

ОБ ОДНОМ ДО СИХ ПОР НЕУЧТЕННОМ ВНУТРЕННЕМ ИСТОЧНИКЕ ЭНЕРГИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассматривается вопрос об источниках энергии тектонических процессов в коре и литосфере. Показано, что мы регулярно упускаем из рассмотрения внутренний источник энергии, связанный с действием гравитационного напряженного состояния и расслоенностью горных массивов. Инверсию упругой жесткости следует рассматривать как фактор, определяющий отсутствие выполнения принципа Лагранжа для упругой энергии гравитационного напряженного состояния.

Ключевые слова: потенциальная энергия; гравитационное напряженное состояние; предел текучести; тектоническое течение.

Введение

В настоящее время в геодинамике единственным механизмом, обеспечивающим формирование внутрикорового течения только за счет собственной механической энергии, существующей в объеме, подверженном такому течению, считается плотностная инверсия (более плотный слой лежит на слое меньшей плотности). Другие механизмы деформирования слоев тектоносферы, включая термогравитационную конвекцию, требуют совершения работы на границах деформируемых объемов или подвода тепла извне, т.е. источник энергии лежит за пределами деформируемого массива. В настоящей работе будет представлен еще один механизм внутрикорового и, возможно, верхнемантийного течения, который энергетически обеспечен внутренним состоянием самой среды, деформируемой этим течением [Ребецкий, 2013].

Принцип минимума Лагранжа

Согласно теореме Лагранжа – Дирихле в механике устойчивым считается состояние, обладающее *минимумом потенциальной энергии*. В гидродинамике требование, вытекающее из теоремы Лагранжа – Дирихле о минимуме потенциальной энергии сил тяжести, определяет расположение слоев вязкой жидкости по возрастанию их плотности. В противном случае (инверсия плотности) система становится *неустойчивой*. В среде будет формироваться *адвекционное течение*, стремящееся привести систему к минимуму потенциальной энергии сил тяжести (неустойчивость Рэля – Тэйлора [Rayleigh, 1900]). В конечном итоге, в процессе течения, в системе из двух слоев жидкости, сверху оказывается менее плотный слой. Сам процесс течения обеспечивается разностью потенциальных энергий сил тяжести первого состояния, когда внизу лежал менее плотный слой, и второго, когда он оказался сверху.

В науках о Земле принцип минимума потенциальной энергии сил тяжести определяет увеличение с глубиной плотности слоев тектоносферы. Когда это условие не выполняется, то состояние считается неустойчивым. Поскольку на больших (геологических) временах горные породы ведут себя подобно жидкостям, в коре и мантии могут возникать течения, стремящиеся снизить уровень потенциальной энергии сил тяжести.

Энергия упругих деформаций также является потенциальной энергией. В приложении к текто-

носфере большая часть внутренней упругой энергии геосреды связывается с действием сил тяжести, т.е. с гравитационным напряженным состоянием (ГНС). Наибольший вклад в энергию этого состояния доставляет энергия упругого изменения объема, удельные значения которой для верхних слоев тектоносферы много больше энергии изменения формы (для средней коры более 95 %, а для мантии более 99,9 %). Интеграл по объему коры и мантии (нижняя и верхняя) дает значение этой энергии порядка $2,5 \cdot 10^{32}$ Дж. При таком расчете предполагается, что нормальные напряжения равны литостатическому давлению P_{lt} , а удельная упругая энергия объемного деформирования пропорциональна квадрату литостатического давления и обратно пропорциональна объемному упругому модулю K :

$$W_{od} \approx \frac{P_{lt}^2}{2K}. \quad (1)$$

Заметим, что даже для задачи плотностной инверсии изменение потенциальной энергии упругих деформаций ГНС также играют важную роль в процессе течения. Как видно из рис. 1, в случае смены расположения слоев также изменяется и литостатическое давление, а, следовательно, изменяется и удельная потенциальная упругая энергия гравитационного напряженного состояния, которую можно рассчитать согласно (1).

Принцип МУЭ для гравитационного напряженного состояния слоистых массивов

Считается, что ГНС является наиболее простым типом нагружения горных массивов, создающим условия для длительного и стабильного их существования. Отклонения от этого правила связывают с появлением в массиве слоев пониженной плотности. Однако это утверждение не всегда верно. Оказывается, в поле силы тяжести для слоистой среды, обладающей разными значениями модулей упругости, устойчивым является вполне определенная закономерность их распределения по глубине. Если этого требования не выполняется, то слоистая среда будет находиться в неустойчивом состоянии. Для нее будет существовать иное глубинное распределение слоев, для которых общая энергия упругих деформаций всей системы будет меньше, той, что имела место в начальном случае ее внутреннего строения.

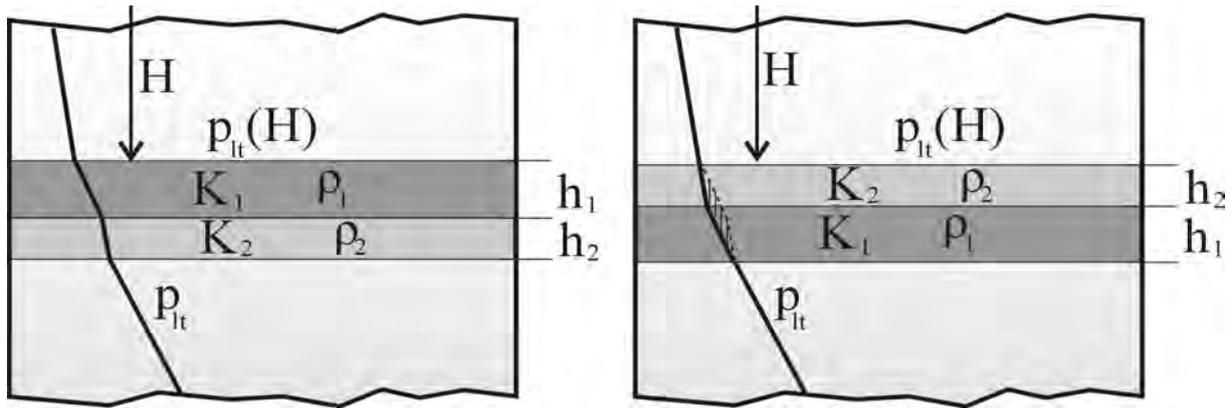


Рис. 1. Расчетная схема в виде двух слоев разных упругих свойств и разной плотности, расположенных на глубине действия литостатического давления $p_{lt}(H)$, при двух вариантах их взаимного положения (а, б). Ломаная сплошная линия определяет величины давления на разных глубинах. Заштрихованная область для второго состояния (б) характеризует изменение литостатического давления (потенциальной упругой энергии) в пределах двуслоя

В среде, допускающей появление больших необратимых деформаций, это явление должно сопровождаться тектоническим течением, обеспечивающим снижение уровня упругой энергии среды. Условием формирования больших деформаций является либо преодоление предела текучести в модели упруго-пластического тела, либо длительные (геологические) времена существования тектонического течения для модели упруго-ползучего (вязкого) тела.

Упругая энергия гравитационного напряженного состояния в слоистой среде

Рассмотрим два бесконечных горизонтальных, контактирующих друг с другом плоских слоя мощности h_i ($i = 1, 2$), обладающих разной плотностью и разной упругой сжимаемостью (компетентный и некомпетентный слои), и сравним упругую энергию этих слоев в поле действия только сил тяжести при разном их взаимном расположении. В первом варианте сверху находится слой с индексом 1, а во втором этот слой находится внизу. Полагаем, что кровля пачки из этих двух слоев в обоих случаях имеет одинаковую глубину, на которой действует литостатическое давление p_{lt} . Поскольку суммарный вес пачки слоев при смене их взаимного положения не меняется, то для сравнения энергий массива двух состояний достаточно сравнить энергию двухслойной пачки.

Будем полагать параметры, определяющие пластические свойства пород, таковыми, что в них уровень девиаторных напряжений много ниже всестороннего давления, равного на кровле пачки p_{lt} . Будем пренебрегать девиаторными напряжениями, полагая, что в среде действует только всестороннее давление, равное литостатическому. Если считать, что $p_{lt} \gg \rho_i g h_i$, и пренебречь

$(\rho_i g h_i)^2$ в сравнении с p_{lt}^2 , то для действия чисто ГНС удельная упругая энергия в каждом из слоев в первом случае их взаимного расположения может быть записана в следующем виде:

$$W_1 \approx \frac{(p_{lt} + \rho_1 g h_1) p_{lt}}{2K_1},$$

$$W_2 \approx \frac{(p_{lt} + 2\rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2) p_{lt}}{2K_2}. \quad (2)$$

Здесь нижний индекс определяет порядковый номер слоя сверху вниз, ρ_i и K_i - соответственно плотность и модуль объемной упругости слоев.

Запишем суммарную потенциальную энергию столбца двуслоя единичной латеральной длины l_x, l_y и мощности $h_1 + h_2$, состоящую из энергии сил тяжести и упругих деформаций:

$$\sum W_{12} \approx l_x l_y \left[\left(\frac{p_{lt} + \rho_1 g h_1}{2K_1} h_1 + \frac{p_{lt} + 2\rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2}{2K_2} h_2 \right) p_{lt} + g \rho_1 h_1 [h_1 / 2 + h_2] + g \rho_2 h_2^2 / 2 \right]. \quad (3)$$

Если слои поменять местами, сохранив их индексы, то суммарная энергия столбца этих двух слоев изменится:

$$\sum W_{21} \approx l_x l_y \left[\left(\frac{p_{lt} + \rho_2 g h_2}{2K_2} h_2 + \frac{p_{lt} + 2\rho_2 g h_2 + \rho_1 g h_1}{2K_1} h_1 \right) p_{lt} + g \rho_2 h_2 [h_2 / 2 + h_1] + g \rho_1 h_1^2 / 2 \right]. \quad (4)$$

Применяя к разности выражений (3) и (4) требование МУЭ, получим выражение, накладывающее ограничение на устойчивость состояния, отвечающее первому расположению слоев:

$$\left[\frac{\rho_1 g}{K_2} - \frac{\rho_2 g}{K_1} \right] p_{lt} + [\rho_1 - \rho_2] \leq 0. \quad (5)$$

Для $\rho_1 = \rho_2$ из условия (4) следует: $K_2 \geq K_1$, т.е. для системы из двух слоев одинаковой плотности энергия упругих деформаций меньше в том случае, если нижний слой имеет большую упругую жесткость. При одинаковых мощностях слоев и разной их плотности условие устойчивости (5) можно преобразовать к виду:

$$\frac{p_{lt}}{\bar{K}} \frac{\Delta K}{\bar{K}} + \chi \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \geq 0 \text{ при } \chi = 1 - \left(\frac{\Delta K}{\bar{K}} \right)^2 + \frac{2p_{lt}}{\bar{K}},$$

$$\begin{aligned} \Delta K &= K_2 - K_1, \quad \Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 \\ \bar{K} &= K_2 + K_1, \quad \bar{\rho} = \rho_2 + \rho_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Условие (6) показывает, что если $\Delta \rho > 0$ и $\Delta K > 0$ (плотность и упругая жесткость слоев с глубиной возрастает), то *состояние устойчивое* всегда. Если же $\Delta \rho < 0$ и $\Delta K < 0$ (плотность и упругая жесткость слоев с глубиной падает), то из (6) следует, что *состояние всегда неустойчивое*. Для случая, когда $\Delta \rho > 0$ и $\Delta K < 0$ (плотность возрастает с глубиной, а упругая жесткость слоев уменьшается) и для случая, когда $\Delta \rho < 0$ и

$\Delta K > 0$ (инверсия плотности при возрастании упругой жесткости слоев с глубиной) состояние может сохранить *устойчивость*, если выполняются определенные соотношения между параметрами, входящими в выражение (6).

Рассмотренный новый механизм смены равновесных состояний, связанный с инверсией упругой жесткости с глубиной, предлагается именовать как **неустойчивость гравитационного напряженного состояния слоисто-неоднородных сред**, отличая его от известного механизма гравитационной неустойчивости **Рэля - Тэйлора**, вызванного плотностной инверсией.

Литература

- Ребецкий Ю.Л. Об одном неучтенном источнике энергии тектонических процессов // Вестник КРАУНЦ 2013. № 1, вып. 21, С. 133-137.
- Biot M.A. The influence of gravity on the folding of a layered viscoelastic medium under compression // J. Franklin Inst. 1959. Vol. 267, No 3. 211 p.
- Rayleigh Lord. Investigation of the character of the equilibrium of an incompressible heavy fluid of variable density. Scientific Papers. 1900. ii. 200. Cambridge. England.

ПРО ОДНЕ, ДОСИ НЕ ВРАХОВАНЕ, ВНУТРІШНЄ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ ТЕКТОНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Ю.Л. Ребецкий

Розглядається питання про джерела енергії тектонічних процесів у корі та літосфері. Показано, що ми регулярно не беремо до розгляду внутрішнє джерело енергії, пов'язане з дією гравітаційного напруженого стану і розшаруванням гірських масивів. Інверсію пружної жорсткості слід розглядати як фактор, який визначає відсутність виконання принципу Лагранжа для пружної енергії гравітаційного напруженого стану.

Ключові слова: потенціальна енергія; гравітаційний напружений стан; межа текучості; тектонічна течія.

ON ONE UNACCOUNTED INTERNAL SOURCE OF THE ENERGY OF TECTONIC PROCESSES

Yu.L. Rebetsky

The question of power sources of tectonic processes in the Earth crust and lithosphere is considered. It is shown that the internal power source connected with the influence of a gravitational tension and mountain massif layering still missing in modern investigations. The inversion of the elastic rigidity should be considered as a factor that defines lack of the Lagrange principle for the elastic energy of the gravitational stress.

Keywords: potential energy; gravitational tension; fluidity limit; tectonic current.