

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24+551.7+528.5+550.3

ИЗОСТАТИЧЕСКИ НЕУРАВНОВЕШЕННЫЕ СТРУКТУРЫ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЗЕМЛИ

Н. А. Чуйкова, Т. Г. Максимова

(ГАИШ)

E-mail: chujkova@sai.msu.ru

Определены изостатически неуравновешенные структуры коры и верхней мантии, согласующиеся с внешним гравитационным полем и минимизирующие отклонения внутреннего поля притяжения от поля изостатически уравновешенной Земли. Выявлен дипольный характер распределения таких структур, соответствующий движению аномальных масс к минимуму потенциальной энергии. На основе сравнения с сейсмическими данными сделано заключение о возможной компенсации изостатически неуравновешенных масс на границе ядро–мантия.

Введение

Глобальная тектоника Земли, внешне проявляющаяся в виде горизонтальных и вертикальных движений земной коры, очевидно, имеет своим источником неуравновешенность внутренних слоев Земли. Гидростатическая неуравновешенность отражается во внешнем гравитационном поле как отклонение измеренного поля от поля гидростатически уравновешенного вращающегося сфероида. Изостатическая неуравновешенность проявляется как отличие измеренного поля от поля изостатически уравновешенной Земли.

Наши исследования условий изостатического равновесия коры и мантии [1, 2] позволили определить вклад изостатически уравновешенных масс рельефа, скачка плотности на границе Мохоровичича (M) и аномальных (т.е. отличных от соответствия гидростатическому равновесию) масс коры и верхней мантии, осредненных по пятиградусным площадкам, во внешнее и внутреннее гравитационное поле Земли [3]. Эти исследования показали, что в изостатически уравновешенной коре и мантии возникают значительные аномалии внутреннего поля притяжения, могущие привести к гравитационной и динамической неустойчивости и, следовательно, к нарушениям изостатического равновесия. Кроме того, отличие внешнего гравитационного поля от поля изостатически уравновешенной Земли свидетельствует о нарушении изостатического равновесия.

Целью данной работы является определение изостатически неуравновешенных структур коры и мантии, согласующихся с внешним гравитационным полем и минимизирующих отклонения внутреннего поля притяжения от поля гидростатически уравновешенной Земли (что соответствует стремлению

любой замкнутой системы (Земли) к равновесному состоянию).

Теория и методика расчета изостатически неуравновешенных структур

Отклонение внешнего гравитационного поля от поля изостатически уравновешенной Земли можно представить в виде разложения изостатических аномалий силы притяжения по шаровым функциям:

$$\Delta g(r, \varphi, \lambda) = \frac{fM_0}{r^2} \sum_{n=1}^N (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \times \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta D_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (1)$$

где M_0, a — масса и средний экваториальный радиус Земли; \bar{P}_{nm} — нормированные по Каула присоединенные полиномы Лежандра; $\begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta D_{nm} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{nm} - C_{nm}^{(0)} - C_{nm}^{(s)} \\ D_{nm} - D_{nm}^{(s)} \end{Bmatrix}$; C_{nm}, D_{nm} — стоксовы постоянные реальной Земли; $C_{nm}^{(0)}$ — стоксовы постоянные для гидростатически уравновешенной Земли; $C_{nm}^{(s)}, D_{nm}^{(s)}$ — вклад в стоксовы постоянные от изостатически уравновешенных аномальных масс коры и верхней мантии ($s = 1 \div 4$, где 1 соответствует массам рельефа, 2 — отклонениям поверхности M от равновесного сфероида, 3, 4 — аномальным массам, распределенным в коре и верхней мантии).

В силу некорректности задачи возможно множество интерпретаций источников, вызывающих изостатические аномалии. Нами была выбрана методика, позволяющая выявить такое распределение источников, которое минимизирует отклонения внутреннего гравитационного поля в коре и мантии Зем-

ли от гидростатически равновесного (т.е. отражает движение масс к равновесному состоянию). Для решения задачи источники изостатических аномалий представлялись в виде суммы L простых слоев непрерывной плотности, распределенных на эллипсоидальных поверхностях радиусов R_l , подобных эллипсоиду относимости для земной поверхности со средним радиусом $R_0 = 6371$ км.

Путем численных расчетов оптимальное решение было определено следующим образом: $L = 5$; $l = 1$ соответствует верхним слоям коры, примыкающим к поверхности рельефа ($\bar{R}_1 = R_0 - 5$ км), $l = 2$ соответствует средним слоям коры, 3-й слой находится в нижних слоях коры и примыкает к M ($\bar{R}_3 = \bar{R}_M + 5$ км, $\bar{R}_M = R_0 - 22$ км), 4-й — в верхах мантии, примыкающим к M ($\bar{R}_4 = \bar{R}_M - 5$ км), 5-й — в верхней мантии ниже средней глубины изостатической компенсации ($\bar{R}_5 = R_0 - \bar{D}_{\text{comp}} - 10$ км, $\bar{D}_{\text{comp}} = 60$ км). Распределение плотности каждого слоя определялось в виде разложения по сферическим функциям [4]:

$$\delta m_l(\varphi, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (a_{nm}^{(l)} \cos m\lambda + b_{nm}^{(l)} \sin m\lambda) \times \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad \text{где } N = 36, \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_{nm}^{(l)} \\ b_{nm}^{(l)} \end{cases} = \frac{2n+1}{3} \left(\frac{R_0}{\bar{R}_l} \right)^2 \left(\frac{a}{\bar{R}_l} \right)^n \bar{\sigma} R_0 \begin{cases} \Delta C_{nm}^{(l)} \\ \Delta D_{nm}^{(l)} \end{cases},$$

$\bar{\sigma}$ — средняя плотность Земли, $l = 1 \div 5$.

Коэффициенты $\Delta C_{nm}^{(l)}$, $\Delta D_{nm}^{(l)}$ для каждого слоя выбирались из массива $\{\Delta C_{nm}, \Delta D_{nm}\}$ на основе заданного условия минимизации аномалий внутреннего гравитационного поля в коре и в верхней мантии и пропорционально соответствующему внутреннему полю притяжения:

$$\begin{cases} \Delta C_{nm}^{(1,4)} \\ \Delta D_{nm}^{(1,4)} \end{cases} \cdot \begin{cases} \Delta G_{nm}^{(1,4)} \\ \Delta F_{nm}^{(1,4)} \end{cases} > 0$$

— для верхней коры и верхов верхней мантии,

$$\begin{cases} \Delta C_{nm}^{(3,5)} \\ \Delta D_{nm}^{(3,5)} \end{cases} \cdot \begin{cases} \Delta G_{nm}^{(3,4)} \\ \Delta F_{nm}^{(3,4)} \end{cases} < 0$$

— для нижней коры и верхней мантии ниже глубин компенсации,

$$\begin{cases} \Delta C_{nm}^{(2)} \\ \Delta D_{nm}^{(2)} \end{cases} \cdot \begin{cases} \Delta G_{nm}^{(1)} \\ \Delta F_{nm}^{(1)} \end{cases} < 0, \quad \begin{cases} \Delta C_{nm}^{(2)} \\ \Delta D_{nm}^{(2)} \end{cases} \cdot \begin{cases} \Delta G_{nm}^{(3)} \\ \Delta F_{nm}^{(3)} \end{cases} > 0$$

— для средней коры, где $\{\Delta G_{nm}, \Delta F_{nm}\}$ — коэффициенты разложения аномалий внутреннего поля притяжения в верхней и нижней коре ($l = 1, 3$) и в верхней мантии ($l = 4$) [3].

Суммарный вклад полученных распределений во внутренние поля притяжения в средней коре ($\delta g^{(2)}$)

и в верхней мантии ($\delta g^{(4)}$) считался в линейном приближении по следующим формулам [4]:

$$\delta g^{(2)} = 4\pi f \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_{nm}^{(2)} \cos m\lambda + f_{nm}^{(2)} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (3)$$

где

$$\begin{cases} g_{nm}^{(2)} \\ f_{nm}^{(2)} \end{cases} = \frac{n+1}{2n+1} \left(\frac{R_3}{r} \right)^{n+2} \begin{cases} a_{nm}^{(3)} \\ b_{nm}^{(3)} \end{cases} - \frac{n}{2n+1} \left(\frac{r}{\bar{R}_1} \right)^{n-1} \begin{cases} a_{nm}^{(1)} \\ b_{nm}^{(1)} \end{cases}.$$

Для верхней мантии формулы аналогичны, с заменой индексов 2, 3, 1 на 4, 5, 4 соответственно. В верхней и нижней коре формулы отличаются от (3) на вклад от аномального слоя средней коры:

$$\begin{cases} g_{nm}^{(1)} \\ f_{nm}^{(1)} \end{cases} = \begin{cases} g_{nm}^{(2)} \\ f_{nm}^{(2)} \end{cases} + \frac{n+1}{2n+1} \left(\frac{R_2}{r} \right)^{n+2} \begin{cases} a_{nm}^{(2)} \\ b_{nm}^{(2)} \end{cases}, \\ \begin{cases} g_{nm}^{(3)} \\ f_{nm}^{(3)} \end{cases} = \begin{cases} g_{nm}^{(2)} \\ f_{nm}^{(2)} \end{cases} - \frac{n}{2n+1} \left(\frac{r}{\bar{R}_2} \right)^{n-1} \begin{cases} a_{nm}^{(2)} \\ b_{nm}^{(2)} \end{cases}.$$

Условие минимизации аномалий внутреннего поля $\Delta g^{(l)}$ для каждой пятиградусной площадки сводится к требованию $(\delta g^{(l)} / \Delta g^{(l)})_i < 0$, где $l = 1 \div 4$, $i = 1 \div 2592$. Поскольку характер функции распределения амплитуд гармоник в зависимости от n, m не совпадает для аномалий внешнего и внутреннего гравитационных полей, то для получения оптимального решения потребовалась дополнительная незначительная коррекция полученных распределений плотности для тех пятиградусных площадок, где условие минимизации внутреннего поля не выполняется. Кроме того, коррекция проводилась для нескольких площадок, где отношение $|\delta g / \Delta g|$ превышало $|\delta g / \max |\Delta g|| \approx 0.1$.

Результаты

На рис. 1–5 представлены полученные латеральные распределения изостатически неуравновешенных масс коры и верхней мантии, являющихся источником для изостатических аномалий (1) внешнего поля.

В таблице приведены некоторые средние характеристики аномальных структур коры и мантии для различных регионов Земли (со сходными свойствами для изостатически уравновешенной коры и верхней мантии [2]).

Здесь h — средняя высота рельефа относительно геоида, d — глубина M , D — глубина компенсации, $\Delta m^{(k)}, \Delta m^{(m)}$ — изостатически уравновешенные аномальные массы коры и мантии, $\Delta \rho^{(k)}, \Delta \rho^{(m)} = -\Delta \rho^{(k)}$ — изостатически уравновешенные вертикальные напряжения растяжения (+) или сжатия (–), $\Delta g^{(k)}, \Delta g^{(m)}$ — аномалии силы

Средние аномальные характеристики коры и мантии для регионов Земли

	1	2а	2б	3	4	5а	5б	6	7	8	9
$h, 10^2$ м	-22	-23	-23	-28	-34	-14	-8	2	2	12	-17
σ	3	2	3	5	3	9	9	6	6	10	15
$d, 10^2$ м	104	96	93	133	147	244	262	399	440	391	220
σ	16	10	15	35	33	67	68	46	56	84	124
$D, 10^3$ м	90	53	82	70	100	39	45	47	54	50	59
σ	16	15	33	28	29	11	22	10	16	14	28
$\Delta m^{(k)}, 10^4$ кг/м ²	-87	-60	-25	13	62	14	-58	57	129	-141	3
σ	62	56	54	89	62	124	110	156	109	106	120
$\delta m_1, 10^4$ кг/м ²	8	15	11	18	27	-2	-8	-31	-28	-46	1
σ	21	17	22	25	28	29	30	30	35	40	35
$c(\Delta m^{(k)}, \delta m_1), \%$	-33	-69	-48	11	71	10	25	-27	-74	92	12
$\delta m_2, 10^4$ кг/м ²	2	1	0	0	-2	2	2	-2	-8	3	0
σ	7	6	8	8	8	10	9	12	9	10	9
$c(\Delta m^{(k)}, \delta m_2), \%$	-49	-47	-62	-70	-52	-54	-64	-79	-91	-72	-69
$\delta m_3, 10^4$ кг/м ²	-8	-4	-3	-8	-10	4	6	9	11	11	-1
σ	16	13	16	17	17	19	19	17	17	17	19
$c(\Delta m^{(k)}, \delta m_3), \%$	70	66	51	2	-70	-16	-31	39	83	-69	2
$\Delta m^{(m)}, 10^4$ кг/м ²	-142	-162	-214	14	184	-7	-29	7	57	84	-3
σ	123	84	107	66	138	139	148	58	75	139	135
$\delta m_4, 10^4$ кг/м ²	-7	-11	-13	1	9	2	1	-1	0	-4	0
σ	2	11	11	9	13	11	12	9	9	12	11
$c(\Delta m^{(m)}, \delta m_4), \%$	91	91	97	87	92	85	87	11	27	88	86
$\delta m_5, 10^4$ кг/м ²	7	6	10	0	-9	3	4	-3	-9	2	0
σ	10	9	11	11	13	13	14	12	12	15	13
$c(\Delta m^{(m)}, \delta m_5), \%$	-88	-74	-85	-80	-78	-77	-81	-70	-87	-83	-80
$\Delta p^{(k)}, 10^5$ Па	-18	-23	14	0	33	23	-18	10	-15	-20	2
σ	28	23	19	1	40	29	24	10	15	19	27
$\delta p^{(k)}, 10^5$ Па	-3	-3	-2	-5	-6	1	2	6	6	9	-1
σ	6	6	4	4	8	6	7	10	10	11	9
$c(\Delta p^{(k)}, \delta p^{(k)}), \%$	94	100	-100	39	-92	20	-94	100	-100	-100	-48
$\Delta p^{(m)}, 10^5$ Па	18	23	-14	0	-33	-23	18	-10	15	20	-2
σ	28	23	19	1	40	29	24	10	15	19	27
$\delta p^{(m)}, 10^5$ Па	5	4	7	0	-5	0	1	0	-1	2	0
σ	7	6	7	3	7	5	6	1	2	6	5
$c(\Delta p^{(m)}, \delta p^{(m)}), \%$	98	100	-100	-90	94	43	66	-100	98	72	72
$\Delta g^{(k)},$ мГал	156	170	147	245	357	-64	-152	-441	-471	-562	0
σ	66	44	62	93	69	172	169	100	138	189	323
$\delta g^{(k)},$ мГал	-7	-8	-5	-10	-15	3	6	16	16	23	-1
σ	6	6	6	8	9	10	10	10	13	14	15
$\Delta g^{(m)},$ мГал	-115	-132	-1	10	140	-7	-21	19	69	-45	0
σ	96	70	83	55	107	109	121	52	55	115	108
$\delta g^{(m)},$ мГал	6	6	9	-1		1	1	-1	-4	3	0
σ	6	5	6	3	6	6	7	3	4	7	6
$\Delta g,$ мГал	1	3	3	5		3	2	-13	-15	-16	0
σ	21	15	21	24	26	28	29	27	28	32	27
$S, \%$	6	4	2	33	9	12	11	12	5	5	100

притяжения в изостатически уравновешенных коре и верхней мантии, $\delta m, \delta p, \delta g$ — аналогичные характеристики, обусловленные вкладом изостатически неуравновешенных источников изостатических аномалий, S — относительная доля площади региона, σ — среднеквадратический разброс значений относительно среднего, $c(x, y)$ — корреляция между соответствующими величинами (по знаку), считает-

ся по формуле

$$c(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^I (x_i y_i \cos \varphi_i)}{\sum_{i=1}^I |x_i y_i \cos \varphi_i|} 100\%,$$

где $I = 2592$.

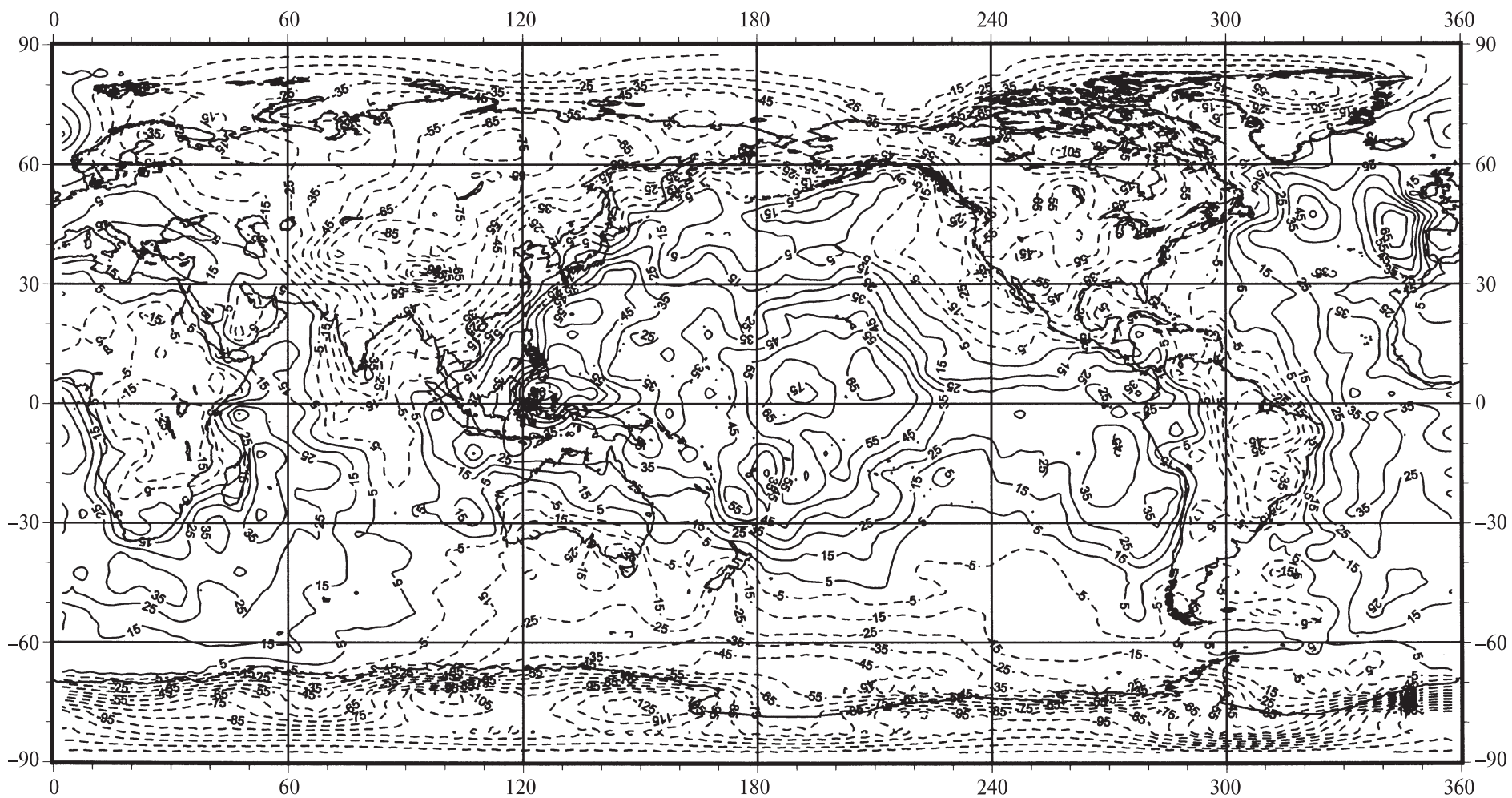


Рис. 1. Распределение изостатически неуравновешенных масс верхней коры (в 10^4 кг/м²). Сечение изолиний 10^5 кг/м². Диапазон изменений $(-138 \div 109) \cdot 10^4$ кг/м²

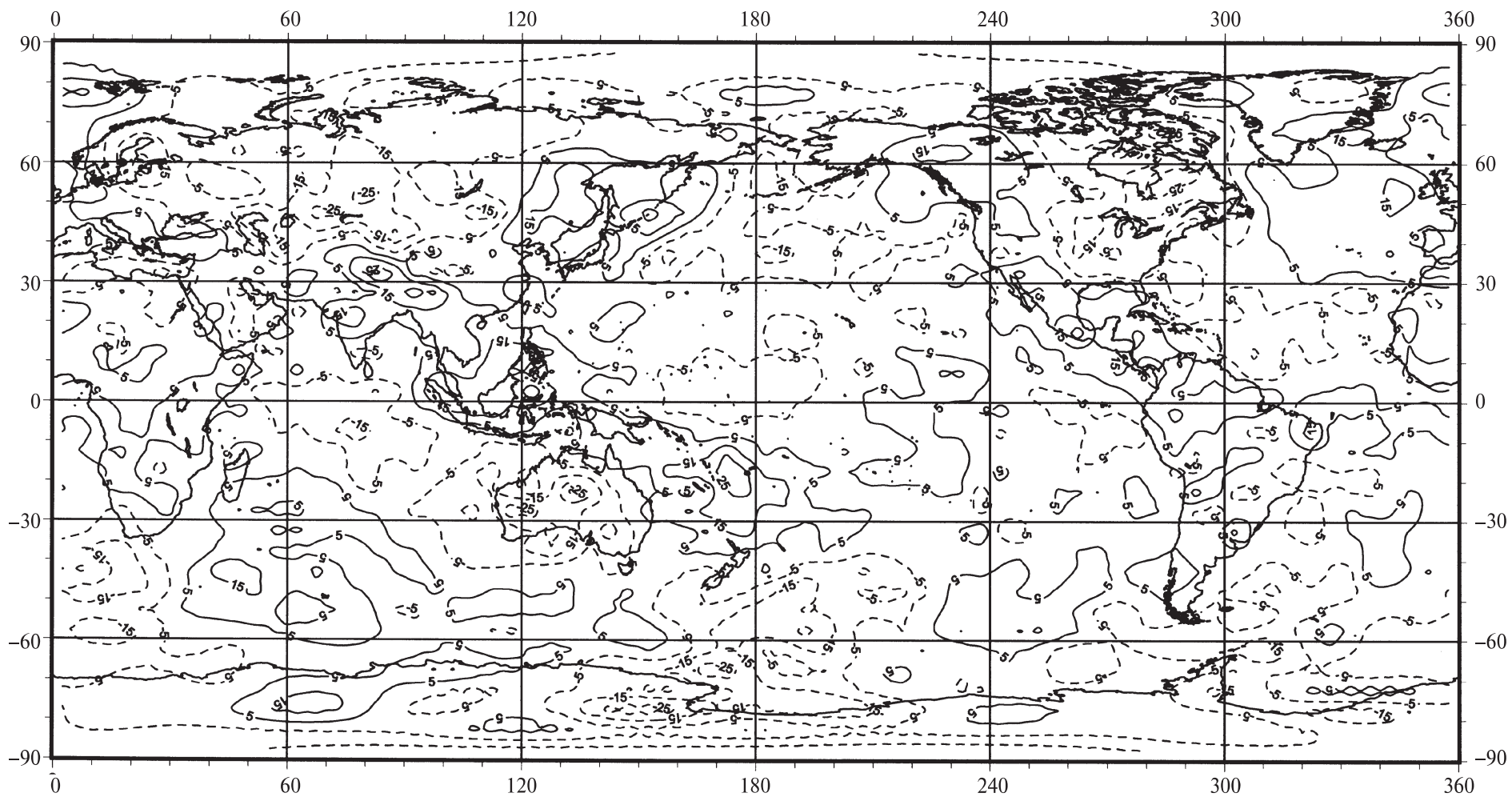


Рис. 2. Распределение изостатически неуравновешенных масс средней коры (в 10^4 кг/м²). Сечение изолиний 10^5 кг/м². Диапазон изменений $(-37 \div 38) \cdot 10^4$ кг/м²

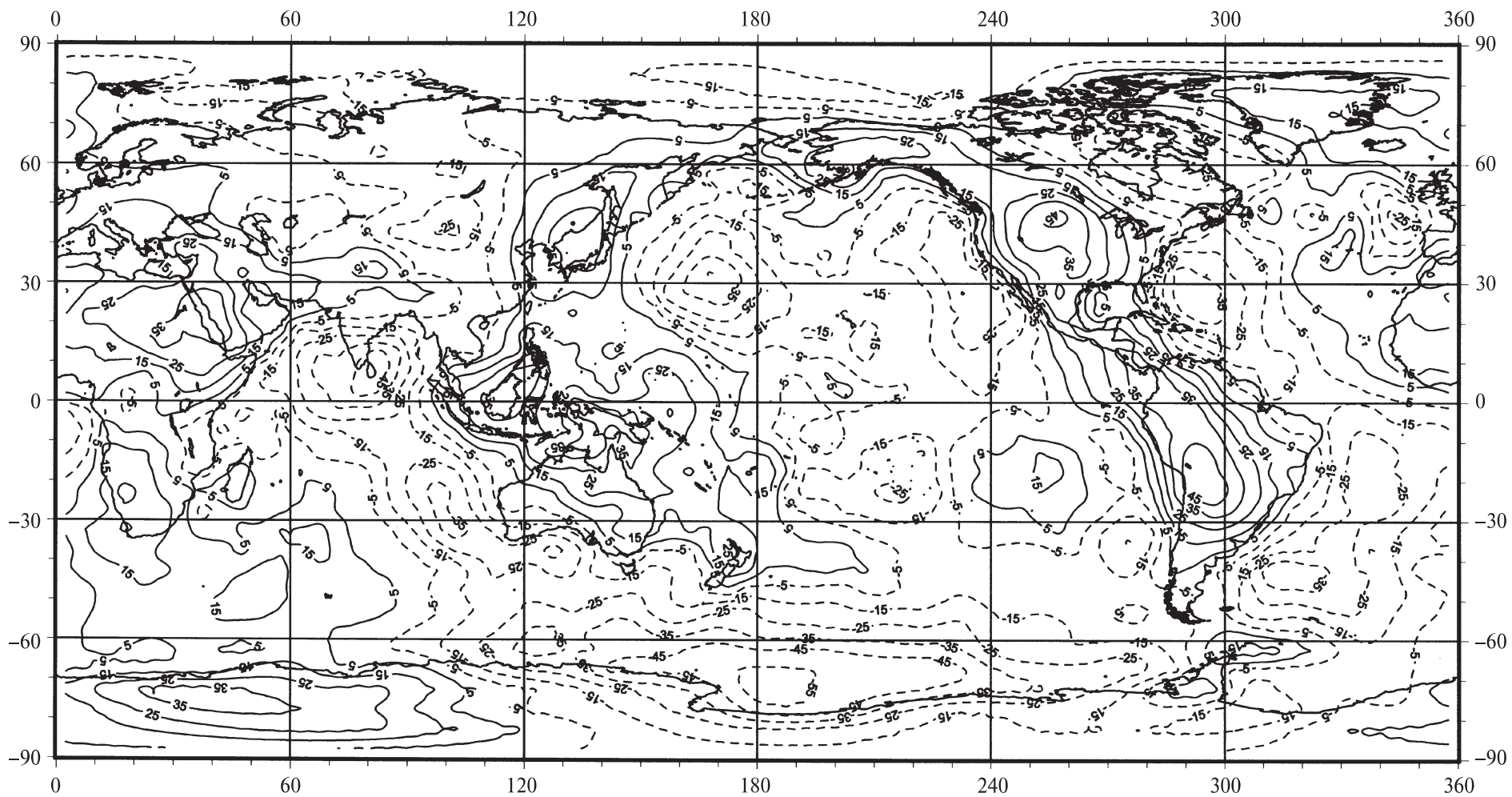


Рис. 3. Распределение изостатически неуравновешенных масс нижней коры (в 10^4 кг/м²). Сечение изолиний 10^5 кг/м². Диапазон изменений $(-62 \div 54) \cdot 10^4$ кг/м²

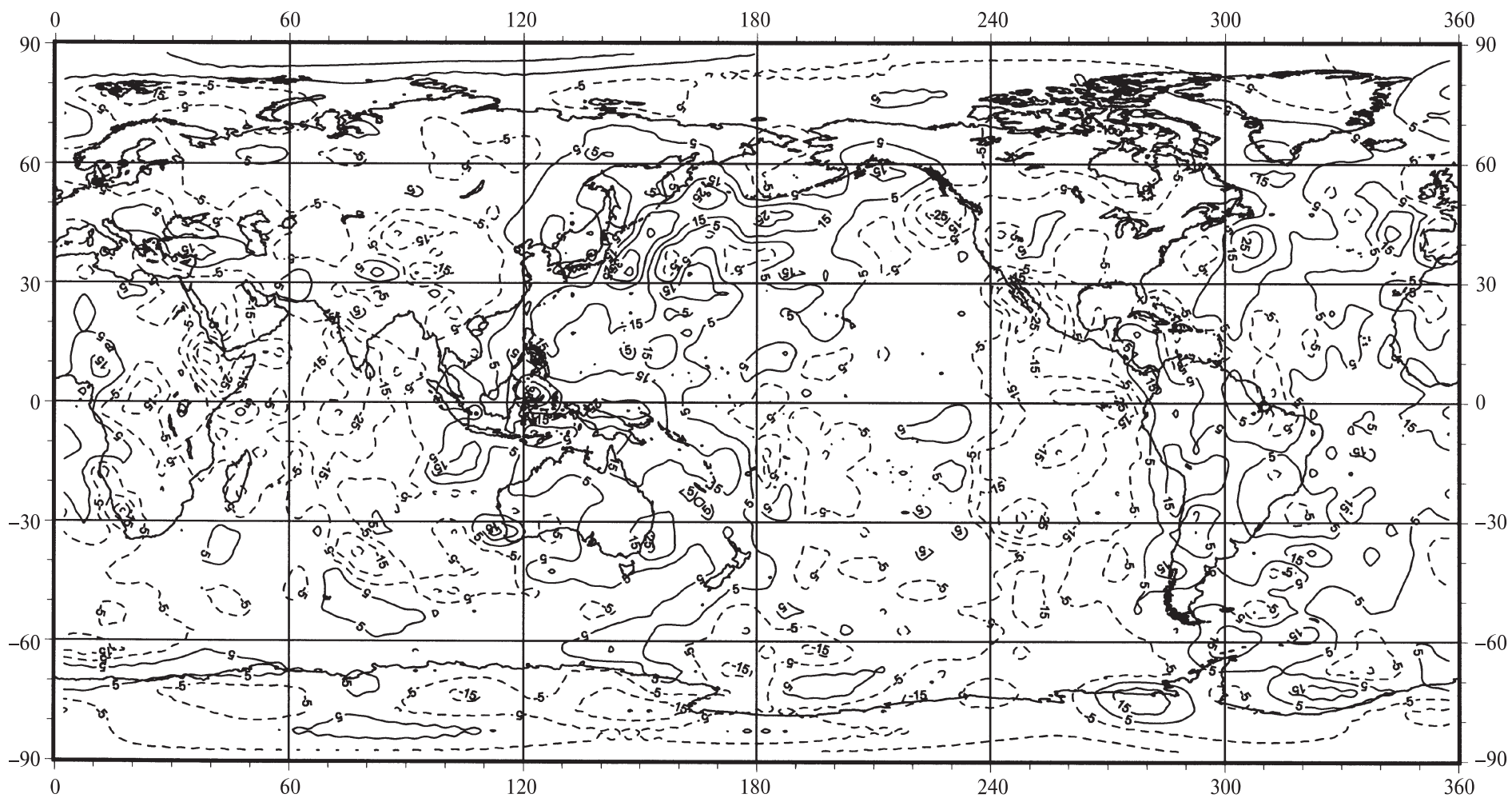


Рис. 4. Распределение изостатически неуравновешенных масс верхов верхней мантии (в 10^4 кг/м²).
Сечение изолиний 10^5 кг/м². Диапазон изменений $(-49 \div 55) \cdot 10^4$ кг/м²

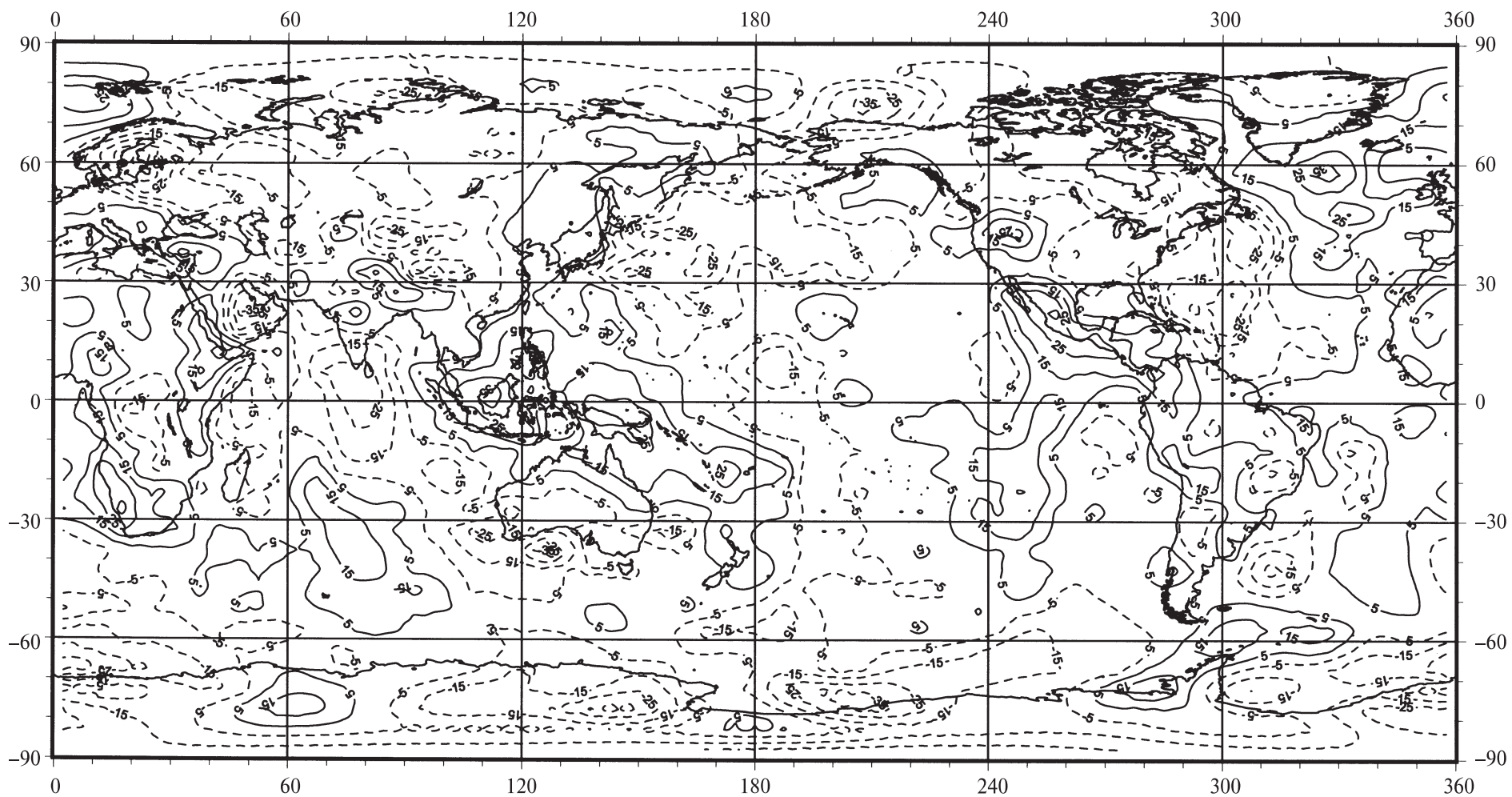


Рис. 5. Распределение изостатически неуравновешенных масс верхней мантии ниже глубины компенсации (в 10^4 $\text{кг}/\text{м}^2$). Сечение изолиний 10^5 $\text{кг}/\text{м}^2$. Диапазон изменений $(-49 \div 45) \cdot 10^4$ $\text{кг}/\text{м}^2$

Регионы распределены на основе следующих характеристик [2]:

- 1) срединно-океанические хребты (СОХ);
- 2) фланги и прилегающие котловины ($d < 13$ км; $\Delta = (\Delta m^{(k)} + \Delta m^{(m)})g < -15$ МПа): а) с вертикальными напряжениями сжатия в верхней коре; б) с вертикальными напряжениями растяжения в верхней коре;
- 3) малоаномальная зона океанов (напряжения в мантии не превышают 1 МПа, в коре — 5 МПа, $\Delta < 15$ МПа);
- 4) глубоководные котловины ($h < -3.1$ км, $\Delta > 15$ МПа.);
- 5) переходные зоны океан-материк ($h \geq -3.1$ км): а) с вертикальными напряжениями растяжения в верхней коре ($h \leq -0.3$ км); б) с вертикальными напряжениями сжатия в верхней коре ($h \leq 0.2$ км);
- 6) платформы I ($d \geq 32$ км, $h > -0.3$ км, $\Delta p^{(k)} \geq 0$);
- 7) платформы II ($d \geq 32$ км, $h > 0$ км, $\Delta p^{(k)} < 0$, $\Delta > 0$);
- 8) высокогорные участки и плато ($h > 0.2$ км, $\Delta p^{(k)} < 0$, $\Delta < 0$);
- 9) вся Земля.

Основные выводы

На основе анализа данных, приведенных в таблице, и из сравнения рис. 1–5 можно сделать следующие выводы.

1. Распределение вклада изостатически неуравновешенных масс в строение верхней и нижней коры, верхов и низов верхней мантии имеет в основном дипольный характер, особенно ярко выраженный для некоторых регионов (центральная и северо-восточная части Тихого океана, глубоководные котловины, отдельные участки СОХ, горные и прибрежные зоны материковой коры). Такое распределение приводит к дополнительным, изостатически невыровненным напряжениям сжатия в верхней мантии глубоководных котловин и в коре океанов, увеличивающимся по мере удаления от СОХ, а также к напряжениям растяжения в мантийных верхах СОХ и коре материков. Эти дополнительные напряжения в основном усиливают изостатически выровненное напряженное состояние коры СОХ и верхов мантии океанов (там, где положительная корреляция $c(\Delta p^{(k)}, \delta p^{(k)})$) и ослабляют напряженное состояние коры материков и океанических котловин (там, где отрицательная корреляция).

2. Вклад дипольного распределения изостатически неуравновешенных масс в гравитационное поле может привести к расхождению аномалий силы притяжения, полученных на основе аналитического продолжения спутниковой модели, и измерений на поверхности Земли. Этот вклад в гармонику n -й степени в линейном приближении пропорционален

$(\Delta/R_l)(n+2)\delta m_n^{(l)}(R_l/r)^{n+2}$, где $\Delta = R_l - R_{l+1}$, l соответствует верхнему слою диполя. Отсюда следует, что если на поверхности Земли превалирует вклад от верхнего слоя, при $r \approx R_l$ возрастающий с увеличением степени гармоники, то на высоте более существенна роль низких гармоник (для высоких гармоник при $r > R_l$ этот вклад стремится к нулю).

3. Неравновесные структуры приводят к некоторому перераспределению изостатически уравновешенных масс, а именно к разуплотнению коры материков в верхах коры и уплотнению в низах, к уплотнению коры океанов в верхах коры и разуплотнению в низах. Однако имеются исключения. Так, нижняя кора океанических регионов, примыкающих к материкам и микроконтинентам, большей частью уплотнена, как у материков (рис. 3), что может свидетельствовать о незаконченном процессе океанизации коры. Нижняя кора северной и центральной частей Евразии разуплотнена, как у океанов, что возможно свидетельствует о былом наличии здесь океанов (или о начавшемся процессе океанизации). Что касается средней коры, то ее выделение достаточно условно для океанов. В целом же ее вклад приводит к уменьшению аномальности средней коры (корреляция $c(\Delta m^{(k)}, \delta m^{(2)}) < 0$). Неуравновешенные структуры верхней мантии океанов носят четко выраженный дипольный характер и в основном приводят к усилению неравномерности распределения в слоях, примыкающих к M (области положительной корреляции $c(\Delta m^{(m)}, \delta m^{(4)})$), и к ослаблению вблизи нижней границы изостатической компенсации (области отрицательной корреляции).

4. Проведенный анализ свидетельствует, что как в коре, так и в верхней мантии, несмотря на достижение изостатического равновесия, происходит перераспределение масс, нарушающее это равновесие. Причем расчет потенциальной энергии для соседних областей материков и океанов показывает, что это перераспределение масс не только минимизирует отклонения внутренних полей притяжений от поля гидростатически уравновешенной Земли, но и отражает движение масс к минимуму потенциальной энергии. Так, для более легких компонент верхних слоев океанической коры кроме движения вверх энергетически выгодно также движение в верхи материковой коры, а для более тяжелых компонент нижней коры океанов — в низы материковой коры и в верхи мантии котловин.

В заключение отметим, что поскольку в центре Земли давления должны выравниваться, то выявленные изостатически неуравновешенные структуры должны быть скомпенсированы где-то в глубинных слоях Земли. Если принять, что компенсация будет происходить на границе ядро–мантия, то возможное распределение компенсирующих масс довольно хорошо коррелирует с сейсмическими данными [5]. Детальный анализ распределения компенсирующих

масс, согласующегося с внешним гравитационным полем и с сейсмическими данными, предполагается сделать в дальнейшей работе авторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 04-02-16681).

Литература

1. Чуйкова Н.А., Казарян С.А., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2003. № 2. С. 55.
2. Чуйкова Н.А., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2005. № 4. С. 64 (Moscow University Phys. Bull. 2005. N 4. P. 76).
3. Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 4. С. 48.
4. Дубошин Г.Н. Теория притяжения. М., 1961.
5. Lay T., Garnero E.J. Core-mantle boundary structures and processes // The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics / Ed. by R.S.J. Sparks, C.J. Hawkesworth. Geophysical Monograph 150, IUGG **19**, doi: 10.1029/150GM04. 2004.

Поступила в редакцию
31.05.06