

## ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24+551.7+528.5+550.3

ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ  
ЗЕМЛИ

Н. А. Чуйкова, Т. Г. Максимова

(ГАИШ)

E-mail: chujkova@sai.msu.ru

Исследование статистических связей между высотами эквивалента рельефа и глубинами поверхности мантии ( $M$ ) для различных регионов Земли выявило нелинейность как передачи нагрузки рельефа на  $M$ , так и обратной передачи. Знание функции прямой и обратной регрессии позволило разделить уравнение общего равновесия коры на два уравнения, на основе решения которых определены оптимальные глубины компенсации, минимизирующие функционал, зависящий от аномалий плотности и напряжений в коре и верхней мантии. Найдено распределение аномальных масс и напряжений в коре и мантии.

## Введение

В настоящее время не вызывает сомнения наличие горизонтальных движений земной коры, фиксируемых как изменение координат пунктов в системе осей Тиссерана. Долгопериодическая компонента таких движений обычно объясняется движением литосферных плит относительно мантии, энергетически связанным с конвективными движениями в мантии. Однако вполне возможен другой механизм, связанный со смещением блоков коры относительно мантии. Энергетика такого движения обусловлена изостатической неуравновешенностью коры, а его возможность связана с наличием слоев повышенной вязкости в коре и в верхней мантии. Поэтому исследование изостатического равновесия коры Земли играет важнейшую роль в решении проблем геодинамики.

Обычно основной поверхностью, на которой осуществляется изостатическое равновесие масс рельефа, считается поверхность Мохоровичича ( $M$ ). В этом случае между коэффициентами разложения относительных высот рельефа и глубин  $M$  по сферическим функциям должна существовать линейная связь, и любому избытку масс рельефа соответствует противоположная по знаку компенсация на границе  $M$ . Однако наши исследования [1] показали как непостоянство связи для различных номеров гармоник, так и неполную компенсацию для различных регионов Земли. Этим фактам могут быть даны следующие объяснения: 1) кора и верхняя мантия неоднородны по плотности; 2) отдельные регионы коры находятся в напряженном состоянии, и поэтому происходит нелинейная передача нагрузки рельефа на  $M$ ; 3) часть нагрузки коры компенсируется ниже поверхности  $M$ ; 4) кроме передачи нагрузки рельефа  $\rightarrow$  кора  $\rightarrow$  мантия существует и обратная передача, обусловленная как архимедовыми силами, так и восходящими потоками флюидов из мантии

в кору; 5) кора и верхняя мантия взаимно изостатически некомпенсированы, и полная компенсация происходит на большей глубине.

Пункты 2, 4 были исследованы в [1]. Пункт 5 может быть исследован только при привлечении другой геофизической информации. В настоящей же работе было определено распределение аномальных масс и напряжений в коре и верхней мантии при различных вариантах изостатической компенсации (пункты 1, 3).

В качестве исходных данных были использованы полученные нами разложения высот эквивалентного рельефа и глубин  $M$  по сферическим функциям 36-й степени:  $h_i(\varphi, \lambda) = h_0 + \Delta h_i$ ,  $d_i(\varphi, \lambda) = d_0 + \Delta d_i$ , где  $h_i(\varphi, \lambda)$ ,  $d_i(\varphi, \lambda)$  — усредненные по 5-градусным трапециям высоты рельефа и глубины  $M$  относительно геоида,  $h_0 = -1.66$  км — средняя высота рельефа,  $d_0 = 22.0$  км — средняя глубина  $M$ ,  $\Delta h_i = \sum_{n=1}^N H_n(\varphi, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (\overline{C}_{nm} \cos m\lambda + \overline{D}_{nm} \sin m\lambda) \overline{P}_{nm}(\sin \varphi) -$  высоты рельефа относительно среднего уровня,  $\overline{P}_{nm}(\sin \varphi)$  — нормированные по Каула полиномы Лежандра,  $\Delta d_i = \sum_{n=1}^N D_n(\varphi, \lambda)$ . Коэффициенты разложений приведены на веб-сайте: <http://lnfm1.sai.msu.ru/~chujkova>.

1. Изостатическая компенсация путем  
выравнивания аномального давления  
коры и верхней мантии

Если принять постоянство ускорения силы тяжести  $g$  для верхних слоев Земли, то общее равновесие коры и мантии на глубине  $D_{\text{comp}}$  можно представить уравнением

$$\left( \sigma_0 \Delta h_i + \Delta_i^{(k)} (\Delta h_i + h_0 + d_0 + \Delta d_i) - \overline{\Delta \sigma} \Delta d_i + \Delta_i^{(m)} (d_{\text{comp}}^{(i)} - \Delta d_i) \right) g = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_0 = 2.67 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta_i^{(k)}g$ ,  $\Delta_i^{(m)}g$  — отличия удельных нагрузочных давлений коры и мантии от средних значений,  $\overline{\Delta\sigma} = 0.31 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — средний скачок плотности на границе  $M$ ,  $d_{\text{comp}}^{(i)} = D_{\text{comp}}^{(i)} - d_0$  — глубина компенсации относительно среднего уровня  $M$ . При нелинейной передаче нагрузки рельефа на  $M$  уравнение общего равновесия можно разложить на две составляющие: частичная компенсация давления коры на поверхности  $M$ , задаваемая функцией регрессии  $\Delta d$  на  $\Delta h$ ,

$$\sigma_0 \Delta h_i + \Delta_i^{(k)} (\Delta h_i + h_0 + d_0) - \Delta\sigma_i \Delta \tilde{d}_i = 0 \quad (2)$$

и компенсация давления некомпенсированной на  $M$  части коры на глубине  $D_{\text{comp}}$

$$\Delta\sigma_i (\Delta \tilde{d}_i - \Delta d_i) + \Delta_i^{(m)} d_{\text{comp}}^{(i)} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta\sigma_i$  — скачок плотности на  $M$ ,  $\Delta \tilde{d}_i = \sum_{n=1}^N A_{hd}(n)H_n(i) + B_{hd}(n)$  — часть глубин  $M$ , обусловленная нагрузкой рельефа и аномальным давлением коры,  $A_{hd}(n)$ ,  $B_{hd}(n)$  — степенные коэффициенты регрессии  $\Delta d$  на  $\Delta h$  [1].

Нами были рассмотрены четыре варианта компенсации, соответствующие различному распределению по глубине аномалий плотности и модулей упругости в коре и мантии: 1) однородное распределение аномалий как в коре, так и в мантии вплоть до поверхности  $M$ . В этом случае  $\Delta\sigma_i = \overline{\Delta\sigma} + \Delta_i^{(m)} - \Delta_i^{(k)}$ ; 2) аномалии в коре локализованы в слоях, лежащих выше поверхности  $d_{\text{min}}(\varphi, \lambda) = \min(d_i, \tilde{d}_i, d_0)$ , т. е.  $\Delta\sigma_i = \overline{\Delta\sigma} + \Delta_i^{(m)}$ ; 3) аномалии в мантии локализованы в слоях, лежащих ниже поверхности  $d_{\text{max}}(\varphi, \lambda) = \max(d_i, \tilde{d}_i, d_0)$ , т. е.  $\Delta\sigma_i = \overline{\Delta\sigma} - \Delta_i^{(k)}$ ; 4) аномалии в коре и мантии локализованы в слоях, лежащих вне слоя, ограниченного поверхностями  $d_{\text{min}}$  и  $d_{\text{max}}$ , т. е.  $\Delta\sigma_i = \overline{\Delta\sigma}$ .

Для вариантов 3 и 4 решения  $\Delta 1_i^{(k)}$  и  $\Delta 1_i^{(m)}$  уравнений (2), (3) относительно  $\Delta_i^{(k)}$  и  $\Delta_i^{(m)}$  разделяются, и распределение аномалий в коре не зависит от распределения аномалий в мантии и от глубины компенсации, а определяется только функцией регрессии  $\Delta d$  на  $\Delta h$ . Для вариантов 1 и 2 существует функциональная зависимость аномалий как в коре, так и в мантии от глубины компенсации.

## 2. Изостатическая компенсация путем установления архимедова равновесия коры в верхней мантии

Точно так же значения аномалий в коре можно получить на основе функции обратной регрессии мантия  $\rightarrow$  кора  $\rightarrow$  рельеф. В этом случае уравнение (1) можно разделить на следующие две составляющие: архимедово равновесие коры в верхней мантии

$$\sigma_0 \Delta \tilde{h}_i + \Delta_i^{(k)} (\Delta \tilde{h}_i + h_0 + d_0) - \Delta\sigma_i \Delta d_i = 0 \quad (4)$$

и компенсация нагрузки неуравновешенной части рельефа за счет подъемной силы источников в мантии

$$\left(\sigma_0 + \Delta_i^{(k)}\right) \left(\Delta h_i - \Delta \tilde{h}_i\right) + \Delta_i^{(m)} d_{\text{comp}}^{(i)} = 0, \quad (5)$$

где  $\Delta \tilde{h}_i = \sum_{n=1}^N A_{dh}(n)D_n(i) + B_{dh}(n)$  — часть высот рельефа, обусловленная подъемной силой источников в коре и вариациями границы  $M$ ,  $A_{dh}(n)$ ,  $B_{dh}(n)$  — степенные коэффициенты регрессии  $\Delta h$  на  $\Delta d$  [1].

Аналогично, как для (2), (3), решения  $\Delta 2_i^{(k)}$  и  $\Delta 2_i^{(m)}$  уравнений (4), (5) для вариантов 3 и 4 разделяются. Для вариантов 1 и 2 решение определяется не только функцией регрессии  $\Delta h$  на  $\Delta d$ , но также зависит от глубины компенсации. В оба решения  $\Delta 1$  и  $\Delta 2$  вносят вклад аномалии плотности коры и мантии, а также аномалии давлений. Разделяются они следующим образом:  $\Delta_i^{(k)} = (\Delta 1_i^{(k)} + \Delta 2_i^{(k)})/2$  — аномалии плотности коры;  $\Delta_i^{(m)} = (\Delta 1_i^{(m)} + \Delta 2_i^{(m)})/2$  — аномалии плотности мантии;  $\Delta p_i^{(k)} = (\Delta 1_i^{(k)} - \Delta 2_i^{(k)}) (\Delta h_i + h_0 + d_0 + \Delta d_i) g/2$  — аномальное давление в коре, передающееся на границу  $M$ . Оно равно по величине и противоположно по знаку давлению на рельеф, обусловленному корой;  $\Delta p_i^{(m)} = (\Delta 1_i^{(m)} - \Delta 2_i^{(m)}) (d_{\text{comp}}^{(i)} - \Delta d_i) g/2$  — аномальное давление в верхней мантии, передающееся на нижнюю границу компенсации. Оно равно по величине и противоположно по знаку аномальному давлению на кору, обусловленному мантией ( $\Delta p_i^{(m)} = -\Delta p_i^{(k)}$  при изостатическом равновесии);  $\Delta m_i^{(k)} = \Delta_i^{(k)} (\Delta h_i + h_0 + d_0 + \Delta d_i)$  — аномальные массы коры;  $\Delta m_i^{(m)} = \Delta_i^{(m)} (d_{\text{comp}}^{(i)} - \Delta d_i)$  — аномальные массы мантии.

## 3. Оптимальная глубина компенсации

Расчет значений аномалий в коре и мантии для фиксированной глубины компенсации показал, что наиболее приемлемой глубиной, на которой достигается минимум аномалий и устойчивость решения, является  $D_{\text{comp}} = 100$  км практически для всех регионов. Исключение составляют район Северо-Западной котловины Тихого океана и примыкающие к ней регионы ( $\varphi = 20^\circ - 50^\circ$ ,  $\lambda = 140^\circ - 190^\circ$ ). Для этих регионов решение получилось крайне неустойчивым для фиксированных глубин и абсолютно несоответствующим имеющимся геофизическим данным. Поэтому нами был выбран путь определения для каждой пятиградусной трапеции оптимальной глубины компенсации, при которой достигается минимум напряжений и аномальных масс в коре и верхней мантии. Оптимальное решение было найдено на основе всех вариантов компенсации следующим образом.

Для первого и второго вариантов для каждой пятиградусной трапеции определялась глубина компенсации, при которой функционал

$$F(d_{\text{comp}}^{(i)}, \varepsilon) = |\Delta m_i^{(k)}| + |\Delta m_i^{(m)}| + |\Delta p_i^{(k)}| + |\Delta p_i^{(m)}| + \varepsilon \max \left( |\Delta_i^{(k)}|, |\Delta_i^{(m)}|, |\Delta_i^{(m)} - \Delta_i^{(k)}| \right)$$

достигал устойчивого абсолютного минимума или сводился к плоской асимптоте. Параметр  $\varepsilon$  минимизировался таким образом, чтобы получаемые аномалии плотности в коре и мантии по всей Земле не превышали среднего скачка плотности на  $M$ . Поскольку для вариантов 3 и 4 рассмотренный функционал практически не зависит от глубины компенсации, то для этих вариантов глубина задавалась на основе максимального статистически значимого значения по региону, полученного для первых двух вариантов. Затем из четырех вариантов компенсации выбирался вариант, характеризующийся минимальным значением функционала. При равенстве значений функционалов выбирался вариант, соответствующий минимуму потенциальной энергии. На рис. 1 представлено полученное в итоге распределение оптимальных глубин компенсации по всей Земле. В таблице приведено распределение глубин компенсации по различным регионам, полученное на основе первого и второго вариантов.

Из таблицы видно, что пик глубин компенсации для океанов приходится на кору (глубины 0–10 км), для материков — на верхние слои мантии, прилегающие к  $M$  (глубины 40–50 км), для переходных зон — на глубины 30–40 км. В основном глубины компенсации не превышают 90 км для океанов, 70 км для материков, 50 км для переходных зон, поэтому в 3-м и 4-м вариантах компенсации для данных регионов можно принять эти значения в качестве максимальных глубин компенсации. Значения глубины компенсации, превышающие 207 км, получены не были (исследовалась зона до глубин 700 км с шагом 1 км).

#### 4. Изостатическое равновесие коры и верхней мантии

На рис. 2–5 представлены решения уравнений равновесия в виде карт распределения аномальных масс и давлений в коре и верхней мантии. Положительный знак в картах давлений соответствует направлению вдоль вектора силы тяжести; карты отражают давление на нижние границы соответствующих

слоев (давление на верхние границы равно по величине и противоположно по знаку). Таким образом, положительный знак соответствует вертикальным напряжениям растяжения, отрицательный — вертикальным напряжениям сжатия.

Поскольку общее напряжение в отдельной трапеции коры равно по величине и противоположно по знаку напряжению в мантии, то для коры на рис. 5 приведена разность напряжений между нижней и верхней корой для случая, когда среднее напряжение в коре и в мантии равно нулю (т. е. при компенсации в коре). Концентрация аномалий в коре заметна в переходных зонах и океанических островах, предельные значения разности напряжений достигают  $\pm 12$  МПа. Для случая компенсации в мантии (рис. 4) предельные значения вертикальных напряжений сжатия в мантии (соответственно напряжений растяжения в коре) характерны для океанических котловин ( $-15$  МПа) и переходных зон, максимальные вертикальные напряжения растяжения в мантии — для СОХ (13 МПа), высокогорья и также переходных зон. Максимальные значения аномальных масс коры (рис. 2) и мантии (рис. 3) также характерны для указанных регионов ( $\pm 7 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>). Недокомпенсированность рельефа на  $M$  максимальна для рифтовой зоны Африки ( $\Delta = (\Delta m_i^{(k)} + \Delta m_i^{(m)})g = -86$  МПа) и на СОХ, перекомпенсированность — для Австралии (88 МПа) и для океанических котловин.

Несмотря на большой разброс значений аномалий, заметно существенное различие средних характеристик по регионам. Так, в регионах СОХ и флангов, в среднем характеризующихся большими отрицательными значениями аномальных масс коры и мантии, при преобладании напряжений растяжения в мантии и сжатия в коре, есть и области с напряжениями противоположных знаков. Аналогично в котловинах с большими положительными аномалиями масс, в целом характеризующихся напряжениями сжатия в мантии и растяжения в коре, встречаются области с противоположными знаками напряжений. Также велик контраст напряжений между прибрежными и переходными зонами, платформами с повышенным и пониженным залеганиям границы  $M$ , высокогорьем. Динамическим следствием контрастов аномалий в соседних регионах, а также между корой и мантией могут быть как горизонтальные, так и вертикальные движения в ослабленных (по реологии) слоях, что может привести к нарушению изостатического равновесия. Интересно

Распределение глубин компенсации по регионам (%)

$D_{\text{comp}}, 10$ км	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–21	0–21
Океаны	25.5	5.2	0.4	0.7	0.8	0.4	0.7	0.6	0.7	2.1	37.0
Материки	—	—	—	2.3	14.3	3.6	0.8	0.2	0.1	0.3	21.7
Переходные зоны	3.2	2.8	1.8	10.8	2.6	0.7	0.3	0.4	0.1	0.4	22.9
Вся Земля	28.7	8.0	2.1	13.7	17.7	4.7	1.8	1.1	1.0	2.8	81.7

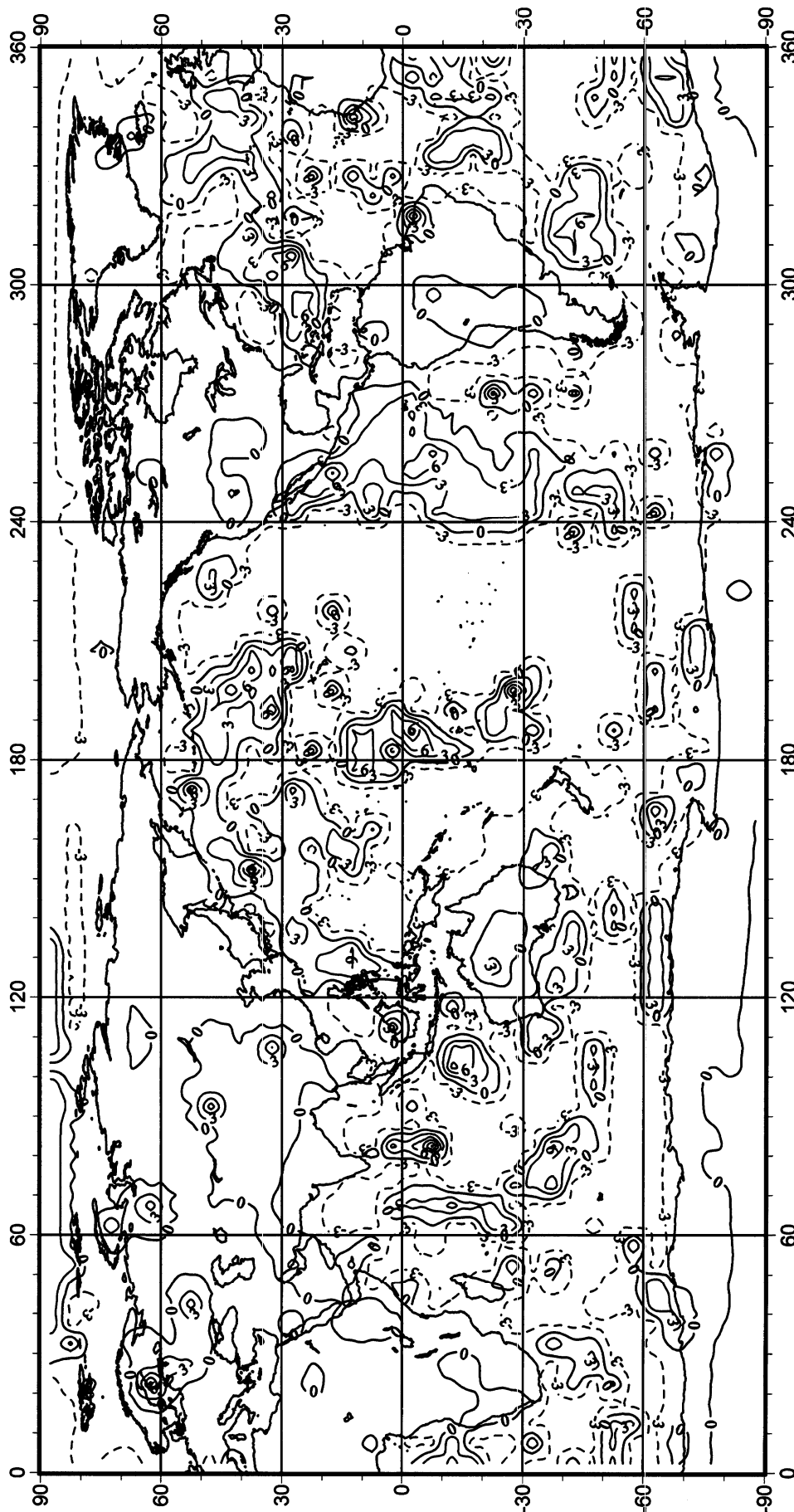


Рис. 1. Глубины компенсации аномальных масс коры и мантии (в десятках км, относительно среднего значения 50 км).  
Сечение изолиний 30 км. Диапазон изменений  $-50 \div 157$  км

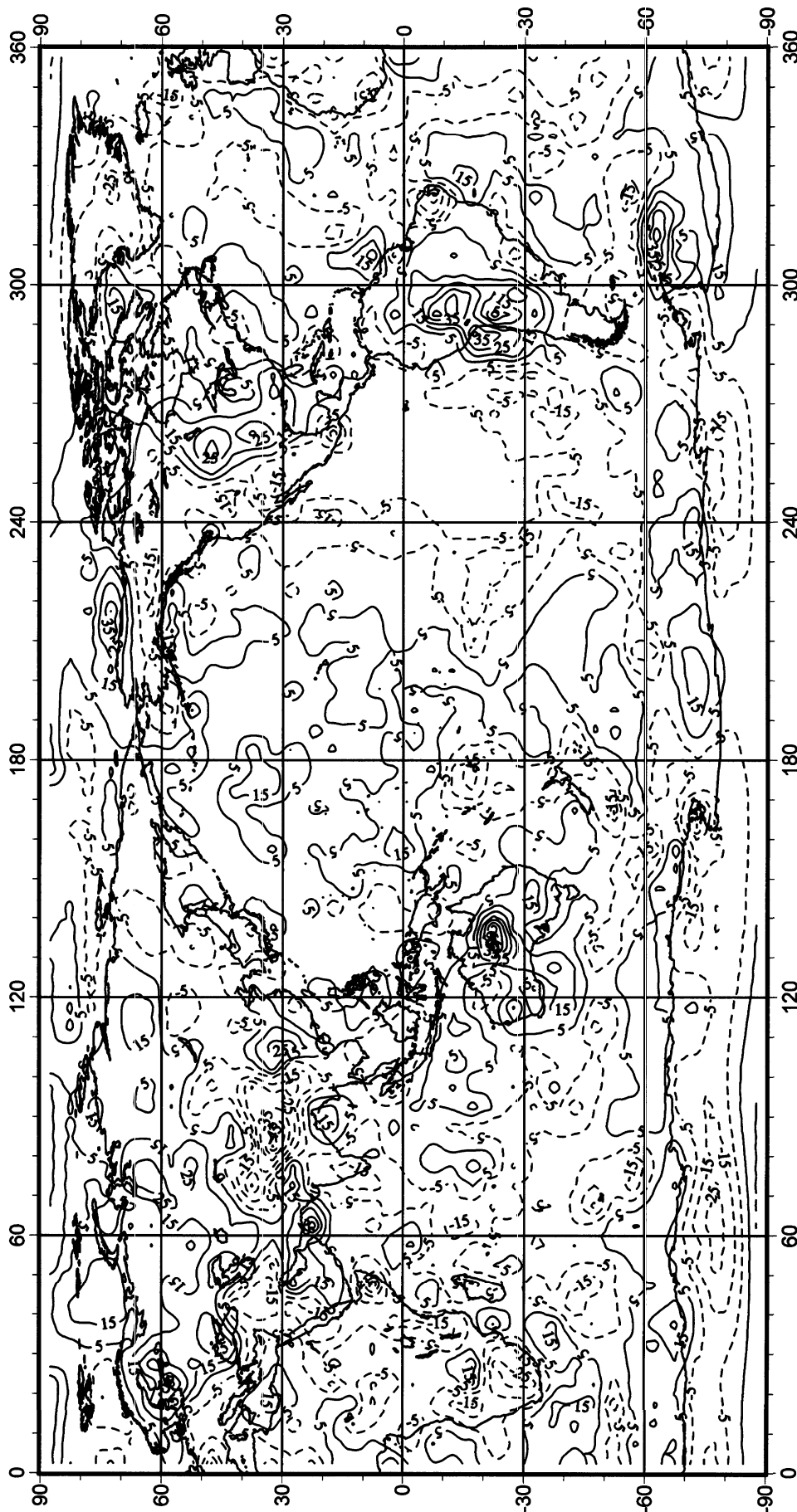


Рис. 2. Аномальные массы коры ( $\times 10^5$  кг/м<sup>2</sup>). Сечение изолиний  $10^6$  кг/м<sup>2</sup>.  
Диапазон изменений  $(-6.6 \div 7.6) \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>

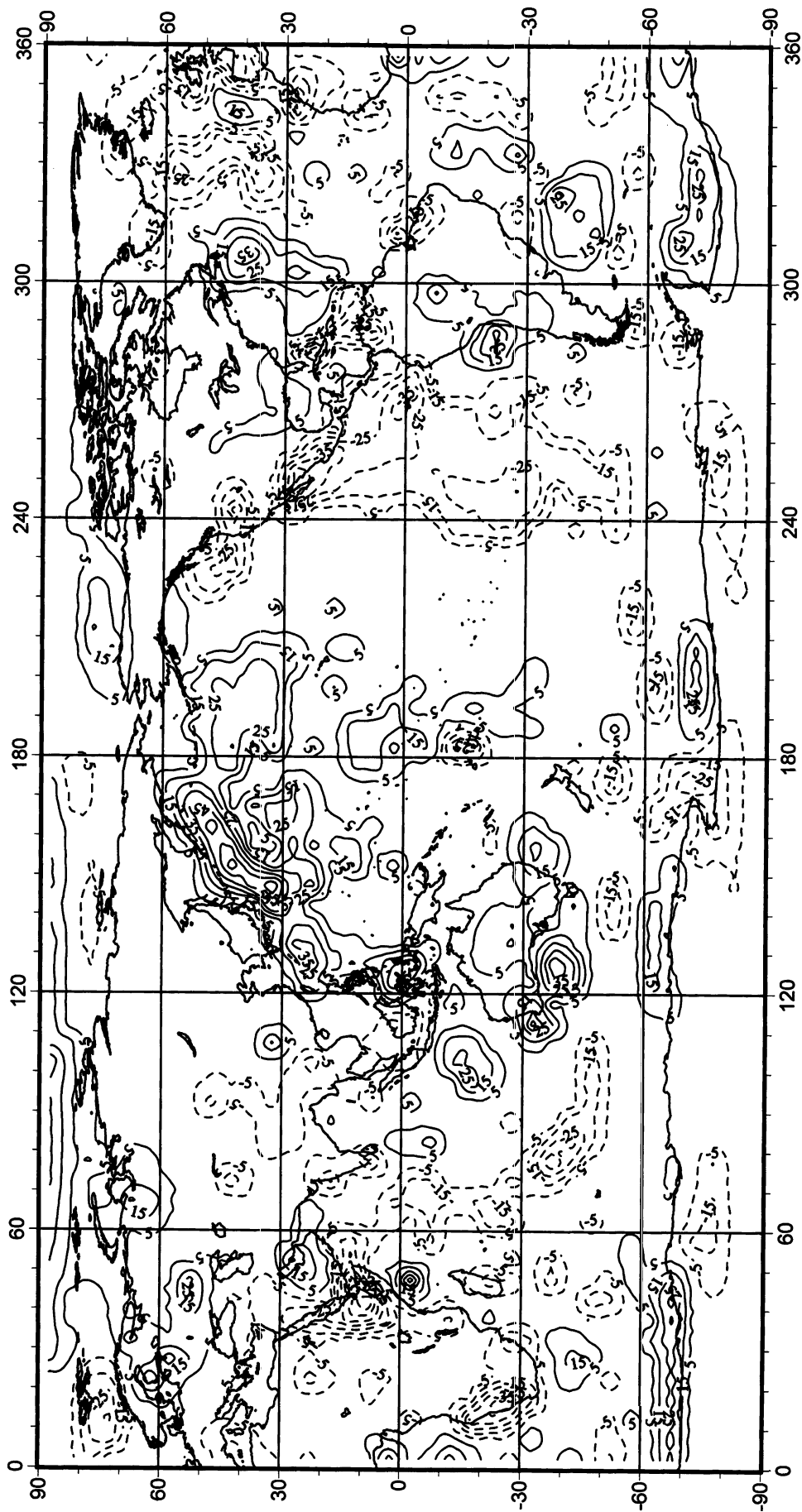


Рис. 3. Аномальные массы мантии ( $\times 10^5$  кг/м<sup>2</sup>). Сечение изолиний  $10^6$  кг/м<sup>2</sup>.  
Диапазон изменений  $(-7.4 \div 7.3) \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>

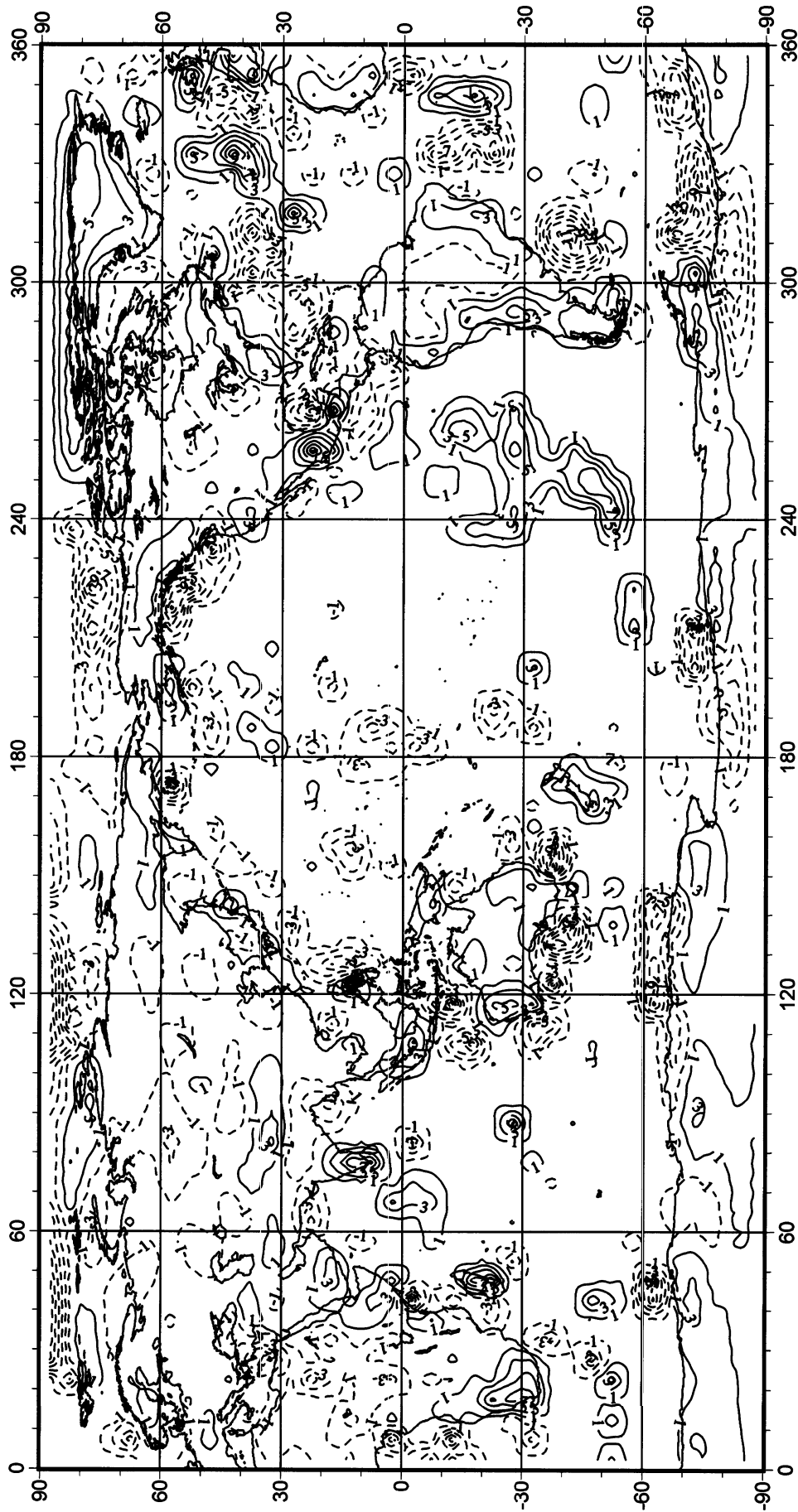


Рис. 4. Напряжения в верхней мантии (МПа). Сечение изолиний 2 МПа.  
Диапазон изменений  $-15 \div 13$  МПа

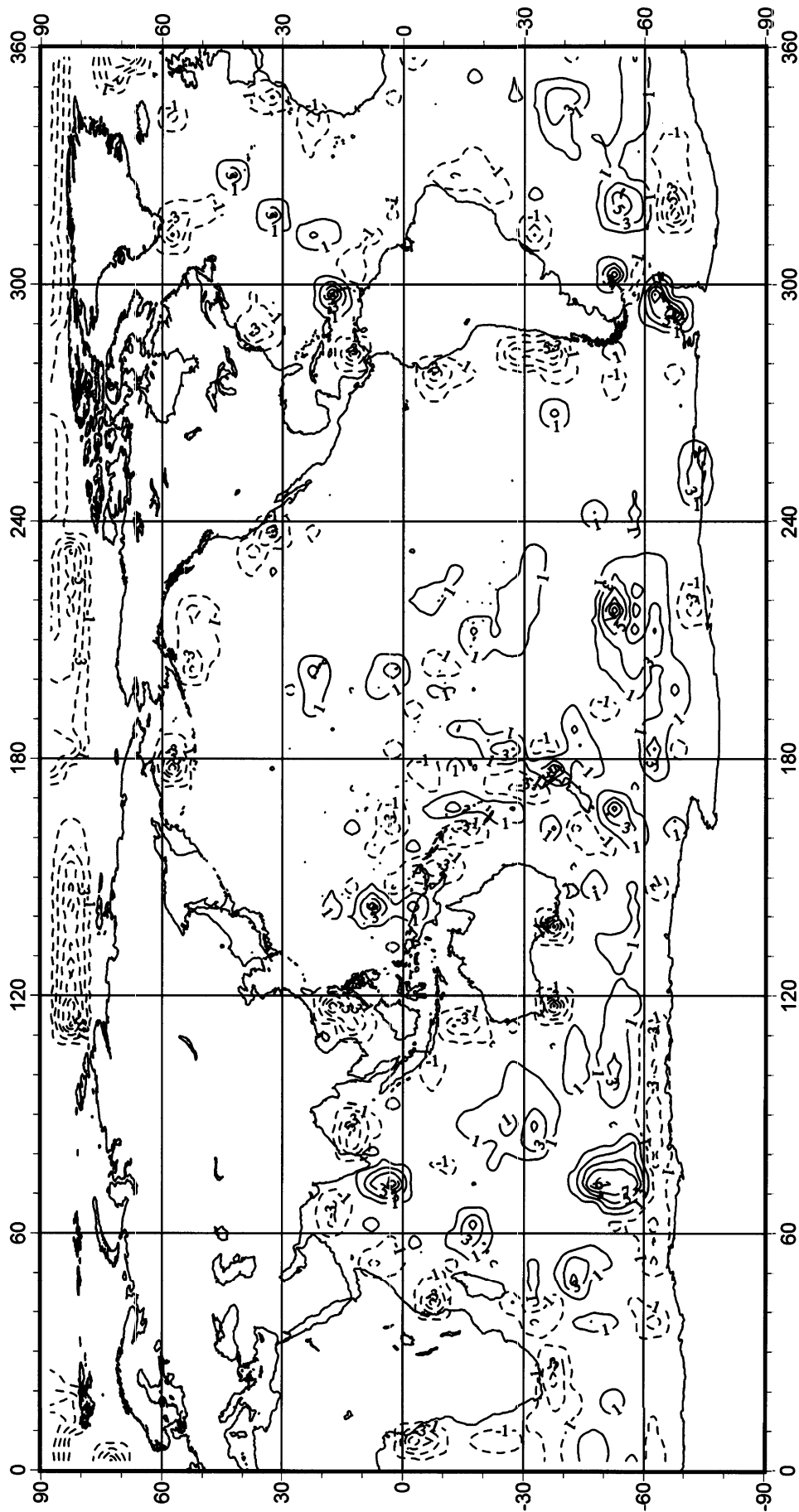


Рис. 5. Разности напряжений между нижней и верхней корой при компенсации в коре (МПа).  
Сечение изолиний 2 МПа. Диапазон изменений  $-12 \div 13$  МПа



отметить также различный характер компенсации для различных регионов Земли. Так, в платформенных и переходных зонах аномалии масс и напряжений распределены вплоть до поверхности  $M$  в большей части коры и в мантии. В регионе СОХ и флангов аномалии в мантии в основном локализованы в слоях, лежащих вне  $M$  (на глубинах порядка 50 км, 90–100 км). Для большей части глубоководных котловин аномалии в коре и мантии локализованы в слоях вне  $M$ . Для основной малоаномальной области океана аномалии масс и напряжений в основном сосредоточены в коре.

Сравнение полученных характеристик, найденных при условии полной изостатической компенсации масс коры и верхней мантии, с другими геофизическими данными позволит судить о степени изостатической неуравновешенности земной коры для различных регионов Земли.

### Заключение

При условии динамического равновесия областям вертикальных напряжений сжатия соответствуют горизонтальные напряжения растяжения и наоборот. Если предел прочности пород коры и мантии лежит ниже полученных значений напряжений, то динамическое равновесие нарушается и могут начаться движения вещества. Согласно [2], предел прочности основных пород на сжатие составляет 270–290 МПа, кислых пород — 150 МПа, на растяжение предел прочности на порядок меньше (22 и 11 МПа соответственно). При наличии флюидов предел прочности может понизиться [3]. Поскольку в коре и мантии, по нашим расчетам, напряжения не должны превышать 15 МПа, то отсюда следует: 1) В регионах СОХ (с вертикальными напряжениями растяжения в мантии и горизонтальными напряжениями растяжения в коре) может возникнуть горизонтальная расслоенность мантии и вертикальная расслоенность коры. Следовательно, легкое вещество мантии может перетекать по горизонтальным разделам в регионы СОХ и поступать по вертикальным разломам в кору, создавая там горизонтальные раздвигающие напряжения; 2) В регионах котловин картина обратная: вертикальные напряжения растяжения в коре и го-

ризонтальные напряжения растяжения в мантии могут привести к горизонтальной расслоенности коры и вертикальным разломам в мантии. Таким образом, в кору котловины (с пониженным положением границы  $M$ ) может поступать из соседних регионов более тяжелое вещество мантии и опускаться вниз по вертикальным разломам; 3) В промежуточных зонах динамика движений может быть более сложной, что видно из сравнения рис. 4 и 5. Помимо обмена веществом между мантией и корой, причем противоположных направлений в соседних регионах, также могут происходить аналогичные движения и между верхней и нижней корой; 4) регионам горячих точек и областей магматизма соответствуют в основном нулевые напряжения в мантии, вертикальные напряжения растяжения в нижней коре и горизонтальные напряжения растяжения в верхней коре. Следовательно, в них возможно движение более легкого вещества мантии (из окружающих областей) в горизонтально расслоенную нижнюю кору и затем по вертикальным трещинам — в верхнюю кору. Вероятно, что некоторые первичные источники вещества горячих точек и магматизма лежат в соседних регионах мантии, и только вторичный очаг лежит в нижней коре непосредственно над горячей точкой.

Проверку сделанных выводов и более детальный анализ можно сделать при привлечении другой геофизической и геологической информации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 04-02-16681, 03-05-64356).

### Литература

1. Чуйкова Н.А., Казарян С.А., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2003. № 2. С. 55.
2. Рыжий Б.П., Начапкин Н.И. // Сб. трудов Четвертых геофизических чтений им. В.В. Федынского (28 февраля–02 марта 2002 г.). М., 2003. С. 203.
3. Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М., 1993.

Поступила в редакцию  
14.07.04