

УДК 551.24.03

DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322548>

Напружено-деформований стан навколо вогнища землетрусу

М.В. Лубков, 2025

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

На підставі варіаційного скінченно-елементного методу для пружних багатошарових ортотропних оболонок обертання, з урахуванням зсувної жорсткості, проведено чисельне моделювання розподілу переміщень і напружень у різних напрямках літосфери навколо вогнища землетрусу. Показано, що збільшення товщини шару осадових порід та, відповідно, зменшення потужності шарів кристалічного фундаменту призводить до збільшення амплітуд переміщень і зниження амплітуд напружень. Зміна жорсткості порід у зсувному напрямку літосфери найбільше впливає на кількісні та якісні зміни в розподілі переміщень і напружень. Зниження жорсткості відповідних порід літосфери у вертикальному напрямку веде до значного збільшення амплітуд вертикальних переміщень. Найменше впливають на розподіли переміщень і напружень в околі вогнища землетрусу зміни жорсткості геологічних порід літосфери у поздовжньому напрямку, перпендикулярному до зсуву.

Ключові слова: напружено-деформований стан літосфери, вогнище землетрусу, моделювання на підставі методу скінченних елементів.

Вступ. У наш час 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

ки відносний рух порід, віддалених від цієї ділянки, триває. Коли напруження навколо заблокованої ділянки розлому сягає критичної величини, у деякій локальній області, що умовно називають вогнищем землетрусу, відбувається пружне розрядження накопичених напружень. Цей процес супроводжується деформуванням території,

Citation: Lubkov, M.V. (2025). Stress-deformable state near the earthquake focus. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 256—260. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322548>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

що прилягає до вогнища землетрусу, а також перенесенням сейсмічної й теплової енергій [Шерман, 2005; Karato, 2008]. Традиційно у вивченні проблем, пов'язаних з виникненням землетрусів та їх наслідків, основну увагу приділяють розробці критеріїв прогнозу землетрусів і пошуку закономірностей деформування, руйнування прилеглих територій та швидкості поширення сейсмічних хвиль на підставі тих або інших моделей навколо вогнищ землетрусів. Наприклад, моделі лавино нестійкого тріщиноутворення, ділатансно-дифузійні моделі, моделі консолідації, моделі stick-slip та ін. [Шерман, 2005; Wright, 2016], які характеризують виникнення землетрусів у пружному тріщинуватому розломно-блоковому середовищі. Згідно із цими моделями деформаційні й сейсмічні процеси, що виникають в околі вогнища землетрусу, мають зазвичай хаотичний характер, у них складно виділити будь-які стійкі фази. Як зазначено в статті [Шерман, 2005], жодна з відомих моделей вогнищ землетрусу не описує закономірностей просторово-часової міграції сейсмічних подій у межах пружного тріщинуватого середовища, що залучене до деформування. Таким чином, становить інтерес дослідження закономірностей напружено-деформованого стану, з урахуванням анізотропії тріщинуватопружного середовища, в околі вогнища землетрусу. У цій роботі на підставі варіаційного скінченно-елементного методу [Лубков, 2011] для багатошарових пружних ортотропних оболонок обертання, з огляду на зсувну жорсткість, змодельовано напружено-деформований стан верхнього, пружного шару літосфери, що виникає навколо вогнища землетрусу зі зсувом за простяганням розлому. Дослідження проведено для типового складу твердих геологічних порід, характерних для верхнього пружного шару літосфери: пісковиків, гранітоїдів і базальтів з урахуванням анізотропії. Розглянуто шаруваті фрагменти пружної частини літосфери, що примикають до лінії активного розриву, по якому відбувся черговий сейсмогенний зсув масиву геологічних порід.

Постановка та метод розв'язання задачі. Розглянемо тривимірну модель релаксації напружень на розриві зі зсувом за простяганням у верхньому пружному шарі літосфери, де по розриву відбувається горизонтальний рух між двома літосферними блоками. Припустимо, що глибше пружного шару розлом замкнений і в цій ділянці області напруження не передаються. Прийнемо також, що підосва пружного шару літосфери вільна від напружень. У результаті відносного руху літосферних блоків в околі заблокованої ділянки розлому концентрується зсувне напруження. При досягненні на цій ділянці напруження, яке можна порівняти з межею міцності твердих порід, відбувається землетрус [Шерман, 2005; Karato, 2008]. Напруження поблизу замкненої ділянки знімається й передається в прилеглому літосферному блоку, що супроводжується деформуванням земної поверхні. Вважатимемо, що шаруваті фрагменти пружної частини літосфери складаються з типових твердих геологічних порід, таких як пісковики, гранітоїди та базальти.

Для моделювання напружено-деформованого стану в анізотропних шарах пружної літосфери скористаємося теорією багатошарових ортотропних пружних оболонок з урахуванням зсувної жорсткості [Карнаухов, Киричок, 1986; Лубков, 2011]. Розглянемо ортотропні оболонки у криволінійній системі координат (s, φ, z) . Тут s — координата у поздовжньому напрямку поверхні оболонки, φ — координата в кутовому (зсувному) напрямку поверхні оболонки; z — координата за товщиною оболонки. Для розв'язання згаданої вище задачі деформування скористаємось методом скінченних елементів, заснованому на варіаційному принципі Лагранжа, що виражає мінімум потенціальної механічної енергії системи [Лубков, 2011].

Моделювання напружено-деформованого стану в околі вогнища землетрусу. Вважатимемо, що напружено-деформований стан виникає у верхньому, пружному шарі ділянки літосферного блока з лінійними розмірами 100×100 км, який

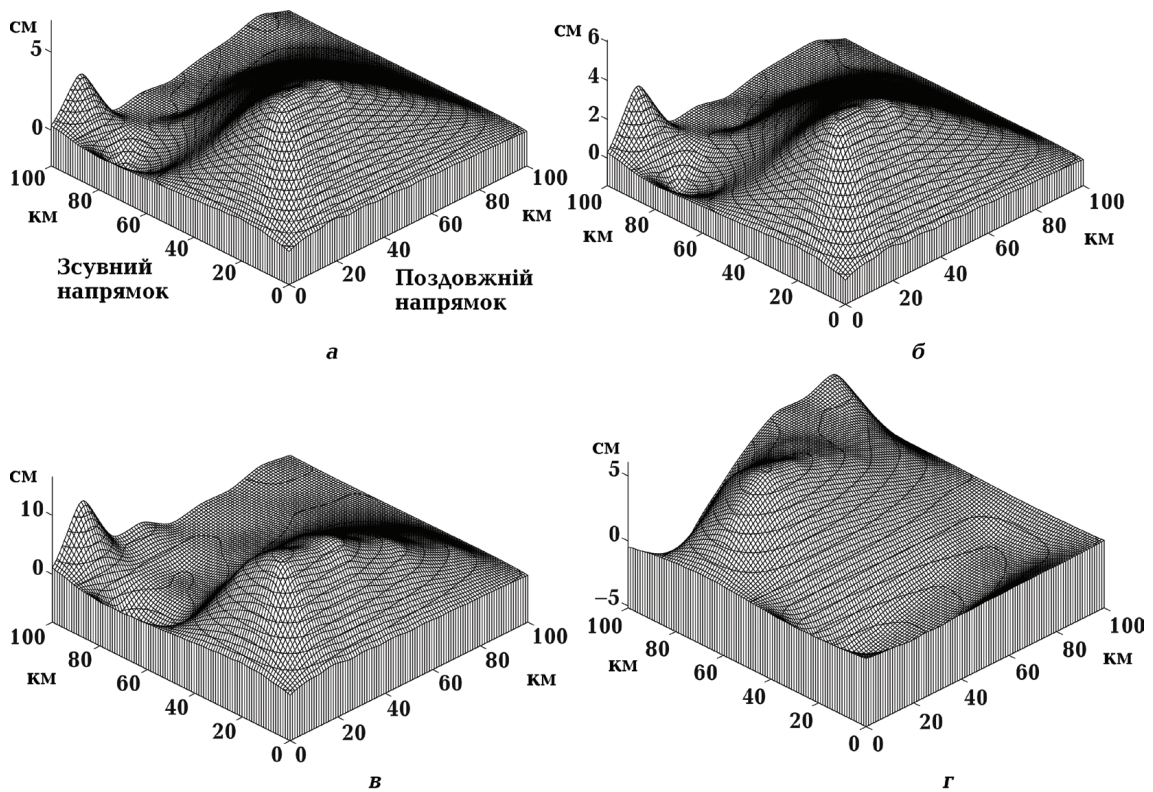


Рис. 1. Розподіл вертикальних переміщень ділянки пружної анізотропної літосфери, що складається з шару пісковиків ($B_{\phi}=10^{10}$ Па, $\nu_{s\phi}=0,3$) завтовшки 14 км, шару гранітоїдів ($B_{\phi}=2 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu_{s\phi}=0,2$) — 8 км, базальтів ($B_{\phi}=5 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu_{s\phi}=0,27$) — 8 км: а — відповідає описаному вище випадку; б, в — вертикальні переміщення, зміна жорсткості у пісковиках (б — $B_s=2 \cdot 10^9$ Па, $\nu_{s\phi}=0,3$); в — $B_z=2 \cdot 10^9$ Па, $\nu_{\phi z}=0,3$); г — вертикальні переміщення, властивості порід (пісковики — $B_i=2 \cdot 10^9$ Па, $\nu_{ij}=0,25$, гранітоїди — $B_i=8 \cdot 10^9$ Па, $\nu_{ij}=0,2$; базальти — $B_i=2 \cdot 10^{10}$ Па, $\nu_{ij}=0,27$).

Fig. 1. Distribution of the vertical displacements of the area of elastic lithosphere consisting of a sandstone layer ($B_{\phi}=10^{10}$ Pa, $\nu_{s\phi}=0,3$) 14 km thick, a granitoids layer ($B_{\phi}=2 \cdot 10^{10}$ Pa, $\nu_{s\phi}=0,2$) — 8 km, a basalt layer ($B_{\phi}=5 \cdot 10^{10}$ Pa, $\nu_{s\phi}=0,27$) — 8 km: а — responds to the described case; б, в — vertical displacements at sandstones rigidity changes (б — $B_s=2 \cdot 10^9$ Pa, $\nu_{s\phi}=0,3$; в — $B_z=2 \cdot 10^9$ Pa, $\nu_{\phi z}=0,3$); г — vertical displacements with sandstones ($B_i=2 \cdot 10^9$ Pa, $\nu_{ij}=0,25$) granitoids ($B_i=8 \cdot 10^9$ Pa, $\nu_{ij}=0,2$), and basalts ($B_i=2 \cdot 10^{10}$ Pa, $\nu_{ij}=0,27$).

примикає до зони активного розлому. Припустимо, що в результаті пружної розрядки зсувних напружень на заблокованій частині, розташованій посередині лівої сторони цієї ділянки, яка прилягає до лінії розлому, відбувається розрив. Він спричинює переміщення відрізка розвантаження завдовжки 5 км на відстань 1 м і, відповідно, деформування всієї зазначеної ділянки пружної літосфери. Розглянемо анізотропні шаруваті фрагменти пружної літосфери з різним ступенем тріщинуватості порід (рис. 1, 2). Тут B_i — модуль Юнга в i -му напрямку, ν_{ij} — коефіцієнт Пуассона в напрямку i, j [Карнаухов, Киричок, 1986].

Висновки. Встановлено, що розподіли переміщень і напружень в околі вогнища землетрусу у різних напрямках залежать від товщини шару осадових порід і товщини порід кристалічного фундаменту літосфери, а також від розподілу жорсткості різних порід у різних напрямках. Збільшення товщини шару осадових порід та, відповідно, зменшення потужності шарів кристалічного фундаменту приводить до збільшення амплітуд переміщень і зниження амплітуд напружень. Зміна жорсткості порід у зсувному напрямку найбільше впливає на кількісні та якісні зміни в розподілі переміщень і напружень. Зменшення жорсткості відповідних по-

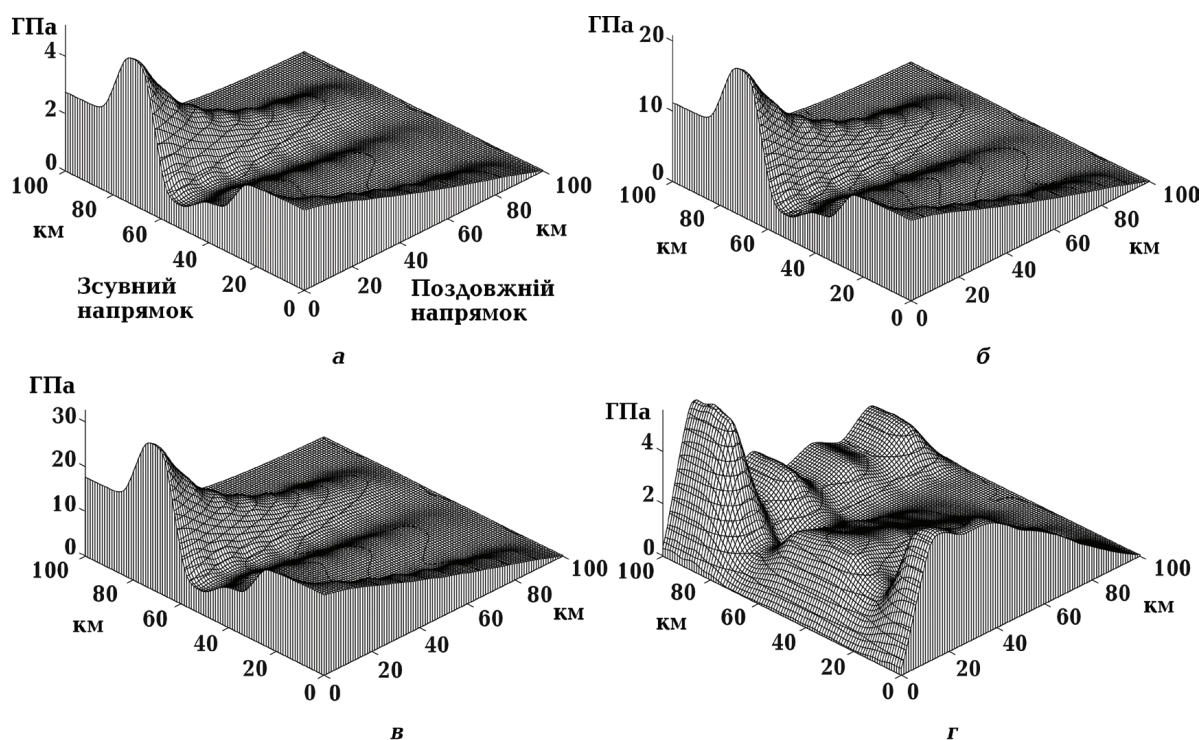


Рис. 2. Розподіл напружень анізотропної пружної ділянки літосфери, що складається з шару пісковиків ($B_\phi=2\cdot10^9$ Па, $\nu_{s\phi}=0,3$) завтовшки 14 км, шару гранітоїдів ($B_i=8\cdot10^9$ Па, $\nu_{ij}=0,2$) — 8 км, базальтів ($B_b=2\cdot10^{10}$ Па, $\nu_{ij}=0,28$) — 8 км. Напруження: а — поздовжні (σ_{ss}); б — зсувні ($\sigma_{\phi\phi}$); в — вертикальні (σ_{zz}); г — згинальні ($\sigma_{\phi z}$).
 Fig. 2. Strain distribution of the area of elastic lithosphere consisting of the sandstone layer ($B_\phi=2\cdot10^9$ Pa, $\nu_{s\phi}=0.3$) 14 km thick, granitoids layer ($B_i=8\cdot10^9$ Pa, $\nu_{ij}=0.2$) — 8 km, basalts ($B_b=2\cdot10^{10}$ Pa, $\nu_{ij}=0.28$) — 8 km: а — longitudinal strains (σ_{ss}); б — shifting strains ($\sigma_{\phi\phi}$); в — vertical strains (σ_{zz}); г — bending strains ($\sigma_{\phi z}$).

рід літосфери у вертикальному напрямку приводить до значного збільшення амплітуд вертикальних переміщень. Найменше впливають на розподіли переміщень і напружень в околі вогнища землетрусу зміни жорсткості гірських порід літосфери у поздовжньому напрямку. Якісні картини роз-

поділу зсувних і вертикальних переміщень та напружень у поздовжньому, зсувному й вертикальному напрямках мають подібний характер. Найбільші переміщення та напруження концентруються поблизу лінії розвантаження розлому, вони швидко спадають у поперечному напрямку.

Список літератури

- Карнаухов В.Г., Киричок И.Ф. *Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек*. Киев: Наук. думка, 1986, 221 с.
- Лубков М.В. Моделирование напряжено-деформованного stanu та аномального гравітаційного поля у вогнищі землетрусу. *Геоінформатика*. 2011. № 1. С. 51—56.
- Шерман С.И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесуточного прогноза землетрясений. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 1. С. 20—38.
- Karato, S. (2008). *Deformation of Earth materials. An introduction to the rheology solid Earth*. Cambridge University Press, 454 p.
- Wright, T.J. (2016). The earthquake deformation cycle. *Astronomy and Geophysics*, 57(4), 4.20—4.26. <https://doi.org/10.1093/astrophys/atw148>.