

Термобарическая упругая неоднородность земной коры и динамика ее изменения

В. А. Корчин

Институт геофизики НАН Украины; Киев

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Методом сопоставления экспериментальных данных изучения упруго-плотностных характеристик горных пород (V_p , V_s , ρ) в зависимости от давления и температуры, изменяющихся по программам соответствующих их распределению с глубиной конкретного региона и материалов глубинного сейсмического зондирования, установлено, что в земной коре на глубинах 3-25 км существуют зоны низких скоростей (волноводы) термодинамической природы.

Комплексными структурно-физическими экспериментальными исследованиями образцов пород после дискретной РТ нагрузки показано, что при давлении и температуре, характерных глубинам зон инверсии скорости, породы разуплотнены, в основном, в области межзерновых контактов, наблюдается эффект делотансии со следами катакластических преобразований. С увеличением глубины залегания пород (воздействующих на образец породы давления и температуры) наведенные структурные изменения минерального вещества, характерные для верхних низкоскоростных горизонтов, устраняются за счет упруго-пластического преобразования последней, подобно региональному метаморфизму. Скорости упругих волн в породе интенсивно возрастают.

Зоны низких скоростей в земной коре термодинамической природы неустойчивы и чувствительны к изменениям глубинных термодинамических условий. Их конфигурация (мощность, интенсивность, расположения в земной коре) зависит от глубинных тепловых потоков конкретного региона, теплопроводности пород. Даже в стабильно-стационарных термобарических условиях больших глубин коровые зоны низких скоростей могут менять свои характеристики за счет временных изменений теплопроводности пород.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зона низких скоростей; термобарические условия; теплопроводность; скорости упругих волн; Украинский щит

Ссылка: Корчин В. А. (2010), Термобарическая упругая неоднородность земной коры и динамика ее изменения, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6019, doi:10.2205/2010NZ000037, 2010

Глубинными сейсмическими исследованиями литосферы установлены аномалии упругого поведения минеральной среды на различных глубинах в виде, так называемых, зон низких скоростей (з.н.с.). Зоны выявлены в континентальной и океанической коре, в районах различной тектонической активности и расположены, как правило, на глубинах 3-25 км (Рис.1).

В зависимости от методики обработки данных ГСЗ эти зоны имеют мощность от нескольких метров до 20 км с уменьшением скорости в них от десятков метров на секунду до $0,4 \div 0,6$ км/с. Абсолютные значения скорости в зоне обычно $6,1 \pm 0,4$ км/с. (в тектонически активных регионах $V_{pmin} \approx 5,6 \div 6,6$ км/с) [Трипольский и Шаров, 2004; Структура..., 1980]. Коровые зоны низких скоростей, как правило, ограничены по площади и вертикали. Природа зон недостаточно изучена. Ряд исследователей полагает, что они вещественного происхождения, другие связывают их с тектоническими нарушениями сплошности коры (зоны повышенной трещиноватости, подобие горизонтальным разломам). Некоторые объясняют появление этих зон локальным обводнением пород соответствующих толщ коры. Есть мнение, что в области з.н.с. происходит понижение литостатического давления, обусловленное воздыманием верхней части пород земной коры над зоной за счет тектонических сил, направленных навстречу друг к другу и образованием упругой "арки". Каждый из предложенных вариантов образования зон низких скоростей в земной коре может существовать, однако трудно объяснить условия возникновения и механизмы реализации их повсеместно на определенных глубинах (5-15 км) в различных геологических, тектонических и геотермических условиях.

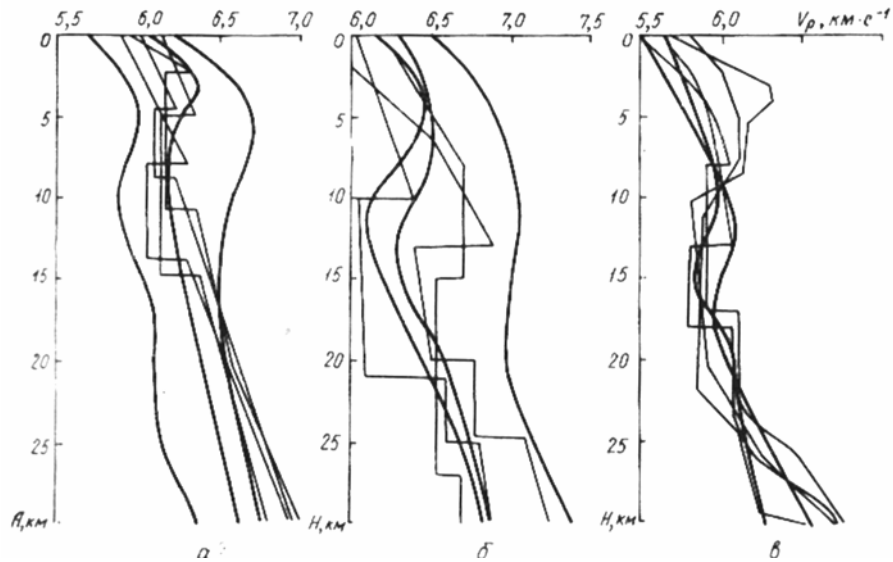


Рис. 1. Распределение с глубиной скоростей упругих волн в верхних горизонтах литосферы по данным взрывной сейсмологии (ломаные тонкие линии) и результатам лабораторных опытов (плавные толстые кривые) для некоторых регионов: а – Украинский щит, б – Малый Кавказ, в – Рудные горы (Германия).

Многолетними экспериментальными исследованиями горных пород различного минерального состава в условиях высокого давления и температуры, нами установлены сложные зависимости изменения их упругих параметров с глубиной [Лебедев и др., 1986; Корчин, 2003, 2008; Korchin, 2006; Korchin et al., 2007]. Суть экспериментальных исследований сводится к определению упруго-плотностных параметров пород в зависимости от программного изменения в аппарате высокого давления РТ-параметров, соответствующих конкретным значениям давления (Р) и температуры (Т) на различных глубинах литосферы. Образец породы в эксперименте как бы "погружается" на определенную глубину, при этом контролируются его характеристики (Рис. 2).

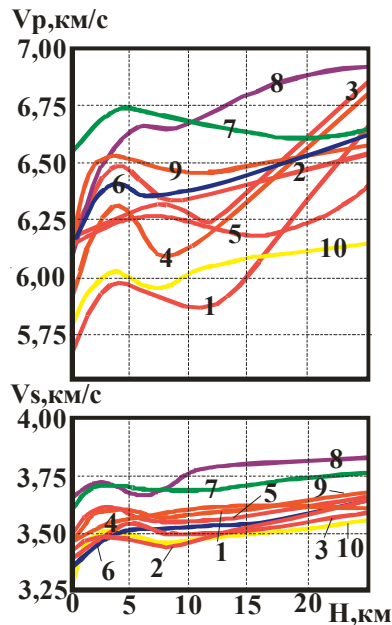


Рис. 2. Изменение $V_{p,s}=f(PT)=f(H)$ с глубиной: 1 – граниты равномернозернистые, 2 – граниты порфировидные, 3 – граниты рапакиви, 4 – плагиограниты, 5 – граниты трахитоидные, 6 – средние породы, 7 – основные породы, 8 – ультраосновные породы, 9 – чарнокитоиды, 10 – гнейсы.

На экспериментальных кривых $V_{p,s}=f(PT)=f(H)$ выявлены области инверсии скоростей. С увеличением глубины, другими словами, термобарических параметров опыта (РТ),

воздействующих на образец породы, после некоторого увеличения $V_{p,s}$ и ρ наблюдается область их уменьшения. Затем скорости и плотности вновь возрастают. Таким образом, на зависимости $V_{p,s}=f(PT)=f(H)$ образуется зона низких скоростей. Эти экспериментальные зоны хорошо коррелируются по своей конфигурации и местоположению с упругими аномалиями, выявленными в земной коре в естественных условиях методом ГЗС [Трипольский и Шаров, 2004; Структура..., 1980; Лебедев и др., 1986; Корчин, 2003].

Изменения $V_{p,s}=f(H)$ также могут быть рассчитаны по данным измерения серии изобар скоростей ($V_p=f(T)$ при $P=const$) и их изотерм ($V_p=f(P)$ при $T=const$) (Рис. 3). Соответствующими исследованиями нами было показано, что обе используемые методики определения $V_p=f(H)$ дают идентичные результаты [Лебедев и др., 1986].

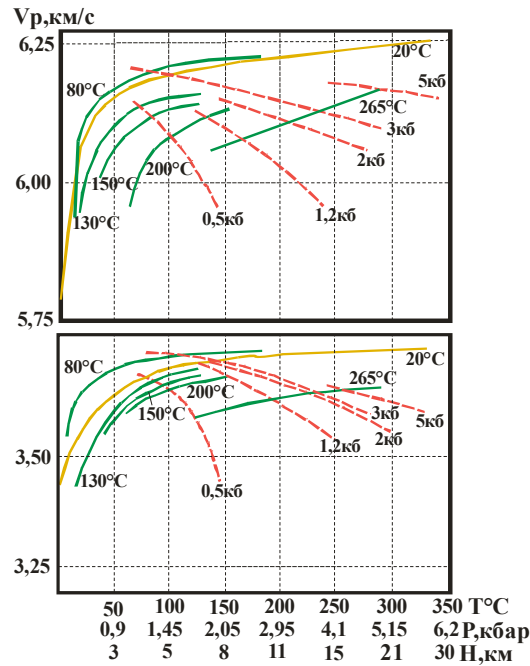


Рис. 3. Изобары и изотермы изменения скорости V_p в граните.

Независимо от методик, экспериментально по нескольким PT -программам или расчетами по изобарам и изотермам скоростей установлено, что существует пороговое значение изменения с глубиной температуры $\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)$ при котором возникают области аномального упругого состояния минерального вещества – зоны низких скоростей.

Изменения с глубиной скорости распространения упругих волн (V_p) в породе постоянного минерального состава может быть рассчитано по

соотношению: $\frac{\partial V}{\partial H} = \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \frac{\partial P}{\partial H} + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \cdot \frac{\partial T}{\partial H}$. Зоны низкой скорости в земной коре

определяются условием: $\frac{\partial V}{\partial H} < 0$. Поскольку $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$, $\frac{\partial P}{\partial H}$, $\frac{\partial T}{\partial H}$ положительны, а $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P < 0$,

то для образования зоны необходимо выполнение условия для абсолютных величин:

$$\left| \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \cdot \frac{\partial P}{\partial H} \right| < \left| \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \cdot \frac{\partial T}{\partial H} \right| \quad (1)$$

В земной коре, в большинстве случаев, изменение литостатического давления с глубиной можно считать постоянной величиной. Так, на глубинах от 3 до 40 км для древних щитов

$\left(\frac{\partial P}{\partial H}\right) \approx 0,24 \div 0,32 \text{ кбар} / \text{км}$. Градиент изменения температуры на этих глубинах варьирует

в широких пределах – от 5 до 25 °С/км [Кутас, 1978; Лебедев и др., 1980]. Исследования показали, что относительные увеличения скоростей от давления при комнатных Т характеризуются двумя участками: $P=0-2$ кбар – область максимального увеличения скорости, $P>2$ кбар – градиент изменения скорости минимальный. Как правило изменение скорости от температуры при атмосферном давлении имеет три участка: $T<80-100^{\circ}\text{C}$ (минимальные изменения), $T\approx 80-250^{\circ}\text{C}$ (максимальные изменения V_p). Дальнейший нагрев в интервале ($T=250-600^{\circ}\text{C}$) приводит к невысокому уменьшению скорости. Относительные изменения скорости при компенсирующем постоянном давлении (изобары) и постоянной внешней температуре (изотермы) отличаются по абсолютным величинам. В интервале 20-70 °С при $P<0,7$ кбар изменения скоростей от температуры незначительны; т.е с глубиной до 2-3 км скорости всегда интенсивно возрастают. Это обусловлено увеличением V_p от давления за счет уплотнения породы. Интервал $T=100-250^{\circ}\text{C}$ – область наиболее интенсивных изменений $V_p=f(T)$. Здесь возможно уменьшение скорости за счет действия температуры в два раза при атмосферном давлении и порядка 10-20% при компенсирующем давлении $P\approx 1-4$ кбар. Именно в этом интервале давлений и температур ($P\approx 1,2-3,5$ кбар; $T\approx 110-250^{\circ}\text{C}$) наблюдаются наибольшие отрицательные изменения скорости распространения упругих волн в породах и обнаруживаются зоны низких скоростей. Экспериментальными исследованиями установлен:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -2,7 \pm 0,5 \text{ (} P\approx 0,5 \text{ кбар); } -0,7 \pm 0,3 \text{ (} P=2 \text{ кбар); } -0,33 \pm 0,1 \text{ м/с}\cdot^{\circ}\text{C (} P=5 \text{ кбар) и } V_p \text{ от}$$

давления при различных постоянных температурах $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = 0,8 \pm 0,3$ (интервал давления 0-2

кбар, температура 20-80°C); $0,01 \pm 0,005$ (при $P\approx 2-5$ кбар, $T\approx 20-80^{\circ}\text{C}$); $0,04 \pm 0,01$ (при $P\approx 2-5$ кбар, $T\approx 265^{\circ}\text{C}$). На основании этих данных и опытов, выполненных по программам (низко и высокотемпературным режимам), расчетами установлено, что в случае реализации

низкотемпературного режима опытов $\left(\frac{\partial T}{\partial H} < 9 - 11 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{км}}\right)$ зоны инверсии скоростей на

зависимостях $V_p=f(PT)=f(H)$ не проявляются. Если температурный градиент $\frac{\partial T}{\partial H} > 15 - 20 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{км}}$

в интервале давлений 1,8-3,5 кбар на зависимостях $V_p=f(PT)$ зоны низких скоростей проявляются четко. Уменьшение скоростей в этих зонах для различных образцов пород варьируют от -10 до -250 м/с (Рис. 4).

Мощность слоев с пониженной скоростью от 2 до 20 км (60% в интервале 6-12 км). Как правило, глубины минимальных значений V_p расположены в интервале суперпозиции давлений и температур, соответствующих 9-16 км.

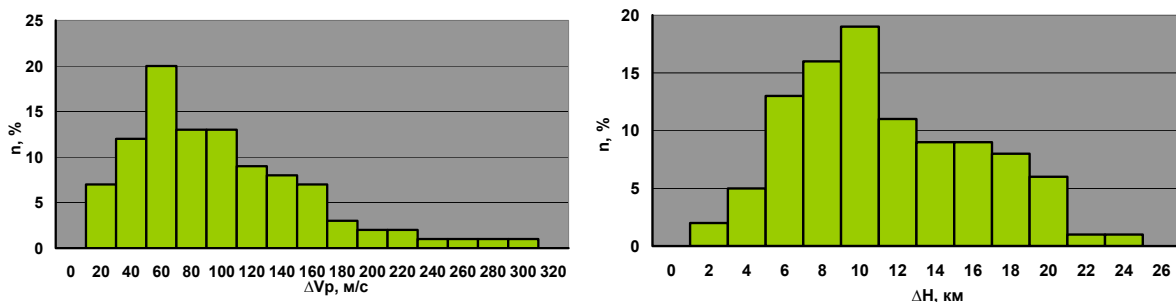


Рис. 4. Гистограммы распределения ΔV_p (уменьшение скорости в зоне) и ΔH (мощности слоя зоны низких скоростей) по данным эксперимента.

Как видим (Рис. 2-5), конфигурация экспериментальных зон низких скоростей (глубина залегания, мощность, занижение скорости) подобны обнаруженным в ходе глубинного сейсмического зондирования земной коры (Рис. 5). Это дает нам право предполагать, что вероятнее всего, в земной коре на указанных глубинах зоны низких скоростей имеют

термодинамическую природу [Лебедев и др., 1986; Корчин, 2003, 2008; Korchin, 2006; Korchin et al., 2007].

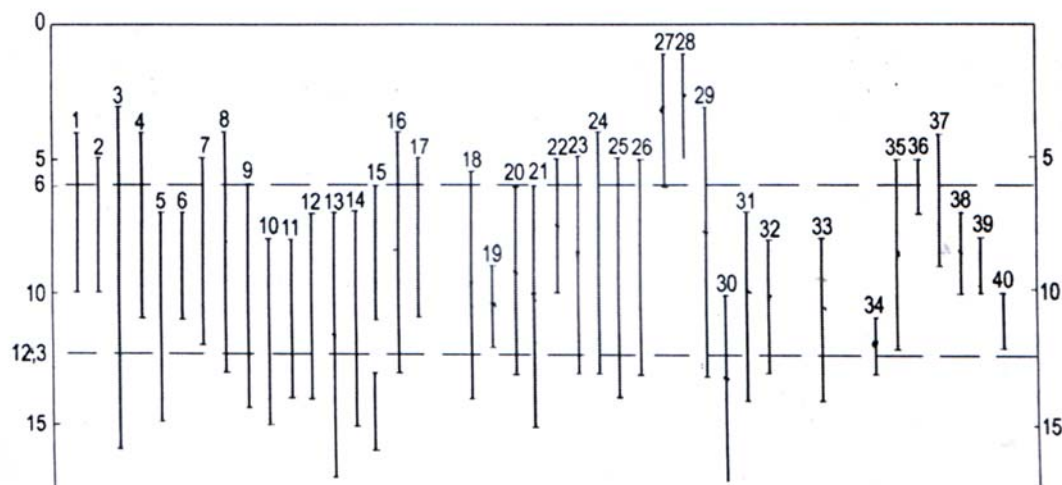


Рис. 5. Распределение волноводов в земной коре Украинского (1-17), Балтийского (18-32), Индийского (33), Канадского (34-40) щитов [Трипольский и Шаров, 2004]. $\Delta V_V=0,1-0,7$ км/с (0,1-0,22 км/с). $\Delta H_V=3-15$ км. $H_{мин}=5-12$ км.

Обобщая результаты приведенного в работе комплексного структурного исследования различных пород Украинского щита при высоких давлениях и температуре [Корчин, 2007] оптическими, рентгеноструктурными, электроно-микроскопическими методами, анализируя материалы изучения упругих характеристик пород, можно сделать ряд предположений о природе упругой вертикальной зональности минерального вещества отдельных горизонтов земной коры. Прежде всего, в зоне низких скоростей ($H=3\div 15$ км, $P=1,5\div 3$ кбар, $T=150\div 250^\circ\text{C}$) уменьшаются упругие константы пород (E , G , K), значительно увеличивается двойникование минералов, расширяются межзерновые границы за счет их милонитизации, увеличивается количество магистральных микротрещин. Происходит растрескивание и разрушение газожидких включений. Уменьшаются блоки мозаики отдельных зерен минералов. Увеличивается плотность дислокаций в блоках и уменьшается в межзерновых границах. Увеличивается относительная деформация зерен, их двойникование. Увеличиваются дефекты упаковки минералов. Увеличивается число центров генерации дислокаций, которые перемещаются в основном за счет трансляционного скольжения. Совокупность обнаруженных микроструктурных преобразований породы свидетельствует о низкотемпературном упругом упрочнении и хрупком разрушении минерального вещества [Korchin et al., 2007].

При дальнейшем увеличении глубины «погружения» породы, т.е. программного увеличения действия на образец РТ-параметров ($H>25$ км, $P>5,5$ кбар, $T>300^\circ\text{C}$) наблюдается интенсивное увеличение упругих параметров породы.

Комплекс упругих и структурных изменений пород, начиная от термодинамических условий на глубине 3-5 км до 12-15 км, свидетельствует о свойствах пород, характерных их катакластическому преобразованию. В данном интервале РТ-изменений происходит разуплотнение минеральной среды – явление дилатансии. Основным механизмом этого – совместное действие развивающихся в среде неравномернораспределяющихся неоднородных напряжений по объёму образца, иногда достигающих в локальных контактах значений больше предела прочности отдельных минералов, приводящих к хрупким на микроуровне разрушениям среды. Такому разуплотнению способствуют разноориентированные анизотропные коэффициенты линейного расширения отдельных минералов, эффект разрушения газожидких включений, миграция свободной воды и газа по микротрещинам породы. Микроструктурные нарушения породы подготавливают условия для ее существенных преобразований с увеличением глубины (РТ-условия опыта) после постепенного уплотнения породы включаются механизмы, характерные пластическим деформациям среды происходит совершенствование породы за счет вещественных и структурных (на уровне элементарных

дефектов) перестроек. С некоторыми допущениями, пользуясь геологической терминологией, в интервале глубин 20-40 км наблюдается процесс регионального метаморфизма.

Полагаем, что наличие зон низких скоростей в земной коре является объективной реальностью, как результат структурных преобразований пород в условиях противоборства давления и температуры, характерных для определенных глубин литосферы. Они возникают в тех случаях, когда градиент температуры на соответствующих глубинах превосходит определенный порог, а давление не способно компенсировать нарушение минеральной среды, вызванное действием температуры. Экспериментально и расчетным путем показано, что условия возникновения термобарических зон аномального поведения минерального вещества на определенных глубинах весьма чувствительна к температурам. Очевидно, флуктуации температуры на глубинах 7-20 км могут изменять параметры зоны низких скоростей вплоть до их исчезновения.

Причиной такого явления может быть изменение теплового режим за счет изменения физических характеристик пород в зоне. Нами экспериментально подтверждено, что существует тесная связь в различных РТ-условиях между теплопроводностью пород и их упругими характеристиками. Если предположить, что в минеральном веществе земной коры передача тепла осуществляется в основном фононной теплопроводностью, то ее величину можно оценить из простого выражения [Структура..., 1980; Korchin, 2006]:

$$\lambda_{\phi} = \frac{1}{3} C_{y\phi} \rho V_{\phi} l_{\phi} = \frac{\delta_0 \beta V_{cp} \rho}{3 \mu \gamma^2 T} \approx B \frac{V_m \rho^{-1/3}}{T} \quad (2)$$

где $C_{y\phi}$ – удельная теплоемкость, ρ – плотность, V_{ϕ} – средняя скорость пробега фононов, равная средней скорости распространения упругой волны: $(1/V_p^3 + 2/V_s^3)^{-1/3}$, l_{ϕ} – средняя длина свободного пробега фононов, δ_0 – средняя константа решетки, β – сжимаемость, μ – средний молекулярный вес, γ – параметр Грюнайзена $\gamma = \frac{d \ln \theta}{d \ln \rho}$, T – температура, θ – температура

Дебая, B – постоянный коэффициент, включающий постоянные параметры независимые от РТ-условий.

На основании приведенного соотношения следует, что изменение теплопроводности в земной коре в каком-то интервале глубин прямо пропорционально изменению упруго-плотностных характеристик минеральной среды и обратно пропорционально температуре. Расчетами и экспериментальными данными $V_p=f(PT)$, $\lambda=f(PT)$ было показано [Лебедев и др., 1986; 1980], что теплопроводность пород в земной коре изменяется подобно $V_p=f(H)$, т.е. на зависимости $\lambda=f(H)$ выделяются области минимальных значений, совпадающие с подобными для скоростей (Рис. 6).

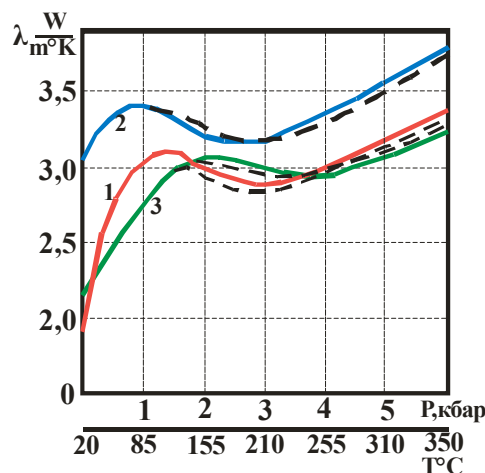


Рис. 6. Теплопроводность горных пород при различных термобарических условиях. 1 – гранит, 2 – кварцит, 3 – чарнокит. Сплошные линии – по данным экспериментальных измерений, пунктирные – вычисленные по упругим параметрам.

Таким образом, зона низких скоростей в земной коре характеризуется пониженными значениями λ и является отражающим горизонтом для теплового потока, источником которого являются термоактивные процессы на больших глубинах. По классическим законам

термодинамики и теплофизики [Нацкеин, 1969] наличие слоя с пониженной теплопроводностью на пути распространения тепловой энергии, приводит к повышению температуры на нижнем участке слоя и понижению ее на верхнем (Рис. 7) в связи с пересечением тепловым потоком горизонта с пониженной теплопроводностью. При этом нарушается равновесное РТ-условие существования зоны низких скоростей. С понижением температуры в верхней области зоны нарушается термобарическое условие (1). Состояние пород верхнего слоя зоны выравнивается с состоянием вышележащих пород и верхняя кромка зоны опускается вниз (Рис. 7). Одновременно, пропорционально разнице теплопроводности минеральной среды зоны в нижней части подстилающих ее пород происходит перегрев подошвы зоны, что приводит к нарушению опять же условия (1) и нижняя кромка зоны опускается вниз. Более высокое давление останавливает рост зоны за счет компенсации термических структурных нарушений пород давлением (Рис. 7).

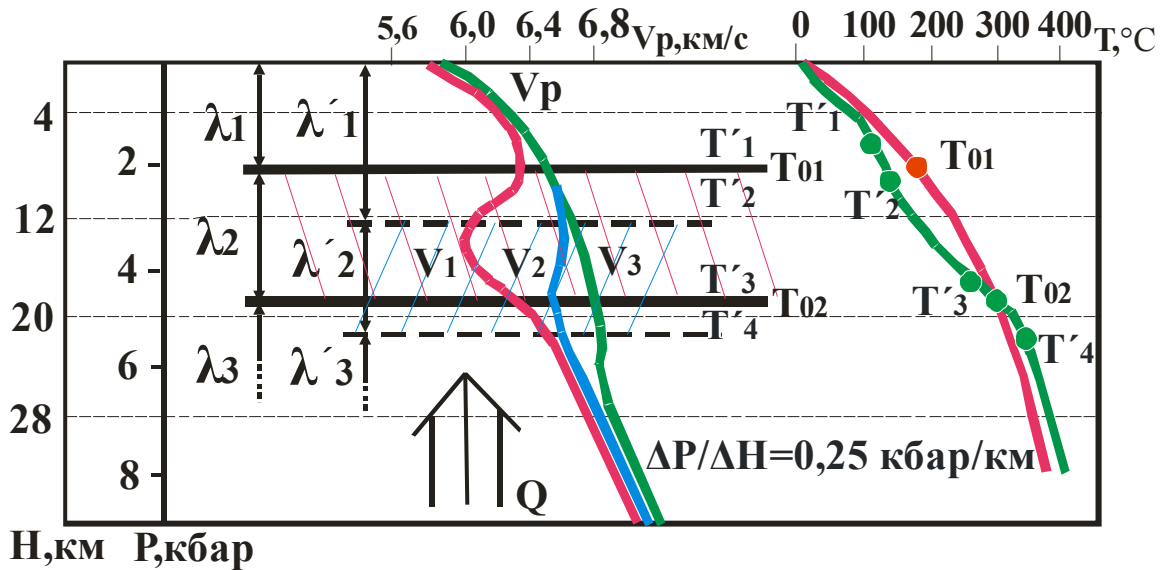


Рис. 7. Динамика изменения параметров зоны низких скоростей в связи с изменением глубинного теплового потока (Q).

Таким образом, зона изменяет свою конфигурацию – ее мощность может увеличиваться (с увеличением интенсивности глубинного теплового потока) или она исчезнет (с понижением поступления достаточного тепла с глубины). Подобная неустойчивость, нестабильность термодинамической зоны низкой скорости обуславливает их эпизодичность проявления в земной коре, а также их миграцию по глубине и горизонтали в зависимости от флуктуации температурного поля в земной коре.

Литература

- Лебедев Т. С., В. А. Корчин, Б. Я. Савенко, В. И. Шаповал, С. И. Шепель (1986), *Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы*, : Наук. думка, Киев.
- Лебедев Т. С., В. И. Шаповал, В. А. Корчин, А. А. Правдивый (1980), Определение теплопроводности минерального вещества по акустическим измерениям в различных термобарических условиях, *Геофиз. журн.*, № 5, 33—39.
- Корчин В. А. (2003), Термобарическое петроструктурное моделирование земной коры Украинского щита и природа некоторых сейсмических границ, *Материалы V-х геофизических чтений им. Ф.Ф.Федынского*, : Центр ГЕОН, Москва, с 83.
- Корчин В. А. (2007), Структурные особенности минеральной среды в РТ-условиях различных глубин земной коры, *Геофизический журнал*, 29, №3, 49-77.
- Кутас Р. И. (1978), *Поле тепловых потоков и теоретическая модель земной коры*, Наук. думка, Киев.

КОРЧИН: ТЕРМОБАРИЧЕСКАЯ УПРУГАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ

- Нашекин В. В. (1969) *Техническая термодинамика и теплопередача*, Изд-во «Высшая школа», Москва.
- Структура земной коры Центральной и Восточной Европы* (1980), Наук. Думка, Киев.
- Трипольский А. А., Н. В. Шаров (2004), *Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным*, Карельский научный центр РАН, Петрозаводск.
- Korchin V. A. (2006), Thermobaric Seismic Stratification of the Lithosphere, *12 International Symposium on Deep Structure of the Continents and their Margins*, Shonan Village Center, Naayama, Japan. – NHA-P02.
- Korchin V. A, V. P. Kobolev, P. A. Burtny, E. E. Karnaukhova (2007), The thermobaric nature of the low seismic velocities zone's in the Earth crust, *Международный научно-практический семинар "Модели земной коры и верхней мантии"*, Санкт-Петербург, Россия. – CD ROM.
- Корчин В. А. (2008), Коровые термобарические преобразования минерального вещества и связанное с ними сейсмическое вертикальное расслоение литосферы, *Матеріали наукової конференції «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища»* 6-10 жовтня, Львів, Україна, с. 36-38.

В. А. КОРЧИН Институт геофизики НАН Украины; г. Киев-142, пр. Палладина, 32 , Украина 03680; т: +380(44)424-28-44; ф.: +380(44)450-25-20; e-mail: korchin@igph.kiev.ua