

АПРОБАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕКТОНОФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ НА НАФТОГАЗОПЕРСПЕКТИВНИХ СТРУКТУРАХ ВНУТРІШНЬОЇ ЗОНИ ПЕРЕДКАРПАТСЬКОГО ПРОГИНУ

С. С. Куровець, І. В. Артим

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

На сучасному етапі геологічних досліджень з метою пошуку родовищ нафти і газу актуальним завданням є оцінка тріщинуватості порід-колекторів з використанням математичних моделей. Перспективним методом оцінки тріщинуватості порід-колекторів є аналіз напружено-деформованого стану піщано-алевритовій товщі шляхом скінченно-елементного моделювання тектонофізичних процесів, що відбуваються в її межах. Обґрунтування і основні підходи до тектонофізичного моделювання даної товщі з метою оцінки тріщинуватості перспективних на нафту і газ відкладів були розроблені в попередніх наших дослідженнях. На першому етапі досліджень була розроблена модель для оцінки напружено-деформованого стану симетричної антикліналі. Але через характерні для родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину складні форми перегинів пластів така спрощена модель не може бути якісно застосована. На другому етапі удосконалено та апробовано тектонофізичну модель на таких раніше досліджених родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, як Південно-Гвіздецьке та Старосамбірське. Результати апробації довели можливість на третьому етапі за допомогою розробленої нами моделі досліджувати на тектонічну тріщинуватість досить складні нафтогазоперспективні структури. Об'єктами досліджень вибрано такі перспективні родовища Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, як Кричківський блок Південносливківської площі, Ангелівська структура та площа Північна Опака. За результатами досліджень уточнено місця розташування пошукових свердловин. Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість використання запропонованої моделі для експрес-оцінки зон підвищеної тріщинуватості реальних прогинів пластів.

Ключові слова: антикліналь, родовище, тріщинуватість, пошукова свердловина, Передкарпатський прогин, тектонофізична модель.

На современном этапе геологических исследований с целью поиска месторождений нефти и газа актуальной задачей является оценка трещиноватости пород-коллекторов с использованием математических моделей. Перспективным методом оценки трещиноватости пород-коллекторов является анализ напряженно-деформированного состояния песчано-алевритовой толщи путем конечно-элементного моделирования происходящих в ее пределах тектонофизических процессов. Обоснование и основные подходы к тектонофизическому моделированию данной толщи для оценки трещиноватости перспективных на нефть и газ отложений были разработаны в предыдущих наших исследованиях. На первом этапе исследований была разработана модель для оценки напряженно деформированного состояния симметричной антиклинали. Но из-за характерных для месторождений Внутренней зоны Предкарпатского прогиба сложные формы перегибов пластов такая упрощенная модель не может быть качественно применена. На втором этапе проведено усовершенствование модели и ее апробацию на ранее исследованных месторождениях Внутренней зоны Предкарпатского прогиба, как Южно-Гвоздецкое и Старосамборское. Результаты апробации доказали возможность третьем этапе с помощью разработанной нами модели исследовать на тектоническую трещиноватость достаточно сложные нефтегазоперспективные структуры. Объектами исследований выбраны перспективные месторождения Внутренней зоны Предкарпатского прогиба как Кричковский блок Южносливкинской площади, Ангеловская структура и площадь Северная Опака. По результатам исследований уточнено местонахождение поисковых скважин. Анализ полученных результатов свидетельствует о возможности использования предлагаемой модели для экспресс-оценки зон повышенной трещиноватости реальных прогибов пластов.

Ключевые слова: антиклиналь, месторождение, трещиноватость, поисковая скважина, Предкарпатский прогиб, тектонофизическая модель.

At the present stage of geological research in order to search for oil and gas fields, the urgent task is to assess the reservoir rocks' fracturing using mathematical models. A promising method for estimating the reservoir rocks fracturing is the analysis of the stress-strain state of the sand-siltstone stratum by finite-element modeling of tectonophysical processes occurring within it. Substantiation and basic approaches to tectonophysical modeling of this

stratum in order to assess the fracture of promising oil and gas deposits have been developed in our previous studies. In the first stage of research, a model has been developed to estimate the stress-strain state of a symmetric anticline. However, due to the complex shapes of formation inflexions native to the deposits of the Pre-Carpathian Depression Inner Zone such a simplified model cannot be qualitatively applied. In the second stage, the model has been improved and tested on such investigated deposits of the Inner Zone of the Pre-Carpathian Depression as Pivdenno-Hvizdetske and Starosambirsk. Approbation of the improved tectonophysical model on these deposits of the Inner Zone of the Pre-Carpathian Depression has proved the possibility of its use for anticlines of complex shape. This makes it possible in the third stage with the help of the model developed by us to study the tectonic fracturing of quite complex oil and gas prospects. The objects of research selected are such promising deposits of the Inner Zone of the Pre-Carpathian Depression as the Krychkiivsky block of Pivdennoslyvkiivsky Region, Angelivsk Structure and Pivnichna Opaka Region. According to the results of the research, the location of exploratory wells has been clarified. The analysis of the obtained results indicates the possibility of using the proposed model for rapid assessment of areas of increased fracture of the real deflections of the layers.

Keywords: anticline, field, fracturing, exploration well, Pre-Carpathian Depression, tectonophysical model.

Вступ

Сучасні світові тенденції у сфері питань енергозабезпечення, особливо країн Європи, все більше вказують на те, що енергетична безпека є однією з першочергових стратегічних проблем України. Одним із основних шляхів успішного вирішення цієї проблеми разом з диверсифікацією джерел постачання енергоносіїв та підвищенням енергоефективності в усіх сферах життєдіяльності країни є підвищення рівня забезпечення паливно-енергетичною сировиною, у першу чергу за рахунок збільшення обсягів видобутку нафти і газу. Значне підвищення обсягів видобутку вуглеводнів можливе тільки за умови спорудження нових свердловин в усіх нафтогазоносних регіонах країни, у тому числі у межах Західноукраїнського нафтогазоносного регіону. Але відомо, що за останні роки видобуток вуглеводнів у регіоні знижується, будь-які дослідницькі роботи не тільки скорочуються, а й часто зовсім не проводяться. Ці факти свідчать про те, що на вказаній території під загрозою є подальший розвиток існуючої інфраструктури нафтогазовидобутку. Саме тому варто присвятити особливу увагу дослідженням, спрямованим на підвищення освоєння нафтогазоперспективних відкладів в межах Західноукраїнського нафтогазоносного регіону. Більшість перспективних ділянок зосереджено у Внутрішній зоні Передкарпатського прогину [1].

Слід зауважити, що сучасні геологічні дослідження вказують на суттєвий вплив вторинної тріщинуватості на підвищення нафтогазоносності порід-колекторів, особливо на великих глибинах. Враховуючи згадані вище чинники, тектонофізичне моделювання є одним із перспективних наукових напрямків, спрямованих на підвищення якості прогнозування нафтогазоносності порід-колекторів. Тому на сучасному етапі розвитку нафтогазової геології актуальним є дослідження тріщинуватості порід-

колекторів з використанням комп'ютерного моделювання. Це питання потребує детального вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як вказано раніше, на сучасному етапі надзвичайно важливим і актуальним є детальне дослідження закономірностей тектонофізичних процесів, які призводять до утворення зон розщільнення в потенційно перспективних щодо нафтогазоносності породах-колекторах. Їх знання може суттєво підвищити ефективність ведення пошукових робіт на локальних об'єктах.

При вивченні процесів, які ведуть до утворення тріщин в гірських породах, слід приділити особливу увагу сучасним працям науковців, які спрямовані на оцінку напружено-деформованого стану (НДС) порід-колекторів. Ще в недалекому минулому вивчення тріщинуватості проводилось тільки шляхом дослідження керну, добутого із свердловин. У таких умовах неможливо змодельовати НДС та врахувати його вплив на тріщинуватість, що було суттєвим недоліком. Але стрімкий розвиток комп'ютерного моделювання фізичних процесів призвів до суттєвого покращення даної ситуації.

Так, авторами роботи [2] розроблено статистичну теорію міцності, деформації та руйнування гірських порід. Наведено методики та засоби досліджень фізико-механічних властивостей гірських порід, у тому числі міцнісних, деформаційних, фільтраційних властивостей, утворення і розвитку тріщин. За допомогою розробленої теорії змодельовано фізико-механічні умови, які виникають під час розробки корисних копалин на великих глибинах, і створено структурну статистичну модель неоднорідного деформованого тіла, типовим представником якого є гірські породи. Також вивчено вплив порового тиску на НДС гірських порід, наведено значний обсяг експериментальних

даних щодо фізичних та фізико-механічних властивостей гірських порід, відібраних з різних басейнів і родовищ.

Статті за матеріалами 7-ої Міжнародної конференції з геообчислення представлені в роботі [3]. Геообчислення як термін показує взаємозв'язок між моделюванням та його застосуванням для наочного відображення і пояснення різних динамічних аспектів фізичних процесів, які відбуваються на земній поверхні.

Автори праці [4] присвятили її дослідженню геодинамічних процесів за допомогою математичного моделювання чисельними методами. Ця робота представлена у вигляді посібника. Перевагами даної роботи є простота викладеного матеріалу та зручність користування довідковою інформацією. Дана праця є доступною для широкого кола зацікавлених читачів, адже у ній відсутні складні математичні формули, а для розуміння основних викладок потрібно мати лише базові знання з геодинамічної теорії та чисельних методів розв'язку диференціальних рівнянь. У праці представлені основні чисельні методи геодинамічного моделювання. Їх використання проілюстровано на прикладах проблем загальної геодинаміки, конвекції мантиї, літосферної деформації та інше. Також для кожного з основних методів наведено їх основні відмінності, переваги та недоліки. Це дає змогу з більшою ймовірністю зробити вірний вибір певного методу для отримання адекватних результатів обчислень.

Експериментальним та числовим методам оцінки тріщиностійкості гірських порід на основі положень механіки руйнування присвячено роботи [5-7].

Так, у роботі [5] автором наведено опис нового експериментального методу дослідження гірських порід на тріщиностійкість. Розроблений метод можна використовувати для визначення стисненого руйнування за зсуву (режим II). Автором також наведено порівняння результатів експериментів з результатами стисненого руйнування за стиску (режим I). Згідно з принципами механіки руйнування порід, опір порід розтріскуванню є надзвичайно важливим параметром, який використовується при оцінці розривів гірських порід.

Автор роботи [6] присвятив свої дослідження оцінці тріщинуватості гірських порід на основі принципів механіки руйнування з використанням методу дискретних елементів. Для цього використано результати, отримані шляхом аналізу досліджень реальних механічних та геометричних показників систем тріщин, які отримано на основі картографування полів в

Селлафілді, Великобританія. Ці дані лягли в основу багатьох числових експериментів, проведених на двовимірних дискретних мережах розриву тріщин з метою визначення напружень та деформацій. Отримані результати лягли в основу розроблення моделі, яка адекватно відображає поведінку тріщинуватих порід за впливу напружень та деформацій як функції обмеження тиску, а також для оцінки таких важливих параметрів деформації, як еквівалентний спрямований модуль пружності першого роду та коефіцієнт Пуассона. Результати представлені у формі еквівалентних властивостей порід, для визначення яких були застосовані критерії оцінки руйнування Мор-Кулона і Хок-Брауна.

Дослідження розтріскування порід методами механіки тріщин також представлені у роботі [7]. У наведеній роботі наведено опис і дано пояснення основних принципових проблем, які можуть виникнути під час застосування методів механіки руйнування для оцінки тріщинуватості гірських порід.

Останнім часом сучасні вчені все більшу увагу звертають на проблему моделювання процесів тріщинуватості гірських порід на основі положень механіки руйнування. Даній проблемі присвячено роботи [8-9].

Так, у 2014 році авторами було опубліковано працю [8] щодо моделювання геомеханічних задач за допомогою комп'ютерної програми FRACOD шляхом використання підходів механіки руйнування. Також у даній праці наведено методику використання FRACOD і теоретичні основи механіки тріщинуватості порід за допомогою методів оцінки опору руйнування матеріалів при зсуві. Комп'ютерна програма FRACOD застосовується з метою оцінки утворення тріщин та їх розповсюдження до руйнування при розтягу (режим I), зсуві (режим II) та комплексному впливі розтягу (стиску) і зсуву. Методики, за якими випробовуються гірські породи з метою визначення параметрів утворення та поширення тріщин, вимагають екстремальних умов напружень, температури та гідравлічного тиску, що значно ускладнює необхідне експериментальне обладнання. Це робить такі дослідження надзвичайно дорогими, а в деяких випадках – взагалі неможливими. Комп'ютерна програма FRACOD є однією з небагатьох, які дають змогу адекватно змоделювати умови утворення та поширення тріщин в екстремальних умовах без проведення дорогартісних натурних експериментів. Також у праці наведено основи аналізу проблеми механіки руйнування для структур, які представлені

крихкими породами. Це – гідромеханічний та термомеханічний зв'язок, множинні регіональні механічні, термічні та гідравлічні функції тощо. Програма постійно вдосконалюється і останнім часом дала змогу також моделювати утворення гідравлічних та термічних тріщин.

Наукову працю [9], присвячену обчислювальним методам оцінки поширення тріщин у пористих середовищах за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ), було опубліковано у 2018 році. У даній роботі автором наведено основні рівняння, що описують пористе середовище, насичене рідиною. На основі проведеного аналізу рівнянь розроблено і обґрунтовано нові методи моделювання поширення тріщин в пористих структурах з урахуванням їх насичення рідиною.

Беручи до уваги попередній огляд, а також численні праці інших авторів, наприклад [10-23], слід відмітити високу перспективність методу оцінки тріщинуватості порід-колекторів шляхом аналізу їх НДС за допомогою комп'ютерного моделювання тектонофізичних процесів прошарків порід-колекторів.

Для цього нами за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) розроблено параметричну тектонофізичну модель оцінки НДС прошарку пісковика [24-26].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Основні підходи до оцінювання тріщинуватості нафтогазоперспективних відкладів у піщано-алевритовій товщі за допомогою тектонофізичного моделювання обґрунтовано в наших попередніх дослідженнях [24-26]. Але родовища Внутрішньої зони Передкарпатського прогину характеризуються дуже складними формами перегинів пластів. Як приклад, наведено фронтальні складки у Долинському перетині (рис. 1), де можна наочно побачити, наскільки складною є тектонічна будова Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Геодинамічні рухи та реологічна неоднорідність порід призвели до виникнення багатоярусної тектонічної будови. Одночасно з горизонтальними рухами відбувались і вертикальні, що спричинили до занурень блоків. Ярусність значно ускладнена локальними насувами, поперечними скидами, скидо-зсувами, які часто утруднюють простеження окремих ліній складок.

У таких умовах розроблена спрощена модель симетричної антикліналі не може використовуватись. Успішна апробація моделі на відомих родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину [27] дає змогу повністю ви-

користати потенціал модельних досліджень тектонічної тріщинуватості в умовах надзвичайно складного характеру тектонічних структур. Тому **метою статті** є удосконалення тектонофізичної моделі піщано-алевритової товщі і її практичне використання для досліджень перспективних ділянок родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та рекомендацій щодо пошукового буріння.

Виклад основного матеріалу

Використання розробленої тектонофізичної моделі оцінки тріщинуватості піщано-алевритової товщі проведено на таких перспективних родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, як Кричківський блок Південносливківської площі, Ангелівська структура та площа Північна Опака

Південносливківська структура

Південносливківська площа приурочена до Надвірнянського нафтогазоносного району. У структурному відношенні охоплює Південносливківську складку першого ярусу структур, яка представлена двома блоками. Ми розглядаємо Кричківський блок (рис. 2, 3).

З урахуванням можливої екранізації поперечними розломами структурні форми цього блоку є сприятливими для існування покладів нафти і газу. Породами-колекторами виступають піщано-алевритові різновидності порід з відносно низькими колекторськими властивостями.

Антикліналь пісковика вигодської світи вдалося змоделювати за допомогою удосконалених граничних умов імітації піднасуву (умова С – переміщення і фіксований поворот переїзу) (рис. 4).

Згідно з результатами досліджень, незважаючи на дуже великі деформації, зона тектонічної тріщинуватості є локальною, антикліналь не зруйнована (рис. 5). Відклади бистрицької світи з аналогічною тектонічною будовою є покришкою. За результатами досліджень уточнюємо місце розміщення пошукової свердловини 1-Пд.Сл. (див. рис. 3). Свердловина зміщена на 100 м в північно-східному напрямку від її початкового проектного положення.

Ангелівська структура

Ангелівська площа знаходиться в Долинському районі Івано-Франківської області на відстані 15 км від м. Долини та в 4-5 км від залізничної станції Вигода. Через площу проходить автомагістраль Долина-Хуст.

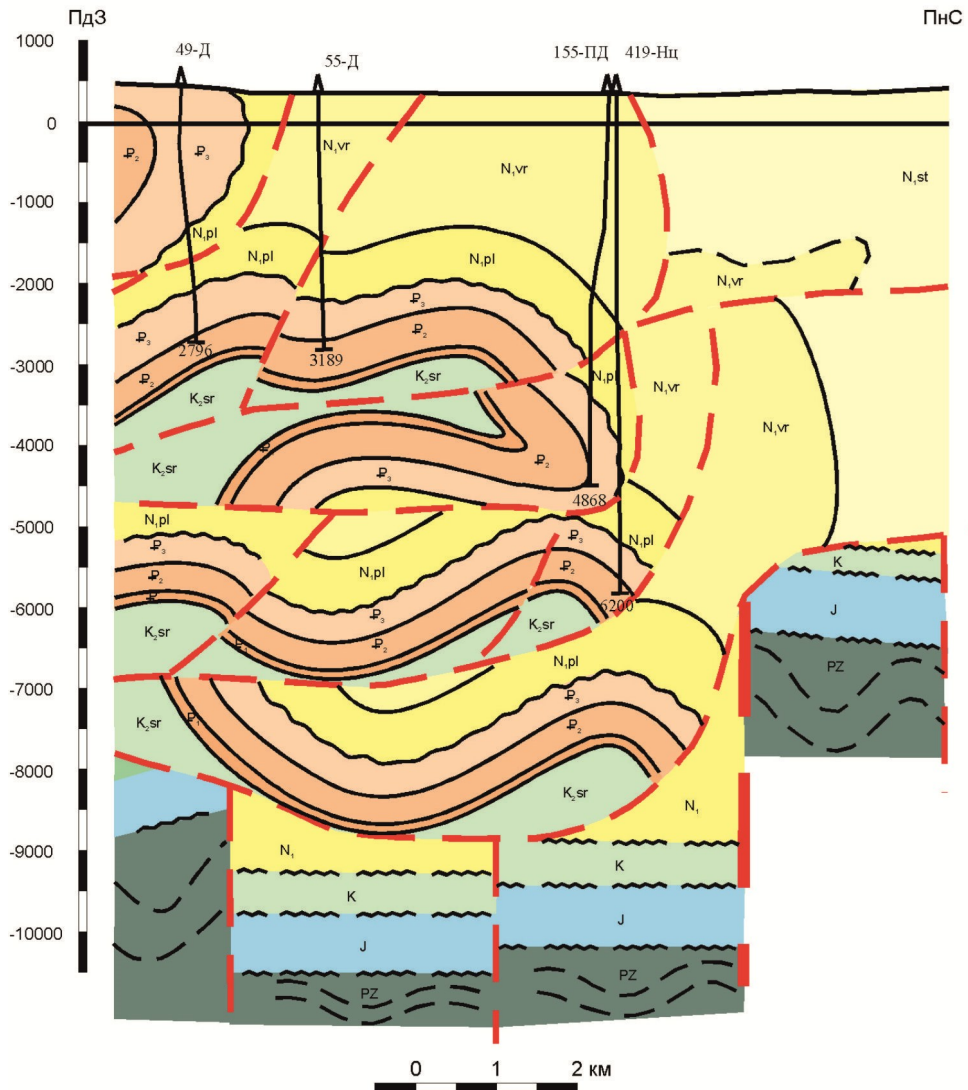


Рисунок 1 – Геологічна будова фронтальних складок у Долинському перетині (склав Мончак Л.С.)

У геологічному відношенні ця площа розташована в Скибовій зоні Карпат і пов'язана з Новошинською лінією складок. Ця складка відноситься до тієї частини Берегової скиби, що перекрита Орівською. Ця територія належить до Долинського нафтогазопромислового району, де сконцентрована велика кількість початкових запасів нафти і газу.

Геологічно будова Скибової зони Карпат вивчена не достатньо. Спеціальні структурні побудови в більшості не виконувались. В зв'язку з цим в 1991 р. сейсміками було переінтерпретовано сейсмозв'язувальні матеріали Скибової зони на Стинавсько-Лугівській ділянці.

За результатами переінтерпретації сейсмічних матеріалів в межах Берегової та Орівської скиб виявлено ряд складок карпатського типу у відкладах палеогену. Деякі з них вже вивчені достатньо і є потенційно перспективними для відкриття в них промислових покладів нафти і

газу на невеликих глибинах. Ці рекомендації відносяться до об'єктів, на яких сейсмічні матеріали мають високу ступінь достовірності. До таких віднесена і Ангелівська складка.

В геологічній будові Ангелівської площі беруть участь відклади верхньої крейди та палеогену у повному наборі світ. Неогенові відклади поляницької світи тут зустрічаються тільки місцями у фронтальній частині складки і не мають впливу на розподіл нафтогазоносності, як це має місце в Бориславсько-Покутській зоні Передкарпатського прогину.

Породи, що можуть бути колекторами нафти і газу, відносяться до ямненської, частково манявської, вигодської та менілітової світи палеогену. У стрийській світі верхньокрейдового віку зустрічаються піщано-аргілітові горизонти, в яких пропластки пісковиків виступають як колектори з низькими фільтраційно-ємнісними властивостями. Породами покришками можуть

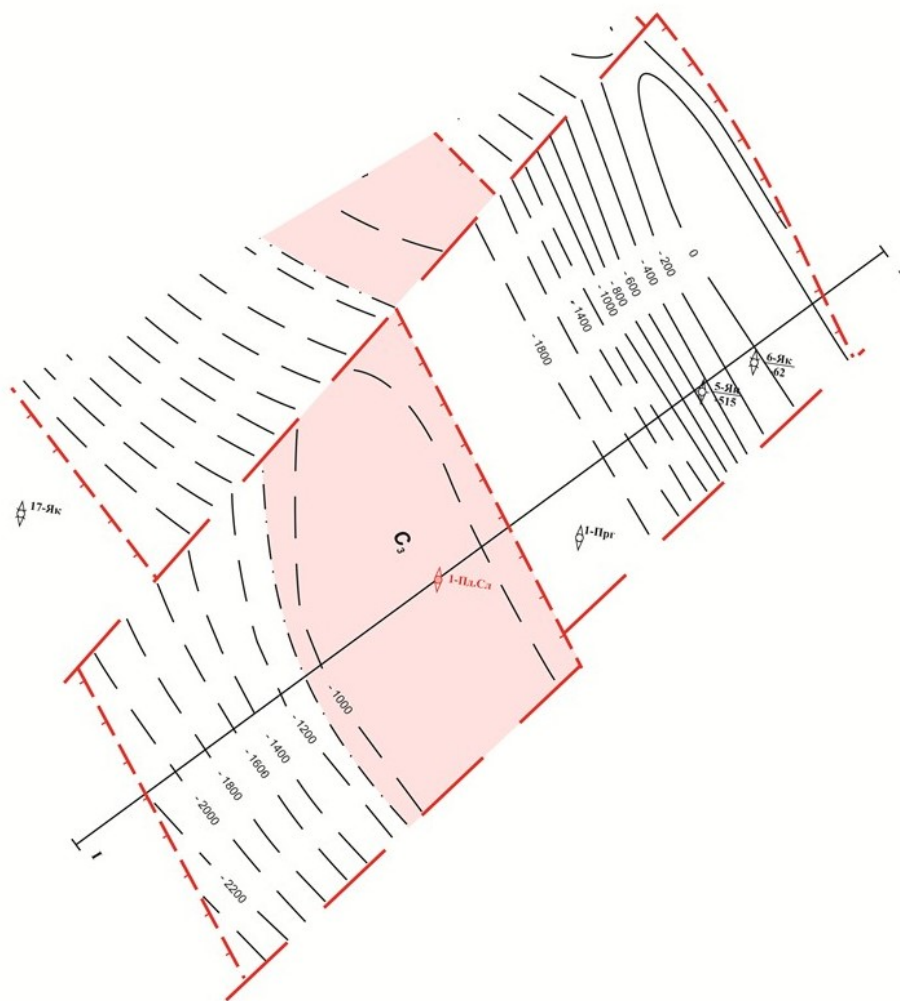


Рисунок 2 – Структурна карта покрівлі еоценових відкладів (P₂) Південносливкінської площі (за матеріалами Прикарпатського УБР, склад Мончак Л.С.)

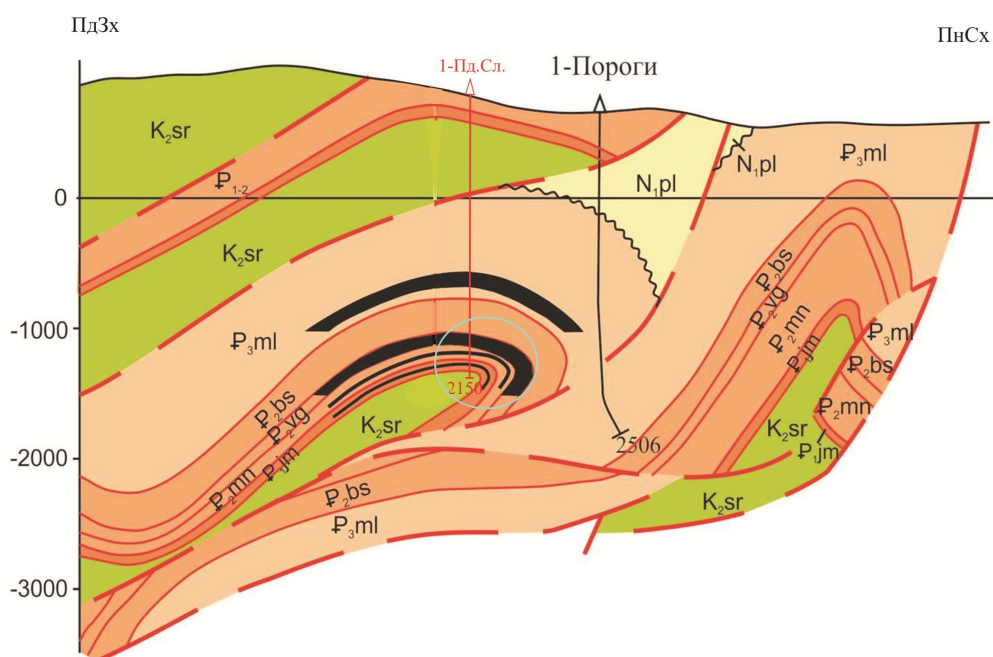


Рисунок 3 – Геологічний розріз Південносливкінської площі по лінії I-I (за матеріалами Прикарпатського УБР, склад Мончак Л.С.)

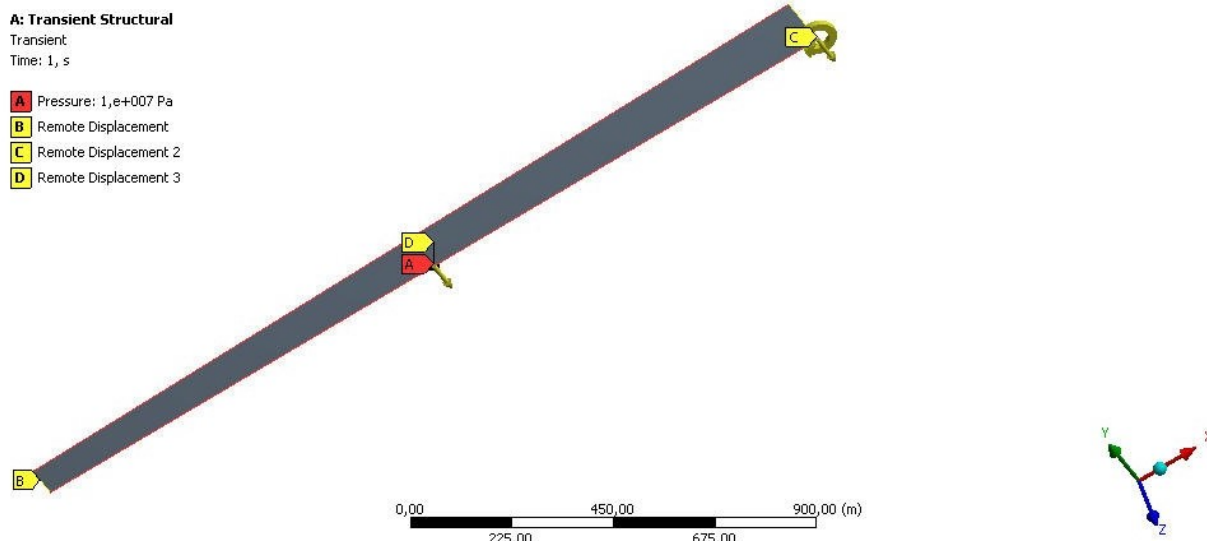


Рисунок 4 – Граничні умови та навантаження моделі антикліналі пісковика вигодської світи

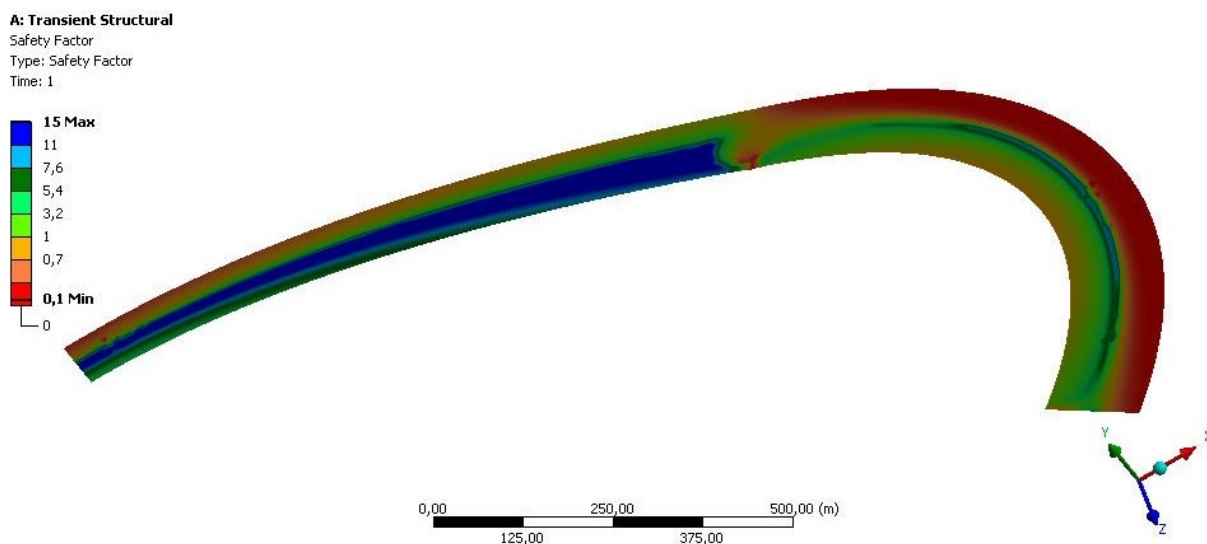


Рисунок 5 – Результати моделювання НДС антикліналі пісковика вигодської світи

бути аргілітові пачки порід верхньострийських, яменських, бистрицьких та менілітових відкладів. Останні як покришки мають локальне значення.

Про можливу нафтогазоносність цієї площі можна судити за багатьма даними:

- існування лінійно витягнутої антиклінальної складки, що ускладнена поперечними розломами, де можуть існувати склепінні та екрановані пастки для нафти і газу;
- наявність порід-колекторів і порід-покришок, про що вже згадувалось вище;
- сусідство давно відомих нафтових родовищ (Вигода-Витвицького та Спаського), а також недавно відкритого Підсухівського;
- припливи газу з нижньоменілітових відкладів (інтервал 1339-1417 м) свердловини 1-Лолінська дебітом біля 10 тис. м³, а також прояви нафти з газом в еоценових відкладах

Орівської скиби (840-1050 м), де після ліквідації свердловини на гирлі просочується нафта.

Перспективні ділянки Ангелівської структури наведено на рис. 6.

Підтверджуємо місце розміщення проектної пошукової свердловини 1-Ан за аналогією з вибором місця свердловини Південносливкінської структури (рис. 7).

Удосконалені граничні умови та навантаження наведено на рис. 8. Результати моделювання наведено на рис. 9. Тут пласт пісковика яменської світи має подібний НДС, як на рис. 5.

Площа Північна Опака

Також модель застосовано на площі Північна Опака (рис. 10). Тут пласт пісковика яменської світи має подібну тектонічну будову до пісковика вигодської світи Південносливкінської структури (рис. 11).

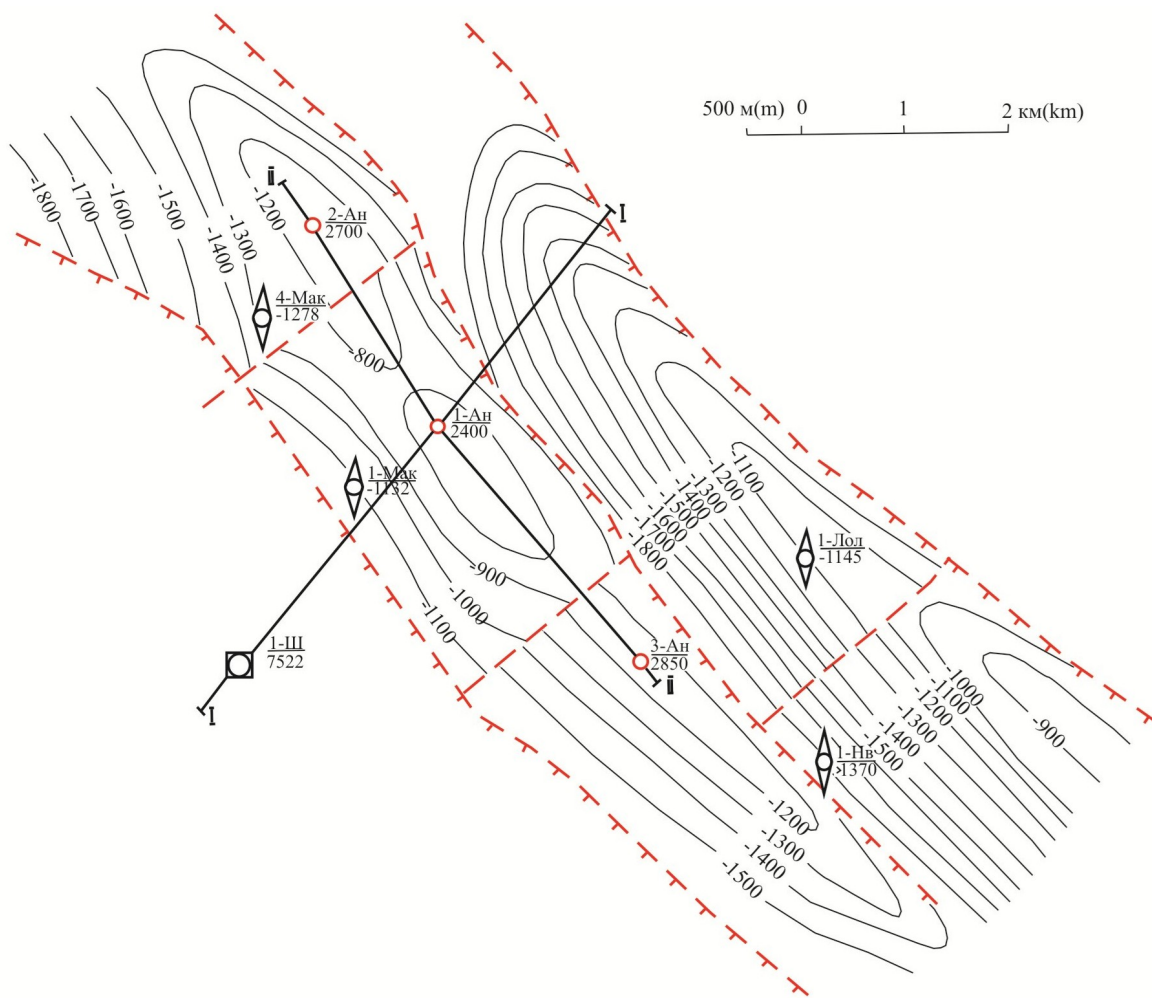


Рисунок 6 – Структурна карта покрівлі еоценових відкладів Ангелівської площі (склала М.Будкевич, О.Шуфлат із змінами Мончака Л.С., 1998 р.)

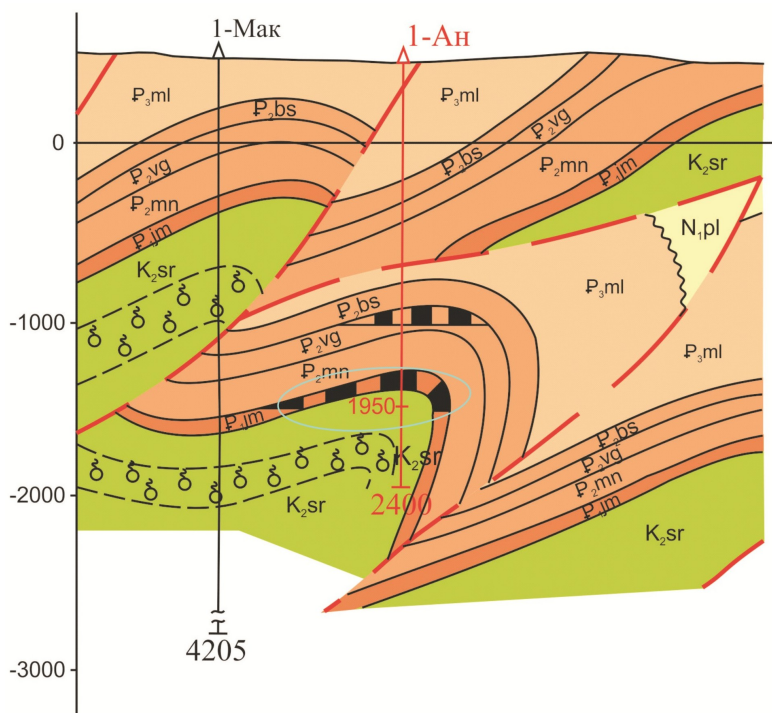


Рисунок 7 – Геологічний розріз Ангелівської площі по лінії I-I (склав Мончак Л.С., 1998 р.)

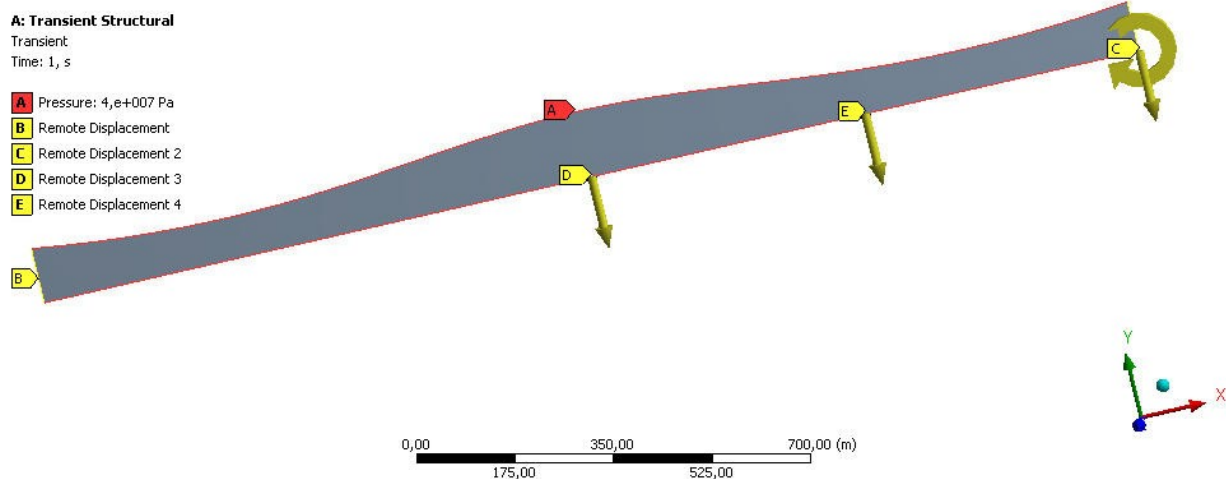


Рисунок 8 – Граничні умови та навантаження моделі антикліналі пісковиків ямненської світи

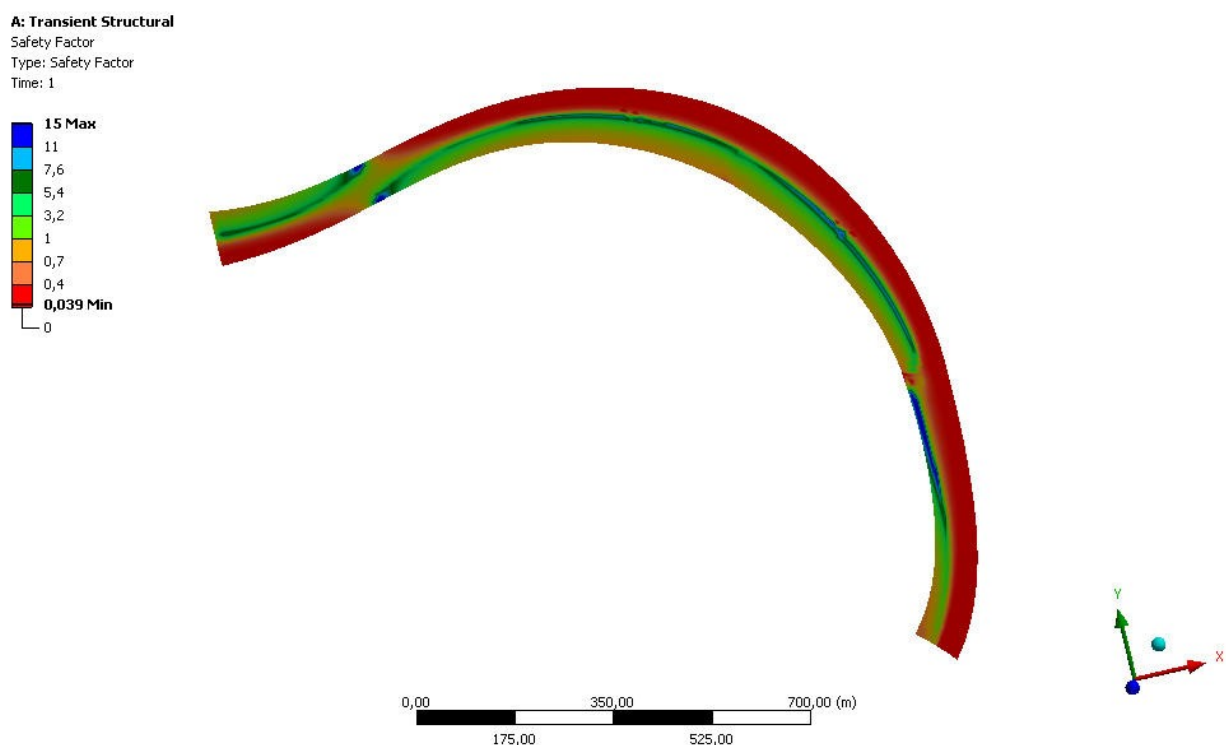


Рисунок 9 – Результати моделювання НДС відкладів ямненської світи Ангелівської структури

Площа Північна Опака розташована в Бориславському районі поряд з Бориславським родовищем. Антиклінальні складки встановлені у Бориславсько-Покутській зоні (нижні складки), а верхні складки – в перехідних елементах Скибової зони. Пласти пісковиків очікуються в ямненських відкладах та у менілітових відкладах (бориславський пісковик). Складка обмежена поперечними порушеннями північно-східного простягання.

Оскільки тектонічна будова пластів є схожою, то і граничні умови були застосовані аналогічні (рис. 12).

Згідно з нашими результатами уточнюємо місце розташування пошукової свердловини 1-ПнО (див. рис. 11).

Висновки

Результати практичного використання удосконаленої тектонофізичної моделі на прикладах нафтогазоперспективних структур Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, а саме Південносливкінської площі, Ангелівської структури та площі Північна Опака, свідчать про те, що за допомогою розробленої моделі можна досліджувати достатньо складні струк-

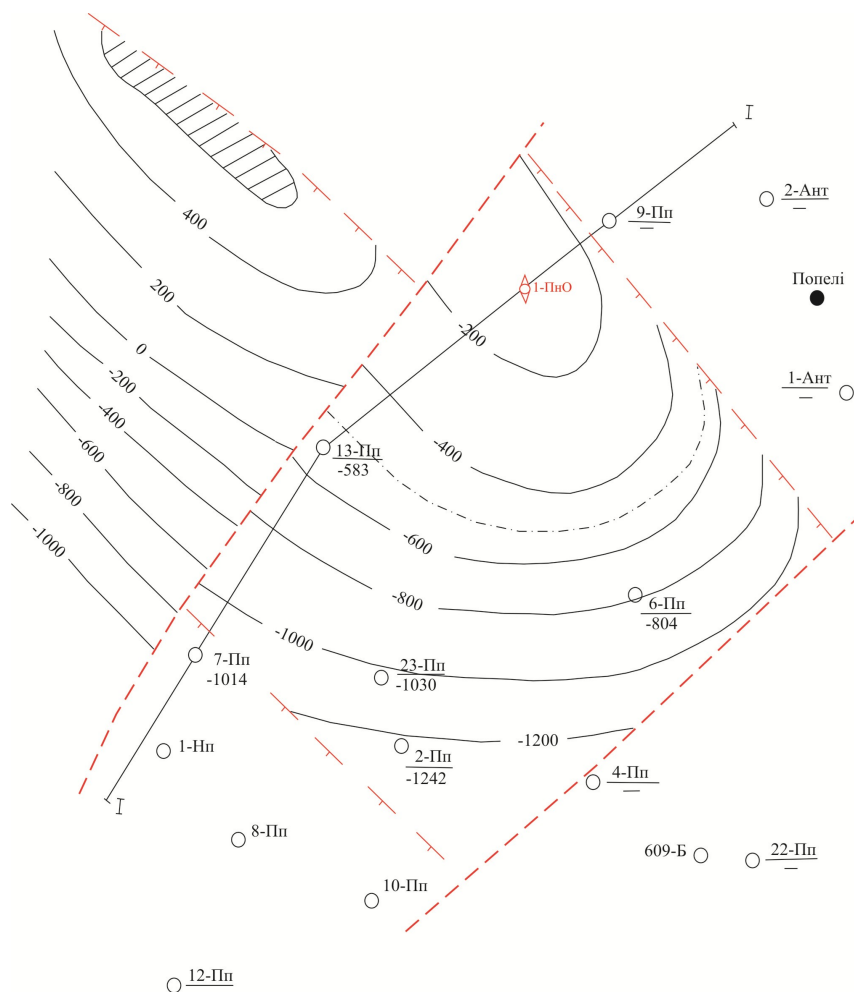


Рисунок 10 – Структурна карта покрівлі ямненської світи Берегової скиби. Площа Північна Опака (склав Трушевич Р.Т., з доповненнями Мончака Л.С.)

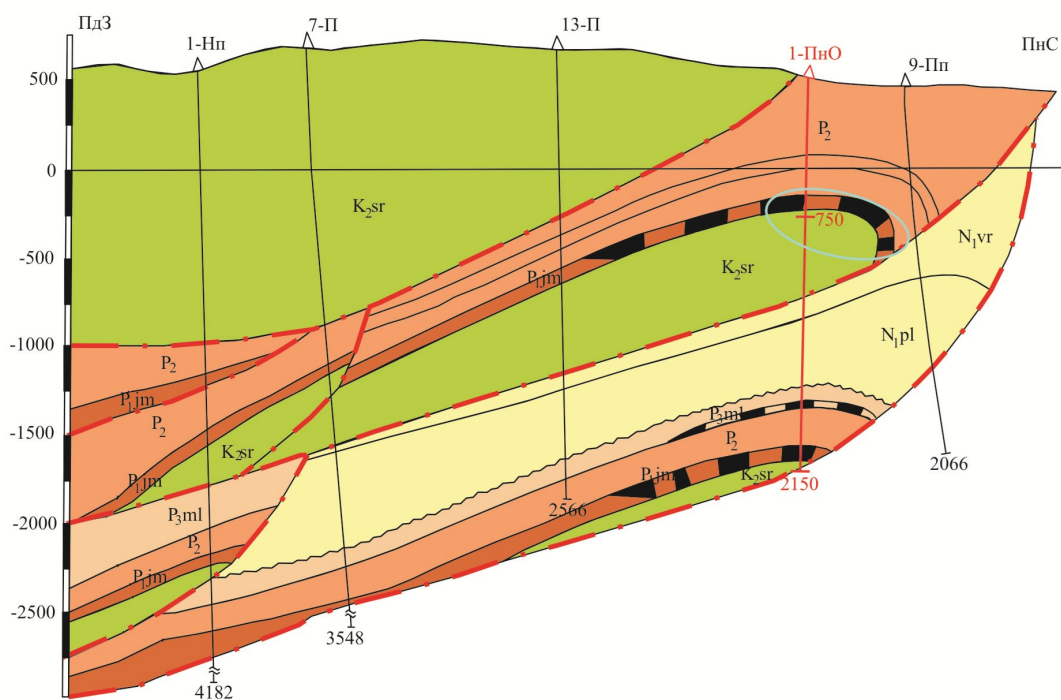


Рисунок 11 – Площа Північна Опака. Геологічний розріз по лінії I-I (склав Мончак Л.С.)

A: Transient Structural
 Transient
 Time: 1, s

A Pressure: 1, e+007 Pa
B Remote Displacement
C Remote Displacement 2
D Remote Displacement 3

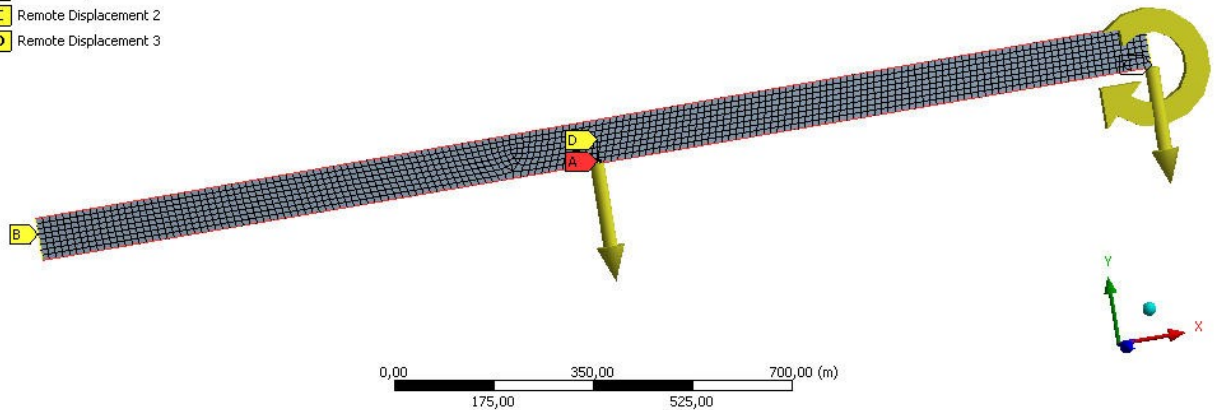


Рисунок 12 – Граничні умови та навантаження моделі антикліналі

A: Transient Structural
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Time: 1

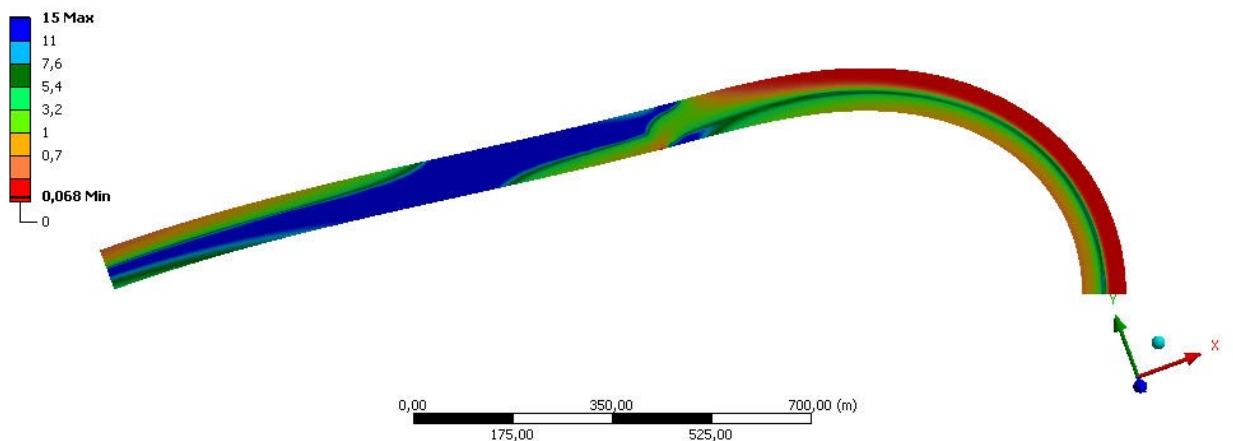


Рисунок 13 – Результати моделювання НДС відкладів ямненської світи структури Північна Опака

тури щодо тектонічної тріщинуватості. Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість використання запропонованої моделі для експрес-оцінки зон підвищеної тріщинуватості реальних прогинів пластів. Наступні дослідження будуть спрямовані на удосконалення моделі для 3-D досліджень перспективних ділянок родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та рекомендацій щодо пошукового буріння.

Література

1. Мончак Л.С., Анікеєв С., Жученко Г., Здерка Т.В., Мончак Й.Л., Хомин В.Р. Щодо реальних перспектив відкриття нових родовищ

та нарощення видобутку нафти і газу у Західному регіоні України. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ* 2019. № 2 (71). С. 7-19. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-2\(71\)-7-19](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-2(71)-7-19).

2. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. *Экспериментальная физика и механика горных пород*. СПб: Наука, 2001.

3. Atkinson P.M., Foody G.M., Darby S.E., Wu F. *GeoDynamics*, 2005.

4. Ismail-Zadeh A., Tackley P. *Computational Methods for Geodynamics*, 2010.

5. Backers T. *Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading*. Diss, 2004.

6. Noorian-Bidgoli M. Strength and deformability of fractured rocks. Diss. Stockholm, 2014.
7. Guo H. Rock cutting studies using fracture mechanics, 1990.
8. Shen Baotang, Stephansson O., Rinne M. Modelling Rock Fracturing Processes: A Fracture Mechanics Approach Using FRACOD, 2014.
9. De Borst R. Computational Methods for Fracture in Porous Media: Isogeometric and Extended Finite Element Methods, 2018.
10. Salze, M., Martinod, J., Guillaume, B., Kermarrec, J.-J., Ghiglione, M.C., Sue, C., 2018. 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*, doi : 10.1016/j.tecto.2018.04.018
11. Guillaume, B., Hertgen, S., Martinod, J., and Cerpa, N.G., 2018. Slab dip, surface tectonics : How and when do they change following an acceleration/slow down of the overriding plate ?, *Tectonophysics* 726, 110-120, doi: 10.1016/j.tecto.2018.01.030.
12. Brun, J.-P., Sokoutis, D., Tirel, C., Gueydan, F., Van Den Driessche J. , and Beslier M.-O., in press. Crustal versus mantle core complexes, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2017.09.017.
13. Bajolet F., Chardon D., Martinod J., Gapais D., Kermarrec J.J., 2015. Syn-convergence flow inside and at the margin of orogenic plateaux : Lithospheric-scale experimental approach. *J.G.R. Solid Earth*, 120, 6634-6657, doi: 10.1002/2015JB012110.
14. Kydonakis, K., Brun J.-P., Sokoutis D., 2015. North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, doi : 10.1002/2014JB011601.
15. Driehaus, L., Nalpas T., Ballard J.-F., 2014. 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*, 65, 59-68, doi: 10.1016/j.jsg.2014.04.003
16. Gapais D., Jaguin J., Cagnard F., Boulvais P., 2014. Pop-down tectonics, fluid channelling and ore deposits within ancient hot orogens. *Tectonophysics*, 618, 102-106.12, doi : 10.1016/j.tecto.2014.01.027
17. Philippon M., Brun J.-P., Gueydan F. and Sokoutis D., 2014. The interaction between Aegean back-arc extension and Anatolia escape since Middle Miocene. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2014.04.039
18. Zanella, A., Cobbold, P.R., Le Carlier de Veslud, C., 2014. Physical modelling of chemical compaction, overpressure development, hydraulic fracturing and thrust detachments in organic-rich source rock. *Marine and Petroleum Geology* 55, 262-274, doi : 10.1016/j.marpetgeo.2013.12.017.
19. Barrier, L., T. Nalpas, D. Gapais, J.-N. Proust, 2013. Impact of synkinematic sedimentation on the geometry and dynamics of compressive growth structures : Insights from analogue modelling. *Tectonophysics*, 608, 737-752.5, doi : 10.1016/j.tecto.2013.08.005
20. Driehaus, L., Nalpas, T., Cobbold, P.R., Gelabert, B., Sàbat, F. 2013. Effects of margin-parallel shortening and density contrasts on back-arc extension during subduction : Experimental insights and possible application to Anatolia. *Tectonophysics*, 608, 288-302, doi: 10.1016/j.tecto.2013.09.028 .
21. Midtkandal I., Brun J.P., Gabrielsen R.H., Huisman R.S., 2013. Control of lithosphere rheology on subduction polarity at initiation : Insights from 3D analogue modelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 219-228, doi : 10.1016/j.epsl. 2012.10.026
22. Reber, J.E., Galland, O., Cobbold, P.R., Le Carlier de Veslud, C. 2013. Experimental study of sheath fold development around a weak inclusion in a mechanically layered matrix. *Tectonophysics*, 586, 130-144, doi: 10.1016/j.tecto. 2012.11.013.
23. Soleimany, B., T. Nalpas, F. Sàbat, 2013. Role of the compression angle on the reactivation of an inverse fault. *Geologica Acta*, 11, 265-276.
24. Артим І.В. Оцінка тектонічної тріщинуватості порід-колекторів за допомогою методу скінчених елементів. *Молодий вчений. Геологічні науки*. 2018. № 2. С. 6-10. DOI: 10.32839.
25. Kurovets S., Artym I. Reservoir rocks fracturing model development. *East European Science Journal*. 2019. No 3. P. 24-29. ISSN: 2468-5380.
26. 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.
27. Куровець С.С., Артим І.В., Здерка Т.В. Апробація тектонофізичної моделі оцінювання тріщинуватості на родовищах Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 2 (34). С. 15-25. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2\(34\)-15-25](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2(34)-15-25).

References

1. Monchak L.S., Anikeiev S., Zhuchenko G., Zderka T.V., Monchak Y.L., Khomyn V.R. (2019). Shchodo realnykh perspektyv vidkryttia novykh rodovyshch ta naroshchennia vydobutku nafty i hazu u Zakhidnomu rehioni Ukrainy. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, No 2(71). C. 7-19. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-2\(71\)-7-19](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-2(71)-7-19). [in Ukrainian]
2. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. *Eksperymental'naya fizika i mehanika gornyykh porod*. SPb: Nauka, 2001. [in Russian]
3. Atkinson P.M., Foody G.M., Darby S.E., Wu F. *GeoDynamics*, 2005.
4. Ismail-Zadeh A., Tackley P. *Computational Methods for Geodynamics*, 2010.
5. Backers T. *Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading*. Diss, 2004.
6. Noorian-Bidgoli M. *Strength and deformability of fractured rocks*. Diss. Stockholm, 2014.
7. Guo H. *Rock cutting studies using fracture mechanics*, 1990.
8. Shen Baotang, Stephansson O., Rinne M. *Modelling Rock Fracturing Processes: A Fracture Mechanics Approach Using FRACOD*, 2014.
9. De Borst R. *Computational Methods for Fracture in Porous Media: Isogeometric and Extended Finite Element Methods*, 2018.
10. Salze, M., Martinod, J., Guillaume, B., Kermarrec, J.-J., Ghiglione, M.C., Sue, C., 2018. 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*, doi: 10.1016/j.tecto.2018.04.018
11. Guillaume, B., Hertgen, S., Martinod, J., and Cerpa, N.G., 2018. Slab dip, surface tectonics: How and when do they change following an acceleration/slow down of the overriding plate?, *Tectonophysics* 726, P. 110-120, doi: 10.1016/j.tecto.2018.01.030.
12. Brun, J.-P., Sokoutis, D., Tirel, C., Gueydan, F., Van Den Driessche J., and Beslier M.-O., in press. Crustal versus mantle core complexes, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2017.09.017.
13. Bajolet F., Chardon D., Martinod J., Gapais D., Kermarrec J.J., 2015. Syn-convergence flow inside and at the margin of orogenic plateaux: Lithospheric-scale experimental approach. *J.G.R. Solid Earth*, 120, 6634-6657, doi: 10.1002/2015JB012110.
14. Kydonakis, K., Brun J.-P., Sokoutis D., 2015. North Aegean core complexes, the gravity spreading of a thrust wedge, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, doi: 10.1002/2014JB011601.
15. Driehaus, L., T. Nalpas, J.-F. Ballard, 2014. 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*, 65, 59-68, doi: 10.1016/j.jsg.2014.04.003
16. Gapais D., Jaguin J., Cagnard F., Boulvais P., 2014. Pop-down tectonics, fluid channelling and ore deposits within ancient hot orogens. *Tectonophysics*, 618, 102-106.12, doi: 10.1016/j.tecto.2014.01.027
17. Philippon M., Brun J.-P., Gueydan F. and Sokoutis D., 2014. The interaction between Aegean back-arc extension and Anatolia escape since Middle Miocene. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2014.04.039
18. Zanella, A., Cobbold, P.R., Le Carlier de Veslud, C., 2014. Physical modelling of chemical compaction, overpressure development, hydraulic fracturing and thrust detachments in organic-rich source rock. *Marine and Petroleum Geology* 55, 262-274, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2013.12.017.
19. Barrier, L., T. Nalpas, D. Gapais, J.-N. Proust, 2013. Impact of synkinematic sedimentation on the geometry and dynamics of compressive growth structures: Insights from analogue modelling. *Tectonophysics*, 608, 737-752.5, doi: 10.1016/j.tecto.2013.08.005 2
20. Driehaus, L., Nalpas, T., Cobbold, P.R., Gelabert, B., Sàbat, F. 2013. Effects of margin-parallel shortening and density contrasts on back-arc extension during subduction: Experimental insights and possible application to Anatolia. *Tectonophysics*, 608, 288-302, doi: 10.1016/j.tecto.2013.09.028.
21. Midtkandal I., Brun J.P., Gabrielsen R.H., Huisman R.S., 2013. Control of lithosphere rheology on subduction polarity at initiation: Insights from 3D analogue modelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 219-228, doi: 10.1016/j.epsl.2012.10.026
22. Reber, J.E., Galland, O., Cobbold, P.R., Le Carlier de Veslud, C. 2013. Experimental study of sheath fold development around a weak inclusion in a mechanically layered matrix. *Tectonophysics*, 586, 130-144, doi:10.1016/j.tecto.2012.11.013.
23. Soleimany, B., T. Nalpas, F. Sàbat, 2013. Role of the compression angle on the reactivation of an inverse fault. *Geologica Acta*, 11, 265-276.
24. Artym I.V. Otsinka tektonichnoi trishchynuvatosti porid-kolektoriv za dopomohoiu metodu skinchennykh elementiv. *Molodyi vchenyi*.

Heolohichni nauky. 2018. No 2. P. 6-10. DOI: 10.32839.

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

26. Kurovets S.S., Artym I.V. Otsinka vplyvu rozkydu znachen mekhanichnykh kharakterystyk porid-kolektoriv Prykarpattia na yikh tektonichnu trishchynuvatist. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2019. No 2. P. 19-33. [in Ukrainian]

27. Kurovets S. S., Artym I. V., Zderka T. V. (2020). Aprobatsiia tektonofizychnoi modeli otsiniuvannia trishchynuvatosti na rodovyshchakh Vnutrishnoi zony Peredkarpatskoho prohynu. *Naftohazova enerhetyka*, No 2 (34). P. 15-25. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2\(34\)-15-25](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2(34)-15-25) [in Ukrainian]