

## АПРОБАЦІЯ ТЕКТОНОФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ТРІЩИНУВАТОСТІ НА РОДОВИЩАХ ВНУТРІШНЬОЇ ЗОНИ ПЕРЕДКАРПАТСЬКОГО ПРОГИНУ

С. С. Куровець, І. В. Артим, Т. В. Здерка

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 0974921482,  
e-mail: viarty1993@gmail.com

*Під час математичного моделювання тектонічних та фізичних процесів, які відбуваються в межах піщано-алевритової товщі, аналіз напружено-деформованого стану є перспективним методом оцінки тріщинуватості порід-колекторів. В попередніх наших дослідженнях обґрунтовано основні підходи до тектонофізичного моделювання даної товщі задля можливості оцінки тріщинуватості перспективних на нафту і газ відкладів. Раніше нами була розроблена модель для симетричної антикліналі. Ця модель не може бути якісно застосована для Внутрішньої зони Передкарпатського прогину через складні форми перегибів пластів. Удосконалення моделі та її апробацію проведено на таких відомих родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, як Старосамбірське та Південно-Гвіздецьке. Побудовано відповідну модель для асиметричної антикліналі з різною товщиною прошарку по довжині колектора ямненської світи палеоцену Старосамбірського родовища. Результати моделювання засвідчили, що склепіння антикліналі пов'язане з зоною підвищеної тріщинуватості. Натурні дослідження керну підтвердили це твердження. Підвищеної тріщинуватості в зоні зрізу не виявлено. Верхній пласт пісковика менилітової світи Південно-Гвіздецького родовища майже повністю можна віднести до порово-тріщинного та тріщинного типів колектора. Постало питання, наскільки реально за допомогою розробленої нами моделі підтвердити існування такої аномально великої зони підвищеної тріщинуватості. Як наслідок, граничні умови потребували суттєвого удосконалення. Згідно з результатами, зона підвищеної тріщинуватості практично повністю охоплює пласт. Таким чином, під час апробації тектонофізичної моделі на антикліналях родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину отримали позитивні результати. Отже, за допомогою розробленої нами моделі досить складні структури можна досліджувати на тектонічну тріщинуватість.*

Ключові слова: тектонофізична модель, антикліналь, родовище нафти і газу, тріщинуватість, Передкарпатський прогин, пісковик.

*Перспективним методом оцінки тріщинуватості пород-колекторів є аналіз їх напружено-деформованого стану шляхом математичного моделювання тектонофізичних процесів в піщано-алевритовій флішевої товщі. Предыдущие исследования были направлены на обоснование основных подходов к тектонофизическому моделированию песчано-алевритовой толщи с целью оценки трещиноватости нефтегазоперспективных отложений. Но разработанная модель симметричной антиклинали не может использоваться в условиях Внутренней зоны Предкарпатского прогиба вследствие наличия сложных форм перегибов пластов. Совершенствование модели и ее апробация выполнены на таких известных месторождениях Внутренней зоны Предкарпатского прогиба, как Старосамборское и Южно-Гвиздецкое. Создана подходящая модель для асимметричной антиклинали с разной толщиной слоя по длине коллектора ямненской свиты палеоцена Старосамбирского месторождения. Результаты моделирования показали, что зона повышенной трещиноватости размещена в своде антиклинали. Это утверждение доказано натурными исследованиями керна. Повышенная трещиноватость в зоне среза не выявлена. Верхний пласт песчаника менилитовой свиты Южно-Гвиздецкого месторождения практически можно полностью отнести к трещинному, порово-трещинному типу коллектора. Возник вопрос, возможно ли в рамках разработанной модели объяснить такую аномально большую зону повышенной трещиноватости. Для решения задачи были уточнены граничные условия для воспроизведения реальной деформации пласта песчаника. Согласно результатам, зона повышенной трещиноватости практически полностью охватывает пласт. Таким образом, результаты апробации тектонофизической модели на примерах месторождений Внутренней зоны Предкарпатского прогиба свидетельствуют о том, что с помощью разработанной модели можно исследовать достаточно сложные структуры на тектоническую трещиноватость.*

Ключевые слова: тектонофизическая модель, антиклиналь, месторождение нефти и газа, трещиноватость, Предкарпатский прогиб, песчаник.

*A promising method for assessing the fracturing of reservoir rocks is the analysis of their stress-strain state by mathematical modeling of tectonophysical processes in the sandy-silty flysch strata. Previous studies were aimed at substantiating the main approaches to tectonophysical modeling of sandy-silty strata in order to assess the fracturing of oil and gas promising deposits. However, the developed model of the symmetric anticline cannot be used in the conditions of the Intristic zone of the Pre-Carpathian Foredeep due to the complex forms of layers. The model was improved and tested at such well-known deposits of the Inner Zone of the Pre-Carpathian Foredeep as Starosambir and Pivdenno-Hvizdetsk. A corresponding model for an asymmetric anticline with different layer thickness of the reservoir rock of the Yamna formation of the Paleocene of the Starosambir deposit has been constructed. The simulation results showed, that the zone of increased fracturing is located within the crest of the anticline. This statement is proved by field studies of the core. Increased fracturing within the cut area was not detected. The upper layer of sandstone of the menilite formation of the South Hvizdetsk deposit almost completely belongs to the fractured, pore-fractured type of reservoir. The question arose as to whether it was possible to explain such an abnormally large area of increased fracturing by the developed model. To solve the problem, the boundary conditions for reproducing the real deformation of the sandstone formation were improved. According to the results, the area of increased fracturing almost completely covers the layer. Thus, the results of approbation of the tectonophysical model within deposits of the Inner Zone of the Pre-Carpathian Foredeep indicate that with the help of the developed model it is possible to research complex structures on tectonic fracturing.*

Key words: tectonophysical model, anticline, field of oil and gas, fracturing, Pre-Carpathian Foredeep, sandstone.

### **Вступ**

Енергетична незалежність – одна з першочергових стратегічних проблем України. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми можна назвати забезпечення паливно-енергетичною сировиною, тобто за рахунок збільшення обсягів видобутку вуглеводнів. Значне підвищення обсягів видобутку нафти і газу можливо досягти за рахунок підвищення спорудження свердловин в усіх нафтогазоносних регіонах країни. Але не секретом є факт, що видобуток вуглеводнів у межах Західноукраїнського нафтогазоносного регіону знижується. За останні роки будь-які дослідницькі роботи в регіоні не тільки скорочувалися, а часто зовсім не проводилися. Всі ці причини призвели до того, що подальше функціонування існуючої інфраструктури нафтогазовидобутку на вказаній території є під загрозою. Саме тому в першу чергу варто присвятити увагу дослідженням, які б дали змогу підвищити освоєння нафтогазоперспективних відкладів в межах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Останнім часом передові вчені в галузі геології все більше приділяють увагу дослідженням впливу вторинної тріщинуватості порід-колекторів на підвищення нафтогазоносності, особливо на великих глибинах.

Отже, одним із перспективних наукових напрямків для розвитку нафтогазової геології можна вважати тектонофізичне моделювання, яке використовується з метою прогнозування нафтогазоносності порід-колекторів. На сьогодні актуальним є моделювання та дослідження тріщинуватості порід-колекторів з використанням математичних моделей. Саме тому це питання потребує детального вивчення.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Зараз надзвичайно актуальним і важливим є детальне дослідження закономірностей тектонофізичних процесів, адже саме ці процеси ведуть до утворення зон розуцілення. Більш точний прогноз на локальних об'єктах може суттєво підвищити ефективність ведення пошукових робіт.

При вивченні тріщинуватості і процесів, які ведуть до утворення тріщин в гірських породах, необхідно приділити увагу сучасним працям науковців, які присвячені оцінці напружено-деформованого стану (НДС) порід. У минулому науковці вивчали тріщинуватість, тільки завдяки дослідженню керну, який був добутий із свердловин. Суттєвим недоліком цих досліджень є те, що в таких умовах неможливо змодельовати та врахувати вплив НДС на тріщинуватість. Але сучасні вчені у своїх працях приділили увагу вивченню цього питання.

У роботі [1] авторами подається експериментальний матеріал щодо фізичних та фізико-механічних властивостей багатьох гірських порід, які були відібрані з різних басейнів і родовищ Росії та інших країн. Також в даній науковій праці змодельовано фізичні і механічні умови, які виникають на великих глибинах під час розробки корисних копалин. Також наведено опис методик та апаратури, за допомогою яких проводилися дослідження на міцність, деформацію та руйнування гірських порід, фільтраційні властивості і утворення тріщин. Вивчено вплив порового тиску на механічний стан гірських порід. Всі результати експериментальних досліджень узагальнено на основі розробленої авторами статистичної теорії міцності, деформації та руйнування гірських порід.

Також в даній роботі запропоновано авторами структурну статистичну модель неоднорідного тіла, яке піддається деформації. Типовим представником такого неоднорідного тіла є гірські породи.

Також варто приділити увагу роботі [2]. Робота складається із низки статей. Всі статті були представлені на 7-ій Міжнародній конференції з геообчислення. Геообчислення, як термін, став надзвичайним популярним в останні роки і все частіше зустрічається в наукових публікаціях і охоплює набір часто використовуваних інструментів, необхідних для моделювання поверхневих процесів. Геообчислення показує взаємозв'язок між обчисленням (іншими словами – моделюванням) та застосуванням обчислення задля пояснення і наочного відображення різних динамічних аспектів соціальних та фізичних процесів, які мають місце на земній поверхні.

Цікавою є також праця під назвою «Обчислювальні методи для геодинаміки» [3]. Автори присвятили дану працю дослідженню геодинамічних процесів та їх моделюванню. Ця робота представлена у вигляді підручника та зручного довідника. Перевагою цієї роботи є простота викладеного в ній матеріалу. У роботі відсутні складні математичні формули, що робить дану працю доступною для широкого кола читачів, адже необхідними є лише базові знання геодинамічної теорії та обчислень. У праці також представлені не тільки основні чисельні методи геодинамічного моделювання, але й проілюстровано можливість вирішення таких проблем, як літосферна деформація, конвекція мантії та геодинаміка за допомогою даних чисельних методів. Також наводяться основні відмінності, переваги та недоліки кожного з методів. Ця праця демонструє читачам, коли і як краще застосувати певний метод для отримання найкращих результатів.

Безумовно, неможливо не відмітити роботу [4]. У своїй роботі «Визначення міцності на розрив та мікромеханіку порід під впливом режимів навантаження I та II» автор досліджував породи на тріщиностійкість. У даній роботі наведено опис нового експериментального методу. Цей метод застосовується для визначення стиснення руйнування в режимі II (зсув). Автор також порівнює результат з результатами стиснення руйнування в режимі I (стиск). Напруженість руйнування описує опір порід розтріскуванню. Описаний параметр є надзвичайно важливим при оцінці розривів порід з використанням принципів механіки руйнування порід.

Досліджував тріщинуватість, а також пов'язував її з механікою напруження, автор роботи [5]. Ним був використаний код UDEC методу дискретних елементів шляхом аналізу дослідження реальних механічних та геометричних даних систем тріщин, базуючись на числових експериментах, проведених на основі двовимірних дискретних мереж розриву. Ці дані були отримані на основі картографування полів в Селлафілді (Великобританія). У роботі наведено результати чисельних експериментів напруження та деформації. Ці результати лягли в основу побудови моделі, яка б відбивала поведінку тріщинних порід при впливі напружень та деформації тріщинних порід як функції обмеження тиску, а також для оцінки еквівалентного спрямованого модуля Юнга та співвідношення Пуассона, оскільки ці два параметри є важливими параметрами деформації. Результати були застосовані відповідно до критеріїв оцінки руйнування Мор-Кулона і Хок-Брауна. Наведені у науковій праці результати представляють собою еквівалентні властивості матеріалів, визначені за цими двома критеріями.

У праці Х. Гуо «Дослідження розтріскування порід на основі механіки тріщин» [6], опублікованій у 1990 році описуються і пояснюються основні проблеми, які можуть виникнути під час застосування принципу механіки руйнування в природі.

У 2014 році була опублікована книга під назвою «Моделювання процесів тріщинуватості гірських порід: підхід механіки руйнування з використанням FRACOD» [7]. Авторами у цій книзі наведено теоретичні основи механіки тріщинуватості порід та методів зсуву. Отримані дані використовуються для моделювання геомеханічних задач. У книзі наведена методика використання комп'ютерної програми FRACOD. Ця програма застосовується з метою аналізу проблем тріщин, оцінки утворення та розповсюдження руйнування при розтягу (режим I), зсуву (режим II) та змішаного режиму I та II. У праці також наведено основи гідромеханічного та термомеханічного зв'язку, формулювання множинних регіональних механічних, термічних та гідравлічних функцій, що дало змогу аналізувати проблеми механіки руйнування для структур, які представлені крихкими породами.

Технології, які випробовуються з метою застосування для гірських порід, вимагають екстремальних умов напружень, температури та гідравлічного тиску, що різною мірою призводять до утворення тріщин у гірських породах. FRACOD є однією з небагатьох комп'ю-

терних програм, доступних в інженерній механіці за останні роки. Перевагою даної програми є те, що за її допомогою можна моделювати умови утворення та поширення тріщин, які часом в подальшому можуть взаємодіяти з природними тріщинами. Останнім часом програма набула змоги моделювати утворення гідравлічних та термічних тріщини, що значно покращило її можливості.

У 2018 році була опублікована наукова праця «Обчислювальні методи розриву в пористих середовищах: ізогеометричні та розширені методи кінцевих елементів» [8], автором якої є Де Борст Р. У цій праці автор презентував нові методи моделювання з метою імітації поширення тріщин насичених рідиною пористих структурах. У своїй роботі автор наводить основні рівняння, які описують пористе середовище, насичене рідиною.

Беручи до уваги попередній огляд та праці багатьох інших авторів [9-22], варто відмітити те, що перспективним методом оцінки тріщинуватості порід-колекторів варто вважати аналіз їх НДС шляхом математичного моделювання тектонофізичних процесів у піщано-алевритовій флішовій товщі.

З метою проведення такого аналізу нами розроблено параметричну модель з метою оцінки НДС прошарку пісковика під час геодинамічних процесів за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [23-25].

### **Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми**

Наші попередні дослідження [23-25] дали змогу обґрунтувати основні підходи до тектонофізичного моделювання для оцінювання тріщинуватості нафтогазоперспективних відкладів у піщано-алевритовій товщі. Але для родовищ, які знаходяться у Внутрішній зоні Передкарпатського прогину, характерними є дуже складні форми перегинів пластів. У таких умовах розроблена спрощена модель симетричної антикліналі не може використовуватись. Тому **метою статті** є удосконалення тектонофізичної моделі піщано-алевритової товщі і її апробація на відомих родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Успішна апробація моделі дасть передумови щодо її практичного використання для досліджень перспективних ділянок родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та рекомендацій щодо пошукового буріння.

**Виклад основного матеріалу.** Удосконалення тектонофізичної моделі піщано-алеври-

тової товщі і її апробацію проведено на таких відомих родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, як Старосамбірське та Південно-Гвіздецьке.

Старосамбірська структура є асиметричною антикліналлю з північно-західним простяганням. Особливістю антикліналі є її північно-східне крило – круте, коротке і значною мірою зрізане насувом (рис. 1). Нафтові поклади зосереджені в колекторах ямненської світи палеоцену і вигодської світи еоцену. Більші поклади виявлені в колекторі ямненської світи. Вони містяться у масивних і товстошаруватих пісковиках та алевролітах. Загальна товщина колектора коливається в межах від 81 до 142 м (рис. 2).

Для побудови моделі колектора ямненської світи палеоцену враховано фізико-механічні характеристики пісковиків ямненської світи, досліджені раніше в [25]. Геометричні особливості даної антикліналі, а саме її асиметричність з різною товщиною прошарку по довжині, потребували удосконалення розробленої в [23] методики. По-перше, оскільки структура є асиметричною, відмовилися від моделювання тільки одного крила. По-друге, ускладнене насувом північно-східне крило потребувало нового підходу в моделюванні його граничних умов. Граничні умови, використані для імітаційного моделювання з такими параметрами, наведено на рис. 3.

На рис. 3 *Transient Structural* – це модуль МСЕ, який дає змогу великі переміщення задавати в табличній формі як лінійну функцію в часі. Розв'язок задачі відбувається шляхом поетапного наближення до остаточного рішення. Це вирішує проблему значних деформацій в антикліналі під час її утворення.

Аналіз НДС антикліналі дав змогу використати такі умови:

A – фіксована висота підйому антикліналі з заборонаю горизонтальних зміщень;

B, C – заборона вертикальних зміщень;

D – тиск.

Для моделювання зсуву правого крила проаналізовано два можливі варіанти граничної умови C. Результати розв'язку наведено на рис. 4 згідно з *Safety factor* – коефіцієнтом запасу міцності. Даний параметр визначають за рівнянням [26]

$$SF = \frac{[\sigma]}{\sigma_{eq}},$$

де  $[\sigma]$  – гранично допустиме напруження;

$\sigma_{eq}$  – еквівалентне напруження згідно з вибраною гіпотезою міцності.

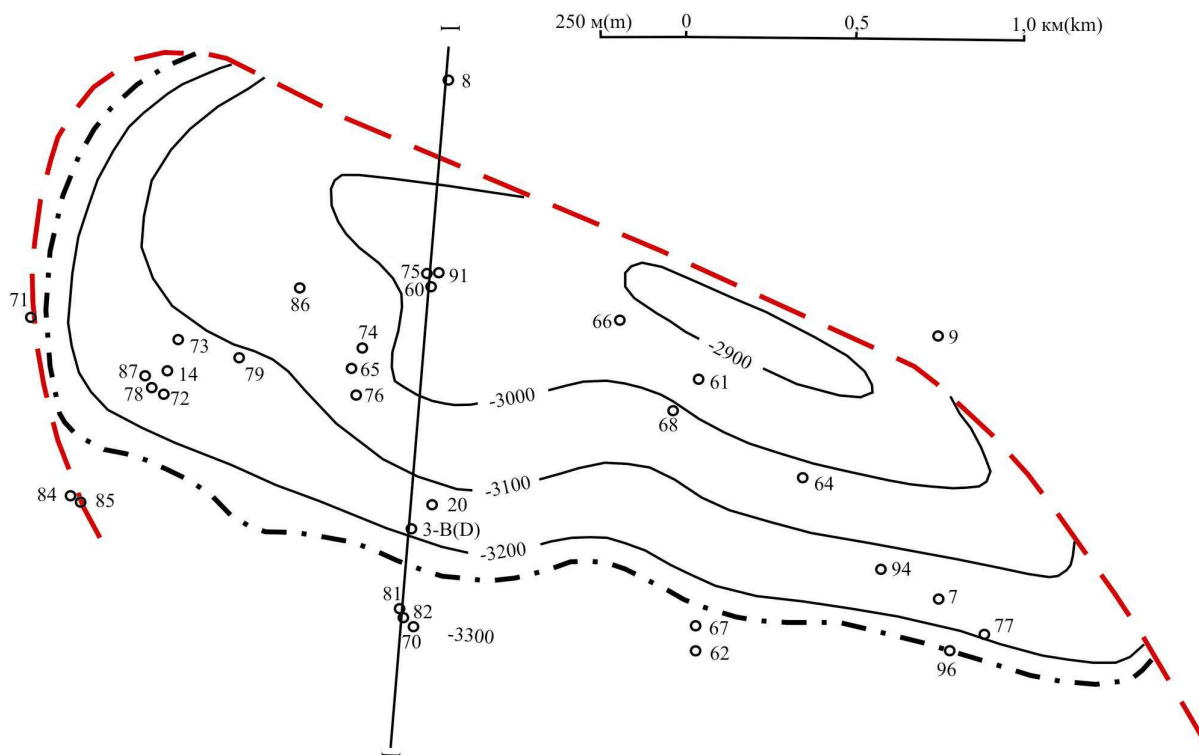


Рисунок 1 – Структурна карта покрівлі ямненської світи Старосамбірського родовища (за О.М. Вишняковою, 1994 р.)

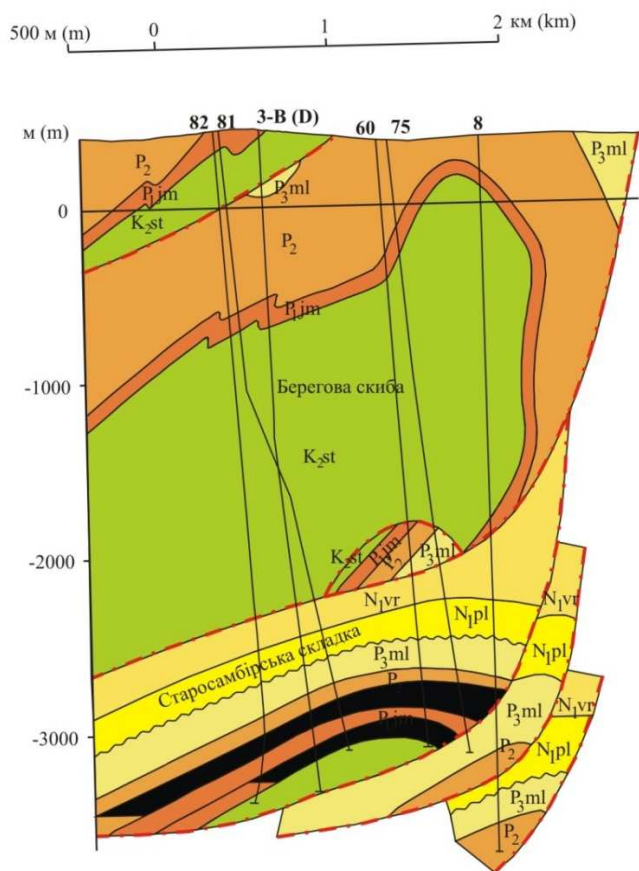


Рисунок 2 – Геологічний профіль Старосамбірського родовища (за О.М. Вишняковою, 1994 р.)

A: Transient Structural

Transient

Time: 1, s

A Remote Displacement: 3

B Remote Displacement: 4

C Remote Displacement

D Pressure: 1,e+007 Pa

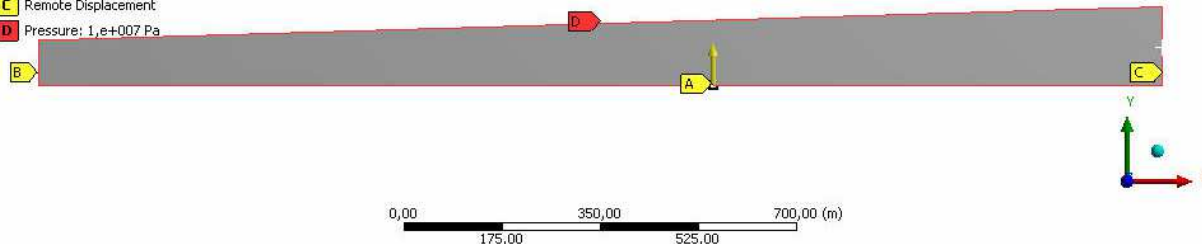


Рисунок 3 – Граничні умови та навантаження моделі антикліналі

A: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 1

15 Max

11

7,6

5,4

3,2

1

0,7

0,056 Min

0



а)

A: Transient Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 1

15 Max

11

7,6

5,4

3,2

1

0,7

0,15 Min

0



б)

а) результати за умови С – заборона вертикальних зміщень і повороту перерізу;

б) результати за умови С – заборона вертикальних зміщень без обмеження на поворот перерізу

Рисунок 4 – Порівняльні результати напружено-деформованого стану антикліналі пісковиків ямненської світи Старосамбірського родовища за критерієм Safety Factor

Аналіз результатів засвідчив, що результати, наведені на рис. 4б, ближчі до реальних через боковий насув. Як бачимо з рис. 4б, зона підвищеної тріщинуватості розміщена виключно у склепінні антикліналі. Натурними дослідженнями керну доведено, що в зоні зрізу не виявлено підвищеної тріщинуватості. Таким чином, умова С на рис. 4б може адекватно імітувати явище зсуву.

Також модель апробовано на Південно-Гвіздецькому родовищі.

Дане родовище розташовується у Надвірнянському районі Івано-Франківської області на відстані 2 км від м. Надвірна.

Геологічна будова структури достатньо різноманітна. В ній присутні флішеві відклади верхньої крейди (стрийська світа), палеоцену, еоцену (манявська, вигодсько-пасічянська, бистрицька світи), олігоцену (менілітова світа) та моласові утворення міоцену (воротищенська світа).



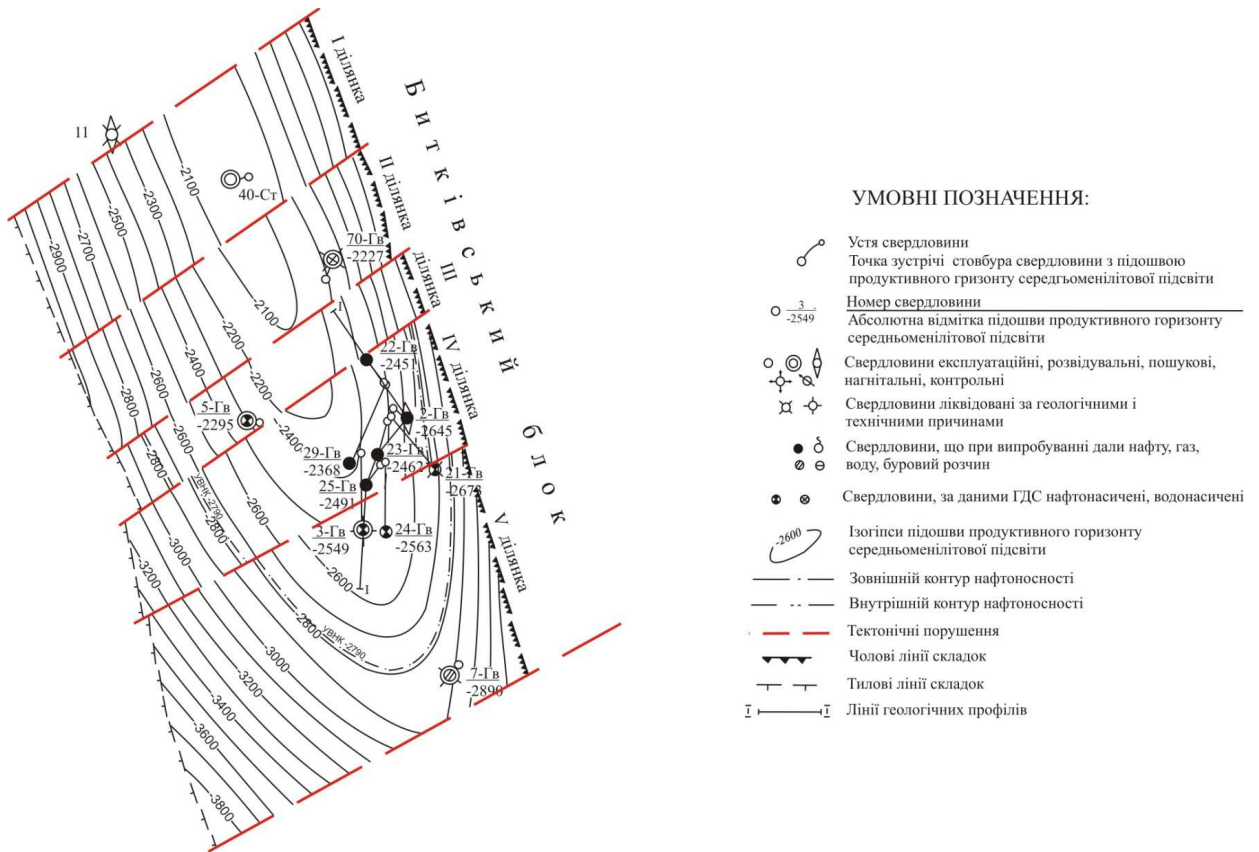


Рисунок 5 – Структурна карта підшови продуктивного горизонту середньомілітової підсвіти Південно-Гвіздецького родовища. Масштаб 1:25000 (за даними НДПІ ВАТ «Укрнафта» та Здерки Т.В.) [27]

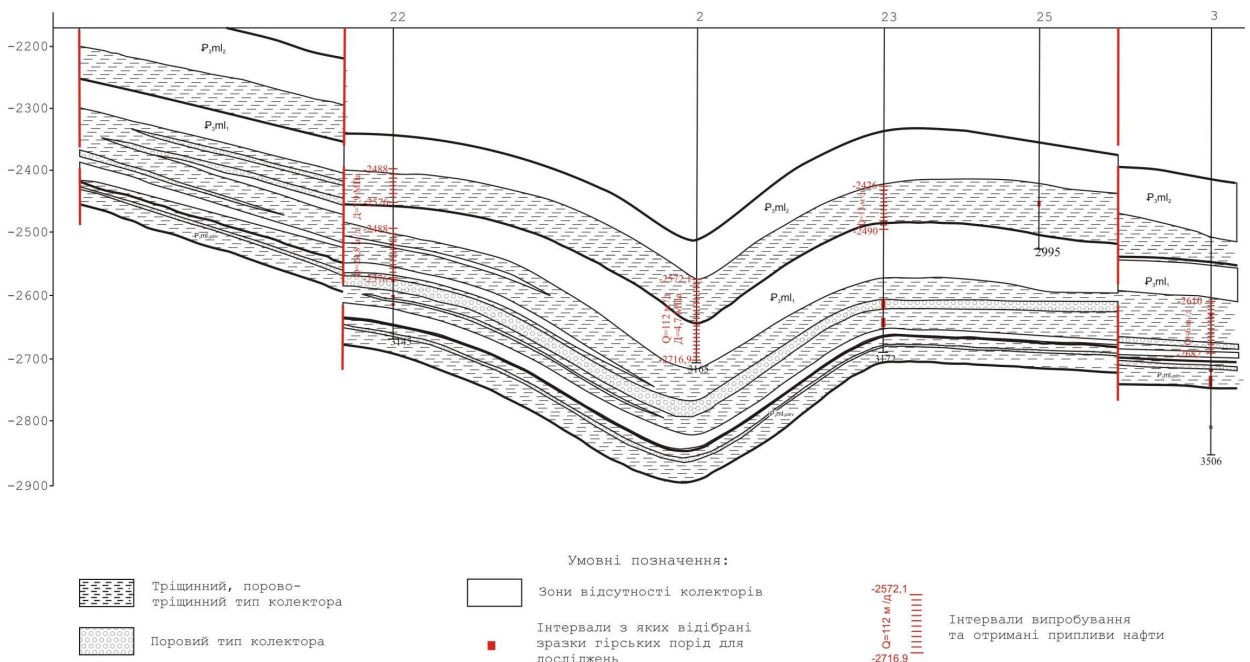


Рисунок 6 – Графічна модель будови олігоценного резервуару Південно-Гвіздецького родовища по лінії свердловин 22, 2, 23, 25, 3 (за даними НГВУ «Надвірнанафтогаз», НДПІ ВАТ «Укрнафта» та результатів [27])

**A: Transient Structural**

Transient  
Time: 1, s

- A** Pressure: 1,e+007 Pa
- B** Fixed Support
- C** Remote Displacement
- D** Remote Displacement 2
- E** Remote Displacement 3
- F** Remote Displacement 4

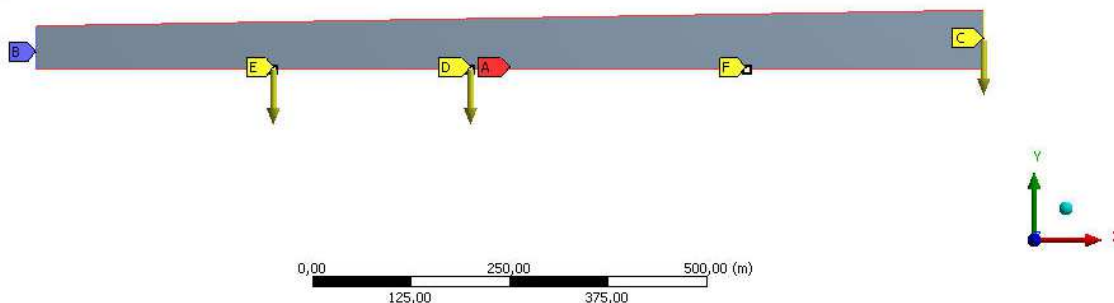


Рисунок 7 – Граничні умови та навантаження моделі синкліналі

**A: Transient Structural**

Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1

- 15 Max**
- 10
- 3,475
- 0,99326
- 0,033304 Min**
- 0

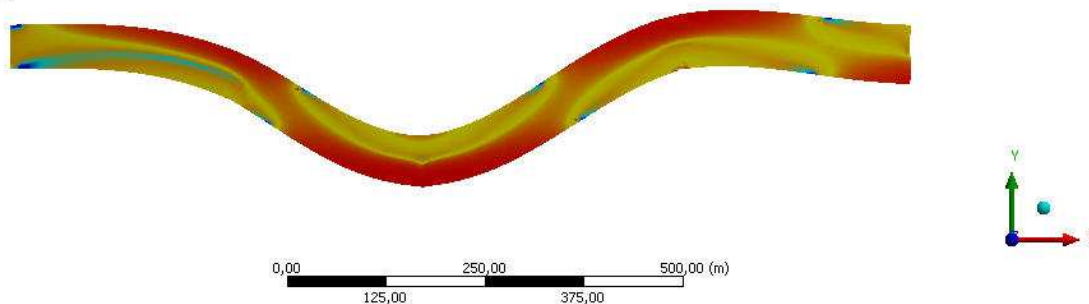


Рисунок 8 – Результати моделювання НДС синкліналі менілітової світи

Південно-Гвіздецька антикліналь містить-ся у четвертому ярусі структур і є фронтальною. По утвореннях палеогену вона є вузькою лінійно витягнутою асиметричною складкою північно-західного простягання. Її північно-східне крило відносно круте, значною мірою зрізане насувом, південно-західне – відносно похиле і широкі (рис. 5).

Нафтогазоносними є утворення менілітової, вигодсько-пасічнянської та манявської світи. В усіх горизонтах колекторами є пласти пісковиків та алевролітів. Усі поклади пластові склепінні та тектонічно екрановані.

Для апробації моделі привернули увагу результати досліджень автора [27] щодо олігоценного резервуару (рис. 6).

Верхній пласт пісковіку менілітової світи товщиною 55-75 м практично повністю відно-

ситься до тріщинного, порово-тріщинного типу колектора. Переважна більшість натурних досліджень свідчить, що зона підвищеної тріщинуватості знаходиться у верхній частині склепіння антикліналі, або нижній синкліналі. Наприклад, для Старосамбірського родовища це добре узгоджується з практикою геолого-пошукових робіт.

Для успішної апробації моделі викликало цікавість питання, чи зможе вона пояснити таку аномально велику зону підвищеної тріщинуватості. Для відтворення реальної деформації пласта пісковіку було розширено і удосконалено граничні умови (рис. 7). Для моделювання складок використано додаткові дві граничні умови фіксованих переміщень з відповідними ступенями вільності (E і F).

Результати досліджень наведено на рис. 8.



Згідно з даними результатами, зона підвищеної тріщинуватості практично повністю охоплює пласт, що відповідає результатам [27] (див. рис. 6).

### **Висновки**

Результати апробації тектонофізичної моделі на прикладах родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, а саме, на Старосамбірському та Південно-Гвіздецькому родовищах, свідчать про те, що за допомогою розробленої моделі можна досліджувати достатньо складні структури на тектонічну тріщинуватість. Наступні дослідження будуть спрямовані на використання моделі для досліджень перспективних ділянок родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та рекомендацій щодо пошукового буріння.

### **Література**

1. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб: Наука, 2001. 343 с.
2. Atkinson P.M., Foody G.M., Darby S.E., Wu F. *GeoDynamics*, 2005. 445 p.
3. Ismail-Zadeh A., Tackley P. *Computational Methods for Geodynamics*, 2010. 313 p.
4. Backers T. *Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading*. Diss, 2004. 137 p.
5. Noorian-Bidgoli M. *Strength and deformability of fractured rocks*. Diss. Stockholm, 2014. 101 p.
6. Guo H. *Rock cutting studies using fracture mechanics*, 1990. 223 p.
7. Shen Baotang, Stephansson O., Rinne M. *Modelling Rock Fracturing Processes: A Fracture Mechanics Approach Using FRACOD*, 2014. 173 p.
8. De Borst R. *Computational Methods for Fracture in Porous Media: Isogeometric and Extended Finite Element Methods*, 2018. 206 p.
9. Salze M., Martinod J., Guillaume B., Kermarrec J.-J., Ghiglione M.C., Sue C. *Trench-parallel spreading ridge subduction and its consequences for the geological evolution of the overriding plate: Insights from analogue models and comparison with the Neogene subduction beneath Patagonia*. *Tectonophysics*. 2018. doi : 10.1016/j.tecto.2018.04.018
10. Guillaume B., Hertgen S., Martinod J., Cerpa N.G. *Slab dip, surface tectonics : How and when do they change following an acceleration/slow down of the overriding plate ?* *Tectonophysics*. 2018. 726, 110-120, doi : 10.1016/j.tecto.2018.01.030.
11. Brun J.-P., Sokoutis D., Tirel C., Gueydan F., Van Den Driessche J., Beslier M.-O., in press. *Crustal versus mantle core complexes*, *Tectonophysics*, doi : 10.1016/j.tecto.2017.09.017.
12. Bajolet F., Chardon D., Martinod J., Gapais D., Kermarrec J.J. *Syn-convergence flow inside and at the margin of orogenic plateaux : Lithospheric-scale experimental approach*. *J.G.R. Solid Earth*, 2015. 120, 6634-6657, doi : 10.1002/2015JB012110.
13. Kydonakis K., Brun J.-P. Sokoutis D. *North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge*, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2015. 120, doi : 10.1002/2014JB011601.
14. Driehaus L., Nalpas T., Ballard J.-F. *Interaction between deformation and sedimentation in a multidecollement thrust zone : Analogue modelling and application to the Sub-Andean thrust belt of Bolivia*. *Journal of Structural Geology*. 2014. 65, 59-68, doi : 10.1016/j.jsg.2014.04.003
15. Gapais D., Jaguin J., Cagnard F., Boulvais P. *Pop-down tectonics, fluid channelling and ore deposits within ancient hot orogens*. *Tectonophysics*. 2014. 618, 102-106.12, doi : 10.1016/j.tecto.2014.01.027
16. Philippon M., Brun J.-P., Gueydan F., Sokoutis D. *The interaction between Aegean back-arc extension and Anatolia escape since Middle Miocene*. *Tectonophysics*. 2014. doi : 10.1016/j.tecto.2014.04.039
17. Zanella A., Cobbold P.R., Le Carlier de Veslud C. *Physical modelling of chemical compaction, overpressure development, hydraulic fracturing and thrust detachments in organic-rich source rock*. *Marine and Petroleum Geology*. 2014. 55, 262-274, doi : 10.1016/j.marpetgeo.2013.12.017.
18. Barrier L., Nalpas T., Gapais D., Proust J.-N. *Impact of synkinematic sedimentation on the geometry and dynamics of compressive growth structures : Insights from analogue modelling*. *Tectonophysics*. 2013. 608, 737-752.5, doi : 10.1016/j.tecto.2013.08.005
19. Driehaus L., Nalpas T., Cobbold P.R., Gelabert B., Sàbat F. *Effects of margin-parallel shortening and density contrasts on back-arc extension during subduction: Experimental insights and possible application to Anatolia*. *Tectonophysics*. 2013. 608, 288-302, doi : 10.1016/j.tecto.2013.09.028 .
20. Midtkandal I., Brun J.P., Gabrielsen R.H., Huismans R.S. *Control of lithosphere rheology on subduction polarity at initiation : Insights from 3D*

analogue modelling. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. 361, 219–228, doi : 10.1016/j.epsl.2012.10.026

21. Reber J.E., Galland O., Cobbold P.R., Le Carlier de Veslud C. Experimental study of sheath fold development around a weak inclusion in a mechanically layered matrix. *Tectonophysics*. 2013. 586, 130-144, doi:10.1016/j.tecto.2012.11.013.

22. Soleimany B., Nalpas T., Sàbat F. Role of the compression angle on the reactivation of an inverse fault. *Geologica Acta*. 2013. 11, 265-276.

23. Артим І.В. Оцінка тектонічної тріщинуватості порід-колекторів за допомогою методу скінченних елементів. *Молодий вчений. Геологічні науки*. 2018. № 2. С. 6-10. DOI: 10.32839.

24. Kurovets S., Artym I. Reservoir rocks fracturing model development. *East European Science Journal*. 2019. № 3. P. 24-29. ISSN: 2468-5380.

25. Куровець С.С., Артим І.В. Оцінка впливу розкиду значень механічних характеристик порід-колекторів Прикарпаття на їх тектонічну тріщинуватість. *Нафтогазова галузь України*. 2019. № 2. С. 19-33.

26. [https://en.wikipedia.org/wiki/Factor\\_of\\_safety](https://en.wikipedia.org/wiki/Factor_of_safety)

27. Здерка Т.В. Літогенетична тріщинуватість та її вплив на нафтоносність порід-колекторів (на прикладі олігоценівих відкладів Надвірнянського нафтопромислового району) Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук. Івано-Франківськ. 2009. 175 с.

### References

1. Stavrogin A. N., Tarasov B. G. Eksperimentalnaya fizika i mehanika gorniyh porod. SPb: Nauka, 2001. 343 p. [in Russian]

2. Atkinson P.M., Foody G.M., Darby S.E., Wu F. *GeoDynamics*, 2005. 445 p.

3. Ismail-Zadeh A., Tackley P. *Computational Methods for Geodynamics*, 2010.313 p.

4. Backers T. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading. Diss, 2004. 137 p.

5. Noorian-Bidgoli M. Strength and deformability of fractured rocks. Diss. Stockholm, 2014. 101 p.

6. Guo H. Rock cutting studies using fracture mechanics, 1990. 223 p.

7. Shen Baotang, Stephansson O., Rinne M. Modelling Rock Fracturing Processes: A Fracture Mechanics Approach Using FRACOD, 2014. 173 p.

8. De Borst R. *Computational Methods for Fracture in Porous Media: Isogeometric and Extended Finite Element Methods*, 2018. 206 p.

9. Salze M., Martinod J., Guillaume B., Kermarrec J.-J., Ghiglione M.C., Sue C. Trench-parallel spreading ridge subduction and its consequences for the geological evolution of the overriding plate: Insights from analogue models and comparison with the Neogene subduction beneath Patagonia. *Tectonophysics*. 2018. doi : 10.1016/j.tecto.2018.04.018

10. Guillaume B., Hertgen S., Martinod J., Cerpa N.G. Slab dip, surface tectonics : How and when do they change following an acceleration/slow down of the overriding plate ?, *Tectonophysics*. 2018. 726, 110-120, doi : 10.1016/j.tecto.2018.01.030.

11. Brun J.-P., Sokoutis D., Tirel C., Gueydan F., Van Den Driessche J., Beslier M.-O., in press. Crustal versus mantle core complexes, *Tectonophysics*, doi : 10.1016/j.tecto.2017.09.017.

12. Bajolet F., Chardon D., Martinod J., Gapais D., Kermarrec J.J. Syn-convergence flow inside and at the margin of orogenic plateaux : Lithospheric-scale experimental approach. *J.G.R. Solid Earth*, 2015. 120, 6634-6657, doi : 10.1002/2015JB012110.

13. Kydonakis K., Brun J.-P. Sokoutis D. North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2015. 120, doi : 10.1002/2014JB011601.

14. Driehaus L., Nalpas T., Ballard J.-F. Interaction between deformation and sedimentation in a multidecollement thrust zone : Analogue modelling and application to the Sub-Andean thrust belt of Bolivia. *Journal of Structural Geology*. 2014. 65, 59-68, doi : 10.1016/j.jsg.2014.04.003

15. Gapais D., Jaguin J., Cagnard F., Boulvais P. Pop-down tectonics, fluid channelling and ore deposits within ancient hot orogens. *Tectonophysics*. 2014. 618, 102-106.12, doi : 10.1016/j.tecto.2014.01.027

16. Philippon M., Brun J.-P., Gueydan F., Sokoutis D. The interaction between Aegean back-arc extension and Anatolia escape since Middle Miocene. *Tectonophysics*. 2014. doi : 10.1016/j.tecto.2014.04.039

17. Zanella A., Cobbold P.R., Le Carlier de Veslud C. Physical modelling of chemical compaction, overpressure development, hydraulic fracturing and thrust detachments in organic-rich source rock. *Marine and Petroleum Geology*. 2014. 55, 262-274, doi : 10.1016/j.marpetgeo.2013.12.017.

18. Barrier L., Nalpas T., Gapais D., Proust J.-N. Impact of synkinematic sedimentation on the geometry and dynamics of compressive growth structures : Insights from analogue modelling. *Tectonophysics*. 2013. 608, 737-752.5, doi : 10.1016/j.tecto.2013.08.005
19. Driehaus L., Nalpas T., Cobbold P.R., Gelabert B., Sàbat F. Effects of margin-parallel shortening and density contrasts on back-arc extension during subduction: Experimental insights and possible application to Anatolia. *Tectonophysics*. 2013. 608, 288-302, doi : 10.1016/j.tecto.2013.09.028 .
20. Midtkandal I., Brun J.P., Gabrielsen R.H., Huisman R.S. Control of lithosphere rheology on subduction polarity at initiation : Insights from 3D analogue modelling. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. 361, 219–228, doi : 10.1016/j.epsl.2012.10.026
21. Reber J.E., Galland O., Cobbold P.R., Le Carlier de Veslud C. Experimental study of sheath fold development around a weak inclusion in a mechanically layered matrix. *Tectonophysics*. 2013. 586, 130-144, doi:10.1016/j.tecto.2012.11.013.
22. Soleimany B., Nalpas T., Sàbat F. Role of the compression angle on the reactivation of an inverse fault. *Geologica Acta*. 2013. 11, 265-276.
23. Artym I.V. Otsinka tektonichnoi trishchynuvatosti porid-kolektoriv za dopomogoiu metodu skinchennykh elementiv. *Molodui vchenyi. Geologicjni nauky*. 2018. No 2. pp. 6-10. DOI: 10.32839.
24. Kurovets S., Artym I. Reservoir rocks fracturing model development. *East European Science Journal*. 2019. No 3. P. 24-29. ISSN: 2468-5380.
25. Kurovets S.S., Artym I.V. Otsinka vplyvu rozkydu znachen mekhanichnykh kharakterystyk porid-kolektoriv Prykarpattia na yikh tektonichnu trishchynuvatist. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2019. № 2. P. 19-33.[in Ukrainian]
26. [https://en.wikipedia.org/wiki/Factor\\_of\\_safety](https://en.wikipedia.org/wiki/Factor_of_safety)
27. Zderka T.V. Litohenetychna trishchynuvatist ta yii vplyv na naftonosnist porid-kolektoriv (na prykladi olihotsenovykh vidkladiv Nadvirnianskoho naftopromysloвого raionu) Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata heolohichnykh nauk, Ivano-Frankivsk. 2009. 175 p. [in Ukrainian]