

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ СЛОИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Ю.Л. Ребецкий

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

Предлагается при оценке устойчивости состояния расслоенных горных массивов учитывать не только данные о глубинном распределении плотности (гравитационная неустойчивость), но и модуля объемной упругости. Показано, что для слоистых сред устойчивым с энергетических позиций состоянием в поле гравитационного напряженного состояния является повышение с глубиной упругой объемной жесткости. В слоях тектоносферы, где наблюдается инверсия (снижение) с глубиной упругих модулей, имеет место избыточная энергия упругих деформаций изменения объема, формирующаяся от действия массовых сил, которая будет определять неустойчивость геосреды.

Потенциальная энергия, гравитационное напряженное состояние, упругие деформации, упругая сжимаемость, модули упругости, неустойчивость.

INSTABILITY OF LAYERED MEDIA UNDER GRAVITY STRESS

Yu.L. Rebetsky

It is proposed to consider data both on the deep density distribution (gravity instability) and the bulk modulus of elasticity on estimation of the stability of layered mountain ranges. It is shown that an increase in bulk elastic rigidity with depth is the stable state of layered media in terms of energy in the field of gravity stress. In the tectonosphere, in which the moduli of elasticity are inverted (decrease) with depth, excess energy of elastic strain of volume change is generated by body forces, and it will determine the instability of the geologic medium.

Potential energy, gravity stress, elastic deformation, elastic compressibility, moduli of elasticity, instability

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что гравитационное напряженное состояние является наиболее простым типом нагружения горных массивов, обеспечивающее длительное и стабильное их существование. Именно действием сил тяжести объясняют стремление к уплощению внутренних и внешних (кровля коры) границ тектоносферы. Отклонения от этого правила связывают только со случаями появления в массиве слоев пониженной плотности. Инверсия плотности с глубиной, когда легкое вещество находится под более тяжелым [Добрецов и др., 1993], приводит к формированию тектонического течения из-за невыполнения принципа минимума потенциальной энергии сил тяжести.

В геологии давно замечено, что существуют процессы тектонического течения пород, подобные тем, что связаны с инверсией плотности с глубиной, но в условиях, когда реально такой инверсии не наблюдается. В работах М.Г. Леонова [2008] исследуются природные структуры «всплывания» гранитных массивов, отличительным свойством которых является декомпрессионная дезинтеграция. Отмечены случаи формирования складок в глубине осадочного бассейна при отсутствии признаков больших латеральных сокращений пространства [Сорский, 1962]. Возникает вопрос — с какими явлениями, обеспеченными внутренними источниками энергии, можно связывать подобные процессы тектонического течения пород тектоносферы?

В работах В.С. Пономарева [2008] обсуждаются вопросы о возможных источниках энергии тектонических процессов. Высказывается гипотеза о существовании латентной энергии, которая определенным образом связана с историей деформирования горных пород и тем уровнем литостатического давления, который породе пришлось выдержать. С другой стороны, в начале XIX в. С. Аренниусом [Arrhenius, 1912] было предложено использовать механизм неустойчивости, вызванной инверсией плотности, для объяснения течения в горных породах.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ

Попробуем найти ответ на поставленный выше вопрос с энергетических позиций, связав неустойчивость состояния тектоносферы Земли с действием только массовых сил, но не ограничиваясь анализом только потенциальной энергии сил тяжести.

В основе доказательства единственности решения задач теории упругости лежит положение механики о достижении минимума суммарной внутренней энергии упругих деформаций (упругой энергии) тела конечного объема, подверженного нагружению вдоль внешних его границ и/или внутренними массовыми силами [Работнов, 1979]. Его также называют законом минимума потенциальной энергии деформаций или принципом наименьшей работы. При заданных условиях нагружения и принятых свойствах среды из всех возможных перемещений и напряжений внутри деформируемого объема реализуются те, которые обеспечивают достижение минимума суммарных значений упругой энергии (МУЭ). Этот принцип служит базисом вариационных — энергетических принципов, используемых для решения задач теории упругости, и распространяется на широкий спектр различных моделей среды (упругих, упругопластических, упруговязких и др.).

Вариационные принципы механики опираются на теорему Лагранжа—Дирихле, определяющую в качестве устойчивых консервативных механических систем те, которые обладают минимумом потенциальной энергии. Впервые эту гипотезу о минимуме действия механических систем в 1744 г. выдвинул французский математик и геодезист Пьер Луи де Мопертюи.

Условие минимума потенциальной энергии гравитационных сил требует расположения слоев в тектоносфере Земли по возрастанию их плотности. В противном случае система становится неустойчивой, и для сред, обладающих вязкой или пластической текучестью, будет происходить перераспределение вещества для достижения минимума потенциальной энергии сил тяжести. В конечном итоге в процессе течения в системе из двух слоев сверху оказывается менее плотный слой. Сам процесс течения обеспечивается разностью потенциальной энергии сил тяжести первого состояния, когда внизу лежал менее плотный слой, и второго, когда он оказался наверху. Эта разность энергии и выделится в тепло в процессе ползучести твердого тела или вязкопластического — тектонического течения.

Отметим, что в большинстве математических расчетов задач о плотностной инверсии применяются модели несжимаемого вязкого тела, а под использованным выше термином «тектоническое течение» понимается создание в геологической среде больших деформаций, сопровождающихся большими углами поворотов и большими перемещениями [Лукьянов, 1991].

Поскольку создание необратимых деформаций в процессе тектонического течения идет за счет уменьшающейся величины потенциальной энергии, будем далее употреблять термин «избыточная потенциальная энергия» в отношении состояния, которое не достигло устойчивой — стационарной — фазы деформирования.

Как выше уже было сказано, при формулировке проблемы неустойчивости слоистого массива в поле силы тяжести, вызванной глубинной инверсией плотности, теореме Лагранжа—Дирихле применяются к потенциальной энергии силы тяжести. Энергия упругих деформаций также является потенциальной, т.е. зависит только от начального и конечного состояния системы, именно поэтому на нее распространяется действие теоремы Лагранжа—Дирихле. В связи с вышесказанным возникает вопрос: в условиях действия только гравитационного напряженного состояния (ГНС) при любом ли распределении упругих свойств горного массива, состоящего из плоскопараллельных слоев одинаковой плотности, всегда ли имеет место минимум его потенциальной упругой энергии? Или имеются такие случаи чередования упругих свойств слоев массива, при которых этот принцип устойчивости не выполняется? Иными словами, можно ли путем простой перестановки по глубине слоев получить состояние, имеющее меньшее значение их внутренней энергии упругих деформаций, чем то, что имело место в начальном положении этих слоев?

Из первого вопроса следует и второй: в каких случаях наличие неравновесного состояния тектоносферы может приводить к появлению в массиве дополнительных деформаций и больших перемещений, обеспечивающих переход к новому равновесному состоянию?

Этот второй вопрос более простой, и здесь у нас уже есть опыт неустойчивых состояний тектоносферы, вызываемых глубинной инверсией плотности. Переход к новому равновесному состоянию происходит тогда, когда в массиве появляется возможность реализации тектонического течения. В приложении к задачам геодинамики коры и литосферы это требование определяет либо достижение предела текучести горных пород (катакластической или истинной пластической) или длительность действия процессов вязкопластического течения — десятки и сотни миллионов лет. Весь процесс течения и выделяющая в его процессе тепловая энергия будут обеспечены разностью потенциальной внутренней энергии начального и конечного упругих состояний.

Если в слоях горных массивов предельное состояние не достигнуто либо если скорости вязкого течения крайне низки (условия верхней кристаллической коры вне зон разломов), то эти слои могут бесконечно долго оставаться плоскими, не реализуя избыточную потенциальную энергию. Но когда в упругопластической среде преодолен предел текучести, то можно предположить, что невыполнение принципа МУЭ приведет к формированию тектонического течения, которое будет происходить так, чтобы наиболее быстро приблизиться к равновесному состоянию. Как показано в работах [Ребецкий,

2008а,б], в более прочных породах блоков кристаллической коры переход в закритическое состояние — катакластическое (трещинное) течение при флюидном давлении, близком к гидростатическому значению (вес столба жидкости на данной глубине), происходит на глубинах 3—5 км, а для зон разломов и массивов осадочных бассейнов — на глубинах 0.5—1.5 км.

АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ МУЭ ДЛЯ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ

Итак, нас будет интересовать следующая проблема: если в природном — актуальном — состоянии в горном массиве присутствуют слои, в которых плотность с глубиной не убывает (постоянна или возрастает), то во всех ли случаях при действии только гравитационных сил (внешнее нагружение и температурные градиенты отсутствуют) это состояние можно рассматривать устойчивым с энергетических позиций, и в таком массиве не возникнет адвекционное течение, подобное тому, которое имеет место при глубинной инверсии плотности.

Двуслойная пачка. Рассмотрим горизонтальную пачку из двух бесконечных плоских слоев мощностью h_i ($i = 1, 2$), расположенную в массиве на глубине, которая определяет на кровле верхнего слоя уровень вертикального литостатического давления, равный p_{lit} . Пусть слои имеют разную плотность ρ_i и объемную упругую сжимаемость K_i (компетентный и некомпетентный слой), отвечающую их актуальному состоянию в глубине массива при давлении p_{lit} (влиянием изменения давления в самой двуслойной пачке будем пренебрегать). Сравним упругую энергию этих слоев при разном их взаимном расположении в поле силы тяжести (см. рис. 1).

Будем полагать параметры, определяющие пластические свойства пород, такими, что в них уровень девиаторных напряжений много ниже всестороннего давления, равного p_{lit} . Для упругопластического тела Кулона—Мора или Друккера—Прагера подобная ситуация может быть обеспечена высоким уровнем флюидного давления, близким к литостатическому, а для тела Мизеса — низкими значениями предела текучести. Как показано в работах [Ребецкий, 2008а,б], при флюидном давлении в трещинно-поровом пространстве, близком к гидростатическому значению, девиаторные напряжения в верхней коре составляют только 25 % от всестороннего давления, а при вдвое большей величине флюидного давления, отвечающей осадочным бассейнам и консолидированным породам средней коры, их соотношение падает до 10 %.

Будем пренебрегать девиаторными напряжениями, полагая, что в среде действует только всестороннее давление, равное литостатическому. В этом случае удельная упругая энергия каждого из слоев может быть записана в следующем виде:

$$W_1^1 = \frac{(p_{lit} + \rho_1 g h_1 / 2)^2}{2K_1}, \quad W_2^1 = \frac{(p_{lit} + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 / 2)^2}{2K_2}. \quad (1)$$

Здесь нижний индекс определяет порядковый номер слоя, а верхний показывает, что рассматривается состояние, когда верхним является слой с индексом 1. При записи выражений (1) давление в каждом из слоев приближенно принималось равным значению в его середине.

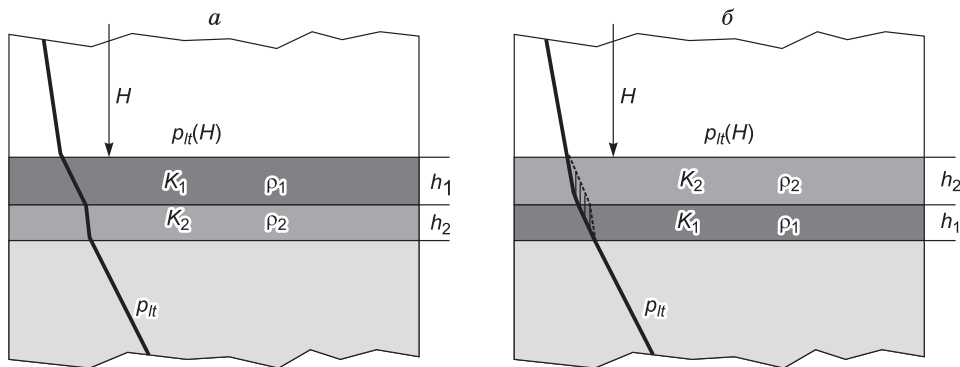


Рис. 1. Расчетная схема в виде двух слоев разных упругих свойств ($K_1 > K_2$), кровля которых расположена на глубине действия литостатического давления $p_{lit}(H)$, при двух вариантах их взаимного положения (а, б).

Ломаная линия показывает изменение с глубиной литостатического давления p_{lit} . На рис. б заштрихованная область — величина уменьшения в двуслое уровня литостатического давления после перестановки слоев.

Если слои поменять местами (см. рис. 1, б), то удельная упругая энергия каждого слоя принимает следующие выражения:

$$W_1^2 = \frac{(p_{lt} + \rho_2 g h_2 + \rho_1 g h_1 / 2)^2}{2K_1}, \quad W_2^2 = \frac{(p_{lt} + \rho_2 g h_2 / 2)^2}{2K_2}. \quad (2)$$

Для этого состояния в выражении (2) слои сохраняют свой нижний индекс, а верхний меняется на 2.

Используя (1) и (2), можно получить суммарную упругую энергию столбца единичной латеральной длины l_x, l_y и мощности $h_1 + h_2$, включающего в себя оба рассматриваемых слоя для двух состояний (см. рис. 1).

$$\sum W^1 = l_x l_y (W_1^1 h_1 + W_2^1 h_2), \quad \sum W^2 = l_x l_y (W_1^2 h_1 + W_2^2 h_2). \quad (3)$$

Разность значений двух выражений (3), определяющая разницу упругих энергий двух состояний для рассматриваемых столбцов двуслойной пачки, будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta W = \sum W^1 - \sum W^2 = l_x l_y h_1 h_2 \left(\frac{g \rho_1}{K_2} - \frac{g \rho_2}{K_1} \right) (p_{lt} + 0.5 \rho_1 g h_1 + 0.5 \rho_2 g h_2). \quad (4)$$

Согласно принципу МУЭ, устойчивость начального состояния, отвечающая расположению слоев сверху вниз по их индексам ($\Delta W < 0$), требует выполнения условия:

$$\frac{\rho_2}{K_1} \geq \frac{\rho_1}{K_2}. \quad (5)$$

Если положить плотности слоев одинаковыми ($\rho_1 = \rho_2$), то из (5) следует

$$K_2 \geq K_1, \quad (6)$$

т.е. принцип МУЭ требует расположения слоев в порядке возрастания их упругих модулей объемного сжатия. Если это условие не выполняется, то система потенциально неустойчивая.

Если плотности различны, то устойчивость системы определяется требованием минимума суммы потенциальной энергии упругих деформаций и потенциальной энергии сил тяжести. В приложении к рассмотренной системе из двух слоев это условие определяет необходимость выполнения выражения:

$$\left(\frac{\rho_1}{K_2} - \frac{\rho_2}{K_1} \right) (p_{lt} + 0.5 \rho_1 g h_1 + 0.5 \rho_2 g h_2) + (\rho_1 - \rho_2) \leq 0. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет оценивать наличие в среде избыточной потенциальной энергии, связанной как с упругими деформациями, вызванными ГНС, так и действием силы тяжести. Проявление избыточной потенциальной упругой энергии ГНС может быть различно и определяется конкретной структурой среды. Рассмотрим возможные начальные структуры, для которых должно проявляться стремление среды к достижению минимума потенциальной упругой энергии.

Некомпетентный блок в компетентном массиве. На рис. 2 проведены графики изменения удельной потенциальной энергии с глубиной двух типов пород, обладающих одинаковой плотностью в актуальном состоянии, но разными модулями объемной упругости. На основе этих графиков можно проиллюстрировать возможность уменьшения упругой энергии системы, состоящей из блока некомпетентной породы (модуль объемной упругости K_b), находящейся внутри компетентного массива (модуль объемной упругости $K_m > K_b$). При подъеме вверх на высоту H объема некомпетентной породы происходит замещение объема породы, обладающей упругим модулем большей величины. Соответственно, на место объема некомпетентной породы опускаются некомпетентные породы (см. схему рис. 2).

Из графика видно, что 1) в результате перемещения вниз вещества массива удельная упругая энергия этого объема увеличивается на величину $dW_m > 0$, отвечающую на рис. 2 длине соответствующей горизонтальной линии:

$$dW_m = \frac{p_{lt}^2}{2K_m} - \frac{(p_{lt} - \rho_m g H)^2}{2K_m} = \frac{(2p_{lt} - \rho_m g H) \rho g H}{2K_m}, \quad (8)$$

где p_{lt} — литостатическое давление на уровне середины блока некомпетентной породы; 2) в результате перемещения вверх некомпетентного блока его удельная упругая энергия уменьшается на величину $dW_b < 0$, отвечающую на рис. 2 длине соответствующей горизонтальной линии:

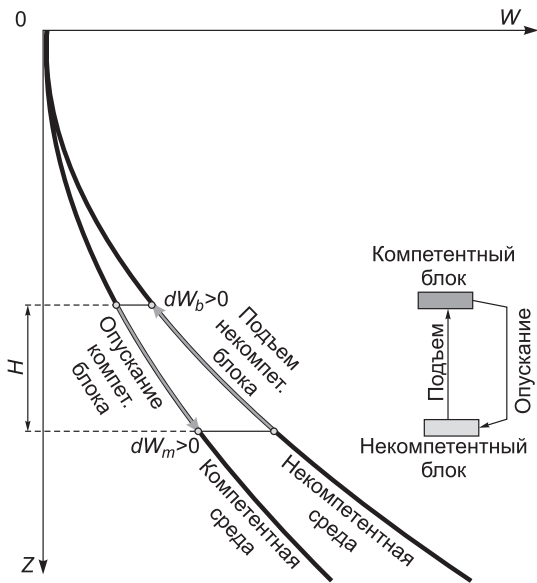


Рис. 2. Графики изменения с глубиной упругой энергии для массива, состоящего из пород разной упругой объемной жесткости.

Схема иллюстрирует изменение упругой энергии системы при подъеме вверх некомпетентного блока в компетентном массиве (замена компетентного блока на некомпетентный — стрелка вверх и некомпетентного блока на компетентный — стрелка вниз).

$$dW_b = \frac{(p_{lt} - \rho_b gH)^2}{2K_b} - \frac{p_{lt}^2}{2K_b} = -\frac{(2p_{lt} - \rho_b gH)\rho gH}{2K_b}. \quad (9)$$

При построении выражений (8) и (9) не учитывалось изменение давления по глубине блока, поскольку считалось, что вертикальная мощность блока $h_b \ll H$. В этом случае сумма выражений (8) и (9) для удельных потенциальных энергий дает возможность оценить изменение потенциальной энергии всей системы. Полагая при суммировании плотности пород массива и блока одина-

ковыми $\rho_b = \rho_m = \rho$, получим

$$dW = dW_m + dW_b = (p_{lt} - \rho gH/2)\rho gH \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_b} \right). \quad (10)$$

Выражение (10) показывает, что в результате перемещения некомпетентного блока вверх $dW < 0$ ($K_m > K_b$) и потенциальная упругая энергия системы уменьшается.

Обратим внимание на следующий факт. Если рассматривать другое начальное структурное состояние, когда массив сформирован из некомпетентного вещества, а блок из компетентного, то уменьшение потенциальной энергии системы будет в том случае, если компетентный блок перемещается вниз, а вверх поднимается соответствующий объем некомпетентного вещества. В этом случае изменение потенциальной энергии системы оценивается выражением

$$dW = dW_m + dW_b = (p_{lt} + \rho gH/2)\rho gH \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_b} \right) < 0. \quad (11)$$

Таким образом, как выше уже говорилось, менее энергозатратной структурой в поле гравитационных сил является расположение компетентных объемов ниже некомпетентных.

Сегментированный компетентный слой. Другая возможность снижения избыточной потенциальной упругой энергии иллюстрируется на рис. 3. Здесь показана схема двух разных состояний некомпетентного массива, внутри которого расположены одинаковые по длине горизонтальные сегменты высоты h более жесткой — компетентной породы. Предполагается, что при разных упругих модулях плотности массива и жестких сегментов одинаковые $\rho_s = \rho_m = \rho$. В первом состоянии жесткие сегменты образуют единый компетентный слой, расположенный на глубине, где действует литостатическое давление p_{lt} (см. рис. 3, а). Во втором состоянии эти сегменты смещены на одинаковое расстояние H вверх и вниз относительно начального состояния (см. рис. 3, б).

Рассчитаем изменение потенциальной упругой энергии всей системы в рамках тех же предположений, что и при вышеприведенных расчетах (пренебрегаем девиаторными напряжениями и изменением литостатического давления по высоте сегментов $h_s \ll H$). Поскольку объемы, замещаемые при движении вверх и вниз жестких сегментов, одинаковые, то для оценки изменений потенциальной энергии упругих деформаций всей системы достаточно рассчитать разницу удельных значений этой потенциальной энергии.

При перемещении вверх более упругоэластичный сегмент замещает объем, который здесь занимает порода массива, и разница удельной потенциальной энергии этого участка массива будет

$$dW_{up} = (p_{lt} - \rho gH/4)\rho gH \left(\frac{1}{2K_m} - \frac{1}{2K_s} \right). \quad (12)$$

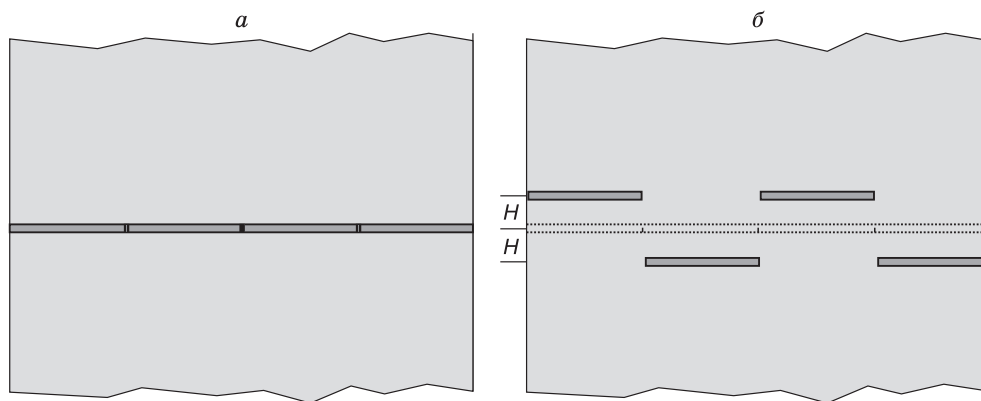


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая изменение геометрии сегментированного компетентного горизонтального слоя в некомпетентном массиве (а). Результатом новой геометрии системы (б) является уменьшение потенциальной энергии упругих деформаций (см. пояснение в тексте).

Пунктир на схеме б показывает начальное положение сегментированного компетентного слоя.

Здесь $K_s > K_m$ — модули объемной упругости вещества горизонтальных сегментов и массива соответственно.

При перемещении вниз жесткий сегмент замещает объем, который здесь занимает вещество массива, и разница удельной потенциальной энергии этого участка массива будет:

$$dW_{dw} = (p_{it} + \rho g H / 4) \rho g H \left(\frac{1}{2K_m} - \frac{1}{2K_s} \right). \quad (13)$$

Суммарные изменения удельной потенциальной энергии определяются выражением

$$dW = dW_{up} + dW_{dw} = -(\rho g H / 2)^2 \left(\frac{1}{2K_m} - \frac{1}{2K_s} \right) < 0. \quad (14)$$

Из (14) следует, что состояние, представленное на рис. 3, б, имеет меньшее значение потенциальной энергии упругих деформаций и, следовательно, состояние, представленное на рис. 3, а, обладает избыточной потенциальной энергией.

ОБСУЖДЕНИЕ

Данные о плотности и упругих модулях пород в их природном состоянии возможно получить сейсмическими и геофизическими методами и, в частности, по скоростям сейсмических волн:

$$K / \rho = v_p^2 \left(1 - \frac{4v_s^2}{3v_p^2} \right), \quad (15)$$

где v_p и v_s — соответственно скорости продольных и поперечных волн.

В рамках сейсмических исследований замечено общее правило, определяющее увеличение скоростей сейсмических волн с глубиной. Это автоматически связывается с увеличением с глубиной упругих модулей и плотности пород. Из выражения (15) видно, что если с глубиной возрастает скорость продольных волн при слабых изменениях отношения скоростей сейсмических волн, то модуль упругости увеличивается больше, чем увеличивается плотность:

$$\frac{\delta K}{K} = 2 \frac{\delta v_p}{v_p} + \frac{\delta \rho}{\rho}. \quad (16)$$

Существуют данные, показывающие, что отклонения от правила увеличения скорости сейсмических волн с глубиной могут наблюдаться в осадочных бассейнах, в средней части консолидированной

коры и в верхней мантии. Так, в частности, по сейсмологическим данным в коре в средней ее части (гл. 10—20 км) существует волновод (Гутенберга), в котором наблюдается резкое падение скорости (около 10 %) продольных волн [Леонов, 1994]. Заметим, что именно с этими участками коры связывается тектоническая и сейсмическая активность коры [Леонов, 1997; Добрынина и др., 2011; Teng et al., 2013].

Возможность изменения упругих свойств одних и тех же пород, находящихся в разных состояниях на разных горизонтах коры, следует из лабораторных экспериментов [Физические свойства..., 1976]. Так, рост температуры уменьшает скорости сейсмических волн, а повышение микропустотности пород и их флюидизация способны достаточно сильно (4—5 %) снизить скорости продольных и поперечных волн, особенно, если это микротрещиноватость (плоскостные пустоты) [Николаевский, 1980, 1996; Ваннын, Хайндман, 1996]. Известно [Ладынин, 2010], что повышение пластового давления флюида в трещиноватых горных породах до литостатических значений способно на 10 % уменьшить скорости сейсмических волн. В работах [Николаевский, Шаров, 1985; Николаевский, 1996], используя результаты на основе анализа данных сверхглубоких скважин, выполненного В.И. Шаровым, делается вполне обоснованное предположение, что в пределах большого диапазона глубин кристаллической коры вещественный состав пород мало изменяется. Изменение скоростей сейсмических волн в них связано с изменением структуры, увеличением и уменьшением объема трещинно-порового пространства и изменением давления флюида в нем. На основе этой гипотезы В.Н. Николаевским разработана модель механического поведения пород литосферы, в которой переход от упругохрупкого к упругопластическому состоянию связывается с границей Мохоровичича.

Существующие немногие экспериментальные данные [Лебедев и др., 1989, 1999; Zharikov et al., 2000; Лебедев, 2006] показывают сильное влияние флюида на физико-химические свойства пород в результате минеральных реакций и сопутствующих им изменений структуры пород. В этих экспериментах показана роль состава флюидов и летучих компонент (кислые, нейтральные и щелочные), определяющих разный ход химических реакций (гидратация или дегидратация, катионный и анионный метасоматоз и другие). Установлено, что в зависимости от состава флюида и температуры изменения скоростей упругих волн песчаника могут достигать 3—4 км/с, у амфиболита и базальта эти изменения могут быть значительно выше.

Таким образом, возможность резкого уменьшения значений упругих модулей в глубоких слоях осадочных бассейнов и кристаллической коре обосновывается как лабораторными экспериментами, так и практическими сейсмологическими и геофизическими исследованиями.

Другой вопрос, вытекающий из выполненных выше исследований, состоит в том, каким образом геологическая среда реализует избыточность потенциальной энергии упругих деформаций изменения объема? При ответе на этот вопрос, вероятно, надо учитывать структурные особенности горных пород, которые представляют собой гетерогенную на микро- и макроуровне среду, уникальные свойства которой до сих пор хорошо не изучены. Наличие в породе резко отличающихся по упругой жесткости включений, трещин и пор уподобляет ее гранулированным средам, исследование поведения которых восходит к работам К. Кулона, В. Ренкина и В.И. Курдюмова. Но, вероятно, существуют большие различия в механике сыпучих сред в том виде, как она развивалась в приложении к проблемам горной механики приповерхностных процессов и механики гранулированных сред с флюидом под высоким давлением [Сибиряков, Деев, 2008]. Находящийся внутри трещинно-порового пространства породы флюид влияет не только на прочностные ее свойства, но и сам является источником энергии упругого деформирования. Вопреки существующему мнению вода и водные смеси (флюид) обладают упругой сжимаемостью, которая на порядок ниже, чем упругая сжимаемость образцов кристаллических пород.

Порода со свойствами гранулированной среды в условиях высокого всестороннего давления как в твердой, так и в жидкой фазах (в трещинно-поровом пространстве пород) обладает способностью к уменьшению упругой энергии объемного сжатия за счет переупаковки, включающей дробления зерен [Николаевский, Шаров, 1985; Николаевский, 1996; Геза и др., 2001; Березин, Гольдин, 2003; Гольдин, 2004; Макаров, 2007]. Эта способность в сочетании с условиями стесненного деформирования в глубоких слоях коры может определять малую изменчивость плотности в процессе тектонического течения. Можно также предположить, что в условиях возможности изменения формы гранулированной среды с сохранением объема может иметь место формирование ненулевых деформаций суммы микродвигов. В этом случае уменьшающаяся энергия упругого изменения объема может прямо обеспечивать пластическое течение среды. Следует отметить, что вопросы возможности трансформации энергии упругого изменения объема в энергию изменения формы и обратно в условиях действия только ГНС ранее рассматривались в работах [Ребецкий, 2008а,б, 2011; Rebetzky, 2010] в связи с проблемой формирования остаточных напряжений горизонтального сжатия в областях больших вертикальных перемещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [Леонов, 2011] обращается внимание на необходимость приближения геологии к точным наукам за счет перехода от описательных методов к количественным. Тектонофизика, являясь одним из главных инструментов количественных исследований геологических процессов, предоставляет возможность геологам и геофизикам разрабатывать относительно простые, но эффективные методы оценки различных деформационных параметров природного состояния горных массивов. Теоретические тектонофизические исследования, выполненные в настоящей статье, показали, что при анализе устойчивости деформационного состояния слоистой тектоносферы необходимо учитывать потенциальную энергию упругих деформаций ГНС. Есть основания предполагать, что к неустойчивым состояниям следует относить слоистые среды, в которых имеется глубинная инверсия величины упругого объемного модуля.

Приложение исследованного в статье явления будет иметь место не только в геодинамике при решении проблемы механизмов эволюции тектонических структур и в тектонофизике при изучении механизмов генерации напряжений, но и в сейсмологии и геофизике, поскольку дает уникальный инструмент прямой интерпретации данных наблюдений. Полученные теоретические результаты могут также найти применение в нефтяной геофизике при изучении устойчивости состояний пластов с аномально повышенной трещинной пористостью и флюидным давлением.

ЛИТЕРАТУРА

Березин Ю.А., Гольдин С.В. Сейсмические волны в сыпучих грунтах в рамках гипопластической модели // Физическая мезомеханика, 2003, т. 6, № 1, с. 5—11.

Ваньян Л.Л., Хайндман Р.Д. О природе электропроводности земной коры // Физика Земли, 1996, № 4, с. 5—11.

Геза Н.И., Егоров Г.В., Мкртумян Ю.В., Юшин В.И. Экспериментальное исследование мгновенных вариаций скорости и затухания сейсмических волн в рыхлой среде *in situ*, подвергаемой пульсирующей динамической нагрузке // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (7), с. 1137—1146.

Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли, 2004, № 10, с. 37—54.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Гладков И.Н. Проблемы глубинной геодинамики и моделирование мантийных плюмов // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (12), с. 5—24.

Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (5), с. 712—724.

Ладынин А.В. Физические свойства горных пород. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 2010, 110 с.

Лебедев Е.Б. Влияние флюидов на геофизические свойства пород литосферы: экспериментальные исследования // Флюиды и геодинамика. М., Наука, 2006, с. 165—181.

Лебедев Е.Б., Кадик А.А., Дорфман А.М., Зебрин С.Р. Экспериментальное изучение влияния воды на скорость упругих волн в амфиболите при высоких P и T // Геохимия, 1989, № 5, с. 729—731.

Лебедев Е.Б., Рыженко Б.Н., Дорфман А.М., Зебрин С.Р., Жариков А.В., Соколова Н.Т., Буркхардт Х. Экспериментальное исследование влияния состава водных растворов на упругие свойства песчаника при высоких давлениях и температурах и компьютерное моделирование взаимодействия вода—порода // Геохимия, 1999, № 7, с. 686—695.

Леонов М.Г. Тектоника консолидированной коры. М., Наука, 2008, 464 с.

Леонов Ю.Г. Строение литосферы в отраженных волнах // Геотектоника, 1994, № 4, с. 85—88.

Леонов Ю.Г. Тектоническая подвижность коры платформ на разных глубинных уровнях // Геотектоника, 1997, № 4, с. 3—23.

Леонов Ю.Г. Тектоника и геодинамика на современном этапе: вопросы методологии исследований // Геология и геофизика юга России, 2011 (1), с. 4—19.

Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М., Наука, 1991, 143 с.

Макаров П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 724—746.

Николаевский В.Н. Дилатансия и теория очага землетрясения // Успехи механики, 1980, т. 3, вып. 1, с. 71—101.

Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М., Недра, 1996, 446 с.

Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1985, № 1, с. 16—28.

Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. М., Наука, 2008, 384 с.

Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М., Наука, 1979, 744 с.

Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика, 2008а, т. 11, № 1, с. 66—73.

Ребецкий Ю.Л. О возможном механизме генерации в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // ДАН, 2008б, т. 423, № 4, с. 538—542.

Ребецкий Ю.Л. Влияние упругой сжимаемости мантии на термогравитационную конвекцию. Конвективная неустойчивость гравитационного напряженного состояния // ДАН, 2011, т. 440, № 2, с. 250—255.

Сибиряков Б.П., Деев Е.В. Использование метода граничных интегральных уравнений для определения упругих модулей гранулированных геологических сред // Физическая мезомеханика, 2008, № 11, с. 85—93.

Сорский А.А. Об условиях формирования полной складчатости в осевой зоне Восточного Кавказа // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 9—41.

Физические свойства горных пород и подземных ископаемых / Ред. Н.Б. Дортман. М., Недра, 1976, 527 с.

Arrhenius S. Zur Physik der Salzlagerstätten. Meddelanden fran K. Vetenskapsakademiens Nobelinstitut, 1912, II. № 20.

Rebetsky Yu.L. Rock with elasticity in mantle convection // Геофизический журнал, 2010, т. 32, № 4, с. 138—139.

Teng J., Zhang Z., Zhang X., Wang C., Gao R., Yang B., Qiao Y., Deng Y. Investigation of Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles // Tectonophysics., 2013, v. 609, p. 202—216. doi:10.1016/j.tecto.2012.1011.1024.

Zharikov A.V., Lebedev E.B., Dorfman A.M., Vitovtova V.M. Effect of saturating fluid composition on the rock microstructure, porosity, permeability and V_p under high pressure and temperature // Phys. Chem. Earth, 2000, v. 25, № 2, p. 215—218.

*Рекомендована к печати 26 ноября 2013 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
24 апреля 2013 г.*