

2. *Visbeck M., James W. Hurrell and Yochanan Kushnir // First Intern. conf. on the North Atlantic Oscillation (NAO). Exchanges, March 2001. – Exchanges. – 2001. – 6, No 1.*
3. *Кузин В. И., Мусеев В. М. Моделирование реакции океана на атмосферные воздействия в период Эль-Ниньо // Тр. Междунар. конф., посвященной 75-летию акад. Г. И. Марчука и 20-летию Ин-та вычисл. математики (Москва, июнь 2000). – Москва, 2000. – Т. 2.*
4. *Смирнов Н. П., Саруханян Э. И., Романова И. В. Циклические центры действия атмосферы Южного полушария и изменение климата. – Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2005. – 217 с.*
5. *Школьний Є. П., Лоева І. Д., Гончарова Л. Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації. – Одеса: Вид-во ТЕС, 1999. – 600 с.*

Одесский государственный экологический университет

Поступило в редакцию 23.05.2007

УДК 550.34

© 2008

Член-корреспондент НАН України **В. А. Даниленко, С. В. Микуляк**

## **Комп'ютерне моделювання процесів динамічного деформування структурованого геофізичного середовища**

*We have carried out the computer simulation of the dynamic deformation of a discrete medium by using two models: **I** all discrete elements have the identical size **II** the medium is formed by three-size elements. We have got the diagrams of deformation of the massifs at different speeds of loading and different amplitudes, as well as those under the action of multiple loadings. The characteristic properties of all diagrams are the nonlinearity, hysteresis, and the dependence of the diagram shape on the deforming speed: if the loading duration increases, the curvature of a deformation diagram increases too, but the hysteresis area decreases. These characteristic properties of deformation diagrams are typical of such structured rocks as sandstone, limestone, and others.*

Некласичність поведінки геоматеріалів при їх динамічному деформуванні підтверджується багатьма експериментальними дослідженнями, наведеними у статтях [1, 2]. Як показують детальні експерименти, з використанням нейтронно-дифракційної методики ця особливість поведінки геоматеріалів зумовлена, в першу чергу, їх структурованою організацією на мезорівні [3], тобто на рівні взаємодії структурних елементів — кристалів, зерен, гранул, блоків тощо. Застосування дискретних моделей для опису динамічного деформування структурованих гірських порід дає змогу якісно описати такі неklasичні особливості їх діаграм деформування, як нелінійність, наявність гістерезису, дилатансії, а також залежність деформаційних характеристик від швидкості деформування. У даному повідомленні наведено результати комп'ютерного моделювання динамічного деформування структурованого геофізичного середовища та побудовано усереднені діаграми деформування для двох дискретних моделей.

Структуроване середовище моделюватимемо системою жорстких блоків, які взаємодіють між собою за законом Герца. Будемо розглядати дві моделі: **I** — усі блоки мають однаковий розмір, **II** — система складається з блоків трьох розмірів, тобто ми розглядаємо масив

блоків, сформований трьома ансамблями частинок, з однаковими розмірами в кожному ансамблі.

Взаємодія між блоками залежить від природи поверхонь взаємодіючих блоків, а також від величини зближення центрів блоків. Для  $i$ -го та  $j$ -го блоків величину взаємного зближення  $\delta_{ij}$  обчислюємо як

$$\delta_{ij} = 2r - \sqrt{\sum_{k=1,2} (x_i^k - x_j^k)^2}, \quad (1)$$

де  $x_i^k, x_j^k$  — координати центрів  $i$ -го та  $j$ -го блоків. Сила  $\mathbf{F}_{ij}$  може бути розкладеною на силу  $\mathbf{F}_{ij}^n$ , направлену уздовж лінії, що з'єднує центри двох блоків та на силу  $\mathbf{F}_{ij}^s$ , направлену перпендикулярно до цієї лінії. Сила  $\mathbf{F}_{ij}^n$  залежить від величини  $\delta_{ij}$  нелінійно

$$\mathbf{F}_{ij}^n = C_n \delta_{ij}^\alpha \mathbf{n}_{ij}, \quad (2)$$

де  $C_n$  — константа, яка, згідно з законом Герца, визначається як

$$C_n = \frac{\sqrt{2}E}{3(1-\nu^2)} \left( \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \right)^{-1/2}. \quad (3)$$

Тут  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коефіцієнт Пуассона;  $\alpha = 3/2$ ;  $\mathbf{n}_{ij}$  — одиничний вектор, направлений уздовж лінії, що з'єднує центри двох блоків. Тангенціальна сила  $\mathbf{F}_{ij}^s$  залежить від відносного зсуву уздовж лінії, перпендикулярної до вектора  $\mathbf{n}_{ij}$ , зокрема

$$\frac{d\mathbf{F}_{ij}^s}{dt} = -C_s \mathbf{w}_{ij} \quad \text{при} \quad F_{ij}^s < C_k F_{ij}^n \quad (4)$$

та

$$\mathbf{F}_{ij}^s = C_k \frac{\mathbf{w}_{ij}}{w_{ij}} F_{ij}^n, \quad (5)$$

де  $F_{ij}^n$  обчислене за формулою (4) при  $F_{ij}^s \geq C_k F_{ij}^n$ . У рівняннях (4) та (5)  $\mathbf{w}_{ij}$  — відносна швидкість  $i$ -го та  $j$ -го блоків:

$$\mathbf{w}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j - \mathbf{n}_{ij}((\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)\mathbf{n}_{ij}) + (2r - \delta_{ij})[\mathbf{n}_{ij} \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\omega}_j)], \quad (6)$$

де  $\mathbf{v}_i$  і  $\boldsymbol{\omega}_i$  — лінійна та кутова швидкості  $i$ -го блока;  $C_s$  — коефіцієнт тертя.

Рух  $i$ -го блока задається системою диференціальних рівнянь

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{F}_{ij}, \quad (7)$$

$$I_i \frac{d^2 \Phi_i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{M}_{ij}, \quad (8)$$

$\mathbf{x}_i, \Phi_i, m_i$  й  $I_i$  — відповідно радіус-вектор, кутова координата, маса й момент інерції  $i$ -го блока;  $\mathbf{M}_{ij}$  — момент сили, що діє на  $i$ -й блок з боку  $j$ -го блока. Підсумовування проводиться для всіх  $j$ -х блоків, які контактують з блоком  $i$ . З огляду на обмежені комп'ютерні ресурси,

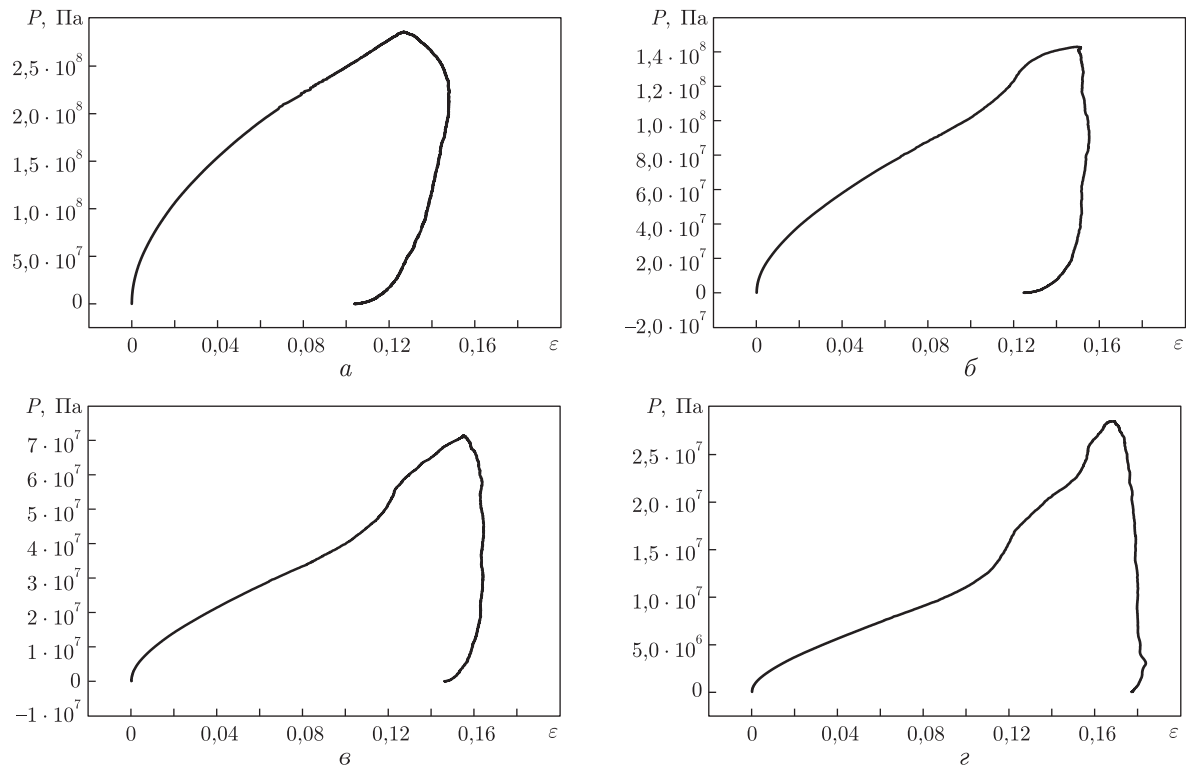


Рис. 1. Діаграми деформування  $P(\varepsilon)$ . Тривалість імпульсного навантаження:  $a - t_{\max} = 2,21$  мс;  $b - t_{\max} = 4,42$  мс;  $v - t_{\max} = 8,83$  мс;  $z - t_{\max} = 22,1$  мс. Розміри блоків однакові

ми розглядаємо двовимірну задачу. Система рівнянь (7), (8) розв'язується чисельно, за допомогою алгоритму Верлета [4]. У розрахунках вибиралися такі константи:  $E = 2,0 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0,29$ ,  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_s = 2,7 \cdot 10^6$  н/м,  $C_k = 0,1$ .

Розглянемо спочатку модель **I**, в якій блоки мають однаковий розмір ( $r = 0,378$  см). Массив складається із 10950 елементів. На поршень діє сила, яка змінюється за часом:

$$f = f_0 \sin^2\left(\frac{\pi t}{t_{\max}}\right). \quad (9)$$

Були проведені розрахунки деформування масиву при чотирьох різних тривалостях навантажень:  $t_{\max} = 2,21$  мс,  $4,42$  мс,  $8,83$  мс,  $22,1$  мс. Амплітуди  $f_0 = 10^5$  Н,  $5 \cdot 10^4$  Н,  $2,5 \cdot 10^4$  Н,  $10^4$  Н відповідно вибирались з тим, щоб сумарний імпульс, який отримало середовище, був однаковим для всіх чотирьох розрахунків.

На рис. 1 наведено діаграми деформування  $P(\varepsilon)$  для чотирьох тривалостей навантаження. Видно, що при збільшенні тривалості навантаження збільшується залишкова деформація, а також, що діаграма деформування в фазі навантаження має дві ділянки з різними кутами нахилу. На першій ділянці, до деформації  $\varepsilon = 0,11$ , середовище проявляє себе як більш податливе, що зв'язано з заповненням блоками вільного міжблокового простору, а при подальшому деформуванні деформація масиву частково пов'язана з деформацією самих блоків. Характерним є також те, що при збільшенні тривалості дії імпульсного навантаження збільшується кривизна діаграми деформування.

Наступну серію розрахунків було проведено в рамках моделі дискретного середовища, утвореного блоками трьох розмірів ( $r = 1,0$  см,  $0,5$  см,  $0,25$  см). Сумарна кількість части-

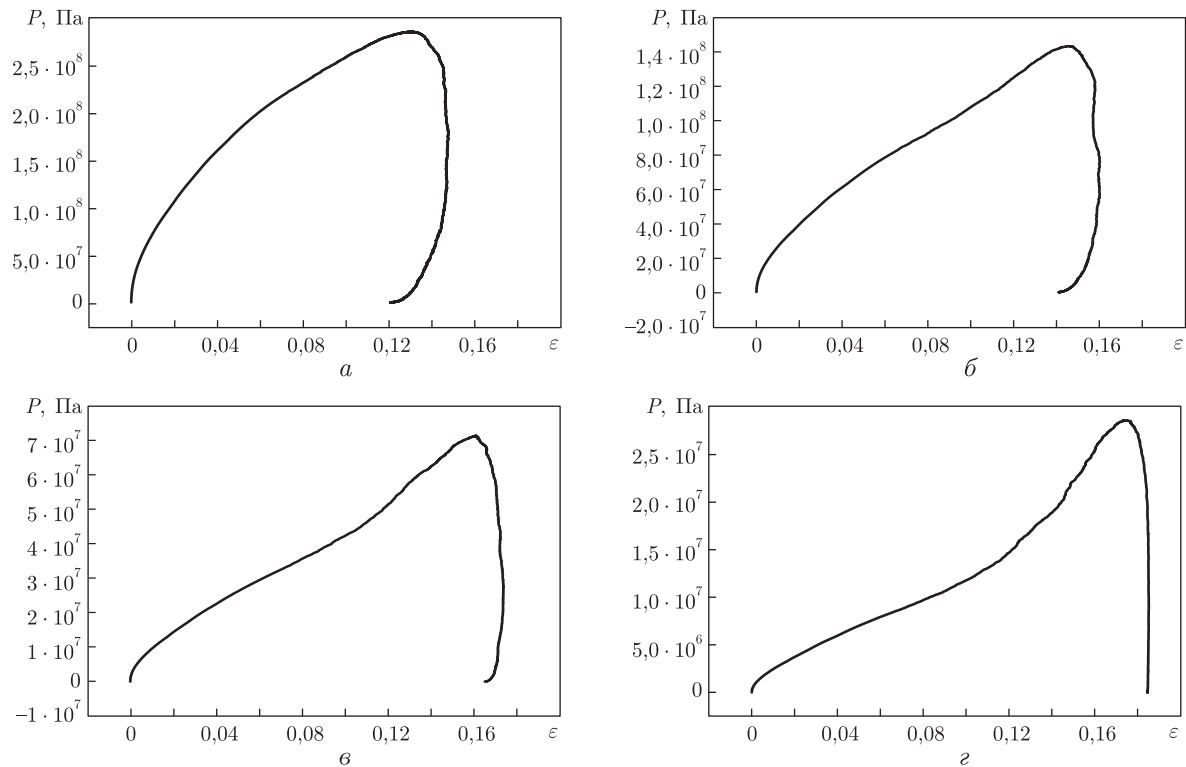


Рис. 2. Діаграми деформування  $P(\varepsilon)$ . Тривалість імпульсного навантаження:  $a - t_{\max} = 2,21$  мс;  $b - t_{\max} = 4,42$  мс;  $v - t_{\max} = 8,83$  мс;  $z - t_{\max} = 22,1$  мс. Блоки трьох розмірів

нок у масиві складає 10500 штук (500, 2000 і 8000 у відповідному ансамблі), а сумарна маса блоків у кожному ансамблі є однаковою. І в цьому випадку до поршня докладалася сила у формі (9). На рис. 2 наведені діаграми деформування для чотирьох тривалостей імпульсних навантажень. Якщо порівнювати діаграми деформування з аналогічними діаграмами для однорозмірного дискретного середовища (див. рис. 1), то можна побачити, що ці діаграми подібні, хоча деформації для середовища з неоднорідною структурою дещо перевищують деформації у дискретному середовищі з однаковими елементами. Цю особливість можна пояснити тим, що масив з блоками різних розмірів може краще упаковуватися, оскільки блоки з найменшим розміром є більш рухливими і відповідно можуть легше заповнювати порожнечу.

Розрахунки деформування обох дискретних середовищ при кратних динамічних навантаженнях та діаграми деформування й протоколи навантажень для середовища з однаковим розміром елементів ілюструє рис. 3. Видно, що при кожному додатковому навантаженні залишкова деформація збільшується, тобто середовище ущільнюється. Всі діаграми повторних деформувань мають гістерезисний характер. Діаграми деформування дискретного середовища, сформованого блоками трьох розмірів при кратних імпульсних навантаженнях, наведено на рис. 4. При порівнянні цих діаграм з аналогічними для монодисперсного середовища (див. рис. 3) встановлено, що деформаційні властивості середовищ практично однакові: діаграми деформування мають подібний характер, хоча деформації в трьохрозмірному середовищі дещо перевищують деформації середовища, утвореного однаковими елементами.

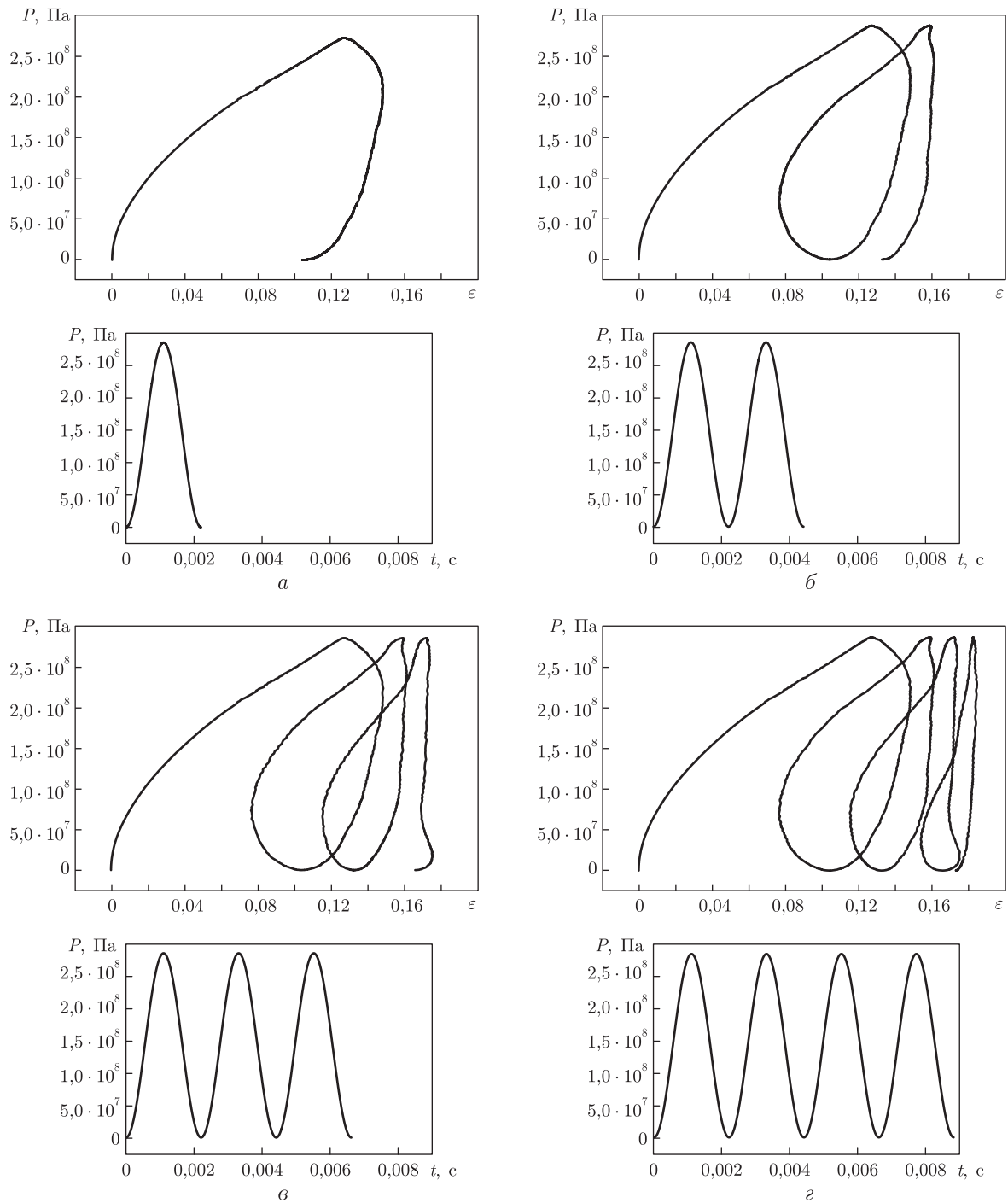


Рис. 3. Діаграми деформування  $P(\varepsilon)$  та протоколи навантажень. Тривалість одинарного імпульсного навантаження  $t_{\max} = 2,21$  мс. Розміри блоків однакові

Таким чином, отримані діаграми деформацій в результаті проведених розрахунків процесів деформування дискретного блокового середовища, утвореного блоками однакового розміру та блоками трьох різних розмірів підтверджують той факт, що неklasичність поведінки геоматеріалів зумовлюється їх структурованою організацією. Характерною особливі-

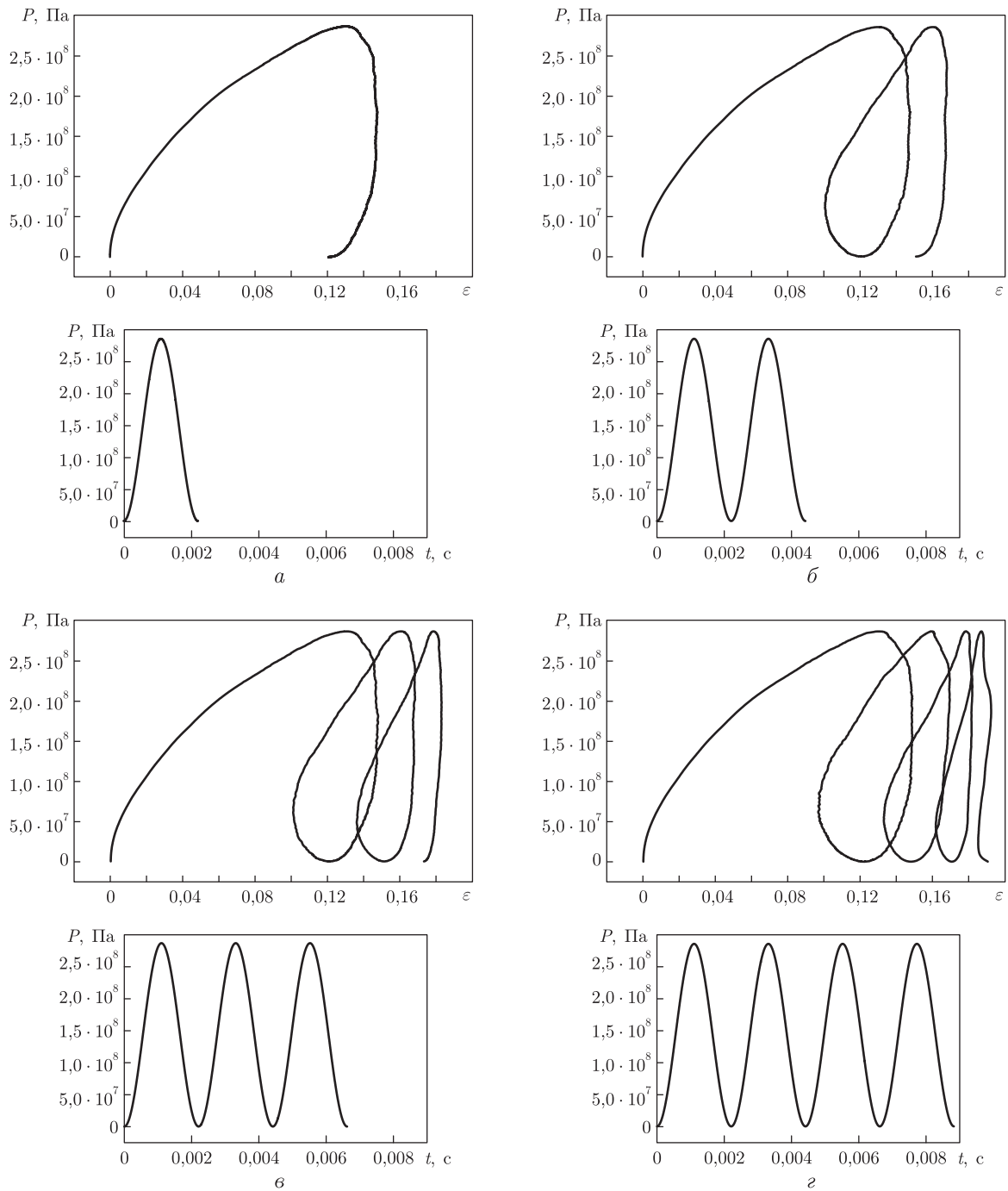


Рис. 4. Діаграми деформування  $P(\varepsilon)$  та протоколи навантажень. Тривалість одинарного імпульсного навантаження  $t_{\max} = 2,21$  мс. Блоки трьох розмірів

стю всіх діаграм є нелінійність, наявність гістерезису, залежність форми діаграм від швидкості деформування: при збільшенні тривалості дії імпульсного навантаження збільшується кривизна діаграми деформування та зменшується площа гістерезису. Ці всі особливості діаграм деформування є властивими для таких структурованих гірських порід, як пісковик, вапняк тощо.

Роботу виконано за часткової фінансової підтримки Науково-технологічного центру в Україні, проект № 3138.

1. Ostrowsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // Riv. Nuovo Cim. – 2001. – **24**, No 7. – P. 1–46.
2. Gueyer R. A., Johnson P. A. Hysteresis, energy landscape and slow dynamics: a survey of the elastic properties of rocks // J. Mater. Process. and Manuf. Sci. – 2000. – **9**, No 7. – P. 14–26.
3. Darling T. W., TenCate J. A., Brown D. W. et al. Neutron diffraction study of the contribution of grain contacts to nonlinear stress-strain behavior // Geophys. Res. Lett. – 2004. – **31**, No 1. – P. 1–4.
4. Andersen H. C. Molecular dynamics simulation at constant pressure and/or temperature // J. Chem. Res. – 1980. – **72**, No 4. – P. 2384–2393.

Відділення геодинаміки вибуху Інституту  
геофізики ім. С. І. Субботіна, Київ

Надійшло до редакції 12.06.2007

УДК 528.8:519.876

© 2008

**В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, З. В. Козлов, Л. П. Ліщенко**

## **Дешифрування гіперспектральної космічної інформації на основі текстурних і спектральних характеристик досліджуваних об'єктів**

*(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Д. Федоровським)*

*The interpretation of hyperspectral space images based on the textural and spectral characteristics of studied objects is examined. It is suggested to perform the interpretation using a spectral shift function along the electromagnetic radiation wavelength as an integral indicator of the spectral characteristics of urbanlandscape elements.*

Гіперспектральна космічна зйомка містить інформацію про випромінювання від поверхні Землі при довжинах хвиль, які фіксуються в окремих вузьких каналах ( $\sim 10$  нм) і охоплюють широкий спектральний діапазон. Для багатьох елементів природного ландшафту та інших об'єктів земної поверхні відомі їхні спектральні властивості, тобто розподіл їх випромінювання за електромагнітним спектром. Однак кожен природний або техногенний ландшафт містить комплекс елементів, які мають різні спектральні властивості і займають різні площі в межах ландшафту. Багатьма вченими вивчалася відбивна здатність покриву Землі з урахуванням впливу елементів, які утворюють ландшафтний комплекс, зокрема рельєф, ґрунт, рослинний покрив, водна поверхня, техногенні об'єкти, підземні води, геологічна будова тощо [1–5]. При ідентифікації різних ознак поверхні Землі виходять з того, що досліджувані типи покриття в дійсності спектрально роздільні, але існує багато об'єктів, які не завжди можна спектрально розділити та ідентифікувати.

Позитивний досвід використання текстурних характеристик у дистанційному зондуванні Землі дозволяє підвищити імовірність дешифрування космічних знімків (КЗ) [6, 7]. На сьогодні, однак, у зазначених статтях досліджено текстуру лише трьох класів ландшафтів