

ПРОЦЕС ВЕЛИКОМАСШТАБНОГО СКЛАДКОУТВОРЕННЯ В ОСАДОВОМУ ШАРІ ЗЕМНОЇ КОРИ

М.В. Лубков

*Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
вул. Мясоедова, 27/29, Полтава 36029, Україна, e-mail: mikhail.lubkov@mail.ru*

На основі варіаційної скінченно-елементної методики для ортотропних в'язкопружних багатошарових оболонок, які перебувають в умовах квазістаціонарного навантаження, змодельовано процеси великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори. Встановлено, що збільшення ступеня тріщинуватості осадових порід і відхилення стискувальних геотектонічних зусиль від горизонтального напрямку приводять до зниження швидкості росту складок. Процеси утворення антикліноріїв і синкліноріїв в осадовому шарі земної кори, а також швидкості цих процесів суттєво залежать від форм і розмірів площин змінання осадових порід.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, процеси складкоутворення, осадові породи.

Вступ. Складками називають деформації, які виникають унаслідок геологічних процесів всередині земної кори і які змінюють кривизну структурних геоповерхонь у ній [2]. Утворення складок у породах земної кори може відбуватись у різних масштабах, починаючи від сантиметрів і закінчуючи сотнями кілометрів. У найбільшому масштабі складки, повернуті опуклістю донизу, називають синкліноріями, а складки, повернуті опуклістю вгору, – антикліноріями. Складки поширені як у осадових, так і в метаморфічних породах. Складки формуються за різноманітних геотектонічних умов, але переважно під дією стискувальних субгоризонтальних тектонічних сил [15]. За М.В. Гзовським [2], різноманітність складок описують на основі трьох класифікацій: морфологічної, фізико-генетичної і геолого-генетичної. Морфологічна класифікація виявляє закономірності утворення складок певної форми. Фізико-генетична класифікація систематизує механізми формування складок на основі динаміки прикладених зовнішніх сил, з урахуванням реологічних властивостей деформівних порід. Геолого-генетична класифікація описує причини появи сил, які утворюють складку, вказує місце розвитку складки в розрізі земної кори і визначає коло геологічних процесів, які можуть супроводжувати розвиток складки.

Вивчення процесів формування складок різних масштабів, і особливо великомасштабних, є необхідним елементом для розуміння багатьох важливих проблем геотектоніки і геології в цілому, таких як проблеми орогенезу і пов'язаних з ним проблем формування і змінювання геологічних структур, проблеми сейсмології, проблеми видобутку корисних копалин, будови геологічних структур тощо. Не випадково питанням складкоутворення, особливо з позицій морфологічної і геолого-генетичної класифікацій, при-

свячена велика кількість робіт [2, 3, 15, 16, 17]. Вивчення складкоутворення за фізико-генетичною класифікацією, як зазначено у праці М.В. Гзовського [2], є порівняно новим напрямом досліджень. Нині внаслідок інтенсивного розвитку сучасних обчислювальних методів уже існує достатньо велика кількість робіт, в яких на основі двовимірних і тривимірних реологічних моделей (в'язких, в'язкопружних, в'язкопружнопластичних та ін.) проводять дослідження процесів складкоутворення під дією зовнішніх сил [19–23]. Однак у більшості цих робіт процеси складкоутворення описують на основі достатньо ідеалізованих реологічних моделей, які можуть точно відображувати лише окремі риси механічної поведінки складних геологічних структур. Тому залишається актуальною побудова фізико-генетичних моделей складкоутворення, особливо великомасштабних, які мають можливість порівняно адекватно відображувати реакцію реальних геоструктур на зовнішні дії. У цій статті на основі тривимірної в'язкопружної моделі у наближенні тришарових ортотропних оболонок зроблена спроба моделювання процесів великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори.

Постановка задачі. Проаналізуємо процес великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори під дією субгоризонтальних стискальних геотектонічних сил, у якому деформується увесь осадовий шар. При цьому на зазначений шар діє сила тяжіння. Для описання механічної поведінки досліджуваного тривимірного півпростору осадових порід скористаємося теорією тришарових ортотропних в'язкопружних оболонок з урахуванням зсувної жорсткості [5, 7, 13]. Розглядатимемо оболонки в криволінійній системі координат (s, φ, z) , яку вважаємо жорстко закріпленою з великим мегабло-

ком. Тут s, φ – координати уздовж поверхні оболонки; z – координата за товщиною оболонки. Переміщення уздовж координат s, φ, z для j -го шару оболонки можна представити у вигляді [5, 6]

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

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

Процес деформування згаданого півпростору осадових порід під дією стискувальних субгоризонтальних геотектонічних сил є досить повільним установленим урівноваженим процесом, протягом якого перехідними стадіями можна знехтувати. Отже, повільний нестационарний процес деформування в'язкопружного півпростору осадових порід умовно можна вважати урівноваженим процесом повільних гармонічних (квазістационарних) коливань. У такому разі часову залежність можна враховувати на основі переходу в частотний простір, унаслідок якого диференціювання за часом може бути замінено множенням на $i\omega$, де i – уявна одиниця, ω – частота квазістационарних коливань [11]. Приймаючи характерну циклічну частоту повільного встановленого процесу деформування в'язкопружного півпростору осадових порід за ω , на основі теорії багатошарових в'язкопружних ортотропних оболонок складемо комплексний функціонал Лагранжа [6, 12], що виражає повну механічну енергію осадового півпростору, який перебуває в умовах квазістационарного навантаження, а також під дією сили тяжіння:

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \iint_{h_j, S} [E_{ss}^j \varepsilon_{ss}^{j2} + E_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^{j2} + E_{zz}^j \varepsilon_{zz}^{j2} + 2E_{s\varphi}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j + \\ &+ 2E_{sz}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{zz}^j + 2E_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{zz}^j + 4\tilde{G}_{s\varphi}^j \varepsilon_{ss}^{j2} + 4\tilde{G}_{sz}^j \varepsilon_{ss}^{j2} + 4\tilde{G}_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^{j2} + \\ &+ \omega^2 \rho_j (u_j^2 + v_j^2 + w_j^2) - 2\rho_j g w_j] \left(1 + \frac{z}{R_3}\right)^2 ds d\varphi dz - \\ &- \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (T_s u_0 + T_{s\varphi} v_0 + Q_s w_0) d\varphi - \int_{s_1}^{s_2} (T_{\varphi s} u_0 + T_\varphi v_0 + Q_\varphi w_0) ds. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут R_3 – радіус кривизни Землі; g – прискорення сили тяжіння; S – площа поверхні півпростору осадових порід; h_j – товщина j -го шару осадових порід; ρ_j – густина j -го шару; $\varepsilon_{\alpha\beta}^j$ – компоненти тензора деформацій j -го шару; $E_{\alpha\beta}^j$ – дійсні модулі пружності j -го шару; $\tilde{G}_{\alpha\beta}^j = G_{\alpha\beta}^j + i\omega\eta_{\alpha\beta}^j$ – комплексні компоненти узагальненого модуля зсуву

j -го шару, що складаються з дійсної частини для пружного матеріалу і комплексної частини для лінійно-в'язкого матеріалу; $\eta_{\alpha\beta}^j$ – коефіцієнт динамічної в'язкості j -го шару; $T_\alpha, T_{\alpha\beta}$ – зусилля, які діють на контур півпростору осадових порід у напрямках, дотичних до його поверхні; Q_α – зусилля, які діють на контур півпростору в напрямках, перпендикулярних до його поверхні.

В'язкопружність півпростору осадових порід у цьому випадку трактують на основі в'язкопружної моделі Кельвіна–Фойта [7], коли загальне напруження зсуву за заданих деформацій і швидкостей деформацій зображують у вигляді лінійної суперпозиції пружного і в'язкого напружень. Граничними умовами задачі тут є стискувальні субгоризонтальні зусилля, що діють на контур півпростору. В умовах квазістационарного навантаження дії цих зусиль можуть бути замінені еквівалентним завданням швидкостей на відповідних ділянках контуру.

Метод розв'язання задачі. Для розв'язання наведеної вище квазістационарної в'язкопружної задачі деформування півпростору осадових порід скористаємося методом скінченних елементів, який ґрунтується на варіаційному принципі Лагранжа, що виражає мінімум повної механічної енергії системи [6, 12]:

$$\delta \tilde{W}(u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1) = 0. \quad (3)$$

Для розв'язання варіаційного рівняння (3) застосовують дев'ятивузловий ізопараметричний чотирикутний оболонковий скінченний елемент з криволінійною поверхнею [6]. Як глобальну систему координат, тобто систему, в якій поєднують усі скінченні елементи (на які розбивають область досліджування), використовують криволінійну систему координат (s, φ, z) . Як локальну систему координат, у якій визначають функції форми скінченного елемента і проводять чисельне інтегрування, застосовують допоміжну нормалізовану систему координат (ξ, θ) . Під час побудови функцій форми, що апроксимують в межах кожного елемента складових переміщень: $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$, для виконання умов гладкості та збіжності скінченно-елементного розв'язку, використовують алгебричні та тригонометричні поліноми [6, 12]:

$$\begin{aligned} u_0 &= \sum_{i=1}^9 N_i u_{0i}; \quad v_0 = \sum_{i=1}^9 N_i v_{0i}; \quad w_0 = \sum_{i=1}^9 N_i w_{0i}; \\ u_1 &= \sum_{i=1}^9 N_i u_{1i}; \quad v_1 = \sum_{i=1}^9 N_i v_{1i}; \quad w_1 = \sum_{i=1}^9 N_i w_{1i}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= H_1(\theta)P_1(\xi); \quad N_2 = H_1(\theta)P_2(\xi); \quad N_3 = H_3(\theta)P_2(\xi); \\ N_4 &= H_3(\theta)P_1(\xi); \quad N_5 = H_1(\theta)P_3(\xi); \quad N_6 = H_2(\theta)P_2(\xi); \\ N_7 &= H_3(\theta)P_3(\xi); \quad N_8 = H_2(\theta)P_1(\xi); \quad N_9 = H_2(\theta)P_3(\xi); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 H_1(\theta) &= \frac{\sin(\theta - \theta_2) - \sin(\theta - \theta_3) + \sin(\theta_2 - \theta_3)}{\sin(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_3) + \sin(\theta_2 - \theta_3)}, \\
 H_2(\theta) &= \frac{\sin(\theta - \theta_3) - \sin(\theta - \theta_1) + \sin(\theta_3 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_3) - \sin(\theta_2 - \theta_1) + \sin(\theta_3 - \theta_1)}, \\
 H_3(\theta) &= \frac{\sin(\theta - \theta_1) - \sin(\theta - \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_3 - \theta_1) - \sin(\theta_3 - \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_2)}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$H_j(\theta_k) = \begin{cases} 1, & j=1 \\ 0, & j \neq 1 \end{cases}$$

$$P_1(\xi) = \frac{1}{2}\xi(\xi-1); \quad P_2(\xi) = \frac{1}{2}\xi(\xi+1); \quad P_3(\xi) = 1 - \xi^2.$$

Алгоритм скінченно-елементного розв'язання варіаційної задачі (3) полягає у такому [6].

На першому етапі в локальній системі координат (ξ, θ) апроксимуємо усі компоненти переміщень і деформацій, що входять у функціонал Лагранжа (2) і є функціями від складових переміщень: $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$, на основі формул (4–6). У цій самій системі проводимо аналітичне інтегрування усередині кожного шару оболонки, а потім підсумовування за всім пакетом шарів оболонки.

На другому етапі здійснюємо варіювання функціонала (2) за всіма вузловими складовими переміщеннями: $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$, і прирівнюємо відповідні варіації до нуля. В результаті для кожного скінченного елемента одержуємо лінійну комплексну алгебричну систему, що складається з 54 рівнянь.

На третьому етапі у глобальній системі координат (s, φ, z) підсумовуємо локальні лінійні системи комплексних алгебричних рівнянь за всіма скінченими елементами, на які розбито оболонку, і формуємо глобальну систему лінійних комплексних рівнянь. Подвійні інтеграли за площею оболонки обчислюємо чисельним інтегруванням на основі квадратурних формул Гауса [12].

Розв'язуємо глобальну систему лінійних алгебричних рівнянь за допомогою чисельного методу Гауса [12]. В результаті визначаємо комплексні складові переміщень: $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$ в усіх вузлових точках скінченно-елементної сітки.

За знайденими вузловими складовими переміщень можуть бути визначені комплексні квазістаціонарні компоненти переміщень, швидкостей, деформацій, напружень та інші величини у довільній точці скінченного елемента, тобто у будь-якій точці півпростору осадових порід. Для переходу з частотного квазістаціонарного простору в часовий простір необхідно виділити реальну частину від отриманих комплексних значень.

Моделювання процесів великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори. Для моделювання процесів великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори розглянемо деформування прямокутних площин

осадового шару різного масштабу (від 1000 км до розмірів порядку ширини осадового шару), на які у поздовжньому напрямку діють квазістаціонарні стискувальні субгоризонтальні геотектонічні зусилля. Дії цих зусиль еквівалентні задаванню на одній з поперечних сторін площини деякої характерної швидкості руху в поздовжньому напрямку, при цьому протилежна сторона площини залишається жорстко закріпленою. За характерну швидкість геотектонічного стискання візьмемо значення 1 дм/рік [8]. Зауважимо, що на розглянуту площину осадового шару діє сила тяжіння. Прийнемо середній, характерний для багатьох осадових басейнів [9] склад в'язкопружних осадових порід: верхній шар завтовшки 2 км складається з глинистих порід; середній шар завтовшки 6 км – з пісковиків; нижній шар завтовшки 2 км – з вапнякових порід. На підставі даних робіт [1, 3, 4] задамо для глинистих відкладів, пісковиків і вапнякових порід відповідні механічні властивості: густина – 2300, 2400, 2500 (кг/м³); модуль Юнга – 2,0; 3,5; 7,0 ($\times 10^{10}$ Па); модуль зсуву – 1,4; 2,0; 2,5 ($\times 10^{10}$ Па); коефіцієнт Пуассона – 0,07; 0,25; 0,275; динамічна в'язкість – 10^7 , $1,4 \cdot 10^{20}$; $2,56 \cdot 10^{20}$ (Па·с). Перед тим як перейти до реалістичних моделей великомасштабного складкоутворення, з метою апробації представленої тривимірної в'язкопружної варіаційної скінченно-елементної методики, порівняємо аналітичні й експериментальні результати про залежність товщини лінійно-в'язкої складки від довжини хвилі, які наведені в роботах [15, 18] (рис. 1). На рис. 2 залежно від товщини шару показано процес великомасштабного складкоутворення під дією поздовжнього горизонтального

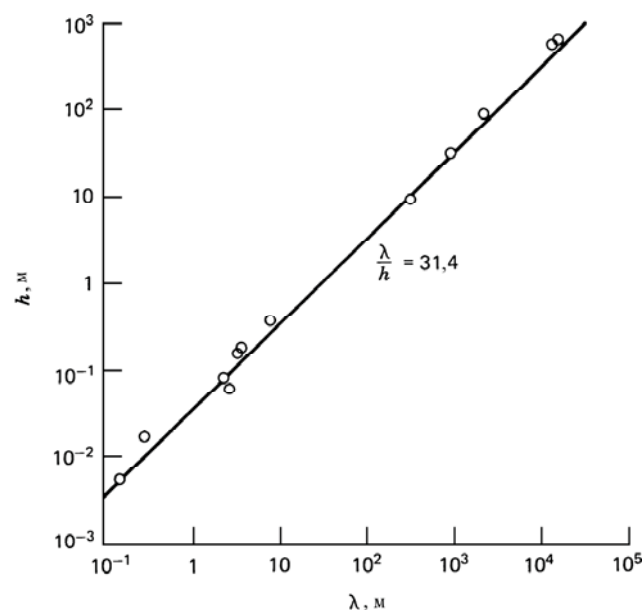


Рис. 1. Залежність товщини лінійно-в'язкої складки від довжини хвилі. Пряма відповідає аналітичному розв'язку, наведеному у праці [15]. Кружки – експериментальні дані дослідів з лінійно-в'язкою глиною [18]

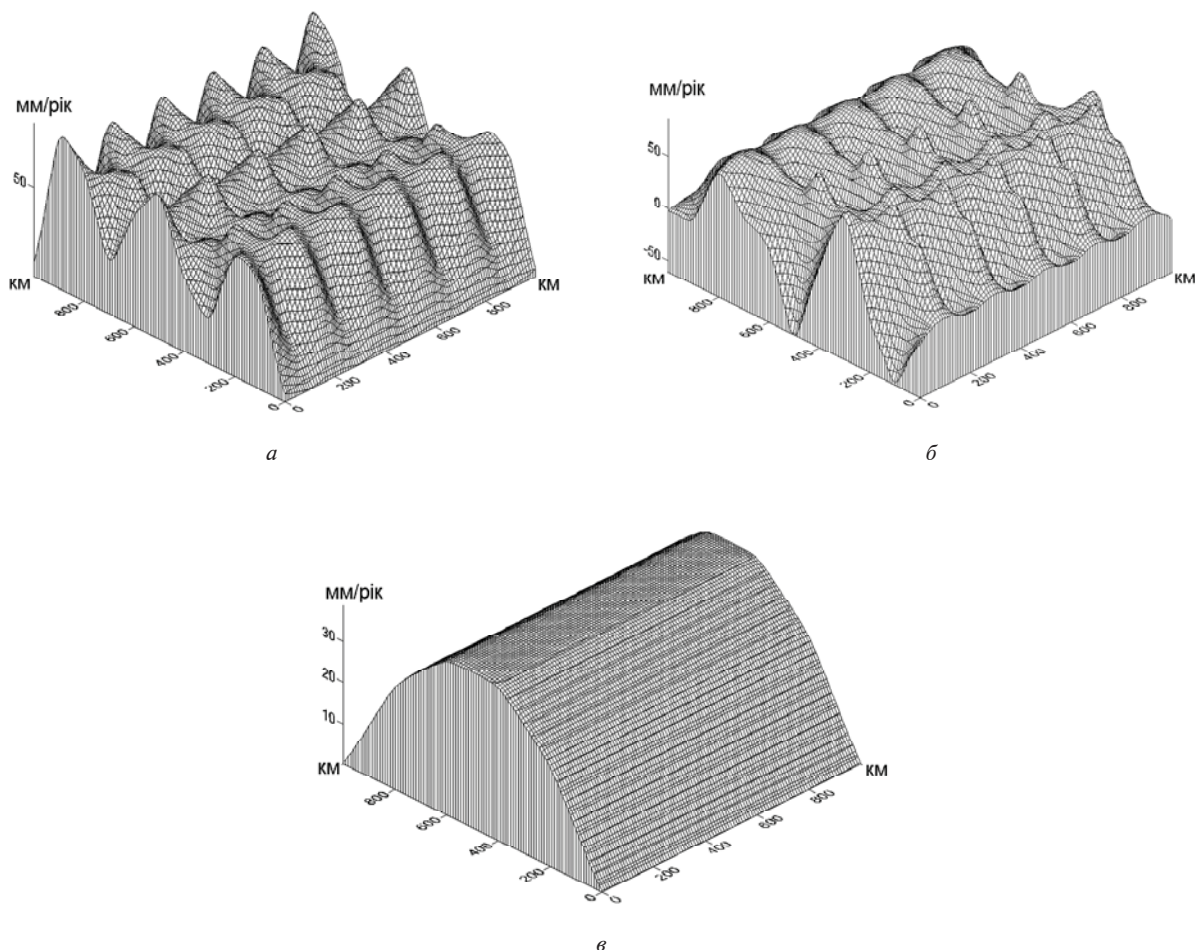


Рис. 2. Процес утворення великомасштабних складок у шарі, який складається з лінійно-в'язкої глини, під дією поздовжнього горизонтального стискання: *а* – товщина шару 10 км; *б* – 15 км; *в* – 30 км

стискання. Зазначимо, що в'язкопружна модель Кельвіна–Фойта описує лінійно-в'язкі процеси як окремий випадок за відсутності пружних напружень зсуву [7]. У статтях [10, 14] зазначено, що збільшення ступеня тріщинуватості у в'язкопружних матеріалах приводить до пропорційного зниження пружних модулів у цих матеріалах. На рис. 3 показано процес великомасштабного складкоутворення під дією поздовжнього горизонтального геотектонічного стискання у в'язкопружному осадовому шарі порід з різним ступенем тріщинуватості, який приводить до виникнення анізотропії пружних властивостей осадових порід. На рис. 4 представлений процес великомасштабного складкоутворення в ізотропному осадовому шарі під дією поздовжнього геотектонічного стискання у різних напрямках. На рис. 5 показано процес утворення антиклінорії на прямокутних площинах змінання осадових порід різних форм і розмірів під дією поздовжнього горизонтального геотектонічного стискання, на рис. 6 – процес утворення синклінорії за аналогічних умов геотектонічного стискання.

Результати великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі, який складається з лінійно-в'язкої глини (див. рис. 2), узгоджують-

ся з відомими результатами про залежність товщини лінійно-в'язкої складки від довжини хвилі (див. рис. 1). Дійсно, на рис. 2 видно, що відношення між довжиною хвилі складки і її товщиною приблизно дорівнює 31,4. Аналіз результатів, представлених на рис. 3, показує, що швидкість утворення великомасштабних складок в осадовому шарі земної кори залежить від ступеня тріщинуватості цих порід, який приводить до появи анізотропних пружних властивостей цих порід. Збільшення ступеня тріщинуватості спричинює незначне зменшення швидкості росту складок. На рис. 4 видно, що швидкість утворення великомасштабних складок в осадовому шарі земної кори залежить від напрямку дії стискувальних геотектонічних зусиль. Відхилення зусиль від горизонтального напрямку зумовлює помітне зменшення швидкості росту складок. Згідно з аналізом результатів, представлених на рис. 5 і 6, процеси утворення антикліноріїв і синкліноріїв в осадовому шарі земної кори, а також швидкості цих процесів суттєво залежать від форм і розмірів площин змінання осадових порід. Так, на рис. 5 видно, що процес утворення антикліноріїв є характерним для площин змінання великих масштабів з поздовжнім розміром від 1000 км і більше

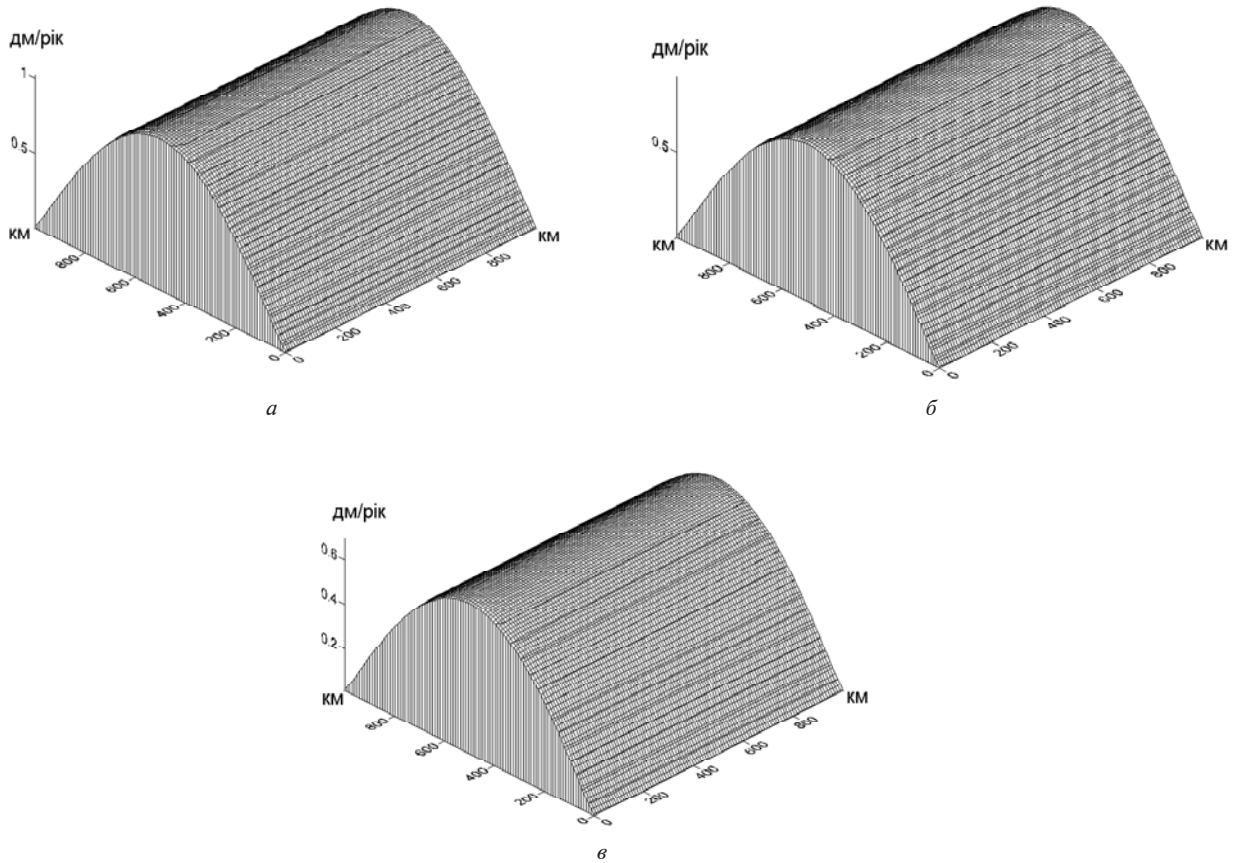


Рис. 3. Процес великомасштабного складкоутворення у в'язкопружних осадових шарах з різним ступенем тріщинуватості порід під дією поздовжнього горизонтального стискання: *а* – монолітні ізотропні осадові породи; *б* – послаблення пружних властивостей порід у горизонтальних напрямках у 5 разів; *в* – те саме у 10 разів

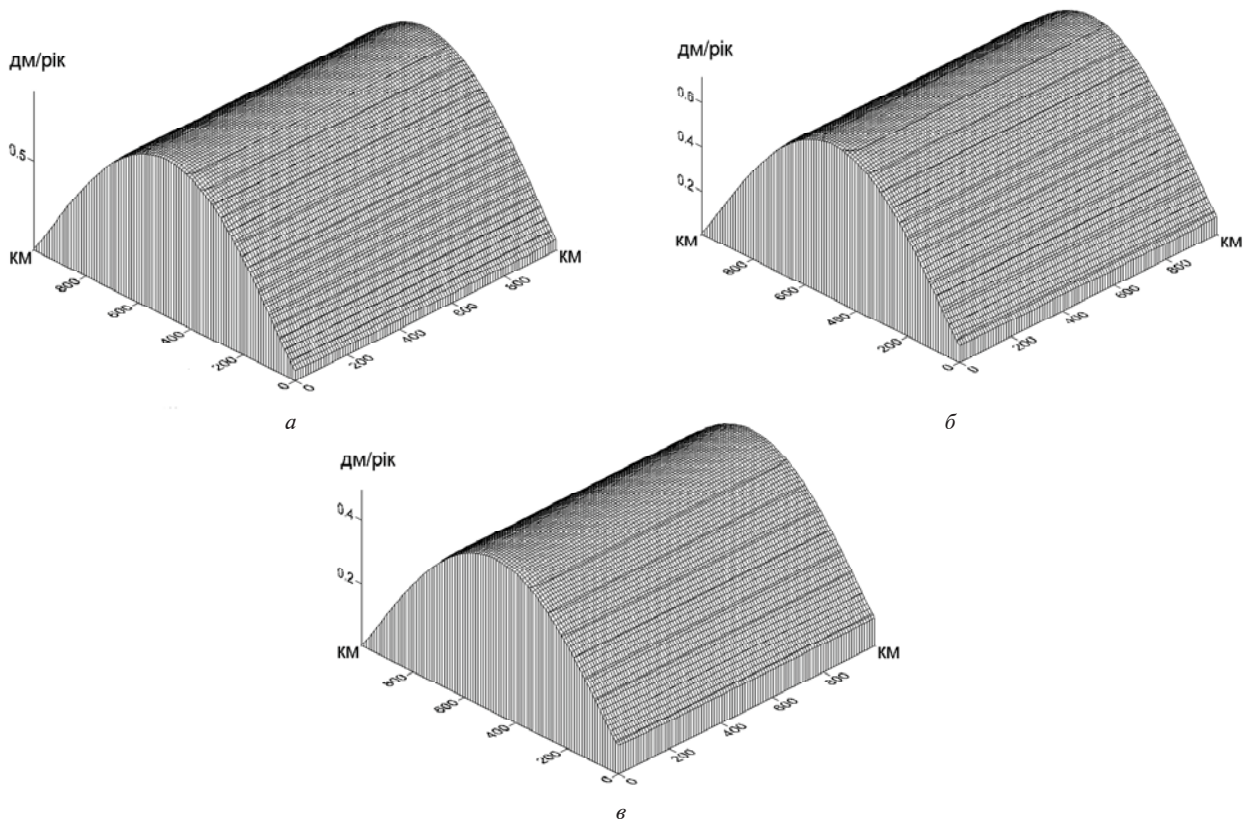


Рис. 4. Процес великомасштабного складкоутворення в ізотропних в'язкопружних осадових шарах порід під дією поздовжнього стискання в напрямках до горизонту: *а* – 30°; *б* – 45°; *в* – 60°

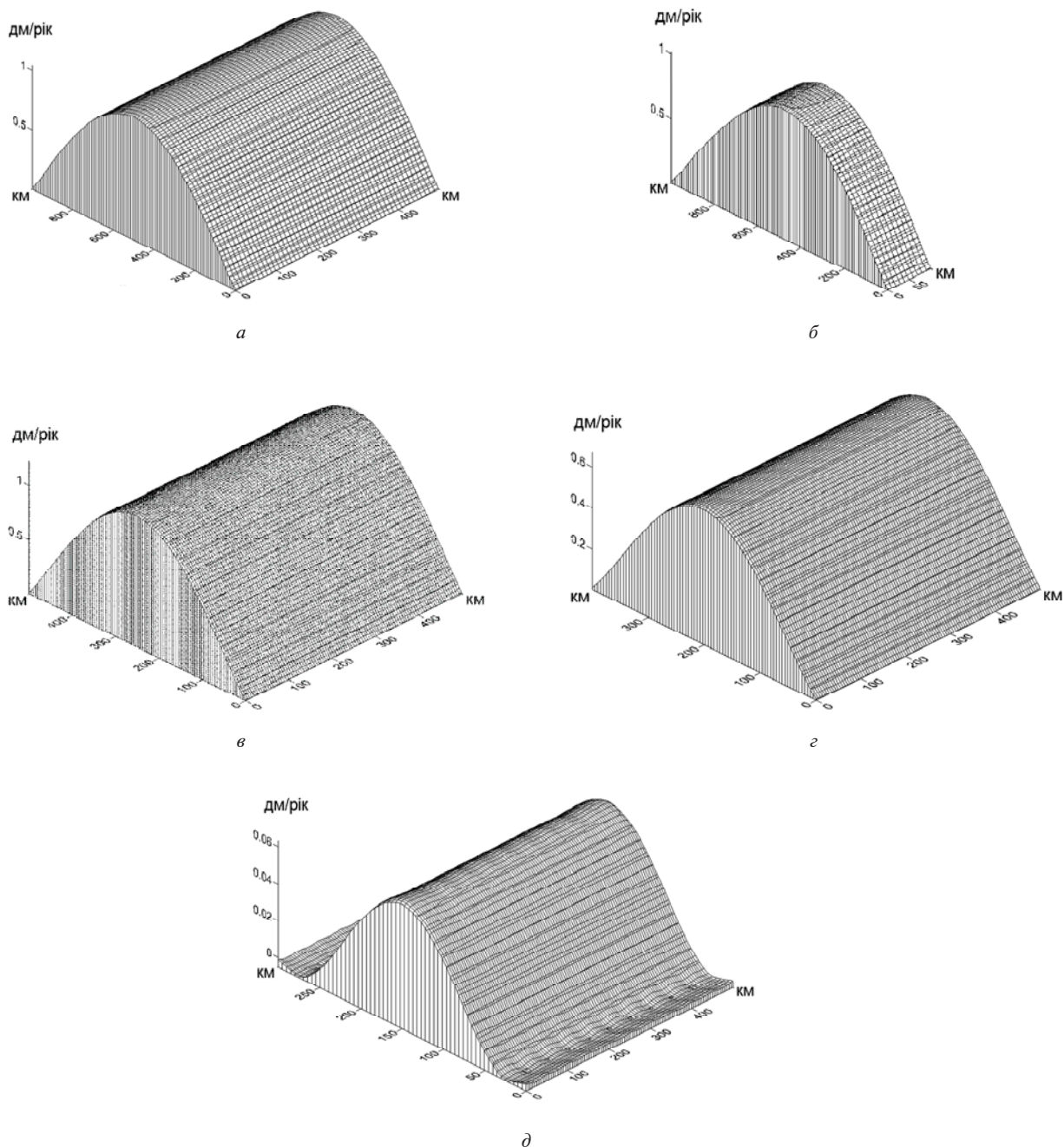
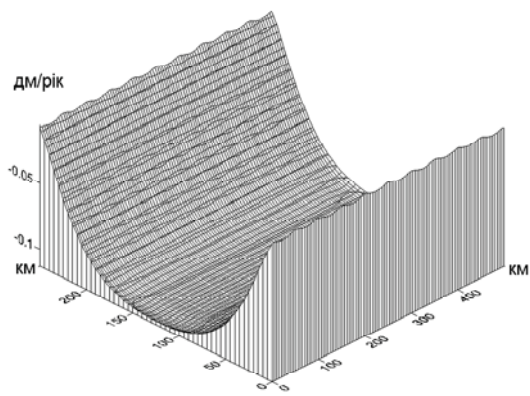


Рис. 5. Процес утворення антиклінорію на прямокутних площинах змінання осадових порід під дією поздовжнього горизонтального стискання

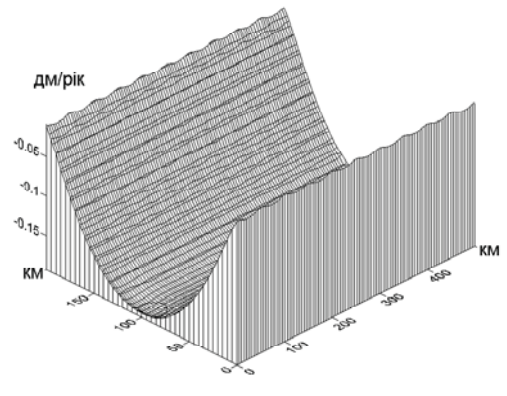
до розміру, який приблизно дорівнює 270 км. При цьому поперечні розміри площини змінання помітно не впливають на швидкість росту антиклінорію. У міру наближення до критичного поздовжнього розміру площини ~ 270 км швидкість росту антиклінорію поступово знижується до нуля. Процес утворення синклінорію починається після подолання критичного значення ~ 270 км (див. рис. 6). При цьому зі зменшенням поздовжнього розміру площини змінання швидкість росту синклінорію зростає від нуля до деякого максимального значення. Потім з наближенням поздовжнього розміру площини змінання до нуля швидкість росту синклінорію поступово зни-

жується до нуля. На рис. 6, в–д видно, що, на відміну від формування антиклінорію, швидкість росту синклінорію залежить також від поперечних розмірів площини змінання осадових порід. Зменшення цих розмірів приводить до зменшення швидкості росту синклінорію.

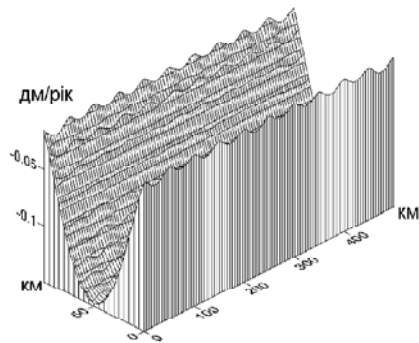
Висновки. Загальний аналіз результатів чисельного моделювання процесу великомасштабного складкоутворення в осадовому шарі земної кори показує, що швидкості росту і форми складок залежать від ступеня тріщинуватості осадових порід, напрямків дії стискальних геотектонічних зусиль, а також від форм і розмірів площин змінання осадових порід. Так, збільшення ступеня тріщинува-



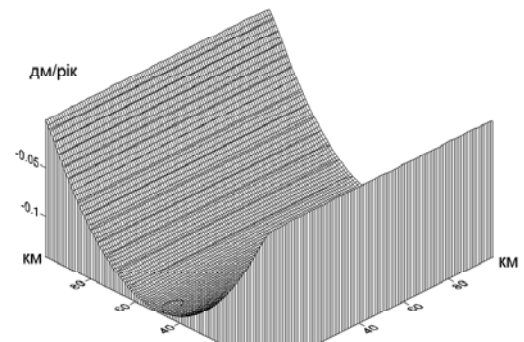
a



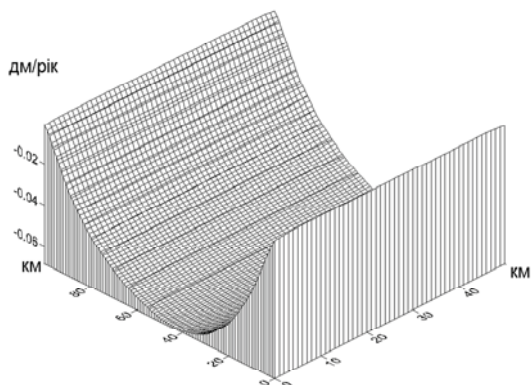
б



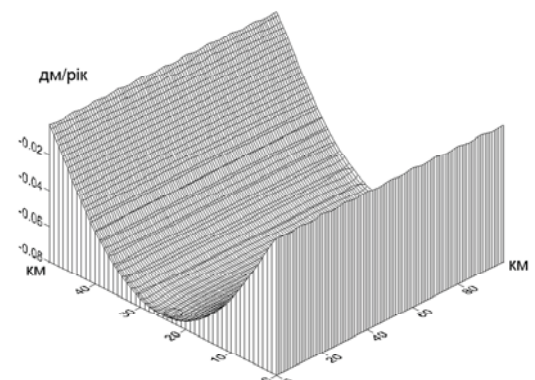
в



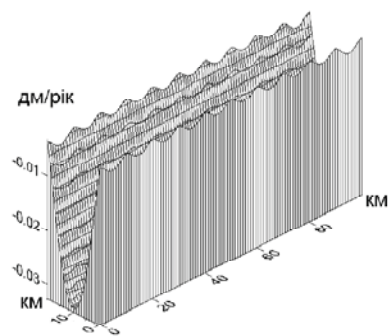
г



д



е



ж

Рис. 6. Процес утворення синклінію на прямокутних площинах змінання осадових порід під дією поздовжнього горизонтального стиснення

тості осадових порід приводить до зниження швидкості росту складок. Відхилення напрямку стискальних геотектонічних зусиль від горизонтального спричинює зменшення швидкості росту складок. Процеси утворення антикліноріїв і синкліноріїв в осадовому шарі земної кори, а також швидкості цих процесів суттєво залежать від форм і розмірів площин зминання осадових порід. Так, процес утворення антикліноріїв є характерним для площин зминання великих розмірів. Зі зменшенням розміру площини в напрямку дії стискальних сил до деякої характерної величини швидкість росту антиклінорію знижується до нуля і відбувається якісний перехід до процесу формування синклінорію. При цьому швидкість росту синклінорію за подальшого зменшення розміру площини зростає від нуля до деякого максимального значення, а потім зменшується до нуля. В разі процесу утворення антиклінорію розміри площини зминання осадових порід у напрямку, поперечному до дії геотектонічних сил, помітно не впливають на швидкість цього процесу. Однак за формування синклінорію зменшення поперечних розмірів площини зминання осадових порід зумовлює зниження швидкості вказаного процесу.

Порівняння результатів складкоутворення, які отримані на основі представленої тривимірної в'язкопружної скінченно-елементної методики для лінійно-в'язкого осадового шару, з відомими аналітичними і експериментальними результатами лінійно-в'язкого складкоутворення [15, 18] демонструє достовірність отриманих результатів і ефективність зазначеної методики для розв'язання задач геотектоніки.

Отримані результати можуть бути використані для дослідження процесів орогенезу і пов'язаних з ним процесів формування і змінювання великих геоструктур. У подальшому становить інтерес використання запропонованої методики для моделювання процесів середньомасштабного складкоутворення в розрізах різних порід земної кори.

1. *Воларович М.П.* Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах / М.П. Воларович. – М.: Недра, 1978. – 237 с.
2. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики / М.В. Гзовский – М.: Наука, 1975. – 536 с.
3. *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.
4. *Дортман Н.Б.* Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика / Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1976. – 527 с.

5. *Карнаухов В.Г.* Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек / В.Г. Карнаухов, И.Ф. Киричок. – Киев: Наук. думка, 1986. – 221 с.
6. *Козлов В.И.* Колебания многослойных ортотропных оболочек вращения с конечной сдвиговой жёсткостью / В.И. Козлов, М.В. Лубков // Труды 15-й науч. конф. молодых учёных Ин-та механики АН УССР, Киев, 1990. – Ч. 2 – Деп. в ВИНТИ 26.10.90, № 3802-В 90, С. 439–445.
7. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
8. *Кукал З.* Скорость геологических процессов / З. Кукал. – М.: Мир, 1987. – 245 с.
9. *Лубков М.В.* Про вплив сучасних розломно-блокових рухів Дніпровсько-Донецької западини на гравітаційне поле / М.В. Лубков // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2012. – Вип. 9. – С. 117–126.
10. *Ляховский В.А.* Поведение вязкоупругой среды с микроразрывами при растяжении и сдвиге / В.А. Ляховский, В.П. Мясников // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1985. – Т. 4. – С. 28–35.
11. *Мориц Г.* Вращение Земли: теория и наблюдения / Г. Мориц, А. Мюллер. – Киев: Наук. думка, 1992. – 512 с.
12. *Образцов И.Ф.* Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – М.: Высш. шк., 1985. – 329 с.
13. *Пелех Б.Л.* Теория оболочек с конечной сдвиговой жёсткостью / Б.Л. Пелех. – Киев: Наук. думка, 1973. – 248 с.
14. *Спиртус В.Б.* Особенности крипа и хрупкого разрушения при сдвиговой деформации вязкоупругой повреждённой среды / В.Б. Спиртус, Е.В. Савчук // Геофиз. журн. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 123–129.
15. *Тёркот Д.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Тёркот, Д. Шуберт. – М.: Мир, 1985. – 730 с.
16. *Хаин В.Е.* Геотектоника с основами геодинамики / В.Е. Хаин, М.Г. Ломизе. – М.: Книжный дом “Университет”, 2005. – 560 с.
17. *Эз В.В.* Складкообразование в земной коре / В.В. Эз – М.: Недра, 1985. – 240 с.
18. *Currie J.B.* Development of folds in sedimentary strata / J.B. Currie, H.W. Patnode, R.P. Trump // Geol. Soc. Amer. Bull. – 1962. – Vol. 73, № 6. – P. 655–673.
19. *Gerbault M.* Do faults trigger folding of the lithosphere? / M. Gerbault, E.V. Burov, A.N. Poliakov, M. Daignieres // Geophys. Res. Lett. – 1999. – Vol. 26, № 2. – P. 271–274.
20. *Ghosh S.K.* Interfering folds in constructional deformation / S.K. Ghosh, D. Khan, S. Sengupta // Journal of Structural Geology. – 1995. – Vol. 17, № 10. – P. 1361–1373.
21. *Muhehaus H.B.* A director theory for visco-elastic folding instabilities in multilayered rock / H.B. Muhehaus, F. Dufour, L. Moresi, B. Hobbs // Inter. J. solids and structures. – 2002. – Vol. 39, № 13–14. – P. 3675–3691.
22. *Schmid D.W.* Evolution of large amplitude 3D fold patterns: A FEM study / D.W. Schmid, M. Dabrowski, M. Krotkiewski // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2008. – Vol. 171. – P. 400–408.
23. *Shmalholz S.M.* Buckling versus folding: importance of viscoelasticity / S.M. Shmalholz, Y. Podladchikov // Geophys. Res. Lett. – 1995. – Vol. 26, № 17. – P. 2641–2644.

ПРОЦЕСС КРУПНОМАСШТАБНОГО СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ В ОСАДОЧНОМ СЛОЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

М.В. Лубков

Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, Полтава 36029, Украина, e-mail: mikhail.lubkov@mail.ru

На основе вариационной конечно-элементной методики для ортотропных вязкоупругих многослойных оболочек, которые находятся в условиях квазистационарного нагружения, проведено моделирование процессов крупномасштабного складкообразования в осадочном слое земной коры. Установлено, что увеличение степени трещиноватости осадочных пород и отклонение сжимающих геотектонических усилий от горизонтального направления приводят к снижению скорости роста складок. Процессы образования антиклинориев и синклинориев в осадочном слое земной коры, а также скорости этих процессов существенно зависят от форм и размеров плоскостей смятия осадочных пород.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, процессы складкообразования, осадочные породы.

PROCESS OF LARGE SCALE FOLD FORMING IN THE CRUST SEDIMENTARY LAYER

M.V. Lubkov

Poltava Gravimetric Observatory within S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine,
Myasoedova St, 27/29, Poltava 36029, Ukraine, e-mail: mikhail.lubkov@mail.ru

Based on the finite element method of three dimensional visco-elastic variation in the orthotropic foliated shells proximity, where shells are in quasi stationary loading process, the authors carried out, modeling of large scale fold forming processes in the crust sedimentary layer. The presented method allows us to calculate heterogeneities of the considered geological structures of both geometrical and rheological character. As a result, it is found, that fold velocities growth and fold forms forming depend on sedimentary rocks fracturing degree and on the deviation of the constringent geotectonic forces from horizontal direction, as well as on forms and sizes of the sedimentary rocks contortion areas. Consequently, sedimentary rocks fracturing degree leads to decreasing of the folds growth velocities. Deviation of the constringent geotectonic forces from horizontal direction also leads to their decreasing. Anticlinorium and synclinorium forming processes, and also velocities of these processes greatly depend on forms and sizes of the sedimentary rocks contortion areas. Moreover, anticlinorium forming process is typical for contortion areas of big sizes. As the contortion area size decreases in the direction of compressing forces to some characteristic value, anticlinorium growth velocity decreases to zero, and qualitative transition to synclinorium forming process takes place. Besides, as the respective contortion area size decreases, synclinorium growth velocity increases from zero to some maximum value, and then decreases to zero. In the case of anticlinorium forming, sedimentary contortion area sizes in transversal direction relatively to geotectonic forces action do not effectively influence the process velocity. But In the case of synclinorium forming, sedimentary contortion area size shortening leads to decreasing of the process velocity. The obtained information can be used for orogeny processes explorations as well as large geostructures forming and changing processes.

Keywords: computer modeling, variation finite element method, three dimensional visco-elastic model, fold forming processes, crust sedimentary layer.

References:

1. Volarovich M.P. *Spravochnik po fizicheskim svoystvam mineralov i gornyx porod pri vysokikh termodinamicheskikh parametrakh* [Handbook on physical properties of minerals and rocks at high thermodynamic parameters]. Moscow, Nedra, 1978, 237 p.
2. Gzovskiy M.V. *Osnovy tektonofiziki* [Base of tectonophysics]. Moscow, Nauka, 1975, 536 p.
3. Grigor'ev A.S., Volovich I.M., Mikhaylova A.V. *Voprosy interpretatsii sovremennykh dvizheniy zemnoy poverkhnosti, obuslovlennykh dvizheniyami fundamenta osadochnogo chekhla* [Interpretation questions of the modern earth surface movements, due to sedimentary layer fundament movements]. *Trudy "Sovremennye dvizheniya zemnoy kory. Morfostruktury, razlomy, seysmichnost"* [Proc. "Recent crust movements. Morphostructures, faults, seismicity"]. Moscow, Nauka, 1987, pp. 9-16.
4. Dortman N.B. *Fizicheskie svoystva gornyx porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika): Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks and useful fossils (petrophysics): Handbook of geophysics]. Moscow, Nedra, 1976, 527 p.
5. Karnaukhov V.G., Kirichok I.F. *Svyazannye zadachi teorii vyazkouprugikh plastin i obolochek* [Connected problems of the visco-elastic plates and shells]. Kyiv, Naukova dumka, 1986, 221 p.
6. Kozlov V.I., Lubkov M.V. *Kolebaniya mnogoslownykh ortotropnykh obolochek vrashcheniya s konechnoy sdvigovoy zhestkost'yu* [Oscillations of the foliated orthotropic shells of revolution with calculating of shift rigidity]. *Trudy 15 nauchnoy konferencii molodykh uchjonykh Instituta mehaniki Akademii Nauk Ukrainskoj SSR* [Proc. of 15 sci. conf. of young scientists of Inst. of mechanics AS USSR]. Kyiv, 1990, pt. 2, Dep. in VINITI 26. 10. 90, no. 3802-B 90, pp. 439-445.
7. Kristensen R. *Vvedenie v teoriyu vyazkouprugosti* [Introduction to theory of visco-elasticity]. Moscow, Mir, 1974, 338 p.
8. Kukul Z. *Skorost' geologicheskikh protsessov* [Velocities of geological processes]. Moscow, Mir, 1987, 245 p.

9. Lubkov M.V. *Pro vplyv suchasnykh rozlomno-blokovykh rukhiv Dniprovs'ko-Donets'koyi zapadyny na hravitatsiyne pole* [About influence of modern fault block movements of Dnepr Donetsk depression on gravity field]. Trudy "Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky" [Proc. "Theoretical and practical aspects of geoinformatics"]. Kyiv, 2012, issue 9, pp. 117-126.
10. Lyakhovskiy V.A., Myasnikov V.P. *Povedenie vyazkoupругoy sredy s mikronarusheniyami pri rastyazhenii i sdvige* [Behavior of visco-elastic environment with micro violations at stretching and shifting]. *Izv. AN SSSR, Ser. Fizika Zemli* [Proc. of AS USSR, Ser. Physics of the Earth]. 1985, vol. 4, pp. 28-35.
11. Morits G., Myuller A. *Vrashchenie Zemli: teoriya i nablyudeniya* [Rotation of the earth: theory and observations]. Kyiv, *Naukova dumka*, 1992, 512 p.
12. Obratsov I.F., Savel'ev L.M., Khazanov Kh.S. *Metod konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki letatel'nykh apparatov* [Finite element method in the building mechanics of flying devices problems]. Moscow, *High school*, 1985, 329 p.
13. Pelekh B.L. *Teoriya obolochek s konechnoy sdvigovoy zhestkost'yu* [Theory of shells with finite shift rigidity]. Kyiv, *Naukova dumka*, 1973, 248 p.
14. Spirtus V.B., Savchuk E.V. *Osobennosti kripa i khrupkogo razrusheniya pri sdvigovoy deformatsii vyazkoupругoy povrezhdennoy sredy* [Creep and brittle destruction characteristics at the shift deformation of visco-elastic defective environment]. *Geofizicheskij zhurnal* [Geophysical Journal], 2006, vol. 28, no. 2, pp. 123-129.
15. Terkot D., Shubert D. *Geodinamika. Geologicheskie prilozheniya fiziki sploshnykh sred* [Geodynamics. Geological supplements of continuum physics]. Moscow, *Mir*, 1985, 730 p.
16. Khain V.E., Lomize M.G. *Geotektonika s osnovami geodinamiki* [Geotectonics with bases of geodynamics]. Moscow, *Knizhny dom universitet*, 2005. – 560 p.
17. Ez V.V. *Skladkoobrazovanie v zemnoy kore* [Fold forming in the earth crust]. Moscow, *Nedra*, 1985, 240 p.
18. Currie J.B., Patnode H.W., Trump R.P. Development of folds in sedimentary strata. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1962, vol. 73, no. 6, pp. 655-673.
19. Gerbault M., Burov E.B., Poliakov A.N., Daignieres M. Do faults trigger folding of the lithosphere? *Geophys. Res. Letters*, 1999, vol. 26, no. 2, pp. 271-274.
20. Ghosh S.K., Khan D., Sengupta S. Interfering folds in constructional deformation. *Journal of Structural Geology*, 1995, vol. 17, no. 10, pp. 1361-1373.
21. Muhehaus H.B., Dufour F., Moresi L., Hobbs B. A director theory for visco-elastic folding instabilities in multilayered rock. *Inter journal of solids and structures*, 2002, vol. 39, no.13-14, pp. 3675-3691.
22. Schmid D.W., Dabrowski M., Krotkiewski M. Evolution of large amplitude 3D fold patterns: A FEM study. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, vol. 171, pp. 400-408.
23. Shmalholz S.M., Podladchikov Y. Buckling versus folding: importance of viscoelasticity. *Geophys. Res. Letters*, 1995, vol. 26, no. 17, pp. 2641-2644.

*Надійшла до редакції 10.01.2014 р.
Received 10/01/2014*