

Національна Академія наук України
Інститут геофізики ім. С.І.Субботіна
Відділення геодинаміки вибуху

На правах рукопису

БЕНГРОВИЧ Дмитро Богданович

**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ
ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ
СТРУКТУРОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ**

01.04.12 - геофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1996

дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Відділенні геодинаміки
С.І.Субботіна НАН України

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00752601 (L)

- Науковий керівник - член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор Даниленко В.А.
- Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук, професор В.Н.Родіонов, кандидат фізико-математичних наук В.Б.Спіртус
- Ведуча організація - Одеський державний університет

Захист відбудеться 2 жовтня 1996 р. о 14 год. на засіданні Спеціалізованої ради Д 01.95.01 при Інституті геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України за адресою: 252142, Київ-142, пр. Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту.

Відуки на автореферат у двох екземплярах, завірені гербовою печаткою організації, просимо надсилати на адресу Інституту.

Автореферат розіслано 22 серпня 1996 р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
доктор фізико-математичних наук

В. С. Гейко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність проблеми.

Важливим досягненням науки останніх десятиліть є розуміння процесів формування структур у системах, які обмінюються речовиною і енергією з навколишнім середовищем, так званих відкритих системах.

Причинами і загальними закономірностями самоорганізації матерії займається нерівноважна термодинаміка. Завдяки їй стало ясно, що нерівноважність може бути причиною впорядкованості. Виявилось, що процеси, які відбуваються у відкритих системах можуть призводити до виникнення нового типу динамічних станів матерії - дисипативних самоорганізованих систем.

В останній час в результаті вивчення явищ, пов'язаних з таким фундаментальним явищем природи, як структурованість природного об'єкта, і в геофізику увійшло це поняття. Стало очевидним, що для адекватного опису геофізичного середовища необхідно безпосередньо займатися побудовою теорії блочності, явищем самоорганізації, як наслідком ієрархії нестійкості структурованого середовища, ієрархічності просторових структур і іншими близькими до цього явищами.

Ряд геофізичних даних мабуть напряду свідчать про те, що оболонки Землі не можуть бути правильно описані в рамках простих механічних моделей. Без врахування структурних властивостей неможливо вивчити деформацію верхніх оболонок Землі під дією тектонічних сил, виконати моделювання сейсмічного режиму району, пояснити процеси підготовки землетрусів, побудувати моделі динаміки літосфери з урахуванням того, що вона складається з сукупності твердих деформованих блоків, розділених тонкими прошарками.

В зв'язку з цим, в останній час, почало розвиватися уявлення про геофізичне середовище як про відкриту блочно-ієрархічну неурівноважену систему, яка здатна обмінюватися енергією і масою з навколишнім світом. В той час, як основні ідеї такого підходу закладені, намічається важкий шлях їх реалізації, втілення в конкретні дослідження і обчислення.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Проблема врахування ієрархічної структурованості реального геофізичного середовища є новою, особливо в галузі конкретних розрахунків. Слід підкреслити, що розвиток моделювання в рамках класичної механіки суцільного середовища теж іде в цьому напрямку, наприклад, з побудовою нелокальних моделей. Однак тут необхідно зупинитись на одній обставині, що за думкою багатьох фахівців свідчить про певну кризу цієї галузі. Суть проблеми в наступному. Тектонічний процес, що розвивається на протязі мільйонів років, характеризується рядом параметрів, які не можливо отримати в лабораторних експериментах, оскільки нема надійних критеріїв подібності для перенесення результатів швидкоплинних дослідів на геологічні масштаби, особливо в області нелінійної динаміки. Одним з проявів нелінійності є те, що деформація літосфери проходить в постійній присутності поля тяжіння, внаслідок чого в динамічних рівняннях середовища присутні інерційні члени з малим коефіцієнтом (числом Рейнольдса, що дає співвідношення інерційних і в'язкісних ефектів). Однак ці члени неможливо відкинути, як відомо з теорії повзучих течій, і задача не може бути зведена до статички. В такому випадку динамічна траєкторія літосфери, що деформується, перестає визначатися лише початковими умовами, а в більшій мірі залежить від всієї попередньої історії деформування матеріалу. Такі типово нелінійні задачі лише недавно стали доступні для чисельного моделювання, врахування ж процесів розломоутворення в цьому підході тільки планується.

В галузі чисельної реалізації схожих моделей динаміки суцільного середовища вже тепер створено алгоритми (паралельні розрахунки на суперкомп'ютерах), котрі теоретично не можуть бути суттєво покращені. Максимальна ж швидкість обчислювальної машини (практично досягнута) обмежена світловими швидкостями передачі сигналів. І в цій ситуації встановлено, що для реальних обчислень динаміки літосфери її не вистачає в межах трьох-чотирьох порядків. Таким чином реальні досягнення в цьому напрямку очікуються тільки з появою нових ідей і моделей, що революційно змінили б ситуацію.

Можна сподіватись, що саме структурний підхід, або погляд на літосферу, як на ієрархічно структуроване, блочне середовище, дасть таку

можливість. Реалізація цього підходу потребує створення і апробації спеціального математичного апарату. Тому є актуальним і перспективним розробка математичної моделі, надійно обгрунтованої в рамках по можливості менших обмежень і не дуже вибагливої до обчислювальних ресурсів. Така модель і запропонована в цій роботі.

Мета роботи.

Метою роботи є побудова математичної моделі динаміки структурованого геофізичного середовища та чисельне моделювання на її основі в єдиному динамічному підході тектонічних та хвильових процесів у блокових ієрархічно структурованих геофізичних середовищах.

Наукова новизна роботи.

1. Вперше розроблено математичну модель геофізичного середовища з урахуванням його блокової ієрархічної структури, котра дозволяє вести розрахунки тектонічних процесів у динамічній постановці.
2. Вперше проведено математичне моделювання процесу рифтингу блочного геофізичного середовища та показано, що саме модель блочного середовища дозволяє одночасно відповісти на ряд досі нерозв'язних з позицій механіки суцільного середовища питань геофізики (існування "синрифтової" стадії накопичення осадків в рифтових басейнах, динаміка формування попередньо напруженого стану геофізичного середовища, динаміка утворення розломів в процесі тектоногенезу, нерівноважність процесу деформування структурованого геофізичного середовища).
3. Створена і протестована програма динамічного моделювання осадкового басейну з урахуванням структури реального середовища. З її допомогою проведені розрахунки, котрі неможливо вести іншими методами. Можливість наповнення моделі конкретними геологічними даними відкриває шлях для чисельного дослідження тектонічної історії земної кори.
4. Виявлено, що в певні моменти часу в геофізичному середовищі спостерігається втрата стійкості окремими блоками з випроміненням

сейсмічної енергії. Це дає можливість побудувати нову модель джерела землетрусу і розповсюдження сейсмічних хвиль від нього.

5. Математичне моделювання і експеримент виявили клас явищ, властивих саме дискретним середовищам - виникнення в них нелінійних солітоноподібних хвиль з новими властивостями. Завдяки обчисленням високої точності вперше встановлені основні характеристики таких хвиль, як амплітудночасові, так і спектральні. Вперше встановлено, що розв'язки такого солітоноподібного типу мають в собі як хвильові властивості так і частинкоподібні. Саме такий тип хвиль, властивих геофізичному середовищу, в останній час став об'єктом інтересу в ряді сейсмічних спостережень.

6. Розрахунок багатосолітонних взаємодій в дискретному середовищі дав можливість вперше виявити спонтанне випромінювання солітонів. Це яскраве підтвердження частинкоподібних властивостей досліджуваних імпульсів.

7. В дослідженнях шаруватого середовища (і особливо виразно в дослідженнях ланцюгів куль) можна виділити ближню і дальню зону, в яких спектр солітоноподібного сигналу має різні параметри. Тим самим в моделі осередка сейсмічної активності може бути обмежена область (джерело), де тільки формується стійкий сейсмічний сигнал. Разом з цим у двовірних розрахунках явно отримано факт локалізації джерела сейсмічного сигналу.

Практична цінність роботи.

Побудована в роботі математична модель геофізичного середовища зі структурою та розроблені програми для математичного моделювання динаміки його деформування дозволяють проводити чисельні експерименти по дослідженню динаміки деформування Земної кори з урахуванням її структури, попередньо напруженого стану, знаходити залежність деформації та напруження від часу і деформації від напруження в довільні моменти часу. Окрему практичну цінність мають результати по чисельному моделюванню утворення осадкових басейнів в рамках розробленої математичної моделі.

Результати роботи дають нові уявлення про механізм генерації нелінійних хвиль, що ресструються в лабораторних і польових еспериментах в реальному геофізичному середовищі. Розроблені програми дозволяють проводити чисельне моделювання двомірних хвильових процесів в пружних і пружньопластичних середовищах з урахуванням їх структурованості. Це може дати нові результати в інтерпритації багатьох сейсмологічних досліджень, як уже проведених, так і запланованих.

Результати роботи можуть бути використані в якості матеріала для навчальних курсів в ВУЗах (КДУ, КПІ, МФТІ, МІФІ, НДУ).

Достовірність результатів.

Достовірність розрахунків в рамках моделі динаміки структурованого середовища базується на таких положеннях:

- швидкості розповсюдження поздовжних і поперечних хвиль в модельному середовищі співпадають з швидкостями сейсмічних хвиль,
- в лінійній області асимптотична поведінка структурованого середовища еквівалентна динаміці пружного геофізичного середовища,
- отримані результати співпадають з результатами в межах ряду відомих квазістатичних методів в областях, де їх співставлення допустиме,
- динамічне моделювання рифтового утворення конкретного басейну приводить до його реально спостереженої фінальної геометрії,

достовірність розрахунків з використанням методів динаміки суцільного середовища базується на таких положеннях:

- використовуються широко відомі методи і стійкі розрахункові схеми чисельного розв'язку рівнянь динаміки суцільного середовища разом з експериментально обгрунтованими рівняннями стану речовин,
 - програми протестовані як в лінійній, так і в нелінійній областях поведінки матеріалів співставленням розрахунків з експериментом,
- достовірність розрахунків динаміки гранульованих середовищ базується на таких положеннях:
- чисельні експерименти проведено з використанням протестованої програми розв'язку системи жорстких диференціальних рівнянь в межах високої точності і контролю стійкості рішень,

- чисельне моделювання динаміки ланцюга пружних куль повністю підтверджено результатами паралельного експериментального дослідження і співставленням з відомими результатами,

- критерій подібності дозволив співставити отримані результати з зареєстрованим розповсюдженням солітоподібної хвилі у випадку Чілійського землетрусу і встановити співпадіння ряду параметрів.

Апробація результатів роботи та публікації.

Основні положення дисертації доповідались і обговорювались :

1. I Північно-Кавказька регіональна конференція з функціонально-диференціальних рівнянь (Махачкала, 1986 р.)
2. XI міжнародна конференція з нелінійних коливань (Будапешт, 1987)
3. I, II і III Всесоюзні школи молодих вчених по чисельним методам механіки суцільного середовища (Красноярськ, 1989, Свердловськ, 1991, Абрау-Дюрсо, 1992 р.).
4. I і III школи-семінари по вибухових явищах (Алушта, 1990, 1992),
5. Всеукраїнському семінарі по геодинаміці і прогнозуванню землетрусів (Ворзель, 1993 р.).
6. III науковий семінар СНД по акустиці неоднорідних середовищ (Новосибірськ, 1994 р.)
7. EUROPROBE Workshop, Ворзель, Україна, жовтень 1994 р.
8. EAUG-8 annual meeting, Strasbourg, France, April 1995.
9. EUROPROBE Workshop, Leeds, United Kingdom, July 1995.
10. AUG 1995 fall meeting, San Francisco, USA, December 1995.
11. Наукові семінари Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики НАН України (Київ, 1985-1996 р.р.).

Основні положення і результати дисертації відображені в 13-ти роботах, список яких приведено в кінці автореферату.

Структура і об'єм роботи.

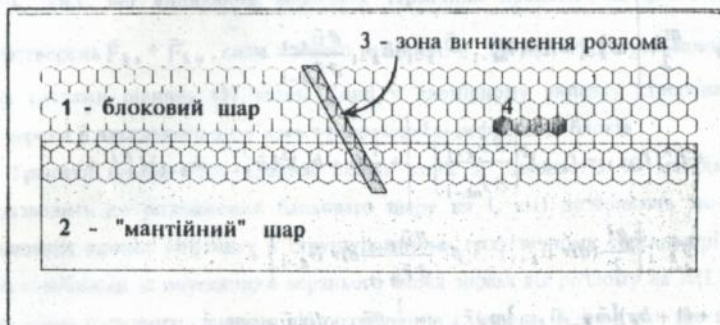
Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку цитованої літератури і списку опублікованих робіт по темі дисертації.

Об'єм дисертації - 146 сторінок, включаючи 59 малюнків, список цитованої літератури, який складається із 150 найменувань.

Короткий зміст дисертації.

У вступі сформульована ціль дослідження, його актуальність, коротко викладена загальна структура роботи і основні положення, винесені на захист. Дано огляд літератури.

В першому розділі сформульовані основні положення математичної моделі нелінійної динаміки структурованих блочних середовищ у застосувнні до тектонічних процесів у земній корі. В основі більшості сучасних методів чисельного моделювання тектонічних процесів лежить використання уявлень про геофізичне середовище як про континуум з усередненими фізичними параметрами. Дослідження ж останніх років вказують на те, що реальне геофізичне середовище має структуру, елементи цієї структури підпорядковані законам самоорганізації. Це є наслідком ієрархії нестійкості структурованого середовища. Виділяючи структурованість в якості окремого предмету дослідження, слід створити спеціальний математичний апарат.



В моделі структурованого середовища літосфера поділена на однорідний мантіїний шар (2) (його поведінка може бути описана відомими

рівняннями динаміки суцільного середовища, в роботі ж цей шар через граничні умови впливає як в'язка рідина на менш щільний верхній шар), і власне трердий блоковий структурований шар (1). Вважається, що сітка існуючих тріщин одного рівня дозволяє ефективно розглядати кору в кожен момент часу, як взаємодіючі елементи характерного розміру. В моделі допустиме дроблення блоків без зміни їх властивостей (перехід до нижчого рівня ієрархії) і виникнення розломів (зміна характеру взаємодії сусідніх блоків в рамках одного рівня - перехід до вишого рівня ієрархії). Таким чином зображений на малюнку блоковий шар (1) має три структурних рівня - весь шар розділений розломами на крупні блоки, ті в свою чергу складаються з шестикутних блоків розміру 3.2 км (типовий розмір блока можна встановити для конкретного регіону по сейсмічним даним). Крім цього, з розглядом різної реології кожного блока (4), можливе моделювання конкретної природно неоднорідної зони земної кори.

В узагальнених координатах q в просторі кватерніонів взаємодія сусідніх блоків k і $(k-1)$ маси $m_k (= \rho V)$, з розривним полем швидкостей U_k в шарі, з тензором моментів інерції $I_{k-1}^{i,j}$ описується рівнянням:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial T_k}{\partial \bar{q}} \right] + \frac{\partial T_k}{\partial \bar{q}} + \frac{\partial U_k}{\partial \bar{q}} = \bar{F}'_k + \bar{F}''_k + \bar{F}'''_{ok} + \bar{F}_{ks} + \bar{F}_{ku} + \bar{F}_0; \quad (1)$$

$k = 1, n;$

$$T_k = \frac{m_k}{2} \left\{ \bar{v}_{k-1}^2 + 2\beta(\bar{r}_{ok-1} - \bar{r}_{k-1})\bar{v}_{k-1} \frac{\partial \bar{v}_{k-1}}{\partial \bar{r}_{ok-1}} + \right. \\ \left. + \beta^2(\bar{r}_{ok-1} - \bar{r}_{k-1})^2 \left(\frac{\partial \bar{v}_{k-1}}{\partial \bar{r}_{ok-1}} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2}(1 + b_k)^2(\bar{\omega}_{k-1} \cdot \bar{\omega}_{k-1})I_{k-1}^{i,j} + \\ + I_{k-1}^{i,j} \left\{ \frac{\beta^2}{2}(\text{div } \bar{v}_{k-1})^2 + \beta^2 \frac{\partial \bar{v}_{k-1}}{\partial \bar{r}_{ok-1}} \text{div } \bar{v}_{k-1} \right\} + \\ + (1 + b_k)[\bar{\omega}_{k-1} \bar{v}_{k-1}]m_k \bar{r}_{ok-1} + \frac{1}{2}\beta \bar{v}_{k-1} \text{div } \bar{v}_{k-1} m_k \bar{r}_{ok-1};$$

$\left| b_k \right| = \left| \frac{\bar{r}_{k+1} - \bar{r}_k}{\bar{r}_k - \bar{r}_{k-1}} \right|$, у загальному випадку кватерніон b_k характеризує співвідношення розмірів сусідніх блоків довільної форми, так що структурна характеристика геофізичного середовища $\beta = (1 + b_k) \chi_{n-1}$ ($\chi_{n-1} = (-1)^{n-1} (|\bar{r}_{ok}| - |\bar{r}_{ok-1}|) \varphi_n^{n-1}(\bar{r}_k)$, де $\varphi_n^{n-1}(\bar{r}_k)$ є базисною функцією з простору розривних $\bar{v}(\bar{r}_k)$) грає важливу роль у визначенні векторів поворотів блоків $\bar{\omega}_{k-1} = \chi_{n-1} \text{arf} \bar{v}_{ok-1}$ (в класичній континуальній механіці $\bar{\omega} = \frac{1}{2} \text{arf} \bar{v}$, таким чином, покладаючи $\chi_{n-1} \rightarrow 1/2$, систему рівнянь (1) зводимо до безструктурної динаміки). Два інших граничних випадка - рівняння Ньютона для блоків, що не повертаються при $\chi_{n-1} \rightarrow 0$ і рівняння Ейлера для твердого тіла при повному зчепленні блоків при $\chi_{n-1} \rightarrow \infty$.

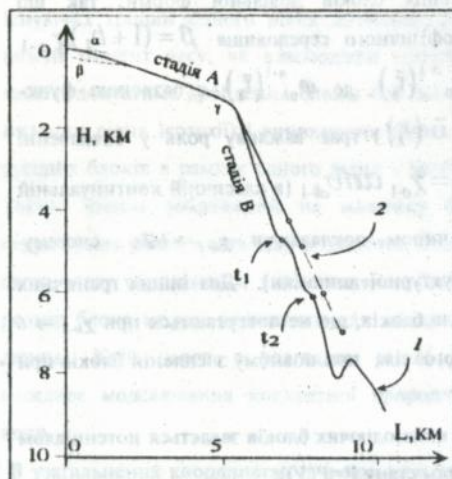
Конкретна реологія матеріалу взаємодіючих блоків задається потенціалом центральної взаємодії (рівнянням стану $P=P(V)$):

$$P_1(v_1) = Av_1^{-1/3} \exp\left\{B\left(1 - v_1^{1/3}\right)\right\} - Cv_1^{-4/3}; \quad v_1 = \frac{V_1}{V_n}, \quad V = \frac{1}{\rho}. \quad (2)$$

що використовується в критеріях дроблення чи розломоутворення і для визначення сил взаємодії в (1) - сили пружної реакції \bar{F}'_k , сили тертя \bar{F}''_k , сил, що виникають внаслідок термічних процесів чи фазових перетворень $\bar{F}_k + \bar{F}_{k0}$, сили земного тяжіння \bar{F}_0 . На базі сформульованої для системи рівнянь (1) задачі Коші у двовірному випадку створена програма її чисельного розв'язку з розрахунком деформації блоків.

Граничні умови (рух крайніх блоків кори зі швидкістю 10 мм/рік призводить до розтягнення блокового шару на L км) дозволяють моделювати процес рифтингу в структурованому геофізичному середовищі. Спостерігаючи за опусканням верхнього блока зправа від розлому на $H(L)$ під лінію горизонту залежно від розтягнення L (крива 1), помітно, що в процесі рифтингу виділяються дві стадії. На початку стадії А блоковий шар веде себе подібно пружній плиті (асимптота α), далі відбувається нелінійне розтягнення шару (при переході до зтиснення, що програмно легко реалі-

зується зміною граничних умов, спостерігається явище гістерезису - крива β) до моменту γ виникнення розлому і початку стадії В. На цій стадії проходить опускання правої половини шару вздовж розлому. Існуючі

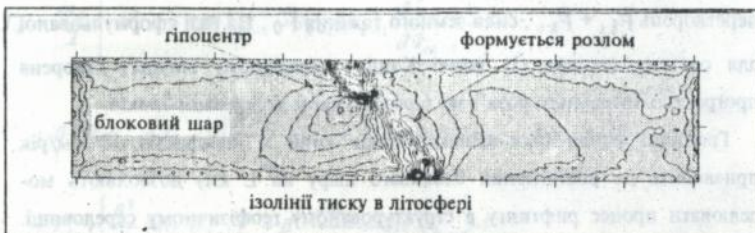


квазістатичні методи дозволяють промодельовувати цю частину рифтингу також з застосуванням теорії пружної балки (лінія 2).

Блокова модель дозволяє виявити на стадії В моменти часу t_1 t_2 , коли внаслідок негладкості розлому і нерівномірноюпруженого стану шару деякі блоки біля розлому втрачають стійкість з ви-

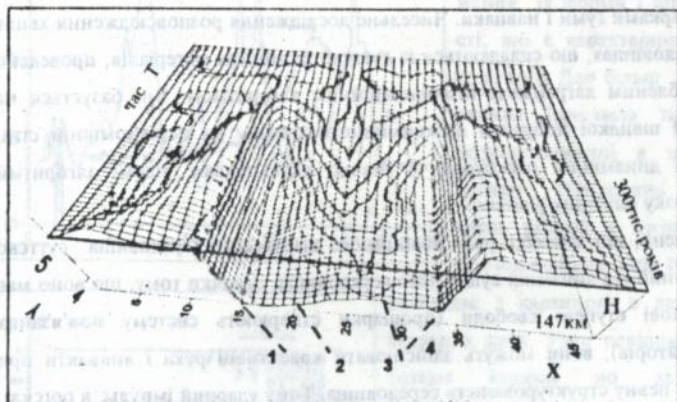
проміненням сейсмічних хвиль з таких гіпоцентрів. Також було встановлено, що і перед виникненням розлому періодично спостерігаються явища генерації сейсмічних хвиль, що є наслідком локальної втрати стійкості окремими блоками.

Картина розподілу тиску в блоках в кінці стадії А (моменти γ з інтервалами часу біля 100 тис. років) вказує на локалізацію гіпоцентрів біля розлому:



Явища генерації сейсмічних хвиль є наслідком локальної втрати стійкості окремими блоками. Детальне дослідження таких хвиль у граніті (з використанням кроків по часу біля 0.01 сек) дозволило встановити, що під час такого процесу генерується солітоноподібна поперечна і поздовжня хвилі, швидкості яких близькі до швидкостей реальних сейсмічних хвиль.

На базі застосування теорії динаміки блочного середовища створено модель осадкового басейну. Промодельовано еволюцію такого рифтового басейну і заповнення його осадками. В літосфері з чотирма розломами (1,2,3,4) внаслідок її попереднього розтягнення на 10% :



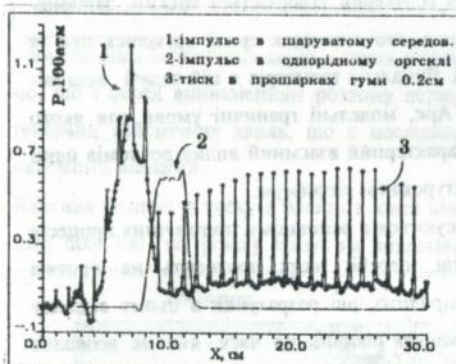
і подальшої фіксації країв після релаксації утворюється басейн, заповнений осадками - частинами блоків, що внаслідок ерозії зрізались при їх підйомі над лінією горизонту Н. Фінальна геометрія в цій задачі відповідає відомому басейну Жани д'Арк, модельні граничні умови для якого було застосовано. Досліджено характерний взаємний вплив розломів один на одного в динаміці такої структурованої літосфери.

Результати першого розділу стосуються в основному тектонічних процесів у літосфері, тобто таких явищ, перебіг яких проходить на протязі геологічних масштабів часу. Природньо, що розрахунки в цьому випадку велись з необхідною дискретизацією рівнянь по часу, яка не дозволяє сумісно з такими процесами моделювати явища сейсмічної природи. Тому дослідженню останніх присвячені окремі розрахунки по розробленій моделі з застосуванням малих кроків по часу і в більшому обсязі задачі наступних розділів.

В розділі 2 проведено теоретичне дослідження розповсюдження нелінійних хвиль в шаруватих середовищах з застосуванням методів динаміки суцільного середовища. Для конкретних розрахунків використано кінцево-різницевий метод "Тензор" і схема Уілкінса апроксимації двохвимірних

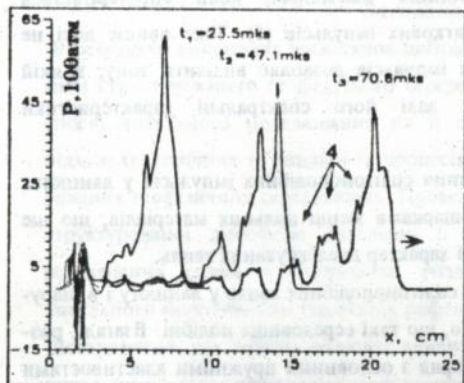
рівнянь механіки суцільного середовища. Розглянуто модель неоднорідного середовища як однорідний півпростір із включеннями прошарків різних матеріалів. В якості таких шаруватих середовищ вибирались: півпростір глини з прошарками повітря, оргскло з прошарками гуми і навпаки. Чисельне дослідження розповсюдження хвиль у середовищах, що складаються із суттєво відмінних матеріалів, проведено розробленим лагранжево-інтерполяційним алгоритмом. Він базується на методи швидкої побудови двохвимірному сплайну на нерівномірній сітці для її динамічної перебудови і значно удосконалює відомі алгоритми розв'язку вихідних рівнянь.

Виявлено, що характер руху нелінійного шаруватого середовища суттєво відмінний від динаміки суцільного середовища. Завдяки тому, що воно має додаткові ступені свободи (прошарки створюють систему пов'язаних осциляторів), вони можуть здійснювати колективні рухи і виявляти при цьому певну структурованість середовища. Тому ударний імпульс в оргсклі

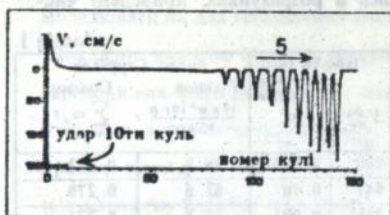


(2) у шаруватому середовищі може трансформуватися в енергетично більш вигідні і стійкі утворення - в довгохвильову складову (3) з більшою фазовою швидкістю і меншою амплітудою і більш гладкий солітоноподібний імпульс (1) із більшою амплітудою в максимумі. Приведена на

малюнку ситуація, характерна при наявності тонких і менш щільних прошарків, вказує на те, що при генерації і проходженні хвиль у таких середовищах завдяки тривалій дії значного перепаду тиску (3) може скластися сприятлива умова фазових перетворень з виділенням флюїдів (як провісників зумлетрусу в структурованому геофізичному середовищі).

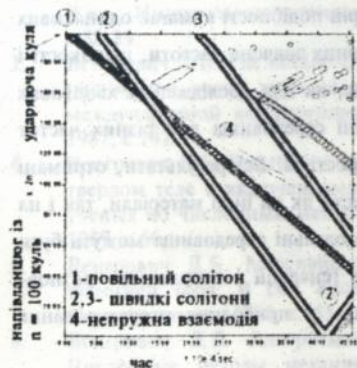


При зустрічному розсіюванні імпульсів (1) спостерігається повне збереження їх форми і швидкості, що є характерним для солітонів. Для більш інтенсивних імпульсів при їх розповсюдженні в шаруватому середовищі має місце розпад у низку солітоноподібних піків (4), що



співпадає з картиною в ланцюгу сталених куль. Удар першими десятима кулями по ланцюгу призводить до генерації подібних солітонів (5).

У розділі 3 проведено дослідження таких нелінійних динамічних процесів у дискретному середовищі, що складається із однакових пружних куль, котрі взаємодіють за законом Герца. Порівнюються результати, отримані як в розрахунках, так і в паралельному експерименті. Встановлено, що після удару кулею по ланцюгу в останньому розповсюджується солітоноподібна



спонтанно випромінений солітон

хвиля з наступними властивостями. При зіткненні двох солітонів спостерігається зсув фаз, випромінення додаткового солітона малої амплітуди (непружна взаємодія (4)), збереження фазової швидкості і форми солітонів. Розрахунки показують, що дані солітони мають частинкоподібні властивості. Особливо наглядно прояв-

Ізольній масової швидкості в ланцюгу куль

ляється це при трьохсолітонних взаємодіях, коли спостерігається спонтанне випромінення додаткових імпульсів (5). Таке явище досі не досліджувалось. Спектр таких імпульсів дозволяє виділити зону, в якій солітон тільки формується, далі його спектральні характеристики стабілізуються.

Промодельовано розповсюдження солітоноподібних імпульсів у ланцюгах пружних куль з тонкими прошарками менш щільних матеріалів, що ще наглядніше виявило особливий характер досліджуваних хвиль.

Порівняння розповсюдження солітоноподібних хвиль у ланцюгу і в шаруватому середовищі вказує на те, що такі середовища подібні. Взагалі, розглянувши дані таблиці 1, де поряд з основними пружними властивостями різних речовин, що використовувались в розрахунках, приведені чис-

таблиця 1.

п	матеріал	$E, 10^{12}$ дин/см ²	ν	$\rho, 3$ г/см ³	шар V_0 1м/с		число Струхалія	
					$V_{\text{сол}}$ см/с	τ_s мс	P-хвиля $\frac{10 \text{ км} \cdot 10 \text{ г} \mu}{V_{\text{сол}}}$	Солітон $\sum \omega_i \tau_{\mu}$ (тресн)
1	сталь	2.1	0.29	7.8	706	0.093	16.8	0.272
2	граніт	0.608	0.22	2.7	647	0.10	62.5	0.279
3	алюміній	0.73	0.34	2.7	716	0.092	15.8	0.271
4	скло	0.7	0.25	2.5	710	0.094	17.2	0.286
5	мідь	1.2	0.34	8.9	542	0.12	21.9	0.279
6	сіль (NaCl)	0.314	0.25	2.16	547	0.119	29.4	0.267
7	орґскло	.0721	0.35	1.18	397	0.164	32.0	0.282
8	гума	.00002	0.5	0.93	17.6	4.38	96.2	0.328
9	літосфера за даними Чілійського землетрусу	-	-	~2.6	1.410 ³	230000	62.5	0.3 - 0.4

ла Струхалія (для нелінійних явищ критерій подібності вимагає однакових чисел - безрозмірних відношень характерних значень частоти, швидкості і відстані), можна твердити, що в той час, як для дослідження хвильових рухів необхідно ретельно шукати подібні середовища для різних частот хвиль, для солітонних явищ ситуація простіша. Всі результати, отримані для ланцюга сталених куль, легко перенести як на інші матеріали, так і на літосферу в цілому. Таким чином дані модельні середовища можуть бути використані для дослідження процесів генерації і подальшого розповсюдження таких солітоноподібних хвиль у природних структурованих середовищах.

Висновки.

В результаті виконаних досліджень побудовано математичну модель динаміки структурованого геофізичного середовища, розроблено і реалізовано спосіб чисельного моделювання на її основі в єдиному динамічному підході тектонічних та хвильових процесів у блокових ієрархічно структурованих геофізичних середовищах. Проведено дослідження деформування структурованої літосфери внаслідок її рифтового розтягнення, тобто розтягнення разом з утворенням розломів. Створено програму для чисельного моделювання утворення рифтових осадкових басейнів.

Встановлено, що модель дозволяє виявити ряд нових нелінійних ефектів, притаманних структурованому геофізичному середовищу і чисельно їх про-моделювати як для геологічних масштабів часу, так і для сейсмічних явищ.

Докладно вивчено процеси генерації і розповсюдження в структурованих середовищах солітоподібних хвиль як таких, що можуть бути домінуючими в сейсмічних процесах, коли йдеться про високоенергетичний процес, коли розглядається область формування хвилі, коли середовище має виражену блокову структуру.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Венгрович Д.Б. Об одной спектральной задаче общей теории относительности. В кн.: Тезисы докладов I Северо Кавказской региональной конференции по функционально дифференциальным уравнениям.: Махачкала, 1986, с.52-53.
2. Венгрович Д.Б. Некорректная задача моделирования структуры частицы. В кн.: Интегральные уравнения в прикладном моделировании.: К., 1986, с.88-89.
3. Венгрович Д.Б. The nonlinear interaction within the framework of the model treating the quarks as topological structures. В кн.: Тезисы докладов XI международной конференции по нелинейным колебаниям.: Будапешт, 1987, с.142.
4. Венгрович Д.Б. Численное моделирование ударно-волновых процессов в твердом теле с включениями. В кн.: Тезисы докладов Школы молодых ученых по численным методам механики сплошной среды.: Красноярск, 1989, с.66.
5. Венгрович Д.Б. Массивное скалярное поле на многообразии с топологией тора. В сб.: Краевые задачи математической физики.: К., Наукова думка., 1990, с.155-157.
6. Венгрович Д.Б. Алгоритмы решения полилокальных задач. В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Тезисы докладов 3 Всесоюзной школы молодых ученых.: Красноярск, 1991, стр.51-53.

7. Венгрович Д.Б., Микуляк С.В., Численное моделирование высокоскоростного соударения пластин. В кн.: Тезисы докладов Всероссийской Школы молодых ученых: Абрау-Дюрсо, 1992, с.121.
8. Венгрович Д.Б. Лагранжево-интерполяционный метод в задачах динамики сплошных сред. В сб.: Краевые задачи математической физики.: К., 1993, с.86-93.
9. Венгрович Д.Б. Сейсмические волны в блочных средах. В сб.: Акустика неоднородных сред. (вып 110 - динамика сплошной среды): Новосибирск, 1995, с.57-62.
10. В.А. Даниленко, І.В. Белінський, Д.Б. Венгрович, В.В. Гржибовський, В.А. Лемешко. Солітонні явища в структурованих середовищах. Доповіді НАН України, 6, 1996.
11. Старостенко В.И., Даниленко В.А., Венгрович Д.Б., Поплавский К.Н. Моделирование эволюции осадочных бассейнов с учетом структуры природной среды и процессов самоорганизации. Доповіді Академії наук України, Киев, 1996, N2, с. 97-101.
12. Starostenko, V.I., Danilenko, V.A., Poplavsky, K.N., Vengrovitch, D.B. "Modelling the origin and evolution of rift sedimentary basins: pre-rift subsidence", Terra abstracts, Abstract supplement n1 to Terra Nova, Vol. 7, 1995, ISSN 0954 4887, Blackwell Scientific Publications, p.61.
13. Starostenko V.I., Danilenko V.A., Vengrovitch D.B., Poplavskii K.N., A fully dynamic model of continental rifting applied to the syn-rift evolution of sedimentary basins. Tectonophysics Special Issue "Geodynamics of the Pripyat-Dnieper-Donets and other Late Paleozoic rift basins of the Eastern European Platform", EUROPROBE Special Volume of Tectonophysics, June 1996.

Венгрович Д.Б. Исследование нелинейных процессов динамики структурированных сред.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.12-геофизика, ин-т Геофизики НАН Украины, Киев, 1996.

Построена математическая модель и на ее основе создан программный комплекс для исследования динамики иерархически структурированной геофизической среды применительно к деформируемой литосфере с разломообразованием. Метод позволяет, выделяя блочный слой литосферы, изостатически уравновешенный на мантийном слое, моделировать рифтовое образование осадочных бассейнов с учетом синрифтового осадконакопления, динамики образования разломов и напряженнодеформированного состояния, вязкостных, термических и других эффектов. Математическое моделирование и эксперимент выявили классы явлений, свойственных именно дискретным средам - возникновение в них нелинейных солитоподобных волн с новыми свойствами. Подробно изучены подобные волны применительно к вопросам сейсмологии.

Vengrovitch D.B. The investigation of the non-linear dynamic processes in a structured media.

A numerical technique has been developed to model dynamically lithosphere deformation and faulting. The method is based on the theory of generalised functions and has been used to investigate rifting processes in a two-layered lithosphere with up to four faults. Among other things, the method allows: 1) incorporation of the influence of syn-rift erosion and sedimentary loading on fault growth; 2) prediction of the history of individual fault development during the rift process; 3) calculation of the state of stress in the lithosphere during rifting; and 4) consideration of the effects of a finite value of mantle viscosity during rifting. The model applied to half-graben growth reveals a process that can be divided into two stages, the first resulting in subsidence prior to the initiation of faulting and the second when extension exceeds a critical value. Seismic waves accompanying the rifting process are also predicted. These and other results are compared with those obtained with other commonly employed rift basin modelling techniques.

Ключові слова: літосфера, структурованість, блочність, осадковий басейн, землетрус, солітон

Підп. до друку 19.08.96.

Формат 60×84¹/₁₆.

Підп. друку № 1. Спосіб друку офсетний. Умовн. друку арк. 0,82.

Умовн. фарбо-відб. 1,04. Обл.-вид. арк. 1,0.

Тираж 100. Зам. № 6-2977.

Фірма «ВІПОЛ»

252151, Київ, вул. Волинська, 60.

438570

AB 35.438