кут простягання; λ – кут між вектором подвигки і напрямом простягання.

Таким чином, орієнтація площини розриву визначається трьома кутами δ , λ і φ_s .

Приклад. Маємо дані для землетрусу, який відбувся в Ісландії:

кути $\lambda = 105^\circ$; $\delta = 52^\circ$; $\varphi = 332^\circ$; та $\lambda = 71^\circ$; $\delta = 40^\circ$; $\varphi = 128^\circ$; $M_w=5.5$, $M_0=1.8645 \cdot 10^{17}$ Н*м.

На рис. 4 та 5 показано механізм джерела, побудований за двома парами кутів δ , λ і φ_s і скалярним моментом M_0 , та через кути δ , λ , φ_s і M_w відповідно.

Тензор сейсмічного моменту дорівнює:

$$M = \begin{bmatrix} -0.8812 & -0.6537 & 0.1568 \\ -0.6537 & -1.0413 & -0.6125 \\ 0.1568 & -0.6125 & 1.9225 \end{bmatrix} 10^{17} \text{ Н*м.}$$

На рис. 6 показана діаграма випромінювання, побудована через компоненти M .

Легко показати, що слід матриці дорівнює нулеві, тому $m^{ISO}=0$.

Власні значення для цього тензора $x_1=-4.1478 \cdot 10^{16}$, $x_2=-1.6572 \cdot 10^{17}$, $x_3=2.072 \cdot 10^{17}$, коефіцієнт $\varepsilon \approx 0.2$. Звідси $\%ISO=0$, $\%DC=60$, $\%CLVD=40$.

Матриця, яка відповідає за DC, дорівнює:

$$\begin{bmatrix} -0.4785 & -0.6277 & 0.0375 \\ -0.6227 & -0.6825 & -0.3561 \\ 0.0375 & -0.3561 & 1.1609 \end{bmatrix} 10^{17} \text{ Н*м,}$$

а за CLVD:

$$\begin{bmatrix} -0.4027 & -0.0260 & 0.1192 \\ -0.0256 & -0.3588 & -0.2564 \\ 0.1192 & -0.2564 & 7.6157 \end{bmatrix} 10^{17} \text{ Н*м.}$$

Відповідні діаграми випромінювання для двох останніх випадків показано на рис. 8 і рис. 9.

Тепер, використавши формули (9), обчислимо компоненти тензора сейсмічного моменту:

$$\begin{aligned} M_{xx} &= -7.00429 \cdot 10^{16} \text{ Н*м}; & M_{xy} &= -9.37034 \cdot 10^{16} \text{ Н*м}; \\ M_{xz} &= 5.77785 \cdot 10^{15} \text{ Н*м}; \\ M_{yy} &= -1.0471 \cdot 10^{17} \text{ Н*м}; & M_{yz} &= -5.24191 \cdot 10^{16} \text{ Н*м}; \\ M_{zz} &= 1.74753 \cdot 10^{17} \text{ Н*м.} \end{aligned}$$

Для побудови механізму джерела землетрусу скористаємось пакетом програм GMT (Generic mapping tools).

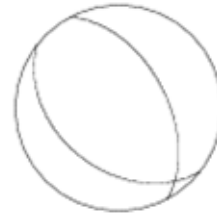


Рис. 4. Механізм, побудований за двома парами кутів і M_0



Рис. 5. Механізм, побудований за кутами λ, δ, ϕ і M_w



Рис. 6. Механізм, побудований через компонент тензора сейсмічного моменту M



Рис. 7. Механізм побудований за формулою (9)



Рис. 8 Діаграма випромінювання чистого CLVD механізму



Рис. 9. Діаграма випромінювання чистого DC механізму

Висновки. Визначення параметрів вогнища землетрусу за даними сейсмічних станцій і побудова механізму джерела є важливими задачами. За результатами даної роботи можна зробити важливий висновок, що введення компенсаторного лінійного векторного диполя CLVD є

підтвердженням теорії так званої Non-double couple, тобто у вогнищі землетрусу існують подвійні пари сил, що представлені на рис. 2, а також доданок, який відповідає за компенсацію зміни об'єму за рахунок руху частинок у площині, перпендикулярній до напрямку дії сили стиску.

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. — М., 1983. — Т. 1, 2. 2. Малицький Д.В. Аналітично-числові підходи до обчислення часової залежності компонент тензора сейсмічного моменту // Геоінформатика. — 2010. — Т. 1. — С. 79–86. 3. Молотков Л.А. Матричний метод в теорії розповсюдження волн в слоистых, упругих и жидких средах. — М., 1984. 4. Andersen L.M.

A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining: PhD thesis, University of Witwatersrand. — Johannesburg, 2001. 5. Dreger D., Tkalčić H., Johnston M. Dilational processes accompanying earthquakes in the long valley caldera // Science. — 2000. — 288 (5463). — P. 122-125. 6. Finck F., Kurz J.H., Grosse C.U., Reinhardt H.-W. Advancer in moment tensor inversion for civil engineering. Non-destructive testing in civil engineering. — 2003. 7. Fowler C.M.R. The Solid Earth — An Introduction to Global Geophysics. — New York, 1990. 8. Jost M.L., Hermann R.B. A students guide to and review of moment tensors // Seism. Res. Letters. — 1989. — Vol. 60. — P. 37-57. 9. Knopoff L., Randall M.J. The compensated linear vector dipole: a possible mechanism for deep earthquakes // Journal of geophysical research. — 1970. — Vol. 75, № 26. — P. 4957-4963.

Надійшла до редколегії 02.09.10

УДК 550.832+550.834

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

ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ ПРОГНОЗНИХ ФІЛЬТРАЦІЙНО-ЄМНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОЛЕКТОРІВ КАРТАМИШСЬКОЇ СВИТИ ЗА ДАНИМИ ЗД СЕЙСМОРОЗВІДКИ

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

Наведено загальні відомості про місце проведення робіт та матеріали, за якими зроблено прогноз. Описано методику обґрунтування та побудови моделей типу "кern-ГДС" на прикладі пористості. На основі даних буріння нових свердловин проаналізовано прогнозні карти ФЄВ на достовірність по 11 інтервалах.

The general information about the place of leadthrough of works and materials which a prognosis was done are considered. The method of establishment and ground of type "Core-well survey" models on the example of porosity is described. On the basis of new wells information the prognosis maps of lauter-capacity properties on authenticity for to 11 intervals are analysed.

Вступ. Ефективна розробка покладів вуглеводнів та подальший підрахунок запасів неможливі без уявлення про геологічну будову родовища та фільтраційно-ємнісні властивості порід. Останні десятиліття відзначаються бурхливим розвитком досліджень у галузі об'ємного геологічного моделювання, в цей період можливі сейсмічних методів суттєво збільшились завдяки застосуванню тривимірної сейсморозвідки та сучасних методів вертикального сейсмічного профілювання. Проте, застосування лише даних сейсморозвідки при розв'язанні 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 багатофакторної інтерпретації матеріалів сейсморозвідки, геофізичних досліджень у свердловинах, лабораторного аналізу керну, результатів буріння та ін. Як показує світовий досвід, на основі сформованої комплексної фізико-геологічної моделі родовища можна за багатовимірними геолого-геофізичними характеристиками не тільки виявити контури покладу вуглеводнів у рамках площ вивчення, але за наявності даних промислової геофізики виконати з достатнім ступенем достовірності кількісну оцінку характеру зміни різних прогнозних параметрів, які визначають колекторські властивості порід, ступінь нафтогазонасиченості, та дати оцінку прогнозних ресурсів вуглеводнів (ВВ) у надрах [1].

Метою статті є встановлення достовірності побудованої за даними ЗД сейсморозвідки та промислової геофізики моделі фільтраційно-ємнісних властивостей колекторів, тобто визначити (наскільки це можливо за наявними даними) її відповідність реальним геологічним умовам залегання покладів вуглеводнів, у тонкошаруватих відкладах картамишської світи центральної частини ДДЗ. Це стало можливим завдяки інтенсивній розробці та надходженню нових матеріалів про Кобзівське газоконденсатне родовище (ГКР).

Об'єкт досліджень. У 2004–2006 рр на вже відкритому на той час газоконденсатному родовищі було проведено сейсморозвідувальні дослідження МСГТ (ЗД). Польові роботи проводилися силами ЗАТ "Укрнафтогазгеофізика". Завдання, які покладалися на сейсморозвідувальні дослідження, включали в себе не лише деталізацію геологічної будови Кобзівського ГКР та його оконтурення по відкладах нижньої пермі, а й параметричний аналіз хвильового поля з прогнозуванням зон розповсюдження колекторів і флюїдонасичення та подальшу побудову тривимірної моделі резервуарів флюїдонасичення.

Коротко про родовище: воно розташоване на території Красноградського та Кегичівського районів Харківської області, в тектонічному відношенні – у межах центрального грабену Дніпрово-Донецької западини. Власне структура є західним елементом Кобзівсько-Мечибилівського антиклінального валу, по осі якого умовно трасується границя між південною прибортовою зоною та центральним грабеном у східній частині ДДЗ. На родовищі пробурено понад 70 пошукових, розвідувальних та експлуатаційних свердловин. Кобзівське ГКР – багатопластове родовище у теригенних відкладах P_1^{nk} , P_1^{kt} - C_3^{kt} , що розташоване на валоподібному схилі між Октябрьським та Кегичівським підняттями з плямовим розповсюдженням колекторів у продуктивних горизонтах, де знаходяться літологічно-обмежені і літологічно-екрановані пастки.

Якість спостережених даних доволі висока, що дало змогу успішно провести обробку та інтерпретацію матеріалів (рис. 1).

В узагальненому вигляді прогноз проводився за такою схемою: 1) збирались геолого-геофізичні матеріали та формувались фізико-геологічної моделі об'єкту; 2) створювались еталонні вибірки свердловин; 3) розраховувались додаткові параметри фізичних полів за даними ЗД сейсморозвідки та кількісні характеристики порід картамишської світи на основі матеріалів промислової геофізики; 4) при узгодженні сейсмічного хвильового поля з даними ГДС використовувалась геоакустична модель середовища; 5) оцінювалась інфор-