

М.В. Лубков

## МОДЕЛЮВАННЯ НАХИЛІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ У ЗОНАХ АКТИВНИХ РОЗЛОМІВ

На основі варіаційної скінченноелементної методики для в'язкопружного середовища проведено чисельне моделювання швидкості змінювання нахилів земної поверхні у активних надрозломних зонах. Показано, що збільшення швидкості і положистості руху блоків кристалічного фундаменту, збільшення кількості солі у надрозломному осадовому чохла та зменшення його потужності приводять до зростання швидкості змінювання нахилів.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, активні розломні зони, нахили земної поверхні.

**Вступ.** Проблеми вивчення повільних рухів земної кори у зонах активних розломів давно привертають увагу дослідників. Це пов'язане не тільки з теоретичним інтересом до вивчення закономірностей сучасних тектонічних рухів у земній корі, а й з питаннями прикладного характеру, наприклад з питаннями видобутку вуглеводневої сировини, запаси якої накопичуються у зонах активних розломів осадових басейнів [7], питаннями розміщення та побудови великих технічних споруд. Разом з тим у динаміці земної кори відображаються процеси накопичення напружень у пружній літосфері і, відповідно, процеси підготовки землетрусів. Володіючи відповідною інформацією, можна здійснювати прогностичні оцінки землетрусів.

Одним із перспективних геофізичних методів, який може дати повне і надійне уявлення про сучасний рух земної кори у зонах активних розломно-блокових рухів, є нахиломірний метод [3]. Цей метод за неперервної реєстрації нахилів на певній ділянці земної поверхні за відносно коротким терміном спостережень дає можливість отримати важливу інформацію щодо природи тектонічних процесів, які відбуваються у верхній літосфері [2, 3]. Так, систематичні дослідження повільних рухів земної кори на основі нахиломірів О.Є. Островського з фотоелектричним перетворювачем проводили на ділянках багатьох великих споруд, наприклад, гідроелектростанцій: Саяно-Шушенської, Інурської, Зейської, Токтогульської та ін. [1]. Результати теоретичних і експериментальних досліджень поведінки нахилів земної поверхні, або, за термінологією засновника сучасної геотектоніки і тектонофізики Михайла Володимирівича Гзовського, “градієнтів швидкості тектонічних рухів” у зонах розломно-блокових структур, представлені у роботах цього автора [5, 6], а також його учнів: А.С. Григор'єва, А.В. Михайлової, Ю.Л. Ребецького, З.Є. Шахмуратової та інших [8, 9]. М.В. Гзовський пов'язував середню для тривалого проміжку часу швидкість змінювання нахилів земної поверхні із середньою швидкістю деформації в околі активного розлому, яка,

у свою чергу, визначає величину максимальних дотичних напружень у розглянутому елементі об'єму всередині кори:

$$\tau_{\max} = \eta_v \cdot D \approx \eta_v \Phi [\text{grad} W]_{\max} \quad (1)$$

Тут  $\eta_v$  – динамічна в'язкість;  $D$  – швидкість деформації;  $\Phi$  – коефіцієнт пропорційності;  $[\text{grad} W]_{\max}$  – максимальна швидкість змінювання нахилів земної поверхні.

Отже, знання характеру змінювання нахилів земної поверхні дає змогу визначати характер змінювань тектонічних деформацій та напружень.

Незважаючи на досить велику кількість робіт, присвячених питанням дослідження нахилів земної поверхні в зонах активних тектонічних подій, актуальним залишається питання побудови реалістичних моделей поведінки нахилів земної поверхні з урахуванням кінематики руху блоків кристалічного фундаменту, а також реології надрозломних осадових товщ. У цій статті на основі варіаційної скінченноелементної методики для в'язкопружного середовища описано моделювання процесів змінювання нахилів в осадовому чохла в околах активних розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту.

**Постановка задачі.** Здебільшого розломи, які розміщуються уздовж блоків кристалічного фундаменту, мають доволі протяжну структуру. Тому процес деформування осадового чохла в околах активних розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту можна розглядати як плоский. Виходячи з цього, а також зневажаючи анізотропію, пов'язану з тріщинуватістю порід, для опису механічної поведінки чохла осадових порід над зоною активних розломно-блокових рухів скористаємося ізотропною в'язкопружною моделлю Кельвіна–Фойта [10], тобто загальне напруження зсуву за заданих деформацій та швидкостей деформацій є лінійною суперпозицією пружної та в'язкої частин напруження. У цьому випадку загальна постановка нестационарної в'язкопружної задачі в системі відліку, яка жорстко зв'язана із суміжними великими мегаблоками, має вигляд

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}_i + \sigma_{ij,j} + \mathbf{F}_i = 0; \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} + 2\eta_v \dot{\varepsilon}_{ij} + k\theta \delta_{ij}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}); \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} \mathbf{n}_j - \mathbf{f}_i = 0, \mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i^*; \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \dot{\mathbf{u}}_i^*. \quad (6)$$

Тут (2) – рівняння руху; (3) – реологічні співвідношення; (4) – співвідношення Коші; (5) – граничні умови I й II роду відповідно; (6) – початкові умови;  $\mathbf{u}_i$  – компоненти переміщень;  $\sigma_{ij}$  – компоненти тензора напружень;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненти тензора деформацій;  $\mathbf{F}_i$  – компонента об’ємної сили, яка в цьому випадку є силою тяжіння;  $\mathbf{f}_i$  – поверхневі зовнішні сили;  $\mathbf{n}_j$  – одиничний вектор нормалі до поверхні;  $\rho$  – густина,  $\mu$  – модуль зсуву;  $k$  – модуль всебічного стиску;  $\theta$  – дилатація;  $\eta_v$  – динамічна в’язкість;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $(\cdot)$ ,  $(\ddot{\cdot})$  – позначення першої та другої похідних за часом;  $(\cdot, \cdot)$  – позначення диференціювання компоненти тензора по змінній, яка відповідає  $j$ -му індексу;  $(*)$  – позначення фіксованої величини переміщення або швидкості, які задані на межі області.

Тектонічні процеси, з точки зору механіки деформованого твердого тіла, є досить повільними. Тому перехідними процесами в цьому випадку можна знехтувати і розглядати деформування як повільний встановлений рівноважний процес. Таким чином, повільний нестационарний тектонічний процес можна умовно розглядати, як врівноважений процес повільних коливань. Тоді часову залежність можна врахувати за переходом у частотний простір і диференціювання відносно часу замінити множенням на  $i\omega$ , де  $i$  – уявна одиниця,  $\omega$  – частота квазістационарних коливань [13]. Взявши характерну циклічну частоту повільного встановленого тектонічного процесу за  $\omega$ , складемо функціонал Лагранжа квазістационарної плоскої в’язкопружної задачі з відповідними узагальненими граничними умовами, що виражає повну механічну енергію досліджуваного об’єкта у нерухомій декартовій системі координат  $(x, y)$ :

$$E = \frac{1}{2} \iint_S [C_1(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2) + 4C_2\varepsilon_{xy}^2 + 2C_3\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} - \rho\omega^2(u^2 + w^2) - 2\rho g w] dx dy - \int_L (\mathbf{f}_{xn}u + \mathbf{f}_{yn}w) dl, \quad (7)$$

де

$$C_1 = k + 4(\mu + i\omega\eta_v)/3, \quad C_2 = \mu + i\omega\eta_v, \\ C_3 = k - 2(\mu + i\omega\eta_v)/3 -$$

комплексні коефіцієнти;  $u, v$  – компоненти переміщень уздовж осей  $x$  і  $y$  відповідно;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $S$  – площа перерізу розглянутого об’єкта;  $L$  – контур, що охоплює площу  $S$ ;  $dl$  – елемент контуру. Термін “узагальнені гра-

ничні умови” означає, що через введення характерної частоти встановленого тектонічного процесу початкові умови втрачають свою актуальність, але задані на межі області квазістационарні переміщення в частотному просторі можна розглядати як амплітуди швидкостей у часовому просторі.

**Розв’язання задачі.** Для розв’язання квазістационарної плоскої в’язкопружної задачі застосовують метод скінченних елементів, що ґрунтується на варіаційному принципі Лагранжа [14], який виражає мінімум повної механічної енергії системи:

$$\delta E(u, w) = 0. \quad (8)$$

Для розв’язання варіаційного рівняння (8) застосовують восьмивузловий ізопараметричний чотирикутний криволінійний скінченний елемент [14]. Як глобальну систему координат, тобто систему, в якій поєднуються всі скінченні елементи, на які розбито досліджувану область перерізу розглянутого об’єкта, використовують декартову систему координат  $(x, y)$ . Як локальну систему координат, у якій для кожного елемента визначають апроксимувальні функції форми і проводять чисельне інтегрування, застосовують допоміжну нормалізовану систему координат  $(\xi, \eta)$ . Для побудови функцій форми, що апроксимують змінні й функції в межах кожного елемента, використовують квадратичні алгебричні поліноми, які задовольняють умовам гладкості та збіжності скінченноелементних розв’язків [11, 14]:

$$\varphi_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1); \varphi_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1); \\ \varphi_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1); \varphi_4 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1); \quad (9) \\ \varphi_5 = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta); \varphi_6 = \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1+\xi); \\ \varphi_7 = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta); \varphi_8 = \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1-\xi).$$

Декартові координати досліджуваної області  $(x, y)$ , відповідні квазістационарні компоненти переміщень  $u, v$  та деформацій  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$  у межах скінченного елемента апроксимують на основі функцій форми (9):

$$x = \sum_{i=1}^8 x_i \varphi_i; y = \sum_{i=1}^8 y_i \varphi_i; u = \sum_{i=1}^8 u_i \varphi_i; w = \sum_{i=1}^8 w_i \varphi_i; \\ \varepsilon_{xx} = \sum_{i=1}^8 u_i \Psi_i; \varepsilon_{yy} = \sum_{i=1}^8 w_i \Phi_i; \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 (w_i \Psi_i + u_i \Phi_i); \quad (10) \\ \Phi_i = \frac{1}{|J|} \left( \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right); \Psi_i = \frac{1}{|J|} \left( \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \right);$$

$$J = \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi} - \text{якобіан переходу } (x, y) \rightarrow (\xi, \eta).$$

Згідно із співвідношеннями (7)–(10), приходимо до систем комплексних алгебричних

рівнянь, які записані для кожного скінченного елемента  $p$  у нормалізованій системі координат  $(\xi, \eta)$ :

$$\frac{\partial E_p}{\partial u_i} = A_{11}^p u_1 + B_{11}^p w_1 + A_{12}^p u_2 + B_{12}^p w_2 + \dots \\ \dots + A_{18}^p u_8 + B_{18}^p w_8 - L_i^p = 0; \\ \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_8} = C_{81}^p u_1 + D_{81}^p w_1 + C_{82}^p u_2 + D_{82}^p w_2 + \dots \\ \dots + C_{88}^p u_8 + D_{88}^p w_8 - M_8^p = 0,$$

де

$$A_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (C_1 \Psi_i \Psi_j + C_2 \Phi_i \Phi_j - \rho \omega^2 \varphi_i \varphi_j) |J| dx dy; \\ B_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (C_2 \Phi_i \Psi_j + C_3 \Psi_i \Phi_j) |J| dx dy; \\ C_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (C_2 \Psi_i \Phi_j + C_3 \Phi_i \Psi_j) |J| dx dy; \\ D_{ij}^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (C_1 \Phi_i \Phi_j + C_2 \Psi_i \Psi_j - \rho \omega^2 \varphi_i \varphi_j) |J| dx dy; \\ L_i^p = \int_L f_{xm} \varphi_i dl; M_i^p = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\sum_{i=1}^8 \rho g \varphi_i) |J| dx dy + \int_L f_{ym} \varphi_i dl.$$

Підсумувавши системи рівнянь (12) за всіма скінченими елементами, на які розбито досліджувану область, формуємо глобальну систему рівнянь:

$$\frac{\partial E}{\partial u_i} = \sum_{p=1}^N \frac{\partial E_p}{\partial u_i} = 0; \frac{\partial E}{\partial w_i} = \sum_{p=1}^N \frac{\partial E_p}{\partial w_i} = 0, \quad (13)$$

де  $N$  – кількість скінчених елементів;  $i = 1, \dots, 8$ . У системі (13) інтегрування за площею досліджуваної області замінено сумою інтегралів, які беремо по площах окремих скінчених елементів. Подвійні інтеграли у виразах (12) обчислюємо за чисельним інтегруванням на основі квадратурних формул Гауса [14]. Процедура такого інтегрування полягає у підсумовуванні значень підінтегрального виразу, обчисленого у спеціальних точках інтегровної площі, та помноженні на відповідні вагові коефіцієнти:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \alpha_i \alpha_j F(\xi_i, \eta_j), \quad (14)$$

де  $n_1, n_2$  – кількість точок інтегрування;  $\alpha_i, \alpha_j$  – вагові коефіцієнти. Глобальну систему комплексних лінійних алгебричних рівнянь розв'язуємо за допомогою чисельного методу Гауса [15], в результаті визначаємо компоненти переміщень в усіх вузлових точках скінченноелементної сітки. За знайденими вузловими значеннями пере-

міщень отримуємо комплексні компоненти квазі-стаціонарних переміщень та інші величини, що цікавлять, у довільній точці скінченного елемента, тобто у будь-якій точці досліджуваної області. Квазістаціонарні нахили земної поверхні у комплексній формі обчислюємо за формулою  $\frac{\partial w}{\partial x} = \sum_{i=1}^8 w_i \Psi_i$ , для переходу у дійсний часовий

простір слід виділити реальну частину від отриманих комплексних значень.

**Моделювання змінювання нахилів земної поверхні у зонах активних розломів.** Під час моделювання процесу змінювання нахилів у зонах активних розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту розглядатимемо симетричні відносно умовної середини активного блока прямокутні фрагменти осадових порід – 18 км завдовжки та 6 км завглибшки. При цьому прилегла до осі симетрії горизонтальна ділянка підосви фрагмента завдовжки 4 км (ця довжина визначає лінію розлому) занурюється з характерною швидкістю 1 см/рік [8]. Разом з тим неактивна частина підосви та бокова межа фрагмента жорстко закріплені з навколишніми породами, верхня межа фрагмента вільна від навантажень. На розглянутий фрагмент осадових порід діє сила тяжіння.

Перед тим як переходити до реалістичних моделей змінювання нахилів земної поверхні у зонах активних розломів, як апробацію наведеної вище варіаційної в'язкопружної скінченноелементної методики для розв'язання задач геотектоніки проведемо порівняння з результатами, які отримані на основі ідеалізованої теорії для лінійно-в'язкого середовища (рис. 1, 2) [8]. Звернімо увагу на те, що в'язкопружна теорія здатна описувати лінійні в'язкі процеси як граничний випадок [10].

Нижче наведено реалістичніші моделі. Дані щодо механічних властивостей осадових порід взято із літературних джерел [8, 15].

1. Несоленосні осадові породи: нижня 5-кілометрова товща представлена пісковиками, а верхній шар завтовшки 1 км – глинами (рис. 3).
2. Соляний шток [4, 12]: ось його симетрії проходить через умовну середину активного блока. При цьому на глибині від 0 до 1 км розміщуються глинисті породи; від 1 до 3 км у верхній вузькій частині штоку – кам'яна сіль, на периферії – пісковики; від 3 до 5 км у нижній широкій частині штоку (соляному ядрі) – кам'яна сіль, на периферії – пісковики; від 5 до 6 км – пісковики (рис. 4).
3. Наявність у надрозломному осадовому чохла потужних відкладів кам'яної солі (соляних подушок) [4, 12]: на глибині від 0 до 1 км розміщуються глини; від 1 до 2 км – пісковики; від 2 до 5 км – відклади кам'яної солі; від 5 до 6 км – пісковики (рис. 5).

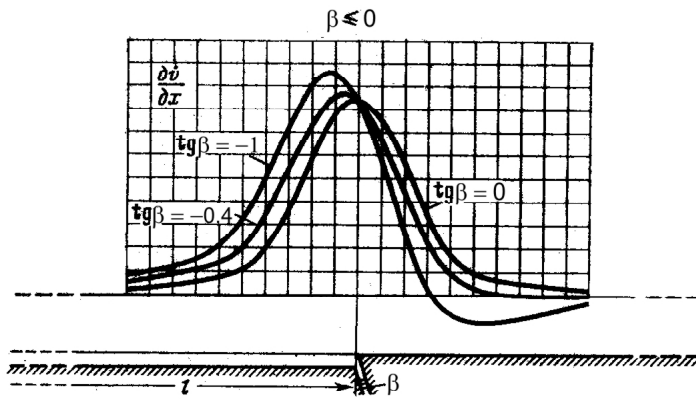


Рис. 1. Безрозмірні криві швидкості змінювання нахилів земної поверхні у активній надрозломній зоні, де осадові породи мають лінійно-в'язкі властивості, за руху блока під різними кутами [8]

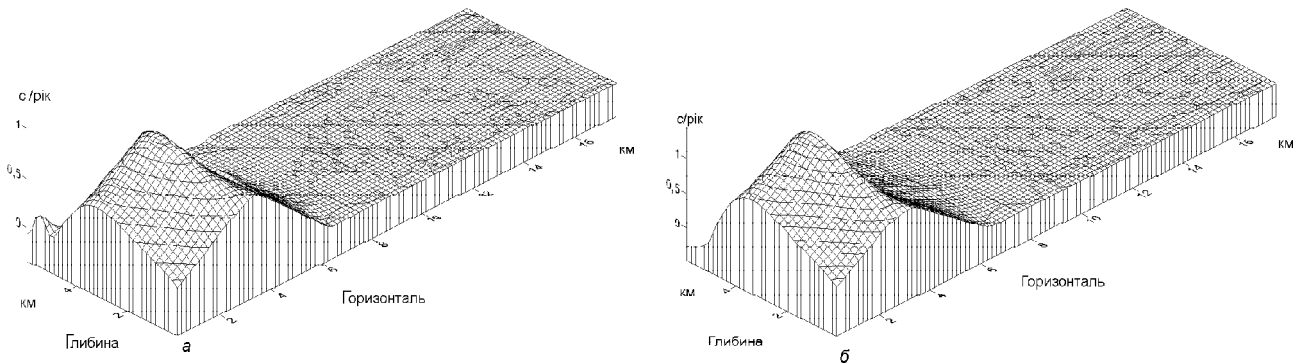


Рис. 2. Розподіл швидкості змінювання нахилів у осадовому чохлі надрозломної зони, яка складається з лінійно-в'язкої глини, за руху блока зі швидкістю 1 см/рік під кутами до горизонту: а –  $\beta = 90^\circ$ ; б –  $\beta = 45^\circ$

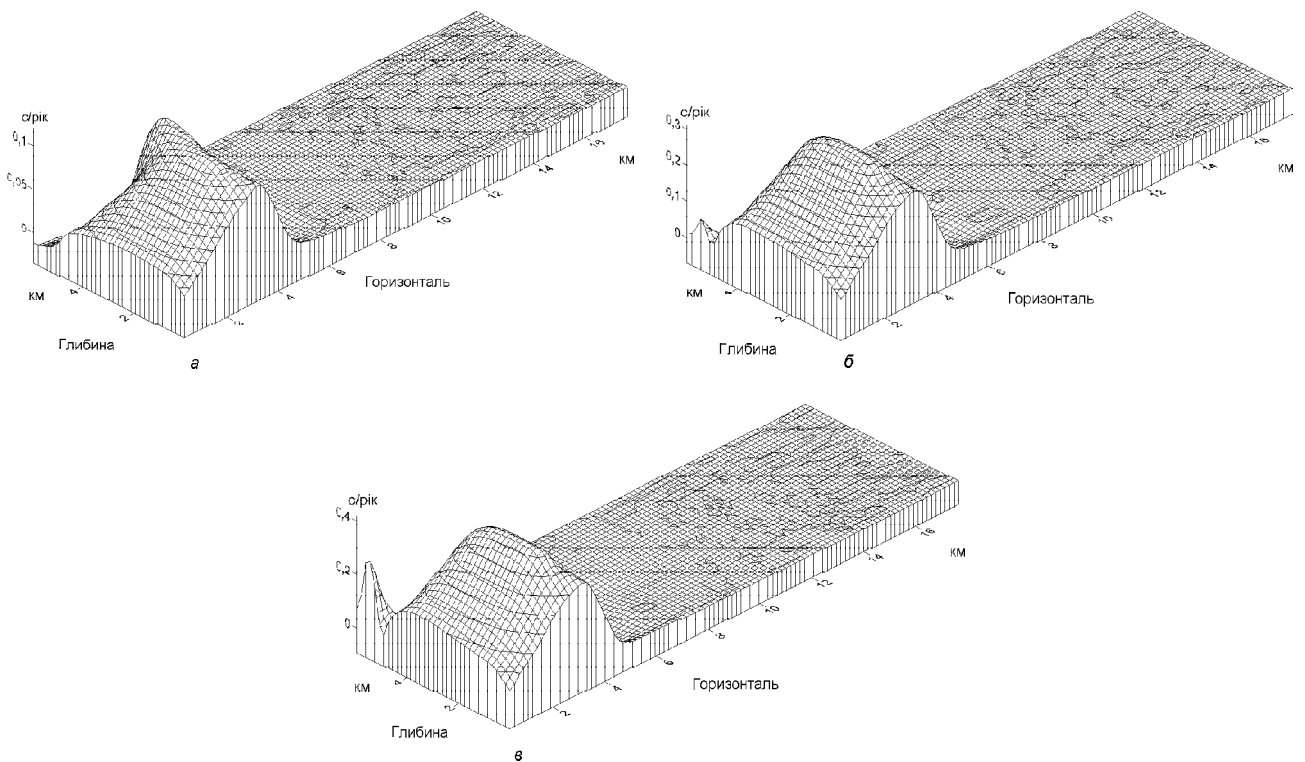


Рис. 3. Розподіл швидкості змінювання нахилів у несоленому осадовому чохлі надрозломної зони за руху блока зі швидкістю 1 см/рік під кутами до горизонту: а –  $\beta = 90^\circ$ ; б –  $\beta = 60^\circ$ ; в –  $\beta = 30^\circ$

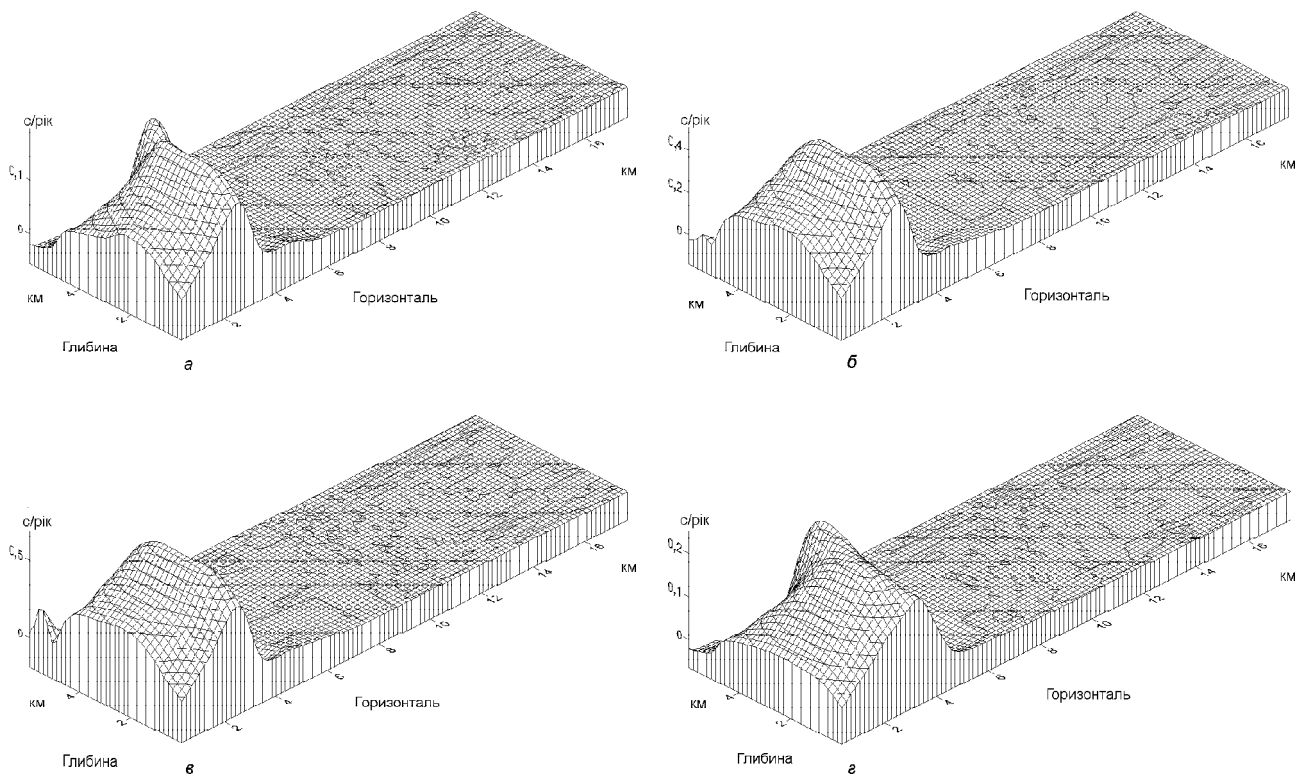


Рис. 4. Розподіл швидкості змінювання нахилів у осадовому чохлі надрозломної зони, який вміщує соляний шток, за руху блока зі швидкістю 1 см/рік, за різних кутів до горизонту та конфігурацій штоку. Півширина верхньої частини штоку 3 км, соляного ядра 9 км: а -  $\beta = 90^\circ$ ; б -  $\beta = 60^\circ$ ; в -  $\beta = 30^\circ$ ; г - півширина верхньої частини штоку 6 км, соляного ядра - 9 км,  $\beta = 90^\circ$

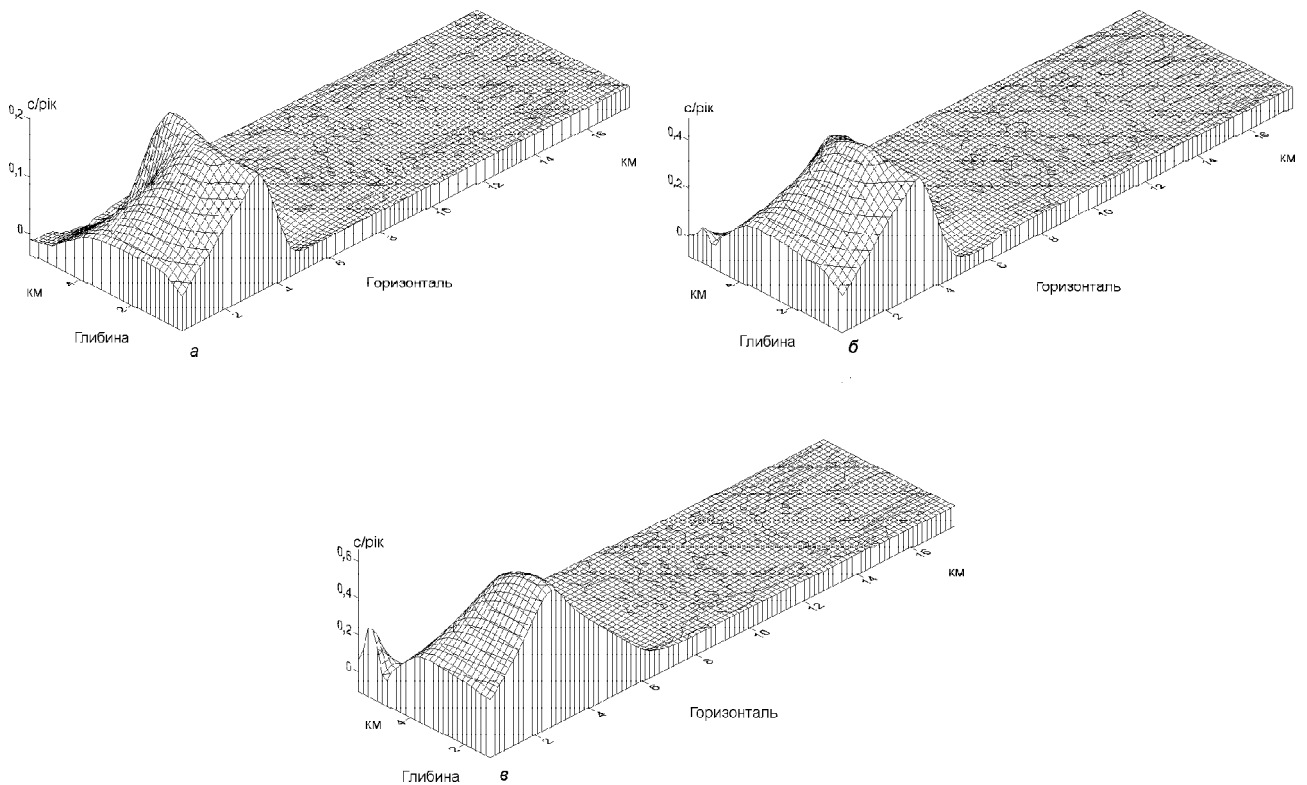


Рис. 5. Розподіл швидкості змінювання нахилів у осадовому чохлі надрозломної зони, який вміщує соляну подушку, за руху блока зі швидкістю 1 см/рік під кутами до горизонту: а -  $\beta = 90^\circ$ ; б -  $\beta = 60^\circ$ ; в -  $\beta = 30^\circ$

Аналіз отриманих результатів показав, що в усіх розглянутих випадках пік швидкості змінювання нахилів відповідає приблизно зоні активного розлому, в міру віддалення від лінії розлому швидкість змінювання нахилів згасає. Водночас розташування піка може змінюватися залежно від напрямку руху блока і складу надрозломних осадових порід. Найбільші значення швидкості змінювання нахилів характерні для випадків найположистого руху блоків кристалічного фундаменту та наявності найбільшої кількості соленосних порід у надрозломній зоні. Так, за характерної швидкості руху блока  $\sim 1$  см/рік у разі наявності у надрозломному осадовому чохла соляної подушки максимальні значення швидкості змінювання нахилів досягають  $\sim 0,6$  с/рік. Наявність соляних штоків у надрозломній зоні приводить не тільки до збільшення швидкості змінювання нахилів, а й помітного переміщення піка відносно лінії розлому. Чим тонше структура соляного штоку, тим більші переміщення піка та менші абсолютні значення швидкості змінювання нахилів. Найменші значення швидкості змінювання нахилів характерні для несолених осадових порід у надрозломній зоні. Порівняння розподілів швидкості змінювання нахилів у надрозломному осадовому чохла, який складається з лінійно-в'язкої глини, із відповідними результатами, отриманими на основі аналітичного розв'язання задачі для лінійно-в'язкого осадового шару [8], показує добре узгодження. Цей факт свідчить про достовірність отриманих результатів моделювання, а також про ефективність наведеної варіаційної в'язкопружної скінченноелементної методики для розв'язання задач геотектоніки.

**Висновки.** Згідно із загальним аналізом результатів чисельного моделювання процесу змінювання нахилів у осадовому шарі в околах розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту, розподіл швидкості цього змінювання подібний. Максимуми швидкості змінювання нахилів відповідають приблизно зоні розміщення активного розлому, в міру віддалення від неї відбувається поступове загасання. Разом з тим абсолютні значення і форми розподілу швидкості змінювання нахилів залежать від швидкості й напрямку руху блоків кристалічного фундаменту, потужності, складу та солених порід надрозломних осадових порід. Збільшення швидкості та положистості руху блоків кристалічного фундаменту, зменшення потужності шару надрозломних осадових порід зумовлюють збільшення абсолютних значень швидкості змінювання нахилів. Наявність кам'яної солі у надрозломному осадовому шарі у вигляді соляних штоків або соляних подушок приводить не тільки до збільшення абсолютних значень швидкості змінювань нахилів, а й до

змішень області максимальних значень швидкості відносно лінії активного розлому. Отримані результати моделювання підтверджують положення про те, що нахили земної є важливою та ефективною характеристикою для дослідження механічної поведінки розломно-блокових структур. Ці результати можуть бути використані для аналізу тектонічних процесів під час розв'язання різних практичних завдань.

Порівняння результатів для лінійно-в'язкої глини із відповідними результатами, отриманими на основі аналітичного розв'язку задачі для лінійно-в'язкого осадового шару [8], свідчить про достовірність отриманих результатів моделювання, а також про ефективність наведеної в'язкопружної методики для розв'язання задач геотектоніки.

1. *Балавдзе Б.К.* Наклоны и деформации земной коры в районе Ингурской ГЭС / Б.К. Балавдзе, В.Г. Абашидзе. – Тбилиси: Мецниереба, 1985. – 116 с.
2. *Баленко В.Г.* Наклономерные наблюдения в г. Карло-Либкнеховске по программе изучения эффекта полости / В.Г. Баленко, А.М. Кутный, А.Н. Новикова // Вращение и прилив. деформации Земли. – 1979. – Вып. 11. – С. 18–23.
3. *Баленко В.Г.* Исследование наклонов земной поверхности по профилю Киев–Артемовск. – Киев: Наук. думка, 1980. – 174 с.
4. *Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины.* Глубинное строение и геотектоническое развитие / [Гавриш В. К., Забелло Г. Д., Рябчун Л. М. и др.]; Под ред. В. К. Гавриша. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
5. *Гзовский М.В.* Математика в геотектонике. – М.: Недра, 1971. – 240 с.
6. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
7. *Гордиенко В.В.* Активизация тектоносферы и месторождения углеводородов // Геофиз. журн. – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 75–101.
8. *Григорьев А.С.* О кинематических характеристиках движения дневной поверхности и напряжённом состоянии осадочного чехла в зонах над разломами фундамента / А.С. Григорьев, А.В. Михайлова, З.Е. Шахмурадова // Физика Земли. – 1979. – № 1. – С. 3–20.
9. *Григорьев А.С.* Вопросы интерпретации современных движений земной поверхности, обусловленных движениями фундамента осадочного чехла / А.С. Григорьев, И.М. Волович, А.В. Михайлова // Современные движения земной коры. Морфоструктуры, разломы, сейсмичность. – М.: Наука, 1987. – С. 9–16.
10. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
11. *Лубков М.В.* Определение статических чисел Лява и Шида методом конечных элементов // Геофиз. журн. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 147–150.
12. *Лубков М.В.* Моделирование современных движений локальных соляных структур Днепровско-Донецкой западины // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 54–60.

13. *Мориц Г.* Вращение Земли: теория и наблюдения / Г. Мориц, А. Мюллер. – Киев: Наук. думка, 1992. – 512 с.
14. *Образцов И.Ф.* Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. – М.: Высш. шк., 1985. – 329 с.
15. *Тёркот Д.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Тёркот, Д. Шуберт. – М.: Мир, 1985. – 730 с.

*Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна  
E-mail: mikhail.lubkov@mail.ru*

*Надійшла до редакції 22.11.2012 р.*

*М.В. Лубков*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКЛОНОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗОНАХ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ**

На основе вариационной конечно-элементной методики, разработанной для вязкоупругих сред, проведено численное моделирование скорости изменения наклонов земной поверхности в активных надразломных зонах. Показано, что увеличение скорости и пологости движения блоков кристаллического фундамента, увеличение количества соли в надразломном осадочном чехле и уменьшение его мощности приводят к росту скорости изменения наклонов.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, активные разломные зоны, наклоны земной поверхности.

*M.V. Lubkov*

## **MODELING OF THE EARTH SURFACE TILTS IN ACTIVE FAULT ZONES**

Based on variation finite element method elaborated for visco-elastic medium, computer modeling of earth surface tilts change velocity in over-fault zones was carried out. Increase of velocity and declivity of crystalline fundament blocks movements, and growth of salt quantity in over-fault sedimentary layers, as shown, lead to augmentation of tilts change velocity.

**Keywords:** computer modeling, active fault zones, earth surface tilts.