

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА АНОМАЛЬНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ У ВОГНИЩІ ЗЕМЛЕТРУСУ

© М.В. Лубков, 2011

*Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботина НАН України Полтава, Україна*

Stress-deformable state and anomalous gravity field in the earthquake centre with displacement along fault spread were modeled on the base of variation finite element method elaborated for elastic foliated shells. It was shown that in the case of monolithic rocks shift displacements, stresses and anomalous gravity field distributions around earthquake centre had a universal character. Those are not dependent on the thickness of elastic lithosphere, on the geological composition and linear dimensions of the earthquake centre. At the same time fracturing of geological rocks leads to the qualitative changes on the distribution patterns. Some irregular maximum and minimum zones can be seen. Their number grows as the rock fracturing increases.

**Keywords:** earthquake centre, mode of deformation, gravity field.

**Вступ.** Добре відомо, що виникнення землетрусів часто пов'язане з активними тектонічними рухами уздовж розломів. У результаті зачеплення протилежних бортів розлому, що взаємно рухаються, у масиві твердих порід навколо заблокованої ділянки розлому накопичується енергія пружної деформації, оскільки відносний рух порід, віддалених від цієї ділянки, триває. Коли напруження навколо заблокованої ділянки розлому досягають критичної величини, у деякій локальній зоні, що умовно називають вогнищем землетрусу, відбувається пружне розрядження накопичених напружень. Цей процес супроводжується деформуванням території, що прилягає до вогнища землетрусу, а також перенесенням сейсмічної і теплової енергій [1].

Традиційно у вивченні проблем, пов'язаних з виникненням землетрусів та їх наслідків, основну увагу приділяли розробці критеріїв прогнозування землетрусів і пошуку закономірностей деформування, руйнування прилеглих територій та поширення сейсмічних хвиль на основі тих або інших моделей вогнищ землетрусів, наприклад: моделі лавинонестійкого тріщиноутворення [2], дилатантно-дифузійної моделі [3], моделі консолідації [4], моделі stick-slip [5, 6] тощо. Подібні моделі характеризують виникнення землетрусів у тріщинуватому розломно-блоковому середовищі. Згідно з цими моделями, деформаційні й сейсмічні процеси, що відбуваються у вогнищах землетрусів, мають переважно хаотичний характер, у яких важко виділити якісь стійкі фази. Як зазначено у статті [7], жодна з відомих моделей вогнищ землетрусів не описує закономірностей просторово-часової міграції сейсмічних подій у межах пружного тріщинуватого середовища, залученого до деформування. З цього погляду становить інтерес дослідження закономірностей напружено-деформованого стану, а

також аномального гравітаційного поля, що формуються у вогнищі землетрусу, навіть на основі суто пружної моделі.

У цій статті на основі варіаційної скінченно-елементної методики для багатошарових пружних оболонок проведено моделювання напружено-деформованого стану верхнього пружного шару літосфери, а також аномального гравітаційного поля, що виникають у вогнищі землетрусу із зсувом за простяганням розлому. Досліджено типовий склад сухих твердих геологічних порід, характерних для верхнього пружного шару літосфери: пісковиків, гранітоїдів і базальтів. Розглянуто шаруваті фрагменти пружної частини літосфери, що примикають до лінії активного розриву, по якому відбувся черговий сейсмогенний зсув масиву зазначених геологічних порід.

**Постановка та методика розв'язання задачі.** Розглянемо тривимірну модель релаксації напружень на розриві із зсувом за простяганням у верхньому пружному шарі літосфери. Нехай по розриву відбувається горизонтальний рух між двома літосферними блоками. Припустимо, що глибше пружного шару літосфери напруження не передаються. В результаті відносного руху літосферних блоків в околі заблокованої ділянки розлому концентруються зсувні напруження. З досягненням на цій ділянці напружень, які можна порівняти з границею міцності твердих порід, відбувається землетрус. Напруження поблизу заблокованої ділянки знімається і передається в прилеглий літосферний блок. Цей процес супроводжується деформуванням земної поверхні й відповідним перерозподілом пружних мас, що є причиною утворення аномального гравітаційного поля. Щоб виключити з розгляду в'язкі та пластичні механізми деформування, характерні для пористих середовищ, припустимо, що породи у зазначеному пружному шарі літосфери є досить сухими. У

статтях [8, 9] показано, що збільшення ступеня тріщинуватості у пружних й в'язко-пружних матеріалах приводить до пропорційного зниження в них пружних модулів. Надалі цей факт використано для моделювання пружних властивостей у тріщинуватих геологічних породах. Розглянемо шаруваті фрагменти пружної частини літосфери, що складаються з типових твердих геологічних порід – пісковиків, гранітоїдів й базальтів. Для моделювання напружено-деформованого стану у згаданих фрагментах скористаємося теорією багатопарових пружних оболонок [10, 11]. Для ортотропних оболонок використаємо криволінійну систему координат  $(s, \varphi, z)$ , де  $s, \varphi$  – координати уздовж поверхні оболонки;  $z$  – координата за товщиною оболонки. Переміщення уздовж координат  $s, \varphi, z$  для  $j$ -го шару оболонки можуть бути подані у вигляді

$$\begin{aligned} u_j &= u_0(s, \varphi) + zu_1(s, \varphi); \\ v_j &= v_0(s, \varphi) + zv_1(s, \varphi); \\ w_j &= w_0(s, \varphi) + zw_1(s, \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $u_0, v_0, w_0$ , – компоненти переміщення середньої поверхні оболонки;  $u_1, v_1$  – кути повороту нормалі до середньої поверхні щодо координатних ліній  $\varphi = \text{const}, s = \text{const}$  відповідно;  $w_1$  – обтискання нормального елемента до середньої поверхні.

Для розв'язання пружної задачі застосовуємо метод скінченних елементів, заснований на варіаційному принципі Лагранжа [12], що відбиває мінімум пружної механічної енергії системи:

$$\delta E(u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1) = 0. \quad (2)$$

Функціонал Лагранжа для пружної шаруватої ортотропної оболонки в криволінійній системі координат  $(s, \varphi, z)$  може бути поданий у вигляді [13]

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \int_{h_j} \int_S [\mathbf{E}_{ss} \boldsymbol{\varepsilon}_{ss}^2 + \mathbf{E}_{\varphi\varphi} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varphi\varphi}^2 + \mathbf{E}_{zz} \boldsymbol{\varepsilon}_{zz}^2 + 2\mathbf{E}_{s\varphi} \boldsymbol{\varepsilon}_{ss} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varphi\varphi} + \\ &+ 2\mathbf{E}_{sz} \boldsymbol{\varepsilon}_{ss} \boldsymbol{\varepsilon}_{zz} + 2\mathbf{E}_{\varphi z} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varphi\varphi} \boldsymbol{\varepsilon}_{zz} + 4\mathbf{G}_{s\varphi} \boldsymbol{\varepsilon}_{s\varphi}^2 + 4\mathbf{G}_{sz} \boldsymbol{\varepsilon}_{sz}^2 + 4\mathbf{G}_{\varphi z} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varphi z}^2] \times \\ &\times (1 + \frac{z}{R_1})(1 + \frac{z}{R_2}) ds d\varphi dz - \int_S (\mathbf{P}_s u_0 + \mathbf{P}_\varphi v_0 + \mathbf{P}_z w_0) ds d\varphi - \\ &- \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (\mathbf{T}_s u_0 + \mathbf{T}_{s\varphi} v_0 + \mathbf{Q}_s w_0 + \mathbf{M}_s u_1 + \mathbf{M}_{s\varphi} v_1) d\varphi - \\ &- \int_{s_1}^{s_2} (\mathbf{T}_{\varphi s} u_0 + \mathbf{T}_\varphi v_0 + \mathbf{Q}_\varphi w_0 + \mathbf{M}_{\varphi s} u_1 + \mathbf{M}_\varphi v_1) ds, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\mathbf{P}_s, \mathbf{P}_\varphi, \mathbf{P}_z$  – компоненти вектора поверхневого навантаження;  $\mathbf{T}_{\alpha\beta}, \mathbf{Q}_\alpha, \mathbf{M}_{\alpha\beta}$  – зусилля й моменти, що діють на контур оболонки;  $R_1, R_2$  – радіуси кривизни координатних ліній базисної поверхні оболонки  $\varphi = \text{const}$  і  $s = \text{const}$  відповідно;  $\boldsymbol{\varepsilon}_{\alpha\beta}$  – компоненти тензора деформацій  $j$ -го шару

оболонки;  $\mathbf{E}_{\alpha\beta}, \mathbf{G}_{\alpha\beta}$  – модулі пружності й модулі зсуву  $j$ -го шару оболонки відповідно;  $S$  – площа поверхні оболонки;  $h_j$  – товщина  $j$ -го шару оболонки. У цьому випадку інтегрування відбувається по всьому пакету шарів оболонки, який дорівнює  $N$ .

Для розв'язання варіаційного рівняння (2) застосовуємо дев'ятивузловий ізопараметричний чотирикутний оболонковий скінченний елемент, обмежений криволінійними поверхнями [13]. Як глобальну систему координат, тобто систему в якій поєднуються всі скінченні елементи, використовуємо криволінійну систему координат  $(s, \varphi, z)$ ; як локальну систему координат, у якій для кожного елемента визначаємо функції форми і проводимо інтегрування, – допоміжну нормалізовану систему координат. Під час побудови функцій форми, що апроксимують змінні і функції в межах кожного елемента, для поліпшення гладкості та збіжності застосовуємо алгебричні й тригонометричні поліноми.

Алгоритм скінченно-елементного розв'язання варіаційної задачі (2) полягає у такому [14]. Спочатку в локальній системі координат апроксимуємо всі компоненти переміщень і деформацій, що входять до функціонала Лагранжа (3), з використанням отриманих функцій форми, при цьому кожному вузлу скінченного елемента відповідає своя апроксимаційна складова. У цій самій системі проводимо аналітичне інтегрування по всьому пакету шарів оболонки, потім – диференціювання функціонала (3) по всіх вузлових складових переміщень (1) і прирівнювання відповідних похідних до нуля. В результаті для кожного скінченного елемента одержуємо лінійну алгебричну систему, що складається з 54 рівнянь. Далі у глобальній системі координат підсумовуємо локальні системи алгебричних рівнянь по всіх скінченних елементах, на які розбита оболонка, і формуємо глобальну систему рівнянь. Подвійні інтеграли за площею оболонки обчислюємо чисельним інтегруванням на основі квадратурних формул Гауса [12]. Глобальну систему лінійних алгебричних рівнянь визначаємо за допомогою чисельного методу Гауса [12] і, отже, компоненти переміщень в усіх вузлових точках скінченно-елементної сітки. За вузловими значеннями переміщень знаходимо компоненти переміщень, деформацій, напружень та інші величини, що цікавлять, у довільній точці скінченного елемента, тобто у будь-якій точці оболонки.

**Моделювання напружено-деформованого стану у вогнищі землетрусу.** Під час моделювання проаналізуємо напружено-деформований стан, що виникає у верхньому пружному шарі ділянки літосферного блока з лінійними розмірами  $100 \times 100$  км, який межує із зоною активного роз-

лому. Припустимо, що в результаті пружного розрядження зсувних напружень на деякому заблокованому відрізку, розташованому посередині сторони цієї ділянки, що прилягає до лінії розлому, відбувається розрив. Цей розрив приводить до переміщення зазначеного відрізка на величину 1 м і, відповідно, до деформування всієї ділянки пружної літосфери.

Розглянемо шаруваті фрагменти пружної літосфери з різним ступенем тріщинуватості порід. Припустимо також, що в результаті згасання поля деформацій переміщення на межах ділянок, що не збігаються з лінією розлому, дорівнюють нулю.

На рис. 1 показано поверхневі діаграми, що визначають розподіл зсувних переміщень середньої поверхні розглянутої шаруватої ділянки пружної літосфери в сантиметрах. По осі абсцис відкладена довжина сторони ділянки (в км), що збігається з лінією розлому, по осі ординат – довжина сторони ділянки (в км), перпендикулярна до лінії розлому.

З аналізу рис. 1 виходить, що поле зсувних переміщень, яке виникає у вогнищі землетрусу, залежить від довжини відрізка розвантаження, твердості геологічних порід і ступеня їх тріщинуватості. Збільшення довжини відрізка розвантаження приводить до незначного росту амплітуд зсувних переміщень. Якщо структура геологічних порід досить монолітна, поле зсувних переміщень набу-

ває універсального виду. Тут максимальні переміщення припадають на природнозломну зону, плавно спадаючи з віддаленням від неї, при цьому поле зсувних переміщень мало залежить від потужності пружного шару та його геологічного складу. За наявності тріщинуватих порід якісна картина різко змінюється – поле зсувних переміщень помітно зростає за амплітудою. З віддаленням від вогнища землетрусу переміщення спадають хвилеподібно. Кількість таких стоячих хвиль зростає зі збільшенням ступеня тріщинуватості порід.

На рис. 2 показано розподіл зсувних напружень середньої поверхні розглянутої ділянки пружної літосфери в гігапаскалях.

Згідно з аналізом отриманих результатів, поле зсувних напружень, яке виникає на ділянці пружної літосфери у вогнищі землетрусу, залежить від довжини відрізка розвантаження, товщини та складу пружного шару літосфери і ступеня тріщинуватості порід.

Максимальні напруження виникають у розломній зоні з обох боків від заблокованої ділянки, у якій відбулося сейсмогенне переміщення порід. Найменші напруження характерні для середини вогнища землетрусу, де розрядження є пружним. Для монолітних порід картина розподілів зсувних напружень має приблизно однаковий вигляд. З ростом тріщинуватості порід якісна картина змінюється. При цьому напруження зменшуються за амплітудою, з'являються їхні не-

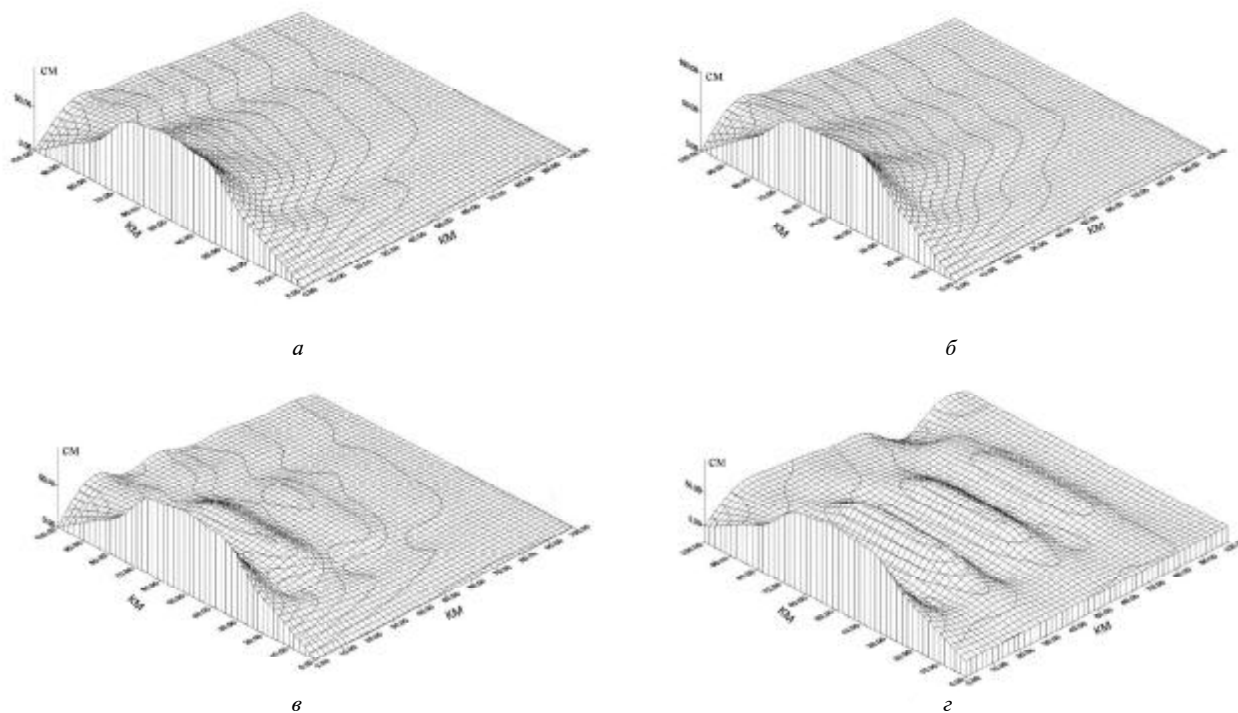


Рис. 1. Розподіл зсувних переміщень у межах ділянки пружної літосфери: *а* – шар пісковиків завтовшки 5, гранітоїдів – 10, базальтів – 5 км, довжина відрізка розвантаження 5 км; *б* – шар пісковиків завтовшки 9 км, довжина відрізка розвантаження 20 км; *в* – тріщинуваті пісковики потужністю 9 км (пружні модулі зменшені в 10 разів порівняно з такими у звичайних пісковиках), довжина відрізка розвантаження 5 км; *г* – пухкі пісковики потужністю 9 км (пружні модулі зменшені в 100 разів порівняно з такими у звичайних пісковиках), довжина відрізка розвантаження 5 км

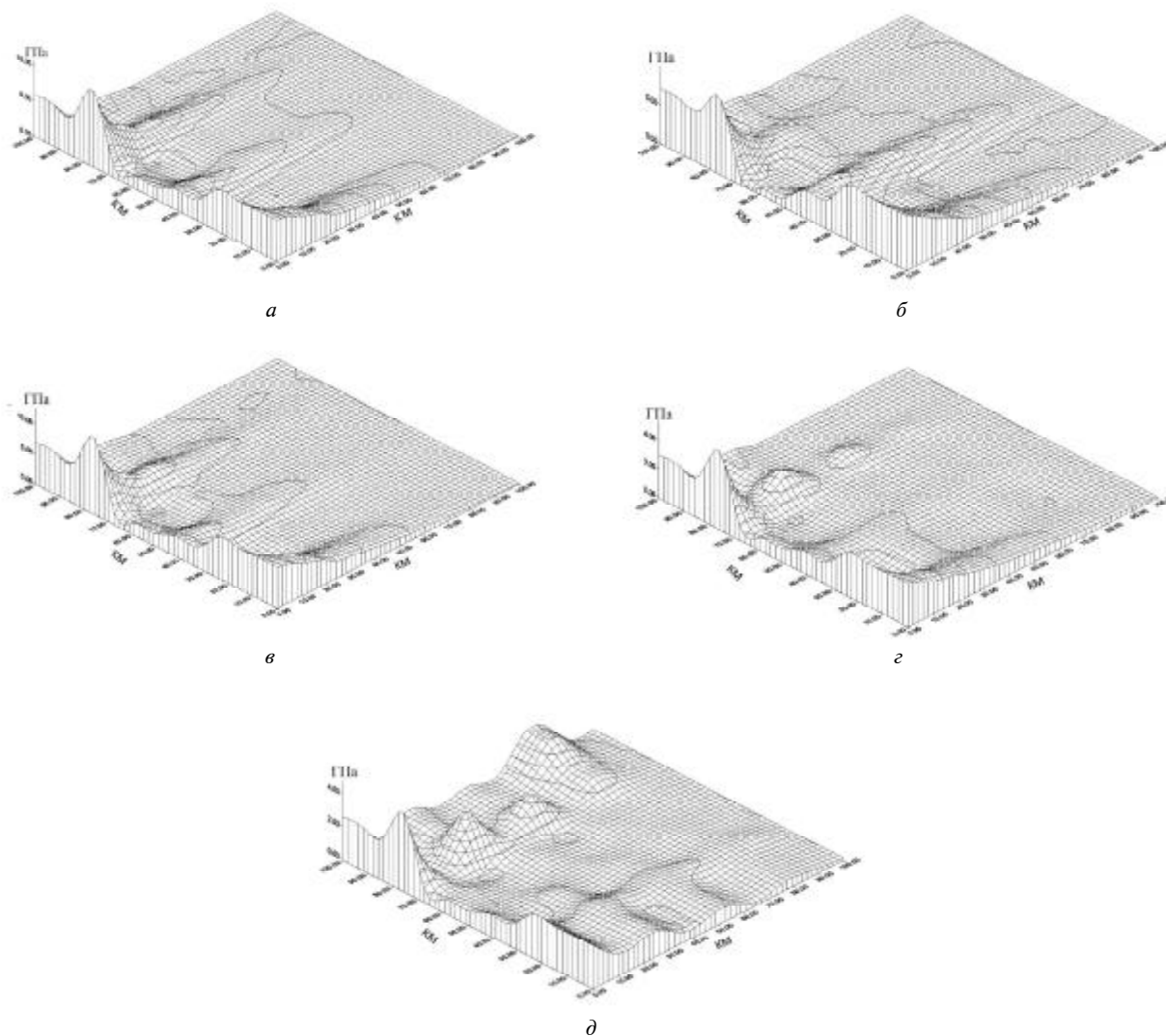


Рис. 2. Розподіл зсувних напружень на ділянці пружної літосфери: *а* – пісковики потужністю 12 км, довжина відрізка розвантаження 5 км; *б* – пісковики потужністю 12 км, довжина відрізка розвантаження 20 км; *в* – пісковики потужністю 9 км, довжина відрізка розвантаження 5 км; *г* – тріщинуваті пісковики потужністю 9 км, довжина відрізка розвантаження 5 км; *д* – пухкі пісковики потужністю 9 км, довжина відрізка розвантаження 5 км

регулярні сплески, кількість яких зростає в міру збільшення ступеня тріщинуватості порід.

**Моделювання аномального гравітаційного поля в зоні вогнища землетрусу.** Добре відомо, що існує тісна кореляція між наземними гравітаційними вимірами та вимірами вертикальних переміщень земної поверхні. У ряді випадків між масивами таких даних може бути встановлена прямо пропорційна залежність. Наприклад, добре відома теоретично визначена і широко використовувана на практиці величина редукції гравітаційного поля внаслідок вертикальних переміщень земної поверхні, зумовлених тиском стовпа атмосфери, яка дорівнює 0,3086 мкГал/мм. У публікації [15] показано, що для в'язкопружної поверхні Землі дія льодового навантаження приводить до виникнення прямо пропорційної залежності між зміною гравітаційного поля і вертикальними переміщеннями земної поверхні з коефіцієнтом пропорційності 0,15 мкГал/мм. У статті [16] теоретично до-

сліджено відношення зміни гравітаційного поля до вертикальних переміщень земної поверхні. Встановлено, що пружна деформація земної поверхні відповідає коефіцієнту прямо пропорційної залежності 0,0766 мкГал/мм. Справедливість цього значення підтверджена обробкою даних спостережень у районі пустелі Сахара, де практично були відсутні інші важливі чинники зміни гравітаційного поля: метеорологічні опади та глобальні переміщення мас усередині Землі. Таким чином, цей факт дає змогу визначити розподіл аномального гравітаційного поля навколо вогнища землетрусу на основі поля вертикальних переміщень у заданій зоні. Це поле, у свою чергу, може бути отримане на засадах наведеної вище варіаційної скінченно-елементної методики.

Розподіл аномального гравітаційного поля, спричиненого деформуванням розглянутої ділянки пружної літосфери у вогнищі землетрусу (в мікрогалах), показано на рис. 3.

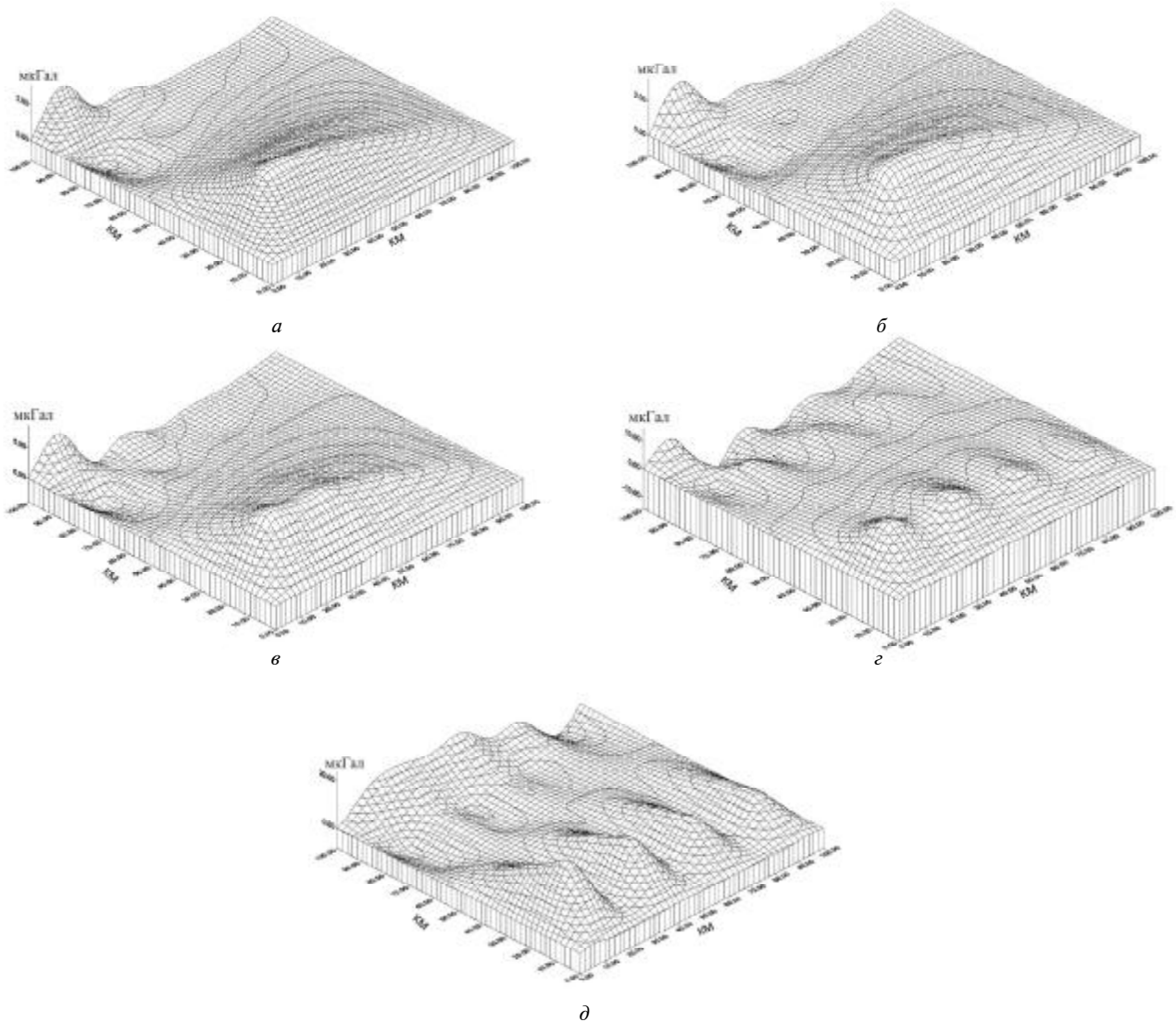


Рис. 3. Розподіл аномального гравітаційного поля на ділянці пружної літосфери: *а* – шар пісковиків завтовшки 2, гранітоїдів – 16, базальтів – 2 км, довжина відрізка розвантаження 5 км; *б* – шар пісковиків завтовшки 2, гранітоїдів – 16, базальтів – 2 км, довжина відрізка розвантаження 20 км; *в* – шар пісковиків завтовшки 10, гранітоїдів – 5, базальтів – 5 км, довжина відрізка розвантаження 5 км; *г* – тріщинуваті пісковики потужністю 9 км, довжина відрізка розвантаження 20 км; *д* – пухкі пісковики потужністю 9 км, довжина відрізка розвантаження 20 км

Згідно з отриманими результатами, розподіл аномального гравітаційного поля в зоні вогнища землетрусу має типову картину: по один бік від вогнища – зона збільшення амплітуди поля, по інший бік – зона зниження поля. При цьому розподіл аномального гравітаційного поля залежить від товщини пружної літосфери та складу порід у ній і меншою мірою – від довжини відрізка розвантаження. Збільшення частки пісковиків приводить до росту амплітуди аномального гравітаційного поля. Водночас збільшення ступеня тріщинуватості порід зумовлює не лише зростання амплітуд, а й зміну якісної картини розподілу аномального гравітаційного поля в зоні вогнища землетрусу. Для цієї картини характерна поява локальних зон максимуму й мінімуму аномального гравітаційного поля. Зі збільшенням ступеня тріщинуватості порід такі зони перепадів виражені яскравіше.

**Висновки.** Аналіз результатів моделювання показує, що на ділянці пружної літосфери в зоні вогнища землетрусу можуть бути виявлені деякі загальні типові риси напружено-деформованого стану та розподілу аномального гравітаційного поля. Для геологічних порід монолітного складу у верхній, пружній, частині літосфери характерні картини розподілу зсувних переміщень, напружень і аномального гравітаційного поля мають універсальний вигляд, мало залежать від товщини пружної частини літосфери, складу порід і лінійних розмірів вогнища землетрусу. Зі збільшенням ступеня тріщинуватості порід, що складають пружну частину літосфери, кількісні та якісні залежності у картинах розподілу зазначених полів різко змінюються. Характерна поява нерегулярних зон максимумів і мінімумів, кількість яких зростає в міру збільшення ступеня тріщинуватості порід.

1. *Теркот Д., Шуберт Д.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. — М.: Мир, 1985. — 730 с.
2. *Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений. — М.: Наука, 1978. — 232 с.
3. *Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwall Y.P.* Earthquake prediction: a physical basis // *Science*. — 1973. — **181**. — P. 803–810.
4. *Садовский М.А., Болохвитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 102 с.
5. *Li V.C., Rice J.R.* Pre seismic rupture progression and great earthquake instabilities at plate boundaries // *J. Geophys. Res.* — 1983. — **88**. — P. 4231–4246.
6. *Scholz C.H.* Earthquakes and friction laws // *Nature*. — 1998. — 391. — P. 37–42.
7. *Шерман С.И.* Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесуточного прогноза землетрясений // *Геофиз. журн.* — 2005. — **27**, № 1. — С. 20–38.
8. *Ляховский В.А., Мясников В.П.* Поведение вязкоупругой среды с микронарушениями при растяжении и сдвиге // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. — 1985. — № 4. — С. 28–35.
9. *Спиртус В.Б., Савчук Е.В.* Особенности крипа и хрупкого разрушения при сдвиговой деформации вязкоупругой поврежденной среды // *Геофиз. журн.* — 2006. — **28**, № 2. — С. 123–129.
10. *Пелех Б.Л.* Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. — Киев: Наук. думка, 1973. — 248 с.
11. *Карнаухов В.Г., Киричок И.Ф.* Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек. — Киев: Наук. думка, 1986. — 221 с.
12. *Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С.* Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. — М.: Высш. шк., 1985. — 329 с.
13. *Козлов В.И., Лубков М.В.* Колебания многослойных ортотропных оболочек вращения с конечной сдвиговой жесткостью // *Материалы 15-й науч. конф. молодых ученых / Ин-т механики АН УССР*. — Киев, 1990. — Ч. 2. — С. 439–445. — Деп. в ВИНТИ 26.10.90; № 3802-В 90.
14. *Лубков М.В.* Определение статических чисел Лява и Шида методом конечных элементов // *Геофиз. журн.* — 2004. — **26**, № 6. — С. 147–150.
15. *Wahr J., DaZhong H., Trupin A.* Predictions of vertical uplift caused by changing polar ice volumes on a viscoelastic earth // *Geophys. Res. Lett.* — 1995. — **22**. — P. 977–980.
16. *Linage C., Hinderer J., Paul Boy J.* A search on the gravity/height ratio induced by surface loading; theoretical investigation and numerical applications // *BIM*. — 2007. — **143**. — P. 11451–11459.

Надійшла до редакції 25.11.2010 р.

*М.В. Лубков*

#### **МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА АНОМАЛЬНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ У ВОГНИЩІ ЗЕМЛЕТРУСУ**

На основі варіаційної скінченно-елементної методики для пружних багат шарових оболонок змодельовано напружено-деформований стан, а також аномальне гравітаційне поле, які виникають у вогнищі землетрусу із переміщенням за простяганням розлому. Показано, що за монолітного складу геологічних порід типові картини розподілу зсувних переміщень, напружень й аномального гравітаційного поля навколо вогнища землетрусу мають універсальний характер, мало залежать від товщини пружної літосфери, складу геологічних порід і лінійних розмірів вогнища землетрусу. Водночас наявність тріщинуватості геологічних порід приводить до якісних змін у картинах розподілу — з'являються нерегулярні зони максимумів і мінімумів, кількість яких зростає із збільшенням ступеня тріщинуватості порід.

**Ключові слова:** вогнище землетрусу, напружено-деформований стан, гравітаційне поле.

*М.В. Лубков*

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В ОЧАГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

На основе вариационной конечно-элементной методики для многослойных упругих оболочек выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния, а также аномального гравитационного поля, возникающих в очаге землетрясения со смещением по простиранию разлома. Показано, что в случае монолитного состава геологических пород типичные картины распределения сдвиговых перемещений, напряжений и аномального гравитационного поля вокруг очага землетрясения носят универсальный характер, мало зависят от толщины упругой литосферы, состава геологических пород в ней и линейных размеров очага землетрясения. В то же время наличие трещиноватости геологических пород приводит к качественным изменениям в картинах распределения — появляются нерегулярные зоны максимумов и минимумов, количество которых возрастает по мере увеличения степени трещиноватости пород.

**Ключевые слова:** очаг землетрясения, напряжённо-деформированное состояние, гравитационное поле.