

СЕЙСМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ 3D ТА ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ЗАДАЧАХ ПРОЕКТУВАННЯ, СТВОРЕННЯ, ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ТА РОЗШИРЕННЯ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ

БИБЛІВ О. ТОВ «Надра інтегровані рішення», начальник відділу моделювання родовищ нафти і газу
СОЛОВІЙОВ І. Кандидат геолого-мінералогічних наук, голова правління ПрАТ «Центр обробки даних Надра»

Развитие подземного хранения газа во всем мире переживает большой подъем. Нужно отметить следующие тенденции этого процесса: проектирование и создание новых подземных хранилищ газа (ПХГ); увеличение производительности ПХГ и сокращение периода отбора газа; полномасштабная реконструкция действующих ПХГ; автоматизация ПХГ; сокращение эксплуатационных расходов; повышение экологической стабильности ПХГ.

Очевидно, что во всех тенденциях развития подземного хранения газа и стадиях процессов сооружения ПХГ одну из ключевых ролей играет знание геологического строения объекта. В настоящее время наиболее совершенным методом изучения геологического строения объектов – от тектоники и литологии к распределению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) – большинство ученых считают сейсмические исследования 3D.

Использование современных методов обработки, преобразования, атрибутивного анализа и интерпретации позволяет выполнить не только высокоточные структурные построения, но и с высокой степенью достоверности прогнозировать литологию и коллекторские свойства пород в межскважинном пространстве. Именно такие данные должны стать основой, исходной информацией для задач проектирования, создания, оптимизации работы, расширения и реализации современных методов трехмерного геолого-технологического моделирования работы ПХГ.

В статье приведены некоторые предварительные результаты использования данных сейсмических исследований 3D на Солоховском ПХГ в Украине.

The development of underground gas storage is on its rise all over the world. It's worth to note the following tendencies in this process: design and construction of new Natural gas storage facilities; a production gain of Natural gas storage facilities and reduction of gas extraction period; a full-blown reengineering of operating Natural gas storage facilities; an automatization of Natural gas storage facilities; a reduction of operation costs, an ecological stability growth of Natural gas storage facilities.

It's obvious that the key role in all underground gas storage development tendencies and in all stages of the processes in NGSF construction plays the knowledge in geology of the object. Today the most perfect method in geological structure researches- from tectonics and lithological properties to distribution of filtration properties (by a major part of researchers) is supposed to be 3D seismic studies.

The implementation of modern methods in processing, transforming, attribute analysis and interpretation allows to perform not only high-precision structural imaging but also prediction of lithological properties and rock reservoir properties in interwell space with a high percentage of reliability. This data should become a basis, an output for the problems of design, construction, work optimization, extension and modern methods of 3D geotechnological modeling in NGSF operation.

Some initial results of implementation of 3D seismic studies in Solokivske Natural gas storage facility in Ukraine are given in this article.

Ключові слова: підземне зберігання/сховище газу, сейсморозвідка 3D, сейсмічні атрибути, порушення, літологія, геологічне моделювання.

Ключевые слова: подземное хранение/хранилище газа, сейсморозведка 3D, сейсмические атрибути, нарушения, литология; геологическое моделирование.

Keywords: underground gas storage, 3D seismic exploration, seismic attributes, faults, lithology, geological modeling.

Вступ

Підземні сховища газу (ПСГ) мають багатозцільове призначення. Окрім основної функції – регулювання сезонної нерівномірності споживання – вони виконують й

інші, наприклад, резервування газу на випадок короткострокових аварійних ситуацій, створення значних резервів на випадок непередбачуваних тривалих аварійних ситуацій у системі газопостачання та ін. Велику

роль ПСГ відіграють також у структурі системи транзиту через Україну поставок газу з Росії до Європи.

Розвиток підземного зберігання газу у всьому світі переживає великий підйом. Потрібно відзначити наступні тенденції цього процесу: проектування та створення нових ПСГ; збільшення продуктивності ПСГ та скорочення періоду відбору газу; повномасштабне реконструювання діючих ПСГ; автоматизація ПСГ; скорочення експлуатаційних витрат; підвищення екологічної стабільності ПСГ [3].

Спорудження ПСГ передбачає виконання робіт у приблизно такій послідовності: детальна геологічна розвідка об'єктів ПСГ або дорозвідка виснажених родовищ; обґрунтування створення; дослідно-промислове закачування газу та дослідно-промислова експлуатація; циклічна експлуатація; розширення; консервація (ліквідація) ПСГ.

Очевидно, що у всіх тенденціях розвитку підземного зберігання газу та стадіях процесів спорудження ПСГ одну з ключових ролей відіграють знання про геологічну будову об'єкта.

Пласти-колектори, у тому числі й ті, в яких відбувається зберігання газу на ПСГ, незалежно від їхньої стратиграфічної належності, нерідко характеризуються неоднорідністю як за літологічним складом, так і за колекторськими властивостями, які залежать як від петрографічного складу порід, так і від тектонічного напруження.

На сьогоднішній день найдосконалішим методом вивчення геологічної будови об'єктів – від тектоніки та літології до розподілу фільтраційно-ємнісних властивостей (ФЄВ) – більшість дослідників вважає сейсмічні дослідження 3D.

Використання сучасних методів обробки, перетворень, атрибутивного аналізу та інтерпретації [4] дає змогу не лише виконати високоточні структурні побудови, але й з високим ступенем достовірності прогнозувати літологію та колекторські властивості порід у міжсвердловинному просторі [1]. Саме такі дані мають стати основою, вихідною інформацією для задач проектування, створення, оптимізації роботи, розширення та сучасних методів тривимірного геолого-технологічного моделювання роботи ПСГ.

Нижче наведені деякі результати використання даних сейсмічних досліджень 3D та геолого-геофізичного моделювання на Солохівському ПСГ.

Практичне застосування

Солохівське ПСГ створено у виснаженому і повністю обводненому газовому покладі байоського ярусу середньої юри однойменного родовища. Юрська система, що залягає з перервою на трасі, представлена середнім та верхнім відділами.

Середньоюрська система включає байоський та батський яруси. Байоський ярус складений пачками алевролітів, піщаних глин, пісковиків, некарбонатних морських глин. Загальна товщина байоських відкладів – 70–120 м, а потужність алеврито-піщаної товщі – 50–80 м. Згадуваний виснажений газовий поклад знаходився у гранулярному пласті-колекторі, покрівля якого залягає

на глибинах 851–956 м. Колектор має середню товщину 67,5 м, пористість – 27% і проникність – 2–3,5 дарсі.

На рис. 1 показано структурні побудови, виконані за даними буріння та попередніх сейсмічних робіт 2D.

Згідно з цими побудовами по покрівлі байосу підняття являє собою асиметричну антиклінальну складку, яка скидним порушенням поділена на дві різні за величиною частини: більшу – східну і меншу – західну. Східна частина (рис. 1) розривними порушеннями розчленована на чотири блоки, з яких в південному (I) та центральному (II) створено ПСГ.

Штучний газовий поклад займає верхню частину пласта-колектору і є масивним, склепінним. Він розташований у контурі газоносності -696 м та має максимальну висоту 25 м. Обсяг газу в покладі становить понад 2 млрд м³. На час виконання останніх робіт з дорозвідки та реалізації проекту розширення (1993 р.) Солохівське ПСГ вважалось достатньо вивченим.

Сейсмічні роботи 3D на Солохівському ГКР проводилися з метою вивчення та уточнення глибинної будови продуктивних товщ аж до візейського ярусу кам'яновугільної системи включно. Глибина залягання цих відкладів у межах родовища – понад 5000 м.

Таким чином, штучний газовий поклад ПСГ у середній юрі виявився майже повністю накритим системою сейсмічних спостережень 3D.

Із використанням можливостей візуалізації, результатів аналізу даних та структурних побудов пакета Petrel компанії Schlumberger була побудована модель тектонічних порушень та ізохрони поверхонь відбиваючих горизонтів по покрівлі верхньобайоського колектору (J_2b_1) та покрівлях потужних глинистих пачок, що зіставляються відповідно з покрівлею нижньобатського під'ярусу юри (J_2bt_1) та розмитою поверхнею тріасу (Т). Глибинні структурні плани покрівлі (рис. 2) та підшви колектору, а також покрівлі пласта покришки отримані за даними ВСП, проведеного у глибоких свердловинах Солохівського родовища.

Результати сейсмічної інтерпретації дещо змінили уяву про структурну будову ділянки ПСГ на Солохівській площі. Зокрема, амплітуда порушення, яке відокремлювало південний та центральний блоки ПСГ за попередніми побудовами (рис. 1), згасає у склепінній частині складки і далі, згідно з сейсмічними даними, не простежується. Таким чином, два блоки працюючого ПСГ – південний та центральний, – наявність гідродинамічного зв'язку між якими була давно визначена, виявились об'єднаними в один, і він отримав назву південно-центрального (рис. 2).

Змінились уявлення також про тектонічну будову ділянок що прилягають до ПСГ у північному та західному напрямі. Були виділені два нових блоки – північний 2 та північно-західний. Система порушень у районі ПСГ в цілому була більш упевнено протрасована та уточнена.

Важливим результатом сейсмічної інтерпретації є також виділення декількох аномалій хвильового поля типу «ясрава пляма» [4]. Аномалії відображаються інтенсивним чотирифазним відбиттям у підшві ба-

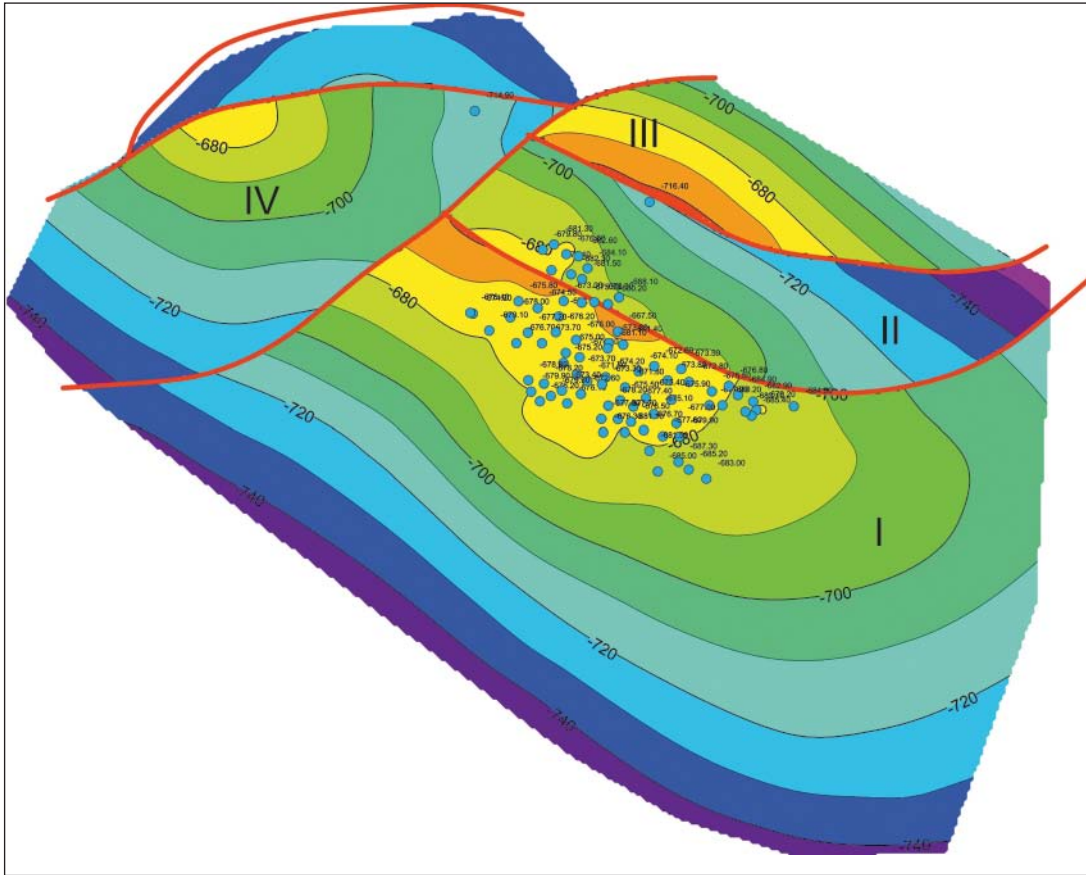


Рис. 1. Структурна карта по покрівлі колектору за даними попередніх робіт. I, II, III, IV – відповідно південний, центральний, північний та західний структурні блоки Солохівського ПСГ

йосу – покрівлі тріасу та характеризуються «розширенням» фаз, збільшеними величинами амплітуд та зниженням частоти хвильового поля. Фаза простежування ВГ, що відповідає покрівлі тріасу – T_3rg , у межах аномалій змінюється на протилежну (з додатної на від’ємну). Традиційно аномалії хвильового поля такого типу пов’язують з наявністю газових покладів.

На рис. 3 показано відображення згадуваних аномалій на часовому розрізі хвильового поля. Планове положення «яскравих плям» встановлено за допомогою розрахунку карти максимальних амплітуд в інтервалі байоського ярусу середньої юри, тобто в інтервалі колектору – об’єкта зберігання газу Солохівського ПСГ. Розрахована карта максимальних амплітуд, представлена на рис. 2.

Аномалії типу «яскрава пляма» однозначно пов’язуються з наявністю газових покладів, проте історія та походження цих покладів-аномалій різна.

Найбільша південна аномалія відповідає згадуваному південно-центральному працюючому блоку ПСГ. На північ (північний блок 1) та захід (західний блок) розташовані аномалії, що відповідають виснаженим байоським покладам у блоках родовища, розробка якого закінчилась у 1978 році. Найпівнічніша та найменша за площею аномалія (північний блок 2), очевидно, відповідає не охопленому у свій час розробкою екранованому тектонічни-

ми порушенням покладу згадуваного родовища з початковими тиском та газоводяним контактом (ГВК).

Аналіз форми кривих ГК та результатів палеореконострукції дав змогу зробити висновок [2] про переважну приуроченість об’єкта зберігання Солохівського ПСГ до системи річкових барів та вздовжберегових островів, що сформувалась у прибережно морських, можливо, дельтових умовах осадонакопичення. Піщані фації колектору перекриваються глинистими фаціями відкладів глибокого моря батського ярусу середньої юри (J_2bt).

На рис. 4 показано схеми кореляції через свердловини по лініях профілів вздовж та поперек двох блоків – південно-центрального та західного, а на рис. 5 – карта палеорельєфу стратиграфічного рівня нижнього байосу середньої юри (J_2b_1). Сучасні тектонічні порушення на карті палеорельєфу показані для зручності визначення положення блоків ПСГ.

Отримані у результаті моделювання розподіли фільтраційно-ємнісних властивостей (ФЄВ) [1] (рис. 6, 7) дали змогу більш детально вивчити будову байоського колектору на Солохівській площі та виконати підрахунок запасів виснаженого родовища на новій моделі.

За матеріалами підрахунку запасів 1957 р. у ДКЗ було затверджено 1,489 млрд m^3 газу, а у період з 1964-го по 1978 рік видобуто 1,870 млрд m^3 .

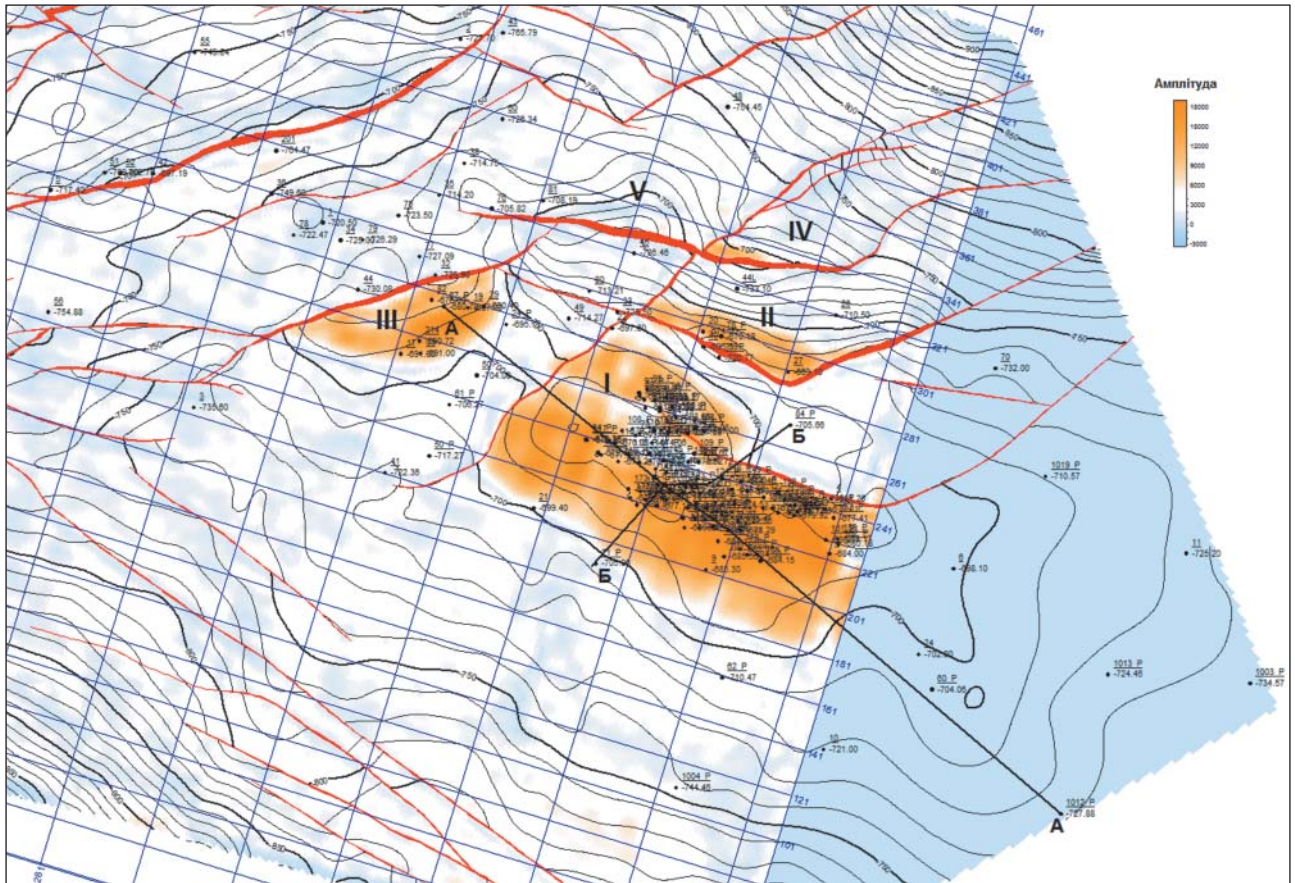


Рис. 2. Структурна карта по покрівлі колектору за результатами інтерпретації сейсмічної зйомки 3D та карта розподілу значень максимальних амплітуд в інтервалі об'єкта газозберігання. I, II, III, IV, V – відповідно південно-центрального, північний 1, західний, північний 2 та північно-західний структурні блоки Солохівського ПСГ за новими побудовами

За розрахунком на новій моделі запаси південно-центрального та західного блоків становлять 2,08 та 0,32 млрд м³ газу відповідно, що доводить геологічну адекватність моделі байоського колектору.

Очевидно, що розширення ПСГ може відбуватися за двома напрямками: збільшення обсягів зберігання у існуючих блоках та залучення до роботи ПСГ нових об'єктів газозберігання. Нижче розглянуто та проаналізовано обидва напрями розширення ПСГ.

До 1957 року газовий поклад юрських відкладів був підготовлений до промислового освоєння, у тому ж році затверджуються запаси у ДКЗ (1,489 млрд м³). Рівень ГВК прийнятий єдиним для всього родовища та встановлений на абсолютній позначці -696 м.

З 1964-го по 1978 рік поклад юрських відкладів знаходився у розробці. За цей період видобуто 1,870 млрд м³ газу.

На початок створення штучного газового покладу об'єкт розробки старого родовища вважався повністю обводненим – ГВК у південно-центральному блоці знаходився на абсолютній позначці -674 м, у західному – -684 м. Пластовий тиск зафіксований на рівні гідростатичного та становив 79,6 кгс/м².

Практично на всіх ділянках склепіння товщина проникної частини нижнього байосу переважає над

амплітудами скидів. Аналіз блокової будови території з даними розробки родовища, розподілу залишкових запасів газу та процесу створення і роботи ПСГ дав змогу стверджувати про наявність сполучення окремих (блокових) ділянок між собою та тяжіння до встановлення спільного рівня площини газ – вода.

Проведений аналіз структурно-тектонічної будови та взаємного розташування блоків дозволив рекомендувати до залучення у роботу ПСГ разом з працюючим південно-центральним блоком сусідні – західний, північний 1, північний 2 та північно-західний (рис. 8).

За результатами аналізу гіпсометрії був встановлений максимально низький, єдиний для усіх блоків, рівень ГВК (на абсолютній позначці -710 м), який гарантує відсутність розтікання газу за межі природних пасток.

Проте щодо рівня ГВК у блоках необхідно зробити деякі зауваження.

Навіть при максимально низькому ГВК (-710 м) утворюються дві гідродинамічно не зв'язані системи блоків. Перша – південно-центрального, західного та північного 1 блоків, друга – північного 2 та північно-західного блоків.

При цьому між блоками першої системи – південно-центральним та західним – можливі перетоки газу

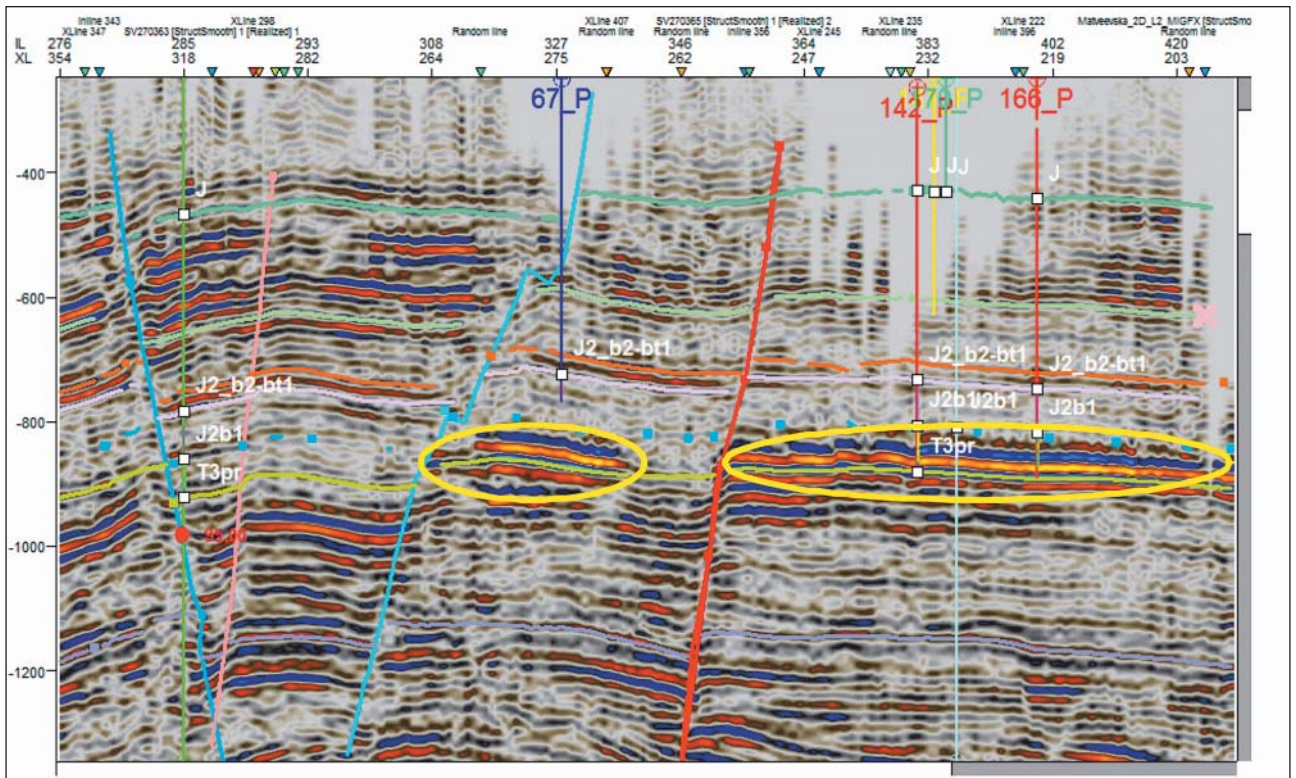


Рис. 3. Відображення аномалій типу «яскрава пляма» на часовому розрізі хвильового поля

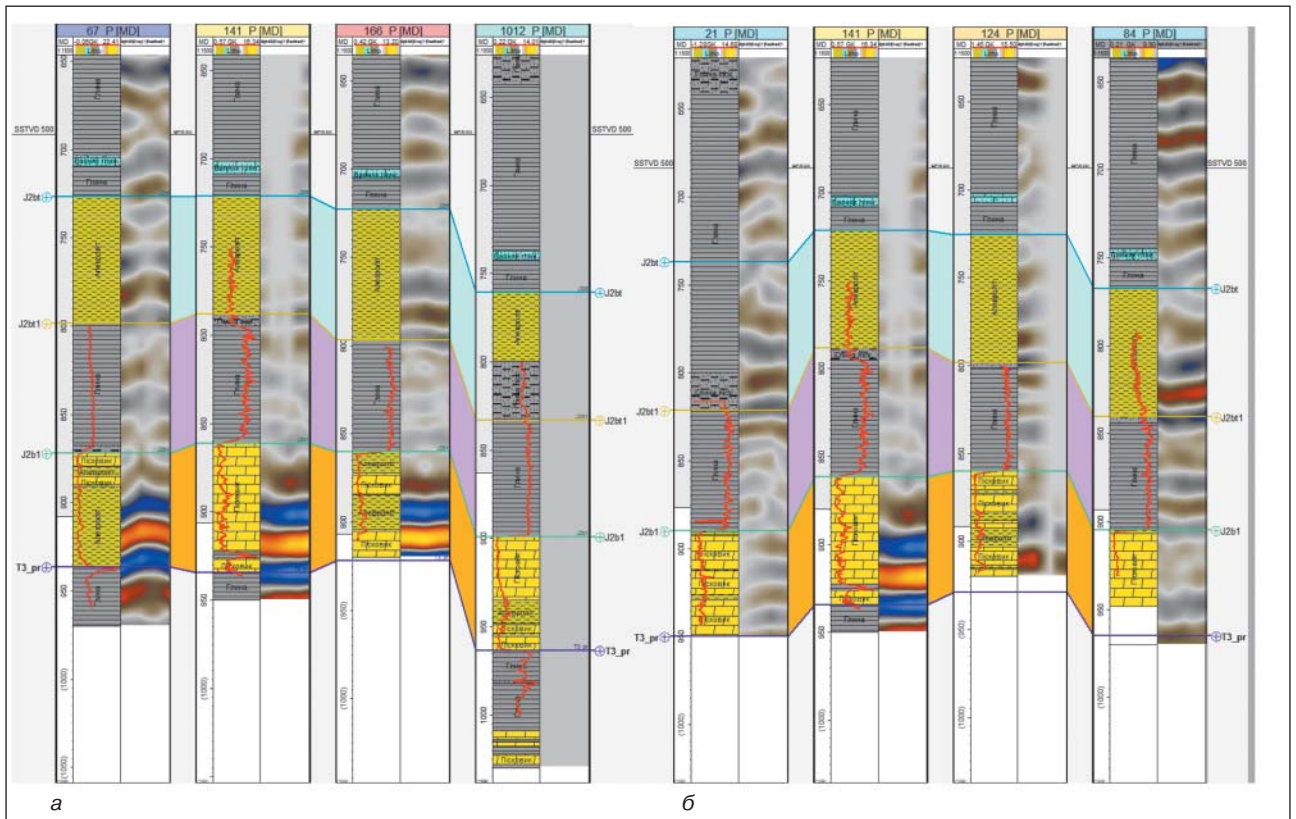


Рис. 4. Схеми кореляції через свердловини по лініях пофілів: а) А-А; б) Б-Б

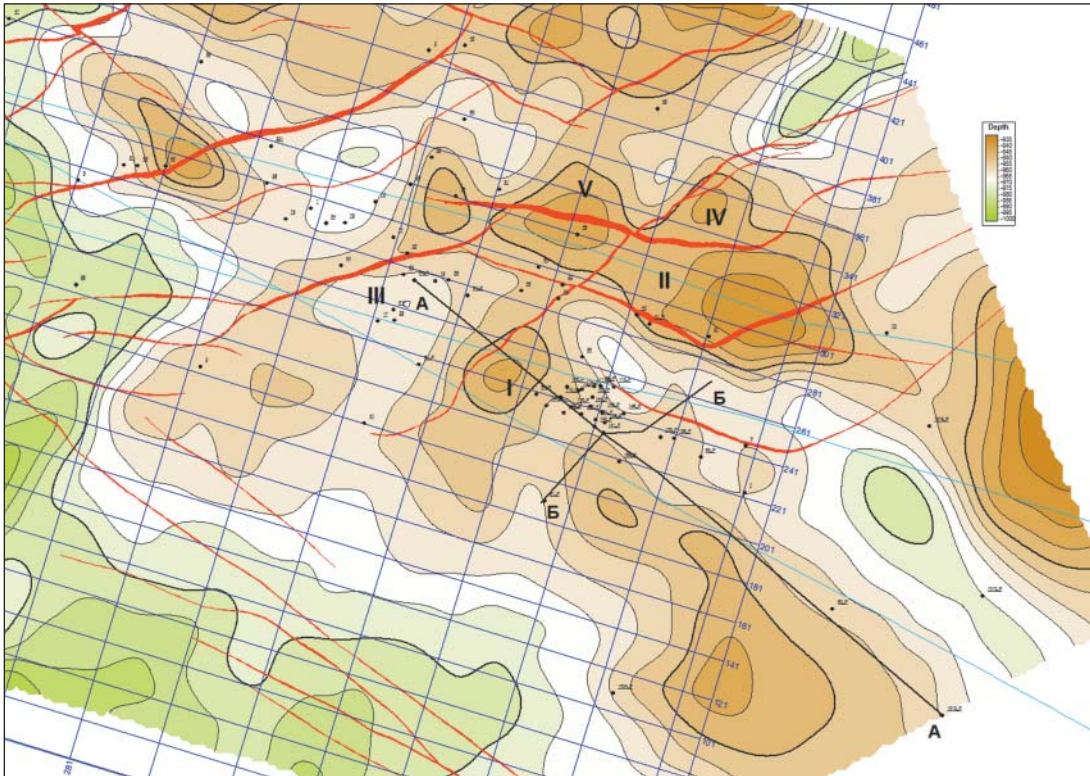


Рис. 5. Карта палеорельєфу стратиграфічного рівня нижнього байосу середньої юри (J2b1)

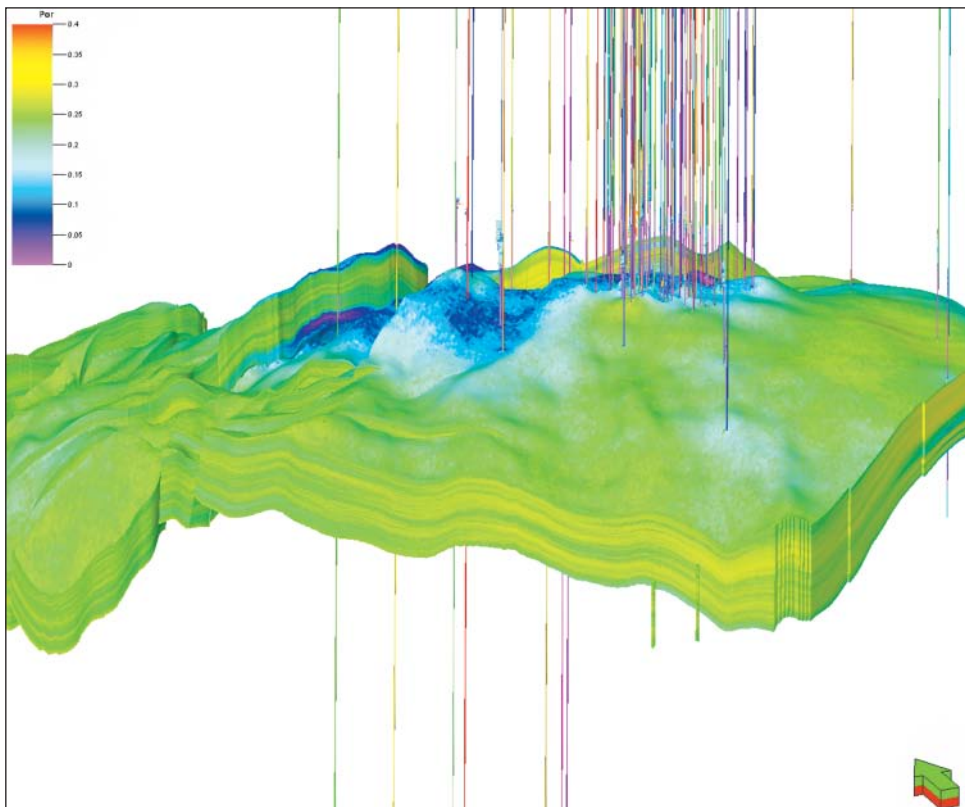


Рис. 6. «Куб» пористості у тривимірному зображенні

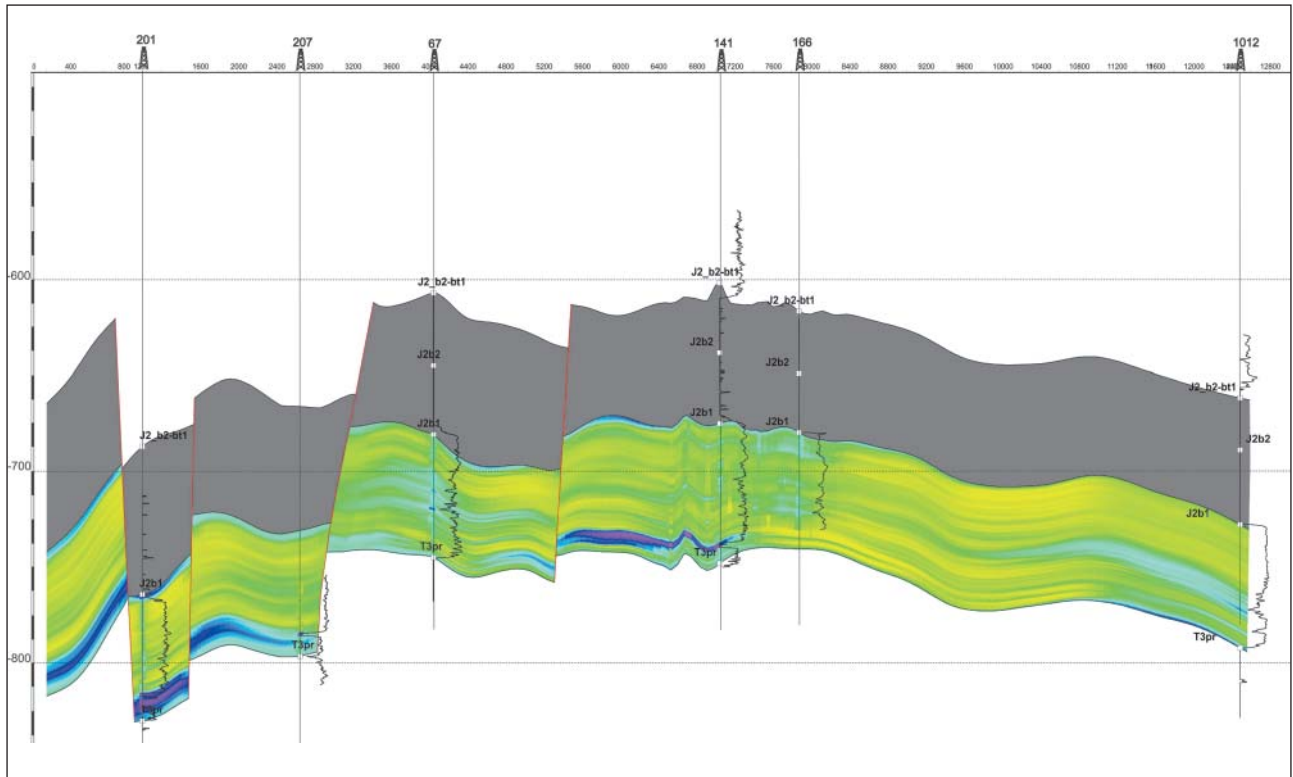


Рис. 7. Розріз прогнозованої пористості колектору J2b1 через свердловини по лінії А–А

вже за рівня ГВК, нижчого від -969 м, а між південно-центральною та північною 1 – за рівня контакту, нижчого від -704 м.

У другій системі блоків – північний 2 та північно-західний – гідродинамічний зв'язок по газу з'являється на рівні ГВК, нижчому від -705 м.

Таким чином, задачу розширення Солохівського ПСГ можна розділити на дві черги: перша – збільшення обсягів зберігання газу у діючому південно-центральному блоці з одночасним залученням до експлуатації західного та північного 1 блоків, друга – створення нових об'єктів газозберігання у північному 2 та північно-західному блоках і незалежної технологічної системи їхньої експлуатації.

На основі створеної геологічної моделі були розраховані декілька можливих обсягів зберігання газу у працюючому та рекомендованих до розширення блоках ПСГ. А, зважаючи на особливості створення штучного покладу та процесів, що відбуваються у пласті під час нагнітання газу, для розрахунку об'ємів застосовувався дещо нижчий коефіцієнт газонасичення колектору (K_r) ніж зазвичай при підрахунку запасів. Розрахунки виконані для чотирьох рівнів ГВК -969 м, -700 м, -705 м та -710 м.

Максимальний обсяг зберігання газу у південно-центральному блоці окремо становив 5,8 млрд м³ газу, а разом із західним та північним 1 блоками – 7,63 млрд м³ газу. Можливий обсяг зберігання газу у двох системах Солохівського ПСГ становитиме 8,3 млрд м³.

Нижче, у таблиці 1, показано розрахунки порового об'єму у працюючому та рекомендованих до розширення блоках ПСГ за різних значень ГВК, які свідчать про можливість збільшення об'ємів на 40–210%.

Таблиця 1. Поровий об'єм (млн м³) залежно від положення ГВК

Блок	Рівень ГВК			
	-696	-700	-705	-710
південно-центральною	25,417	35,516	51,985	72,956
західний	4	6,046	9,648	14,444
північний I	3,661	4,786	6,406	8,29
північний II	0,6	0,76	2,64	5,7
північно-західний блок	0,96	1,396	2,12	3,186
загалом	34,638	48,504	72,799	104,576
приріст порового об'єму, %		40	110,2	201,9

Висновки

Використання результатів інтерпретації даних сейсмічної зйомки 3D дозволили уточнити тектонічну модель та визначити нову блокову будову Солохівського ПСГ, а геолого-геофізичне моделювання із залученням атрибутивного аналізу сейсмічних даних дало

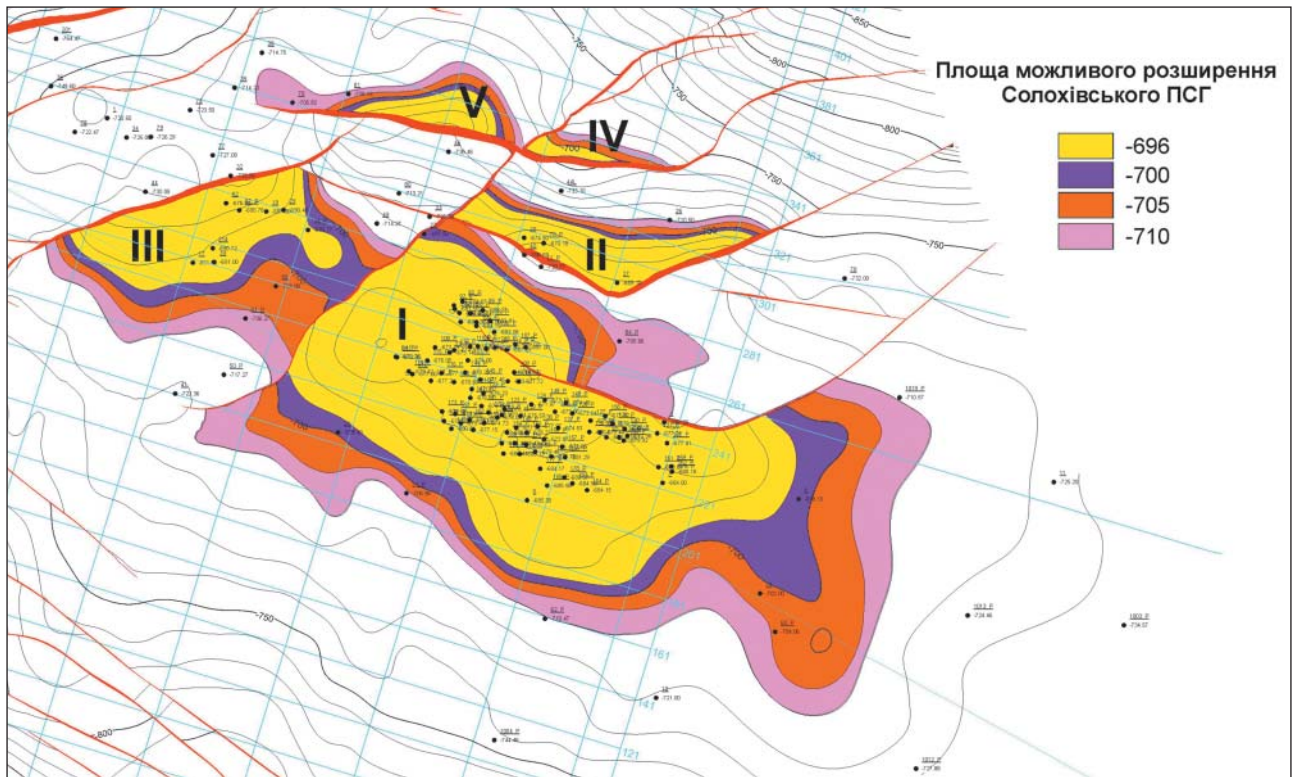


Рис. 8. Площі можливого розширення Солохівського ПСГ відповідно до значень рівня ГВК

зможу більш обґрунтовано прогнозувати розподіл ФЄВ у колекторі.

Адекватність отриманої моделі підтверджується, по-перше, добрим збігом обсягів видобутих вуглеводнів із виснаженого юрського покладу і початкових запасів родовища, порахованих за результатами моделювання, та, по-друге, можливістю пояснення фактичних промислових даних експлуатації ПСГ, які не відповідали попереднім уявленням про геологічну будову об'єкта збереження ПСГ.

Отримана геолого-геофізична модель стала основою для визначення напрямків впровадження заходів з метою розширення та збільшення обсягів зберігання газу у Солохівському ПСГ.

На даний час постановка сейсмічних робіт 3D здійснюється, як правило, в межах відомих родовищ вуглеводнів з метою детального вивчення геологічної будови і – буквально в поодиноких випадках – для вивчення будови ПСГ. Очевидно, наведений приклад використання об'ємної сейсміки демонструє не всі можливості цього геофізичного методу.

Наступним логічним кроком у використанні геолого-геофізичної моделі є створення на її основі тривимірних газогідродинамічних моделей для відтворення процесів експлуатації ПСГ.

Постановка робіт об'ємної сейсміки видається досить витратною, проте можна не сумніватись, що обґрунтовані та цілеспрямовані заходи, запроектовані завдяки таким дослідженням, забезпечать окупність витрат та прибутковість роботи газозберігаючого підприємства.

Отже, сейсмічні дослідження 3D з наступним геолого-геофізичним моделюванням можуть і повинні стати основою для технічних та технологічних рішень у практиці створення та експлуатації ПСГ у водоносних пластах, виснажених газових та нафтових родовищах. Отримані моделі повинні використовуватись для розрахунків технологічних показників експлуатації, заходів з оптимізації та розширення ПСГ, оцінки економічної ефективності підземного зберігання газу.

1. *Закревский К.Е.* Геологическое 3D моделирование. – М.: ИПЦ «Маска», 2009 – 376 с.
2. *Муромцев В.С.* Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. – Л.: Недра, 1984. – 260 с.
3. *Ширковский Л.И., Задора Г.И.* Добыча и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1974.
4. *Chopra S., Marfurt K.* Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization / Geophysical development series. – 2007. – V. 11. – 464 p.