

УДК 531.781:550.36 (045)

Н.І. Бахова, к.ф.-м.н., доц.

ТЕРМОПРУЖНА МОДЕЛЬ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУНаціональний авіаційний університет
E-mail: bakhova_nataly@mail.ru

Побудовано двовимірну термопружну модель Карпатського регіону на основі числового методу скінченних елементів. Фізико-математична модель максимально наближена до реального середовища. Отримано високоточний детальний розподіл термопружних напружень і переміщень Нерівномірне нагрівання гірських порід і структурні неоднорідності приводять до значних змін полів напружень і переміщень у Карпатському регіоні.

The two-dimensional thermoelastic model of Carpathian region on the basis of a numerical finite elements method is constructed. The physical and mathematical model is as much as possible approached to the real environment. Detailed high-precision distribution of thermoelastic stresses and dislocations is received. The mountainous rocks non-uniform heating and structural non-uniforms leads to considerable changes of stress fields and dislocations in Carpathian region.

Построена двухмерная термоупругая модель Карпатского региона на основе численного метода конечных элементов. Физико-математическая модель максимально приближена к реальной среде. Получено высокоточное детальное распределение термоупругих напряжений и перемещений. Неравномерное нагревание горных пород и структурных неоднородностей приводит к значительным изменениям полей напряжений и перемещений в Карпатском регионе.

Вступ

Кількісний опис термопружних напружень є одним із найважливіших завдань сучасної геотермії. Теоретичні та експериментальні геофізичні дослідження показують, що температурні зміни, які спостерігаються в земній корі, можуть спричиняти значні термопружні напруження, яких досягають межі міцності порід. Це дозволяє розглядати теплові напруження як одне із джерел тектонічної та сейсмічної активності.

Аналіз досліджень

Аналіз особливостей теплового поля Карпат і прилеглих прогинів показує, що розподіл теплових потоків корелюється з особливостями тектоніки [1].

Карпатський регіон має досить складну геологічну будову. Великими структурними елементами Карпат є Закарпатський прогин, Складчасті Карпати і Передкарпатський прогин. Кожна з цих великих одиниць має свою історію розвитку, вік та будову фундаменту, умови накопичення опадів, потужність земної кори [2–4].

У Складчастих Карпатах вирізняють Внутрішні та Флішові (Зовнішні) Карпати, які розділені вузькою зоною Пенінських скель.

Теплові потоки у Складчастих Карпатах досягають 50–75 мВт/м², у Флішових Карпатах – не перевищують 65 мВт/м² [5].

Складчасто-покривна будова Карпат свідчить про значні горизонтальні рухи пластин літосфери. У результаті активності тектонічних процесів на різних етапах розвитку Карпатського регіону відбулося просування літосферних блоків на схід та північний схід, скупчення у зовнішніх зонах кристалічної основи, збільшення потужності земної кори, витискання на краї платформи флішових відкладень. Зміни теплових потоків через особливості будови покриву становлять 10–15% [1; 5].

Зовнішні Складчасті Карпати та Закарпатський прогин розділені Закарпатським глибинним розломом.

У Закарпатському прогині теплові потоки збільшуються до 80–90 мВт/м², а в межах аномальних зон до 100–115 мВт/м² [1].

Гористо-складчаста частина Карпат відділена від Передкарпатського прогину глибинним Передкарпатським розломом.

У Передкарпатському прогині значення теплових потоків змінюється від 38 до 71 мВт/м².

Аномалія високих теплових потоків спостерігається в північно-західній частині прогину та вздовж південно-західного борту Передкарпатського прогину (50–75 мВт/м²).

У найбільш опущеній зоні, де сила опадів досягає 8–10 км, спостерігаються мінімальні теплові потоки [5].

Результати геофізичних та сейсмічних досліджень Карпатського регіону свідчать про те, що сейсмоактивним районам відповідають підвищені значення теплового потоку. У Закарпатті значення магнітуди сейсмічних подій знаходиться в межах $M_{\max}=4,7\div 5,3$, а густина теплового потоку $q=80\div 100$ мВт/м², у Карпатах $M_{\max}=4,2\div 4,7$, $q=60\div 70$ мВт/м², у Предкарпатському прогині – на північному сході $M_{\max}=4,7$, $q=50$ мВт/м², на південному сході $M_{\max}=4,1$, $q=40$ мВт/м² [6].

Значна роздробленість земної кори, наявність контрастних включень і структурних неоднорідностей можуть бути причиною істотних варіювань теплового потоку як по латералі, так і вглибині. Пов'язані з контактними зонами аномалії є досить інтенсивними і займають обширні території [7].

Аномалії теплового поля, спричинені нерівномірним нагріванням неоднорідного середовища, призводять до виникнення значних термопружних напружень та переміщень. Оцінка термопружного внеску в напружений стан літосфери показує, що теплові напруження можуть суттєво впливати на утворення сейсмічних зон [8].

Значний науковий інтерес становить подальше вивчення термопружних ефектів, оскільки всі механізми землетрусів безпосередньо або опосередковано пов'язані з тепловим полем Землі.

Постановка задачі

Запропонована методика розрахунків термопружних напружень і переміщень у Карпатському регіоні ґрунтується на числовому методі скінченних елементів.

Основним моментом у вирішенні термопружної задачі є визначення змін температури ΔT .

Згідно з теорією термопружності зміни температури ΔT відраховують від значення T_0 , за якого стан тіла вважається недеформованим за відсутності дії зовнішніх сил [9].

У геофізиці визначити температуру недеформованого стану геологічного тіла досить складно. Необхідно прийняти декілька умовних засад.

У геотермічній активності Карпат розрізняють два етапи.

Перший етап збігається з початком формування Карпатської геосинкліналі. Регіональна аномалія слабкої інтенсивності зумовлена джерелом тепла, яке сформувалося у верхній мантії 160–180 млн. років тому.

Основне джерело теплової енергії на другому етапі знаходилося всередині Карпатського регіону, на захід від Закарпатського глибинного розлому. Цей етап активізації відбувався близько 25–30 млн. років тому і був зумовлений підйомом астеносфери і перебудовою літосфери [1; 5].

Ураховуючи історію теплового та геологічного розвитку Карпатського регіону, сформовано перше наближення моделі.

Для визначення T_0 береться відсутність мантійних джерел тепла під Карпатами і Закарпатським прогином і передбачається однорідне нагрівання досліджуваного регіону. Крім того, деформації, спричинені однорідним нагріванням однорідного середовища, вважаються настільки малими, що ними можна знехтувати. Температура T_0 для кожного вузла скінченно-елементної сітки розраховувалася за мантійного теплового потоку (рис. 1):

$$q_1 = 25 \text{ мВт/м}^2 ;$$

$$q_2 = q_3 = 15 \text{ мВт/м}^2 .$$

Аналіз термічного режиму Карпатського регіону ґрунтується на геологічних та геотермічних даних уздовж геотраверса П, що перетинає Закарпатський прогин, Карпати, Передкарпатський прогин та Східноєвропейську платформу [3].

Для верхніх шарів геотермічної моделі Карпатського регіону теплопровідність гірських порід k і генерація в них радіогенного тепла Q задані на основі експериментальних даних [10].

На верхній поверхні моделі задана гранична умова Діріхле для Закарпатського прогину $T=12^{\circ}\text{C}$, для Карпат $T=6^{\circ}\text{C}$, в районі Передкарпатського прогину $T=9^{\circ}\text{C}$.

Значення мантийної складової теплового потоку визначають за допомогою обчислювального експерименту (рис. 1):

$$q_1=70 \text{ мВт/м}^2; q_2=30 \text{ мВт/м}^2, q_3=15 \text{ мВт/м}^2.$$

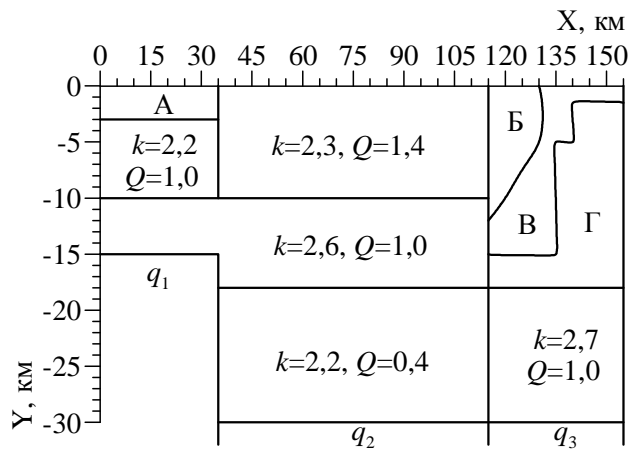


Рис. 1. Геотермічна модель Карпатського регіону:

A – $k = 2,0$, $Q = 1,2$;

B – $k = 2,0$, $Q = 1,4$;

B' – $k = 1,7$, $Q = 1,4$;

C – $k = 2,4$, $Q = 0,8$

На основі методу скінченних елементів у роботі [11] отримано двовимірну геотермічну модель Карпатського регіону. Результати розрахунків температур і теплових потоків показано на рис. 2.

Дані про розподіл температур у регіоні є вхідною інформацією для розрахунку термопружних напружень та переміщень.

Під час вирішення задач теплопровідності та термопружності використовувалися спільні скінченно-елементні сітки.

Для плоского напруженого стану в елементі ізотропного матеріалу, який піддається зміні температури ΔT із коефіцієнтом теплового розширення α , можна записати

$$\varepsilon_0 = \begin{bmatrix} \alpha \Delta \theta \\ \alpha \Delta \theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

оскільки за теплового розширення (стискання) не виникає деформації зсуву [12].

Напруження та деформації пов'язані між собою співвідношенням

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (2)$$

де \mathbf{D} — матриця пружності, яка відображає властивості матеріалу (модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона).

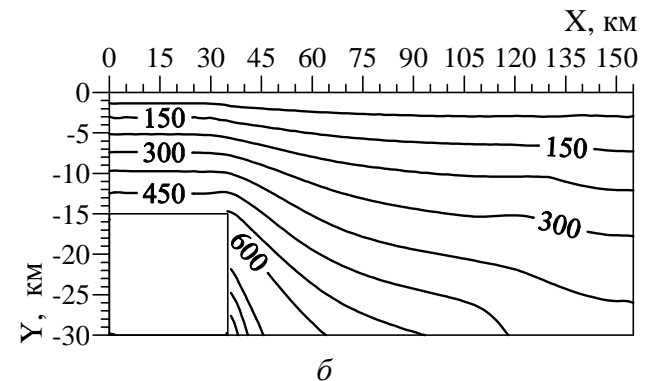
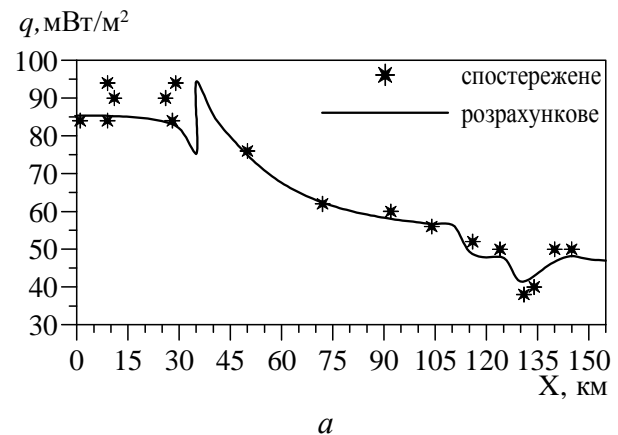


Рис. 2. Теплова модель Карпатського регіону:

a – розподіл температури;

б – розподіл поверхневого теплового потоку

Рівняння (2) дійсне за умови, коли породи літосфери виявляють пружність протягом мільйона років. Таким чином, для визначення максимальних температур, при яких рівняння (2) істинне, потрібно знайти потужність пружної літосфери.

У геофізичній літературі температура основи пружного шару називається пружною «блокувальною температурою» T_e [13; 14].

Породи літосфери, нагріті до температури $T > T_e$, не можуть вносити суттєвого внеску в поле теплових напружень, оскільки напруження вивільнятимуться пластично.

Проте є й інші оцінки температури T_e .

У працях [14; 15] відзначено очевидну кореляцію між пружною потужністю океанічної літосфери та глибиною залягання 450°C–ізотерми, розрахованої з моделі охолодження спредінгової океанічної плити.

Застосування термічної і термомеханічної моделей океанічної літосфери до континентальної неприйнятне [16].

Кореляція, яка спостерігається в океанічній літосфері між тепловим потоком і віком структур, а також між потужністю пружно-в'язкого шару і характерними температурами на континентах, має значно складніший характер. Пружна потужність відповідає глибині з різними ізотермами: від 300 до 700°C [16].

Граничне значення T_e для океанічної літосфери становить 700–800°C [13].

Температура в районі джерела землетрусу є важливим фактором для з'ясування причин і природи деформацій. Максимальні температури, за яких відбуваються землетруси в земній корі, знаходяться в межах 350±100°C, у мантиї – 700±100°C [17].

Більша частина навколохребтових землетрусів має фокальні глибини між границею Мохо і глибиною залягання 800°C–ізотерми [13].

У Закарпатському прогині магнітуда найсильніших землетрусів відповідає значенням 4,7–5,3, глибина їхніх джерел не перевищує 10 км [6]. Температура на цих горизонтах досягає 500°C (рис. 2, а).

Друге наближення термопружної моделі Карпатського регіону полягає в такому. Середовище вважається провідником термопружних напружень до глибини залягання 500°C–ізотерми. Саме з цих міркувань було обрано нижню межу моделі.

У районах переходу від Закарпатського прогину до Карпат на глибинах від 15 до 30 км температура досягає 800°C. Ця зона включена в модель, однак накопичені в ній термопружні напруження можуть вивільнятися пластично.

Скінченно-елементний підхід до дослідження процесу накопичення напружень

Для двовимірних задач механіки твердого тіла на основі принципу мінімуму потенціальної енергії можна отримати такий функціонал

$$\Pi = \int_V \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV. \quad (3)$$

Для скінченно-елементного розбиття вираз (3) запишемо у вигляді

$$\Pi^e = \sum_{e=1}^l t_e \int_{\Omega_e} \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega_e,$$

де l – загальна кількість елементів у системі;

t_e – товщина елементної підобласті;

Ω_e – елементна підобласть.

Диференціюючи елементний внесок Π^e з переміщення вузлів сітки $\boldsymbol{\delta}$ та враховуючи суму всіх елементів, отримуємо систему алгебричних рівнянь:

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\delta} = \mathbf{F}_0, \quad (4)$$

де \mathbf{K} — матриця жорсткості;

\mathbf{F}_0 — сили у вузлах, які виникають під час початкової деформації.

Рівняння (4) дозволяє отримати рішення для переміщень. Із співвідношень (1) та (2) можна отримати вираз для напружень:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \mathbf{B} \boldsymbol{\delta} - \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0. \quad (5)$$

Припускається, що напруження всередині елементів постійні та прикладені до центру тяжіння елемента. Матрицю \mathbf{B} визначають, якщо відомі функції форми та вузлові зміщення.

Пружні властивості середовища (модуль Юнга $E \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона ν , коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^{-5} \text{C}$), показані на рис. 3, задано на основі узагальнених даних [18].

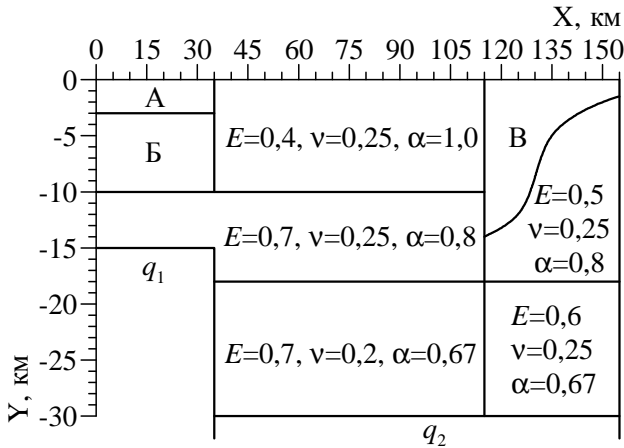


Рис. 3. Термопружна модель Карпатського регіону:
 А – $E = 0,2, \nu = 0,2, \alpha = 1,0$;
 Б – $E = 0,4, \nu = 0,25, \alpha = 1,0$;
 В – $E = 0,3, \nu = 0,2, \alpha = 1,0$

Без введення мінімального числа відомих переміщень розв’язання системи (4) неможливе, оскільки в цьому випадку переміщення будуть визначатися через сили не єдиним способом. Математично цей фізично очевидний факт означає, що матриця [К] виявиться сингулярною, тобто такою, що не піддається оберненню.

Вибір відомих переміщень чи «закріплення» моделі залежить від конкретної геодинамічної ситуації.

Визначення відомих нульових переміщень у Карпатському регіоні дещо ускладнено. У таких випадках варто скористатися обчислювальним експериментом. Розрахунки проводилися для трьох варіантів моделей «закріплення», показаних на рис. 4.

Результати розрахунків термопружних напружень σ_{yy} показано на рис. 5.

Напруження σ_{xx} мають аналогічний характер розподілу. Напруження розтяжного типу σ_{yy} та σ_{xx} для всіх трьох варіантів задачі однакові, оскільки «закріплення» моделі не впливає на значення термопружних напружень. Це впливає з формули (5).

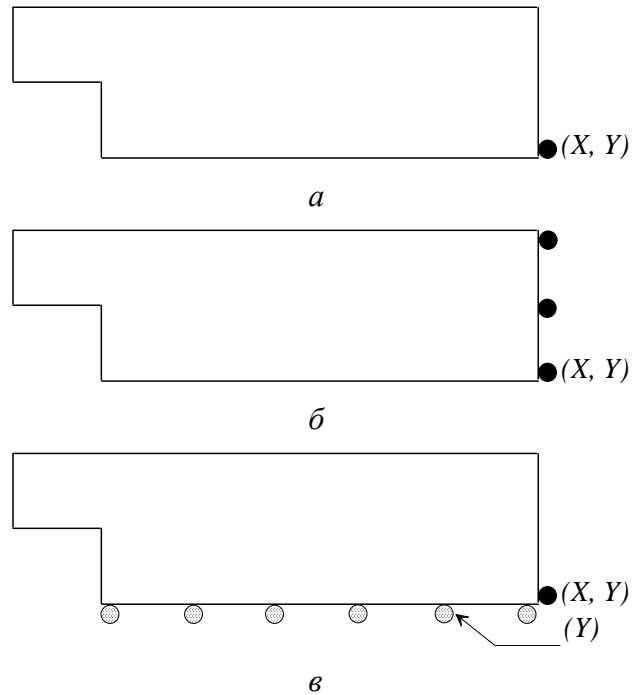


Рис. 4. Завдання нульових переміщень:
 а – модель 1 закріплена в одній точці в напрямку осі X та осі Y;
 б – закріплена права бокова стінка моделі 2 в напрямках осі X та осі Y;
 в – закріплена найнижча межа моделі 3 в напрямку осі Y і одна точка в напрямках осі X та осі Y

Максимальні напруження σ_{yy} (1,5–2 кбар) знаходяться в районі Закарпатського прогину і Складчастих Карпат. Для Східноєвропейської платформи характерні низькі значення напружень (5–240 бар).

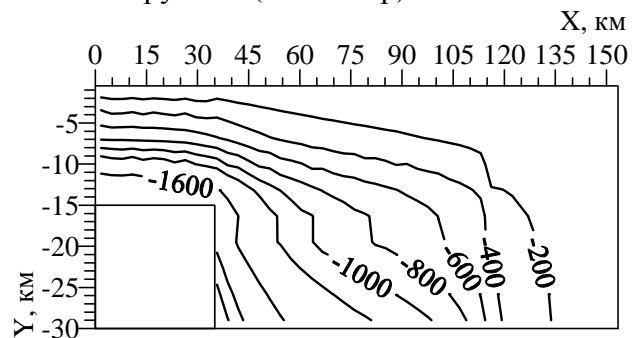


Рис. 5. Розподіл термопружних напружень

Переміщення вузлових точок середовища для моделі 1 показано на рис. 6. Знак «мінус» у напрямку осі X означає, що середовище рухається в напрямку, протилежному осі X (рис. 6, а).

У свою чергу, знак «мінус» у напрямку осі Y означає, що рух середовища відбувається в сторону осі Y . Значення переміщень наведено в метрах.

Земна кора досліджуваного регіону зазнає розтягнення, максимальне значення якого спостерігається в Закарпатському прогині.

Опускання середовища відбувається в районі переходу від Закарпатського прогину і безпосередньо під Карпатами (рис. 6, б).

У напрямку до Східноєвропейської платформи вертикальні переміщення земної кори плавно зменшуються.

Результати розрахунків переміщень для моделі 2 показано на рис. 7.

Закономірності розподілу переміщень змінюються відносно моделі 1. Максимальне розтягування спостерігається знову в Закарпатському прогині й частково в Карпатах (рис. 7, а). Підняття земної кори відбувається в Закарпатській області (рис. 7, б). На самій Східноєвропейській платформі не відбувається переміщень ні в напрямку осі X , ні в напрямку осі Y (рис. 7).

Поведінку моделі 3 показано на рис. 8.

Характер розподілу переміщень не змінюється відносно моделі 2, проте значення переміщень вище за модулем у напрямку осі X і нижче за модулем у напрямку осі Y .

Незначних рухів зазнає земна кора Східноєвропейської платформи (до 10 м) у напрямку осі X .

Вертикальні та горизонтальні переміщення земної поверхні для моделей 1, 2, 3 показано на рис. 9. Зазначені закономірності під час опису результатів для моделей 1, 2, 3 спостерігаються також і в русі поверхні земної кори.

Технологічний базис геофізики ХХІ ст. – це інформаційні технології, які дозволяють знайти не лише вихід із непростих ситуацій у геофізичних дослідженнях, але й значно прискорюють сам процес досліджень.

Прискорення теоретичних і прикладних досліджень полягає в способах отримання знань (прямого та змішаного).

На основі інформаційних технологій безпосередні знання дослідник отримує в режимі «питання–відповідь». Безпосередні знання необхідні, але контролюємо недостатні.

На практиці це виглядає як загальній хід міркувань та алгоритм розв'язання проблеми.

Поєднання загального ходу міркувань та алгоритму розв'язання, доопрацьованого загальноприйнятими методами пізнання, складає змішане знання.

Найважливіше питання в геофізиці – це передбачення землетрусів. «Золотий час», коли геофізики за допомогою нескладного математичного апарату досягали певних успіхів, минув. Переосмислюється саме поняття «передбачення землетрусів». У рамках сучасних досліджень із фізики та геофізики така термінологія є некоректною.

Матеріальне джерело землетрусу має свій аналог в єдиному полі кручення Землі.

Сьогодні складно визначити причину формування землетрусу в єдиному полі кручення. Водночас постають такі запитання:

- можна визначити первинне поле кручення Землі та його зміни в часі;
- які часові інтервали треба враховувати;
- розкладання поля кручення на складові (електромагнітні, гравітаційні, сильні та слабкі взаємодії) відбувається за певним кодом або шифром;
- існують єдині коди й шифри розкладання полів.

Не виключено, що інформаційна матриця, за допомогою якої здійснюється передача і прийом інформації, індивідуальна для кожного землетрусу.

Час «проходження» сейсмоподії зі сфери тонких вібрацій у сферу матеріальну і є тим часом, протягом якого слід знайти провісників землетрусу та попередити людей про наближення сейсмічної небезпеки.

Кожен землетрус особливий і має своє індивідуальне народження, свою «особисту історію» розвитку і свої специфічні ознаки. У свою чергу, всі землетруси Землі взаємопов'язані. Таким чином, необхідно шукати спільні та індивідуальні ознаки «проходження» сейсмоподії і «розщеплення» поля кручення Землі.

Давно відомим є той факт, що тварини здатні отримувати сигнал про небезпеку не лише безпосередньо, але й через певну програму дій (поведінки) у небезпечних ситуаціях. Це поки що недоступно людині.

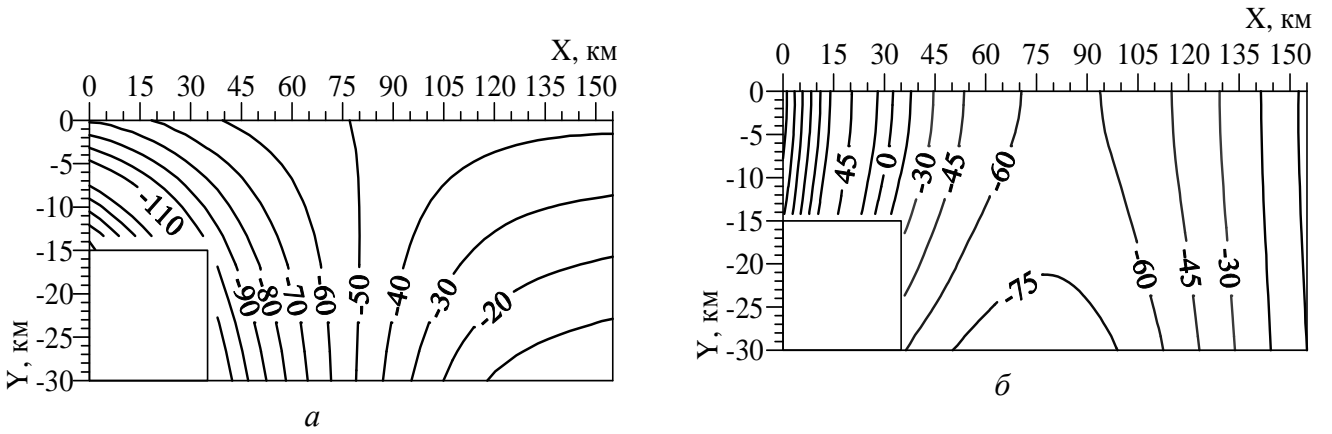


Рис. 6. Розподіл переміщень для моделі 1:
 а – переміщення в напрямку осі X ;
 б – переміщення в напрямку осі Y

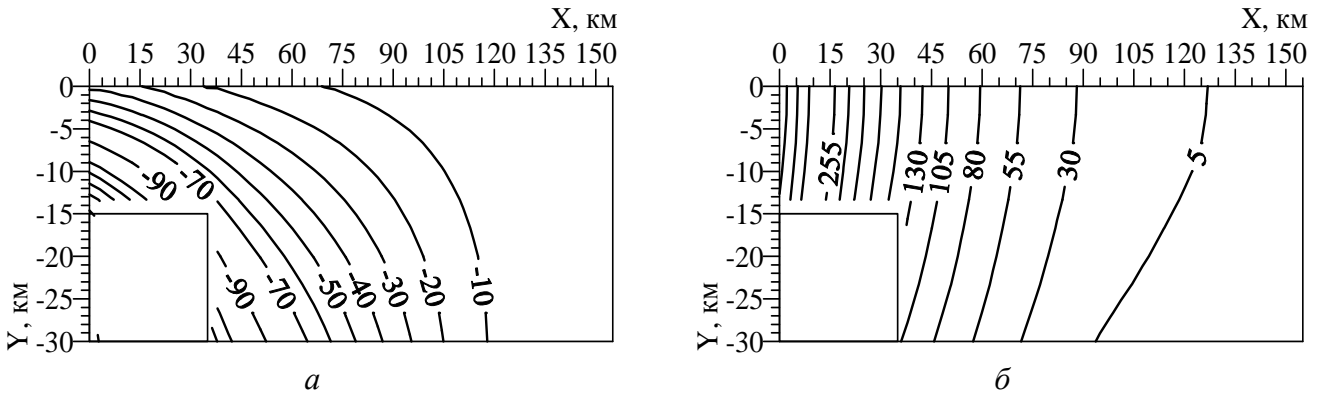


Рис. 7. Розподіл переміщень для моделі 2:
 а – переміщення в напрямку осі X ;
 б – переміщення в напрямку осі Y

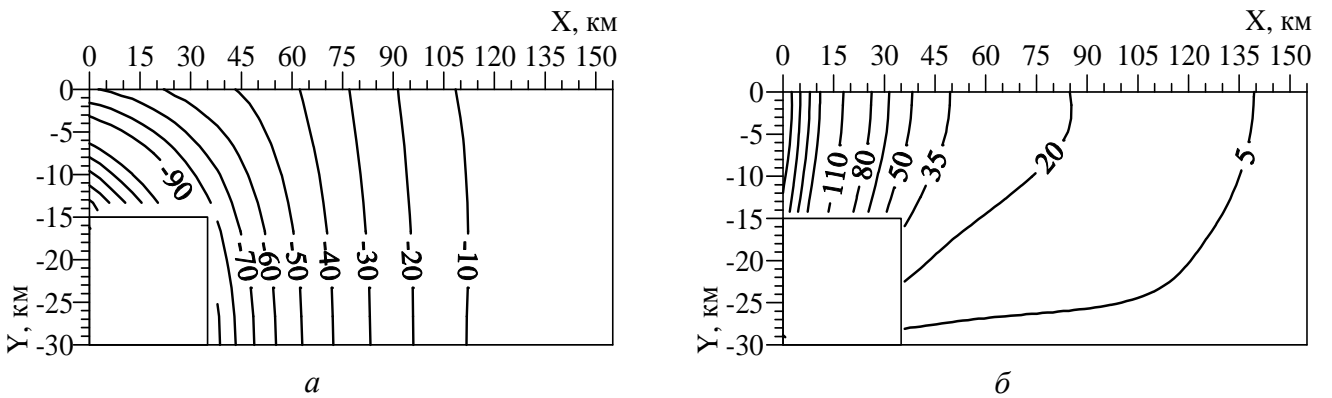


Рис. 8. Розподіл переміщень для моделі 3:
 а – переміщення в напрямку осі X ;
 б – переміщення в напрямку осі Y

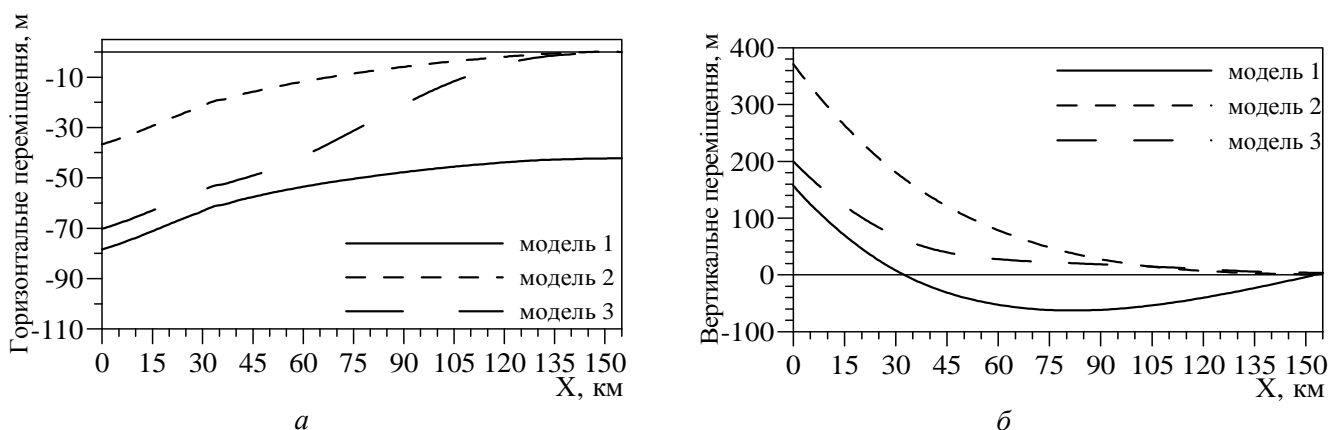


Рис. 9. Переміщення поверхні земної кори для моделей 1, 2, 3:
 а – горизонтальне переміщення;
 б – вертикальне переміщення

Основна властивість природи – це життєздатність. Ієрархію законів природи, ієрархію космосу добре відчують дельфіни, спеціально навчені треновані собаки.

Дельфіни наділені найпотужнішим інтелектом серед морських тварин. У період чекання на потомство сімейні пари дельфінів проявляють особливу чуйність один до одного, відчують потребу опікуватися один одним. Землетрус дає потужний сплеск в полі кручення Землі, саме його відчують високорозвинені тварини.

Життєздатність природи має багатоступеневий захист. Земля готується до землетрусу не один день. Місце землетрусу – це розрив у матеріальній оболонці Землі. У сфері надтонких вібрацій утворюється польовий розрив – польова рана.

Усе живе у Всесвіті має єдину ієрархію будови та єдину ієрархію засобів захисту.

Через певні канали необхідна енергія переходить до місць землетрусів. Крім того, над місцем землетрусу утворюється «шуба», що складається з певних видів захисних енергій. Розмір «шуби» залежить від геофізичних параметрів землетрусу. Такий наземний захист необхідний для того, щоб підземні поштовхи не завдали шкоди польовій оболонці планети Земля.

Нині існує два стилі мислення:

– характерний для атомістів, які вірять в існування найпростіших першоелементів, тобто дуже великого, але скінченного числа комбінацій, яких достатньо для пояснення всього різноманіття аспектів Всесвіту;

– притаманний прихильникам ідей неперервності й безкінечності.

Це зумовлено протиборством двох непримиренних потреб людського розуму, яких він не може позбутися, доки існуватиме як такий, – потреба зрозуміти, а зрозуміти можна лише скінченне, і потреба бачити, а бачити можна лише протяжне, яке є нескінченним [19].

Висновки

На основі методу скінченних елементів побудовано термопружну модель Карпатського регіону. Розглянуто вплив завдання відомих переміщень як граничні умови на розподіл зміщень для досліджуваного регіону.

Створені обчислювальні програми орієнтовані на ефективне розв'язання задач малих і середніх розмірів із різною апроксимацією пробної функції (лінійної, квадратичної і кубічної). Під час розроблення алгоритмів основну увагу приділено створенню простої та гнучкої системи, котру можна легко пристосувати до будь-яких конкретних геолого-геофізичних умов.

Оцінка суто термопружного внеску в напружений стан земної кори Карпатського регіону показує, що величини теплових напружень досягають межі міцності порід 1,5 кбар, хоча величини максимальних зміщень незначні: 200–300 м у вертикальному напрямку і 70–80 м у горизонтальному.

Отриманий кількісний опис режиму термопружних напружень та переміщень не враховує джерел напружень іншої природи, які можуть істотно змінити поле теплових напружень.

Література

1. *Кутас Р.И.* Поле тепловых потоков и термическая модель земной коры / Р.И. Кутас. – К.: Наук. думка, 1978. – 147 с.
2. *История геологического развития Украинских Карпат* / О.С. Вялов, С.П. Гавура, В.В. Даньш и др. – К.: Наук. думка, 1981. – 180 с.
3. *Литосфера Центральной и Восточной Европы: Геотраверсы I, II, V.* — К.: Наук. думка, 1988. — 168 с.
4. *Тектоническая карта Украинских Карпат. Масштаб 1:200000* / под ред. В.В. Глушкова, С.С. Круглова. – К.: Мин-во геологии УССР, 1986.
5. *Кутас Р.И.* Моделирование теплового поля континентальной литосферы / Р.И. Кутас, В.А. Цвященко, И.Н. Корчагин. – К.: Наук. думка, 1989. – 191 с.
6. *Проявления сейсмичности в XVIII-XX вв. и потенциально сейсмоопасные зоны западной части Украины* / В.В. Кутас, А.В. Кендзера, В.Д. Омельченко и др. // *Геофизический журнал.* – 2006. – 28, № 4. – С. 3–15.
7. *Бахова Н.І.* Обчислювальний експеримент у сучасній геофізиці / Н.І. Бахова // *Вісник НАУ.* – 2009. – № 3. – С. 262–270.
8. *Бахова Н.І.* Термопружні напруження в неоднорідних геологічних середовищах складного обрису / Н.І. Бахова // *Вісник НАУ.* – 2010. – № 1. – С. 70–77.
9. *Ландау Л.Д.* Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1987. – 246 с.
10. *Кутас Р.И.* Тепловое поле Украины / Р.И. Кутас, В.В. Гордиенко. – К.: Наук. думка, 1971. – 140 с.
11. *Методы конечных разностей и конечных элементов в геофизике* / Н.И. Бахова, А.С. Кашик, А.Л. Колосов, Р.С. Челокьян. – К.: Институт геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 1999. – 315 с.
12. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
13. *Bratt S.R.* Thermoelastic stress: how important as a cause of earthquakes in young oceanic lithosphere / S.R. Bratt, E.A. Bergman, S.C. Solomon // *J. Geophys. Res.* – 1985. – 90. – С. 10249–10260.
14. *McNutt M.K.* Constraints on yield strength in oceanic lithosphere derived from observations on flexure / M.K. McNutt, H.W. Menard // *Geophys. J. R. astron. Soc.* – 1982. – 71, №2. – С. 363–394.
15. *Bodine J.H.* Observations of flexure and the rheology of the oceanic lithosphere / J.H. Bodine, M.S. Steckler, A.B. Watts // *J. Geophys. Res.* – 1981. – 86. – С. 3695–3707.
16. *Willett S.D.* A thermomechanical model of continental lithosphere / S.D. Willett, D.S. Chapman, H.J. Neugebauer // *Nature.* – 1985. – 314, № 6011. – С. 520–523.
17. *Chen W.P.* Focal depth of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere / W.P. Chen, P. Molnar // *J. Geophys. Res.* – 1983. – 88. – С. 4183–4214.
18. *Теркот Д.* Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Теркот, Дж. Шуберт. – М.: Мир, 1985. – 374 с.
19. *Пуанкаре А.* О науке / А. Пуанкаре. – М.: Наука, 1990. – С. 735.