

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОЦЕССОВ УПЛОТНЕНИЯ, РАЗУПЛОТНЕНИЯ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВО ВНУТРЕННИХ СТРУКТУРАХ ЗЕМЛИ

На основе нелинейной теории деформируемых твердых тел исследуются процессы уплотнения, разуплотнения, фазовых переходов и разрушений в условиях внутренних структур Земли. Показывается, что потери устойчивости состояния равновесия по геометрическому формоизменению (структурная неустойчивость) может предшествовать процессам разуплотнения, фазовых переходов и разрушениям.

**Ключевые слова:** плотность; деформация; фазовый переход; неустойчивость.

Распределения плотности, дебаевская температура, параметр Грюнайтзена, решеточная часть коэффициента теплопроводности, удельная энтропия среды, адиабатическая температура, температура плавления и их градиенты, скачки энтропии и теплового эффекта при фазовых переходах, наклон кривого фазового равновесия и теплота кристаллизации для мантии и ядра являются основными параметрами внутреннего строения Земли в параметрических моделях [Жарков, 1983; Guliyev, 2010]. При их определении необходимо предварительно знать приращение плотности по глубине недр. Поэтому очень важно более точно определить этот параметр в реальных условиях. Данная проблема в той или иной степени затрагивают вопросы минералогии, петрологии, геотермии, тектоники, петрофизики и др. основ геологии и геофизики.

В данном сообщении, исходя из фундаментальных свойств основных систем уравнений механики деформируемых твердых тел показывается, что существуют некоторые общие геомеханические основы этого явления. Предлагаемый подход реализован с использованием результатов и данных знаменитых экспериментальных исследований Грина, Рингивуда и Лиу. Эти данные считаются достоверными и целесообразно проанализировать их результаты совместно с результатами, полученными с теоретических позиций и провести тестирование нового подхода. В случае успеха можно данный подход применить и к решению аналогичных региональных задач.

Используя известные соотношения нелинейной теории деформируемых твердых тел [Guliyev and Askerov, 2006; Кулиев и Аскеров, 2007] для определения изменений плотности в зависимости от изменений деформации получил следующие соотношения

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\sqrt{I_3}} - 1, \quad \Delta\rho = \rho_* - \rho;$$

$$\frac{dV^*}{dV} = \sqrt{I_3}; \quad (1)$$

$$I_3 = 1 + 2A_1 + 2(A_1^2 - A_2) + \frac{4}{3}(2A_3 - 3A_2A_1 + A_1^3) \cdot$$

$$A_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3;$$

$$A_2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2;$$

$$A_3 = \varepsilon_1^3 + \varepsilon_2^3 + \varepsilon_3^3,$$

$\varepsilon_i$  - главные значения Тензора деформаций Грина;  $\rho, \rho_*$  - соответственно, плотность среды в естественном и актуальном состояниях;  $V, V^*$  - соответственно объемы среды в естественном и актуальном состояниях.

В современных моделях для определения приращения плотности применяется уравнение Адамса-Вильямсона [Жарков, 1983].

В научной литературе указывается, что изменение плотности глубин Земли формулой Адамса-Вильямсона хорошо описывается для глубин больше чем 670 км. Главными недостатками этой формулы считается:

1. не учет в ней фазовых переходов;
2. неравномерность деформированных состояний (которая характерна структурам до глубин 670 км).

В данной работе применяются формулы (1), которые свободны от этих изъянов и является точным и наиболее общим в рамках механики сплошных сред.

Следует, подчеркнуть важный универсальный характер этой зависимости. Природа деформаций (она может вызваться тектоническими, гравитационными, геохимическими, гидромеханическими, термическими, радиационными и др.) здесь произвольна и параметры напряженного состояния, физико-механических, химических, температурных, и др. полей в нее в явной форме не входят. Деформации могут быть малыми и большими (конечными), линейными и нелинейными, упругими, упруго-пластичными, пластичными, вязкими и т.д. и относиться к изотропным, анизотропным однородным и неоднородным (гетерогенным) средам. Эти факторы имеют очень важные значения для постановки и проведения экспериментальных исследований, а также для интерпретационных процедур сейсмических и других геофизических информаций из недоступных (для непосредственного наблюдения и измерения) глубин Земли.

Используя данные о физических свойствах этих пород [Жарков, 1983] и формулы (1) по-

лучено, что соответствующие изменения  $\frac{\rho^*}{\rho}$  имеют следующие величины 8,45 %; 8,7 % и 7,4 %. На основе формул (1) численным моделированием получено, что такие плотностные изменения в этих фазовых переходах могут сопровождаться следующими напряженно-деформированными состояниями:  
 переход Энстатита в Гранат

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} = \epsilon_{22} &\sim 2\% ; \epsilon_{33} \sim 4\% \text{ при} \\ \sigma_{11} = \sigma_{22} &= -84,8 \text{ Кбар}, \\ \sigma_{33} &= -116,64 \text{ Кбар}, \end{aligned}$$

либо

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} = \epsilon_{22} &\sim 1,1\% ; \epsilon_{33} \sim 5,5\% \text{ при} \\ \sigma_{11} = \sigma_{22} &= -68,75 \text{ Кбар}, \\ \sigma_{33} &= -138,6 \text{ Кбар}, \end{aligned}$$

либо

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} = \epsilon_{22} &\sim 3\% ; \epsilon_{33} \sim 1,8\% \text{ при} \\ \sigma_{11} = \sigma_{22} &= -99,4 \text{ Кбар}, \\ \sigma_{33} &= -80,31 \text{ Кбар}. \end{aligned}$$

Аналогичные расчеты проведены и для фазовых переходов Гранат → Ильменит и Ильменит → Перовскит. Эти результаты получены в случае применения линейно-упругой модели изотропных сред при предположении малости деформаций.

Получены результаты также в пределах нелинейных упругих моделей изотропных сред при больших деформациях. В частности в таблице 1 приведены результаты расчетов соответствующие выше рассмотренным фазовым переходам при предположении всесторонней деформации. В качестве модели деформирования использован

квадратичный упругий потенциал. В этом случае физические составляющие тензора напряжений в рамках теории больших начальных деформаций определяются с помощью формулы

$$S_{\beta\beta} = \frac{\lambda}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + \mu (\lambda_\beta^3 - 1). \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$  - коэффициенты укорочения вдоль координатных осей. Для сравнения в последнем столбце таблицы проведены также величины напряжений, вычисленной по линейной теории.

Таблица 1

Параметры	Номера переходов		
	1	2	3
$\lambda$	662	1020	1512.35
$\mu$	796	800	815.29
$\epsilon_0$	-0.0264	-0.027	-0.0235
$\lambda_1$	0.9732	0.9726	0.9762
$S_{11}^0$	-114.634	-146.537	-163.418
$\sigma_{11}$	-94.4592	-125.82	-144.939

Предполагая, что в рассматриваемой зоне имеется цилиндрическая полость кругового поперечного сечения в однородном силовом поле и, используя нелинейную теорию больших деформаций с применением квадратичного упругого потенциала для различных пород вычислены численные значения критических величин параметров удлинения ( $\lambda_1$ ), всесторонней деформации ( $\epsilon_0$ ), отношения плотностей  $\left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)$  и напряжений ( $S_{11}^0$ ) (таблица 2).

Таблица 2

Название породы	$\lambda_1^*$	$(\lambda_1)^*$	$\epsilon_0^*$	$(\epsilon_0)^*$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)^*$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)^*$	$(S_{11}^0)^*$ , Кбар	$(S_{11}^0)^*$ , Кбар
Форстерит	0.839084	0.94392	-0.14797	-0.05451	1.692717	1.189035	-660.755	-250.057
Оливин <sub>1</sub>	0.832984	0.941711	-0.15307	-0.05659	1.730174	1.197423	-678,993	-258,444
Оливин <sub>2</sub>	0.851196	0.948289	-0.13773	-0.05037	1.62148	1.172674	-604,367	-226,173
Оливин <sub>3</sub>	0.892175	0.962906	-0.10201	-0.03641	1.408151	1.120078	-492,645	-177,917
Фаялит	0.891633	0.962714	-0.1025	-0.03659	1.410721	1.120747	-449,727	-162,493
Шпинель	0.889347	0.961905	-0.10453	-0.03737	1.42163	1.123577	-716,063	-259,218
Гранат <sub>1</sub>	0.863368	0.952658	-0.1273	-0.04622	1.553863	1.156617	-683,21	-252,898
Гранат <sub>2</sub>	0.851138	0.948268	-0.13778	-0.05039	1.621812	1.172752	-531,847	-199,044
Энстатит	0.829716	0.940525	-0.15579	-0.05771	1.7507	1.201958	-642,116	-245,174

Величины с нижним индексом (\*) соответствует локальной потере устойчивости состояния равновесия возле цилиндрической полости [Кулиев, 1988], а с верхним индексом (\*) – потере «внутренней» неустойчивости, т.е. потере сплошности среды [Гузь, 1989; Кулиев, 1988].

Аналогичные результаты получены в случае наличия в среде контактных и свободных плоских поверхностей, включения в виде полос и цилиндрических форм тел.

Эти результаты показывают, что вследствие деформационных процессов в среде реализуются различные процессы уплотнения, разуплотнения и фазовых переходов. Последовательность этих процессов существенным образом зависят от структуры среды, ее степени деформированности, вида напряженно-деформированного состояния. Из результатов следует, что процесс структурной неустойчивости предшествует процессам фазовых переходов и разрушения. Такая последовательность этих процессов может вносить существенные дополнения к интерпретации экспериментальных и полевых данных.

#### Литература

- Гузь А.Н. Механика разрушения композитных материалов при сжатии. – К.: Наук. думка, 1989. – 632 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука., 1983. – 416 с.
- Кулиев Г.Г. Основы математической теории устойчивости скважин. Б.: Элм, 1988. – 168 с.
- Кулиев Г.Г., Аскеров А.Д. Решение нелинейной задачи о приращении плотности среды глубин Земли и его неустойчивость // Изв. НАНА, Серия Наук о Земле. – 2007. – №1. – С. 38-50
- Guliyev N.H. A new theoretical conception concerning the tectonic processes of the Earth // New Concepts in Global Tectonics Newsletter. – 2010. – №56. – P. 50-74.
- Guliyev N.H., Askerov A.D. Adams-Williamson's equation the limitation of non-classical linearized theory // Proceedings the sciences of earth Azerbaijan National Academy of sciences. – 2006. – №1. – P. 31-45.

### ДЕФОРМАЦІЙНИЙ СУПРОВІД ПРОЦЕСІВ УЩІЛЬНЕННЯ, РОЗУЩІЛЬНЕННЯ ТА ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ У ВНУТРІШНІХ СТРУКТУРАХ ЗЕМЛІ

Г.Г. Кулієв

На основі нелінійної теорії деформівних твердих тіл досліджуються процеси ущільнення, розущільнення, фазових переходів і руйнувань в умовах внутрішніх структур Землі. Показується, що втрати стійкості стану рівноваги по геометричній формозміні (структурна нестійкість) може передувати процесам розущільнення, фазових переходів і руйнувань.

**Ключові слова:** густина; деформація; фазовий перехід; нестійкість.

### DEFORMATION ACCOMPANYING OF PROCESSES OF CONSOLIDATION, DECONSOLIDATION AND PHASE TRANSITIONS IN INTERNAL STRUCTURES OF THE EARTH

N.H. Guliyev

The processes of consolidation, deconsolidation, phase transitions and destructions in the terms of internal structures of the Earth are studied on the base of non-linear theory of deformable solid bodies. It is shown that the loss of stability of equilibrium state can precede to the processes of deconsolidation, phase transitions and destructions on geometric form change (structural instability).

**Key words:** density; deformation; phase transitions; instability.

---

*Институт Геологии Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку*