

Плотностные неоднородности мантии и ядра Земли

Н. А. Чуйкова^a, Т. Г. Максимова

¹ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.

E-mail: ^achujkova@sai.msu.ru

Статья поступила 19.11.2009, подписана в печать 29.12.2009

Определены латеральные вариации плотности на глубинах, характеризующихся аномалиями скоростей сейсмических волн, согласующиеся как с аномалиями внешнего гравитационного поля, так и с данными анализа собственных колебаний Земли и минимизирующие отклонения внутреннего строения Земли от гидростатически уравновешенного. Показано, что полученные аномальные структуры вызывают аномалии гравитационного поля внутри Земли, которые могут являться причиной конвективных движений в мантии и ядре.

Ключевые слова: земная кора, мантия Земли, ядро Земли, плотностные неоднородности, гравитационные аномалии, гидростатическое равновесие.

УДК: 551.24+551.7+528.5+550.3. PACS: 91.35.-x, 91.35.Cb.

Введение

Современные сейсмические и сейсмологические исследования показывают значительные латеральные аномалии скоростей сейсмических волн при прохождении переходных слоев верхняя–нижняя мантия [1, 2], а также на отдельных глубинах в верхней и нижней мантии [3], связанные с аномалиями температур, плотностей и упругих свойств в данных слоях. Кроме того, выявлены значительные аномалии скоростей в самых нижних слоях мантии, примыкающих к ядру Земли [4], а также наличие аномалий в пограничных слоях как внешнего [5, 6], так и внутреннего ядра Земли [7–11]. Все эти факты свидетельствуют об отклонении состояния всех оболочек Земли от гидростатически равновесного, что и определяет глобальную геодинамику. Однако попытки найти на основе анализа изменений скоростей сейсмических волн вклад латерально распределенных плотностных неоднородностей нельзя признать успешными, поскольку для глубинных недр Земли неизвестен даже знак зависимости между изменением скоростей и изменением плотности.

В последние годы появились работы по интерпретации наблюдений собственных колебаний Земли с целью определения глобальных латеральных вариаций плотности в различных оболочках Земли [12, 13]. Впрочем, аналогичные исследования других авторов [14] показали, что получаемые плотностные структуры нестабильны и испытывают сильную зависимость от принятой исходной модели распределения сейсмических скоростей и схем регуляции. Однако существуют такие измеряемые геофизические характеристики, как аномалии внешнего гравитационного поля, которые зависят только от распределения плотности внутри Земли. Если задать на основе анализа других геофизических данных глубины расположения аномальных слоев, то существует вполне однозначная связь между гравитационными аномалиями и латеральным распределением аномалий плотности на заданной глубине [15]. В работе [12] помимо собственных колебаний привлекались также данные о внешнем гравитационном поле, однако в по-

следующей работе тех же авторов [13] гравитационное поле уже не учитывалось в силу незначительного его влияния на полученные результаты.

Целью настоящей работы является определение латеральных вариаций плотности на глубинах, характеризующихся аномалиями скоростей сейсмических волн, согласующихся с аномалиями внешнего гравитационного поля и с данными анализа собственных колебаний Земли и минимизирующих отклонение внутреннего строения Земли от гидростатически уравновешенного (что соответствует стремлению любой замкнутой системы, в частности Земли, к равновесному состоянию). В работе [16] подобная задача нами была решена для литосферы Земли, где в качестве параметра минимизации служили аномалии внутреннего гравитационного поля в исследуемых структурах поля [17, 18]. Однако полученные в [16, 17] аномальные структуры литосферы, хотя и полностью соответствуют аномалиям внешнего гравитационного поля, однако вызывают аномалии полей притяжения и давления в более глубоких слоях Земли. Поскольку в жидком ядре давления должны быть гидростатически уравновешены, то полученные в [16] аномальные структуры должны быть скомпенсированы где-то в глубинных слоях. Определение компенсирующих масс (или давлений) является решением поставленной задачи.

Теория и методика расчета аномальных структур мантии и ядра Земли

Поставленная нами задача является некорректной, если внутри Земли имеется несколько слоев аномальной плотности на различных глубинах. На основе интерпретации сейсмологических наблюдений и анализа расщепления нормальных мод собственных колебаний Земли были выделены следующие диапазоны глубин максимальных латеральных вариаций [1–13, 16, 19]: $D_j \pm \Delta D_j$, где $j = 1 \div 12$ — номер слоя, $D_j = R_0 - R_j$, $R_0 = 6370$ км, D_j — средняя глубина слоя, R_j — средний радиус слоя, $2\Delta D_j$ — средняя толщина слоя (таблица).

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R , км	6350	6220	5960	5840	5710	5000	4500	4000	3500	3400	2800	1220
D , км	20	150	410	530	660	1370	1870	2370	2870	2970	3570	5150
ΔD , км	20	50	20	100	20	200	200	200	20	80	520	100
Δm , 10^5 кг/м ²	5.8	7.0	2.3	4.5	3.9	3.5	4.4	7.0	3.8	13.1	1.7	4.7
$\delta\rho$, %	0.48	0.23	0.17	0.07	0.28	0.02	0.02	0.03	0.17	0.08	0.002	0.02

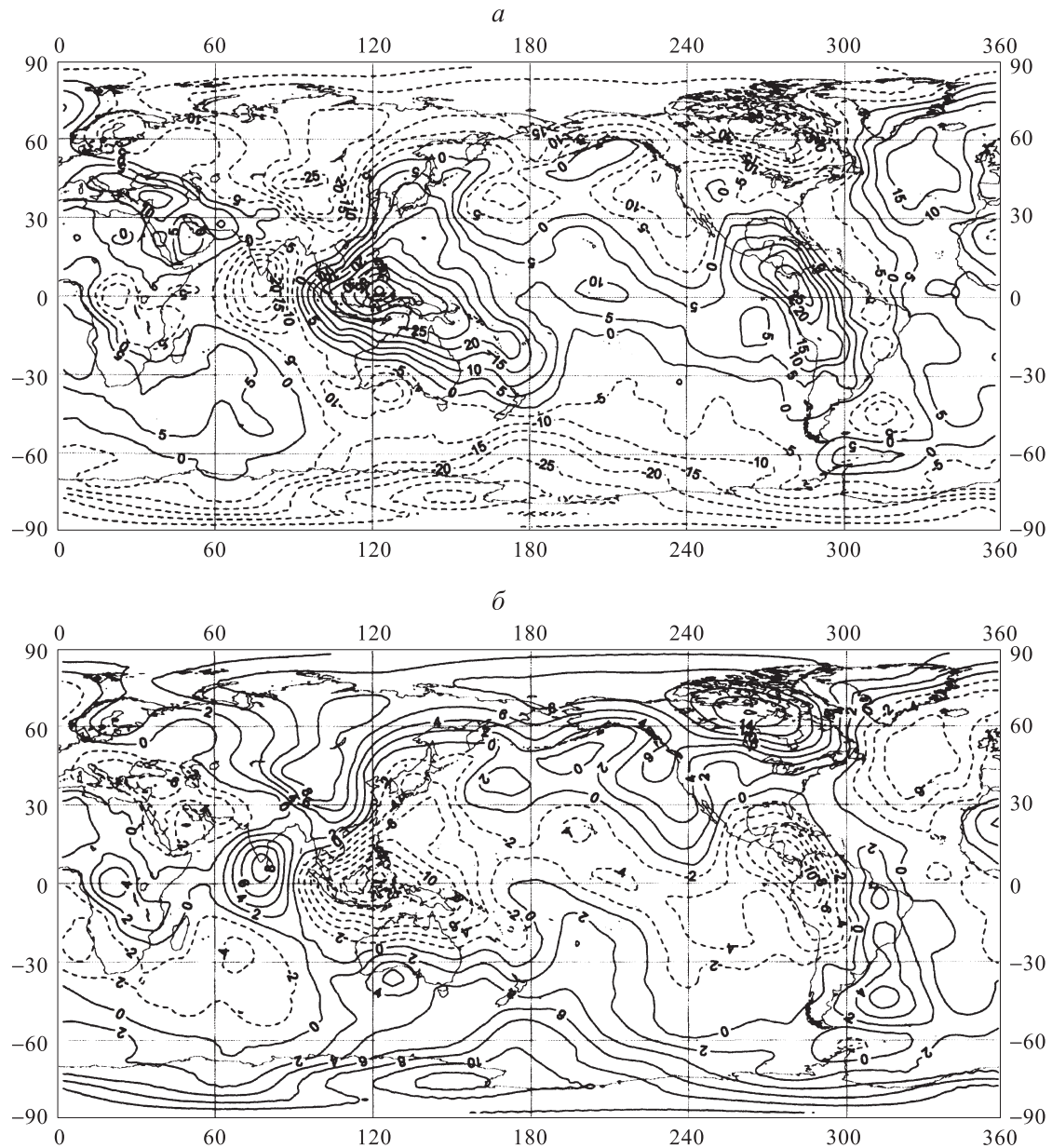


Рис. 1. Аномальные структуры литосферы и переходного слоя верхняя–нижняя мантия: *a* — слой $R_1 + R_2 = (6370 \div 6170)$ км, сечение изолиний $5 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-38 \div 48) \cdot 10^5$ кг/м²; *b* — слой $R_4 = (5840 \pm 100)$ км, сечение изолиний $2 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-17 \div 16) \cdot 10^5$ кг/м²

Первый слой соответствует изостатически неуравновешенным структурам литосферы Земли [16], 2-й — нижним слоям литосферы, 3–5-й — переходному слою верхняя–нижняя мантия, 6, 7-й — аномальным слоям нижней мантии, 8-й — слою D в нижних слоях нижней мантии, 9-й — переходному слою мантия–ядро, 10-й — верхним слоям внешнего ядра Земли, 11-й — централь-

ному слою внешнего ядра, 12-й — переходному слою внешнее–внутреннее ядро.

В силу некорректности задачи сначала рассматривались всевозможные варианты как компенсации найденных в [16] неуравновешенных структур литосферы, пересчитанных к глубине $D_1 = 20$ км, так и возможного их исходного распределения не только

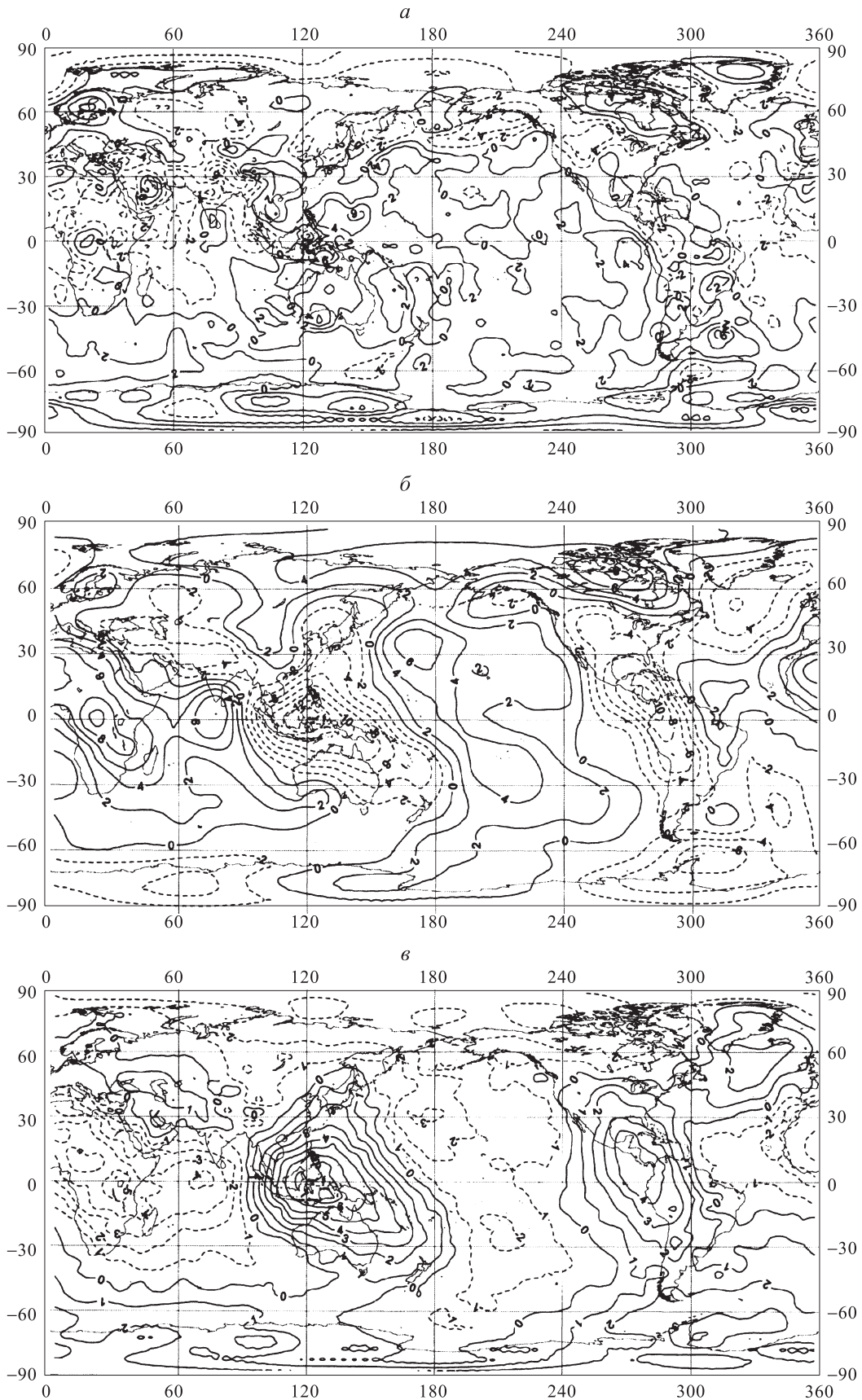


Рис. 2. Аномалии границ переходного слоя верхняя–нижняя мантия: а — граница $R_3 = (5960 \pm 20)$ км, сечение изолиний $2 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-9 \div 9) \cdot 10^5$ кг/м²; б — граница $R_5 = (5710 \pm 20)$ км, сечение изолиний $2 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-15 \div 11) \cdot 10^5$ кг/м²; в — вариации толщины переходного слоя, сечение изолиний 1 км, диапазон изменений толщины переходного слоя $(-6 \div 8)$ км

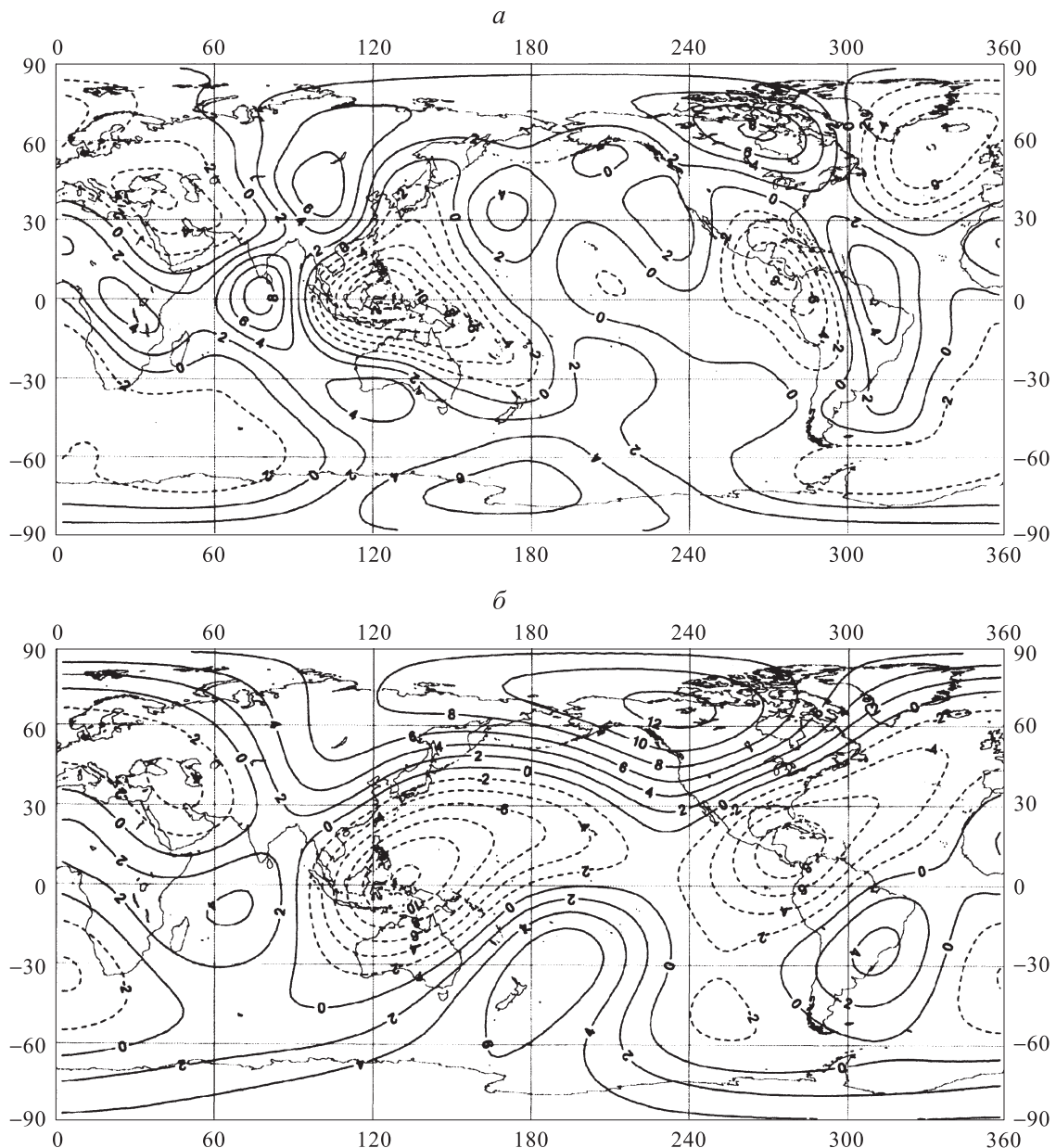


Рис. 3. Аномальные структуры нижней мантии: а — слой $R_6 = (5000 \pm 200)$ км, сечение изолиний $2 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-13 \div 9) \cdot 10^5$ кг/м²; б — слой $R_7 = (4500 \pm 200)$ км, сечение изолиний $2 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-12 \div 13) \cdot 10^5$ кг/м²

в литосфере ($j = 1$), а также в более глубоких слоях ($j = 2 \div 9$). Решение для каждого варианта и для каждой степени разложения должно удовлетворять следующим условиям: 1) равенство нулю внешнего гравитационного потенциала для компенсирующих масс; 2) равенство нулю давлений от исходных изостатически неуравновешенных масс литосферы (или перенесенных масс) и компенсирующих масс на глубинах ниже глубины расположения компенсирующих масс. Чтобы удовлетворить поставленным условиям, компенсирующие массы должны располагаться как минимум на двух сферических слоях с различными глубинами и с дипольным (по глубине) характером латеральных распределений, причем глубина первого слоя может совпадать с глубиной исходного распределения. Латеральное распределение аномальных масс

для каждого слоя представлялось в виде разложения $\Delta m_j = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n k_{nm}^{(j)} (a_{nm} \cos m\lambda + b_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi)$, где $N = 36$, a_{nm} , b_{nm} — гармонические коэффициенты исходного разложения изостатически не уравновешенных масс литосферы, $k_{nm}^{(j)}$ — передаточные множители, P_n^m — присоединенные многочлены Лежандра. Решение для каждой степени разложения искалось в сферическом приближении как для простого сферического слоя со средним радиусом R_j ($i = 1, 3, 5, 9$) или как для слоя толщиной $2\Delta D_j$ с однородным распределением плотности по толщине (для $j = 2, 4, 6, 7, 8, 10$). Для расчета давлений использовалось распределение ускорений силы тяжести по глубине согласно PREM [20]. Каждому варианту придавался вес, обратно пропорциональный произведению трех параметров минимизации: аномалии

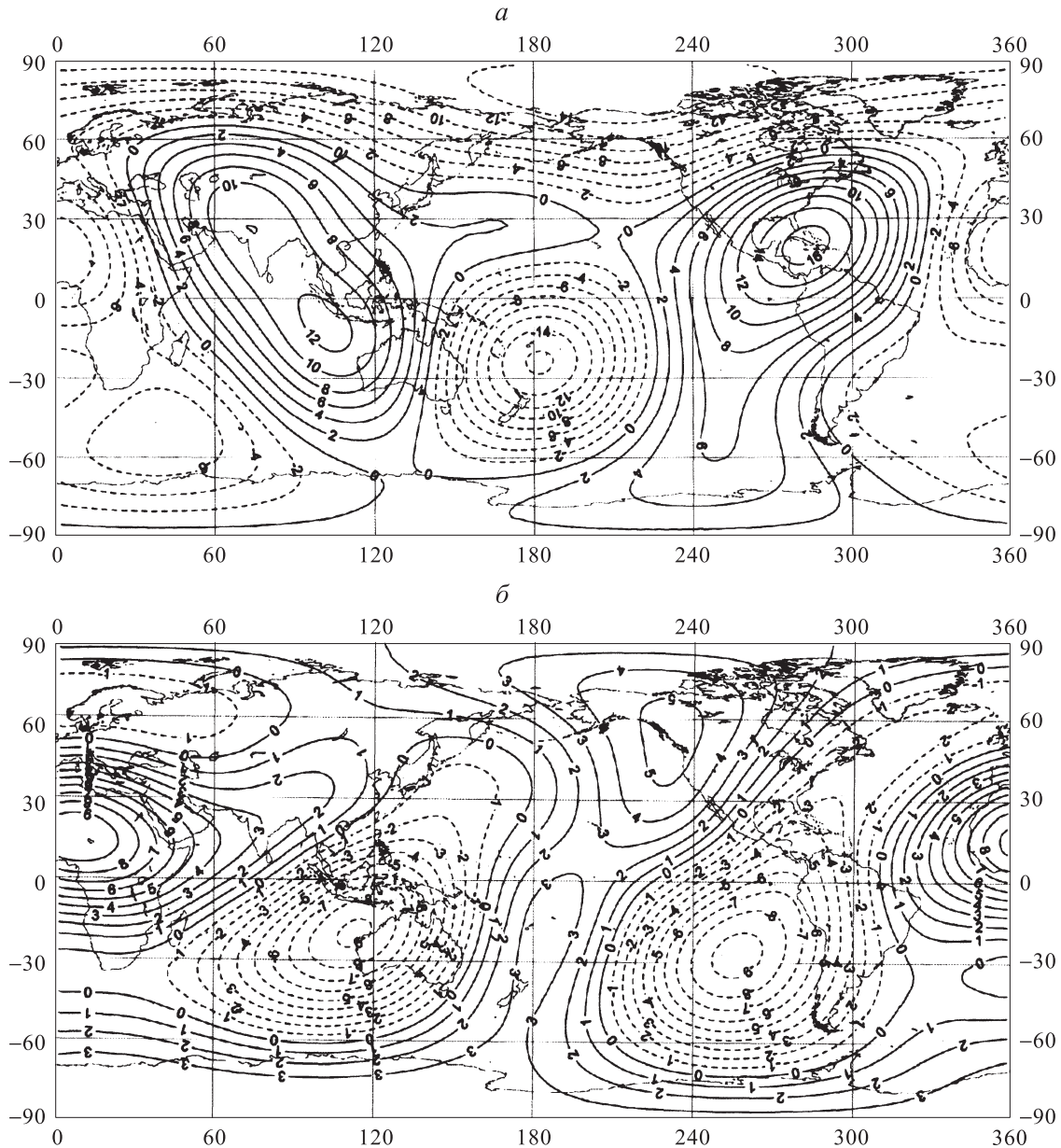


Рис. 4. Аномальные структуры низов нижней мантии: *а* — слой $R_8 = (4000 \pm 200)$ км, сечение изолиний $2 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-16 \div 17) \cdot 10^5$ кг/м²; *б* — переходной слой $R_9 = (3500 \pm 20)$ км, сечение изолиний 10^5 кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-9 \div 10) \cdot 10^5$ кг/м²

давления, вызванного каждым слоем, внутреннего гравитационного поля между слоями и моментов инерции. Затем, с учетом полученных весов, находилось общее решение. Это решение будет соответствовать аномалиям внешнего гравитационного поля Земли и гидростатическому уравновешенному давлению внутри жидкого ядра. Чтобы оно было согласовано также с распределением аномалий плотности, полученных на основе анализа собственных колебаний [13] (для $j = 4, 6-9$), а также с вариациями границ переходного слоя верхняя-нижняя мантия [2] (для $j = 3, 5$), вводились дополнительные веса для некоторых вариантов. В итоге общее решение было получено на основе комбинации 35 вариантов.

Анализ полученных передаточных множителей показывает, что компенсация аномальных структур литосферы для гармоник низкой степени ($n \leq 5$) осуществ-

ляется во всей толще мантии и в верхнем слое внешнего ядра, для гармоник средней степени ($5 < n < 18$) — в переходном слое верхняя-нижняя мантия, для гармоник более высокой степени ($18 \leq n < 36$) — в низах литосферы и в переходном слое верхняя-нижняя мантия. Полученные таким образом структуры, хотя и соответствуют поставленному условию гидростатического равновесия для давления в ядре, однако вызывают значительные аномалии внутреннего гравитационного поля, что и приводит к конвективным движениям во внешнем ядре. Так, латеральные вариации поля силы тяжести приводят к изменениям скорости дифференциации вещества в различных областях ядра, а латеральные вариации гравитационного потенциала приводят к латеральным движениям жидкого вещества ядра. О том, что такие движения в жидком ядре существуют, свидетельствует наличие недипольного магнитного поля Земли

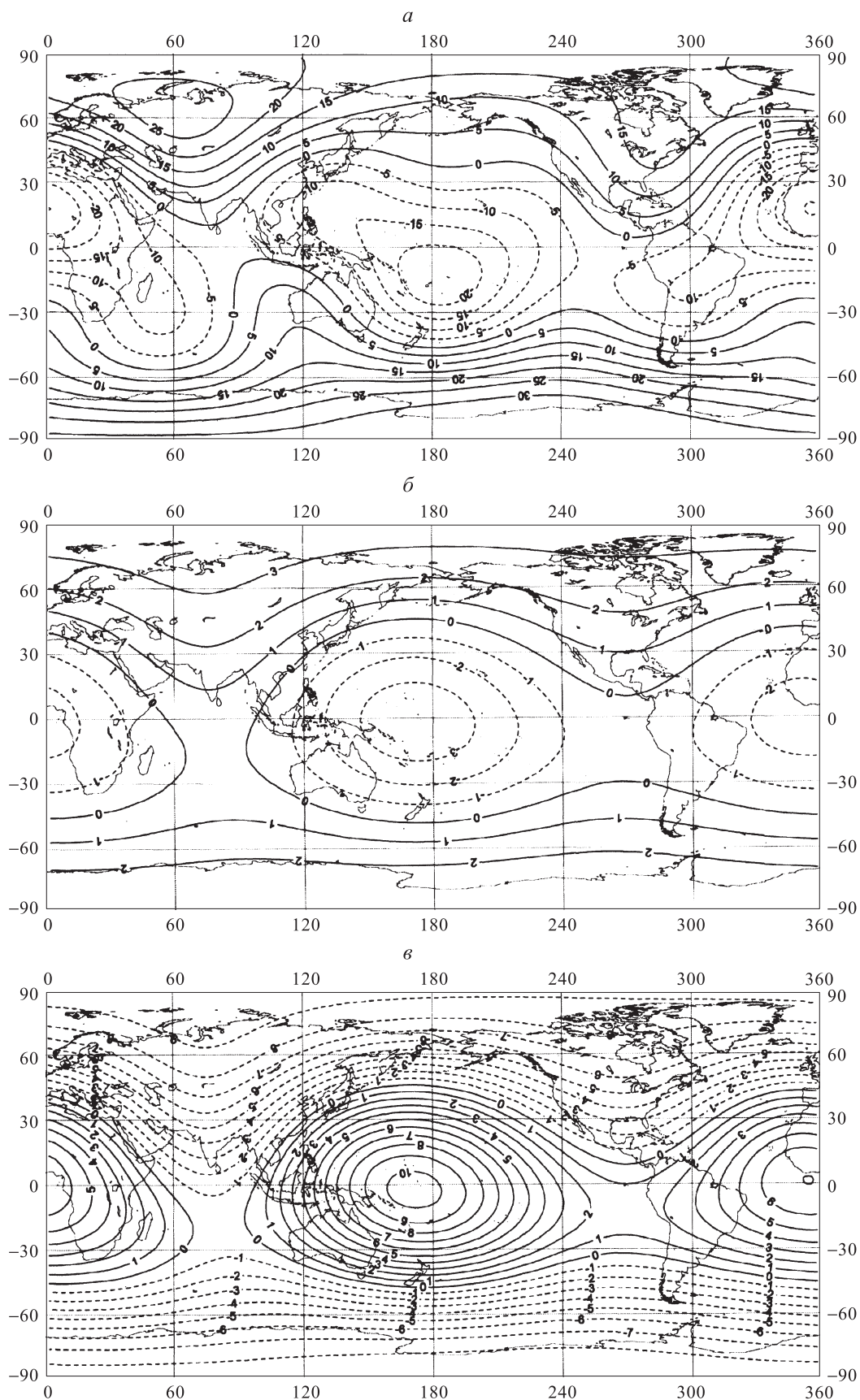


Рис. 5. Аномальные структуры ядра: *a* — верхний слой $R_{10} = (3400 \pm 80)$ км, сечение изолиний $5 \cdot 10^5$ кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-30 \div 34) \cdot 10^5$ кг/м²; *б* — слой $R_{11} = (2800 \pm 520)$ км, сечение изолиний 10^5 кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-4 \div 3) \cdot 10^5$ кг/м²; *в* — переходный слой, внешнее-внутреннее ядро $R_{12} = (1200 \pm 100)$ км, сечение изолиний 10^5 кг/м², диапазон изменений аномалий масс $(-9 \div 10) \cdot 10^5$ кг/м²

и его вариаций. Конвективные движения способствуют перемешиванию вещества жидкого ядра, что приводит к отсутствию латеральных вариаций плотности во всей толще внешнего ядра, кроме его пограничных зон [5, 6, 11, 21]. Что же касается внутреннего ядра, то из анализа сейсмологических наблюдений следует, что только в пограничном слое внешнее–внутреннее ядро могут существовать латеральные вариации плотности [7–10, 22, 23], глубже же везде ядро изотропно для химического состава и температуры [9]. Одна из причин изотропности — это выравнивание поверхности отвердевания к эквипотенциальной поверхности. Строение ядра ближе к центру — мелкоструктурное, с примесью легких элементов ближе к центру [9]. Это объясняется, по-видимому, малой силой тяжести внутри внутреннего ядра и, следовательно, меньшей скоростью дифференциации первичного вещества Земли с сильной примесью легких элементов, что совпадает с требованиями термической истории о юном возрасте внутреннего ядра [24].

Чтобы компенсировать аномалии гравитационного поля внутри твердого ядра Земли и к тому же не нарушить условий соответствия внешнего поля наблюдениям и гидростатического равновесия по давлению во внешнем и внутреннем ядре, нами было рассмотрено несколько моделей распределения аномальных структур внутри ядра, соответствующих сейсмологическим данным: 1) трехслойная модель с распределением аномальных масс в верхнем слое внешнего ядра ($j = 10$), во всей толще внешнего ядра ($j = 11$) и в пограничном слое внешнее–внутреннее ядро ($j = 12$); 2) четырехслойная модель с разделением толщи внешнего ядра на два слоя, на границе которых осуществляется равновесие по давлению. Решение для каждой из рассмотренных моделей и для каждой степени разложения должно удовлетворять следующим условиям: 1) равенство нулю давления во внутреннем ядре от суммы слоев $j = 1–12$; 2) равенство нулю внутреннего поля от суммы всех слоев $j = 1–12$; 3) равенство нулю внешнего поля от суммы слоев ядра.

Результаты и основные выводы

На рис. 1–5 представлены полученные латеральные распределения аномальных масс в мантии и ядре Земли. В таблице для каждого из слоев приведены среднеквадратические значения аномалий масс Δm и латеральных вариаций плотности $\delta\rho$ по отношению к средней плотности для данного слоя. Как видно из таблицы, максимальные вариации плотности, соответствующие литосфере ($j = 1, 2$) и переходным слоям верхняя–нижняя мантия ($j = 3–5$) и мантия–ядро ($j = 9$), не превышают 0.5%. Полученные результаты для распределения аномалий плотности в мантии (рис. 1, 3, 4) хорошо согласуются с результатами [12, 13], полученными из анализа собственных колебаний Земли. Основное отличие заключается в том, что в [12, 13] в построении карт участвовали только гармоники четной степени $n = 2, 4, 6$. Расчет напряжений, обусловленных полученным распределением аномальных масс, показывает, что общая картина напряжений сохраняется во всей верхней мантии, достигая максимума напряжений сжатия в районе Малайзии (-33 МПа) и в районе Гибрал-

тара (-22 МПа) и максимума напряжений растяжения в районе Канадского щита ($+24$ МПа) и в Центральной Антарктиде ($+14$ МПа) вблизи $D_3 = 410$ км. Далее напряжения убывают и сводятся к нулю в данных регионах ниже границы $D_5 = 660$ км, причем имеют локальный характер, не связанный с поверхностной структурой Земли, и не превышают нескольких МПа вплоть до низов нижней мантии. Что же касается формы границ и толщины переходного слоя верхняя–нижняя мантия (рис. 2), то результаты хорошо согласуются с сейсмологическими данными [1, 2], однако при использовании скачков плотности на границе D_3 ($\delta\rho = 0.24$ г/см³) и на границе D_5 ($\delta\rho = 0.19$ г/см³) [19] диапазон вариаций толщины слоя (14 км) вдвое меньше, чем в [1, 2].

В ядре (рис. 5) вариации плотности не существенны (кроме переходных слоев) и соответствуют вариациям высот урвренных поверхностей, что согласуется с выводами, сделанными в [25]. Основной вклад в латеральные вариации переходной зоны внешнее–внутреннее ядро вносят гармоники 1-й степени (характеризующий возможный сдвиг границы внутреннего ядра в направлении $\varphi = -43^\circ$, $\lambda = 200^\circ$) и гармоники 2-й степени, свидетельствующие о возможном сжатии внутреннего ядра по сравнению с PREM [20], а также о несимметрии западного и восточного полушарий внутреннего ядра, что соответствует сейсмологическим данным. Более слабое влияние гармоник 3-й степени также вносит свой вклад в несимметрию северного и южного полушарий ядра. Что же касается внешнего слоя ядра на границе с мантией, то здесь более существенен вклад гармоник степени и порядка 32, 43, 41, свидетельствующие о несимметрии северного и южного полушарий, а также 20, которая может отражать дифференциальное вращение внешней части ядра как по широте (меньшая скорость в экваториальной зоне), так и по глубине (меньшая скорость в экваториальной зоне по сравнению с внутренним ядром).

Построенные нами на основе полученных распределений плотности карты аномалий силы притяжения и потенциала внутри Земли приводят к выводу о возможности конвективных движений в ядре и мантии. Так, латеральные движения, обусловленные вариациями аномалий потенциала до $0.5 \cdot 10^{-4} V_0$ (V_0 — средний потенциал Земли), максимальны во внешнем слое ядра, затем убывают в мантии и меняют свой знак при пересечении переходной зоны нижняя–верхняя мантия (что может свидетельствовать о двухслойной конвекции в мантии). Радиальные движения обусловлены дифференциацией компонент вещества Земли, скоростью которой максимальна в экваториальной зоне внешнего слоя ядра при максимальных аномалиях силы притяжения (диапазон вариаций 200 мГал), после пересечения границ ядра становится максимальной в приполярных областях (диапазон вариаций 300 мГал). В мантии аномалии силы притяжения достигают максимальных вариаций (500 мГал) вблизи границы D_3 . В дальнейшем планируется провести детальный анализ возможных конвективных движений, обусловленных аномалиями внутреннего гравитационного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-05-00256).

Список литературы

1. Gu Y.J., Dziewonski A.M., Ekstrom G. // Geophys. J. Int. 2003. **154**. P. 559.
2. Lawrence J.F., Shearer P.M. // Geophys. J. Int. 2008. **174**. P. 143.
3. Antolik M., Gu Y.J., Ekstrom G., Dziewonski A.M. // Geophys. J. Int. 2003. **153**. P. 443.
4. Lay T., Garnero E.J. // Geophysical Monograph 150. IUGG. 2004. **19**.
5. Soldati G., Boschi L., Piersanti A. // Geophys. Res. Lett. 2003. **30**, N 4. P. 39.
6. Tanaka S. // SEDI 2006. Prague, 2006. P. 19.
7. Cormier V.F. // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. **258**. P. 442.
8. Garcia R., Chevrot S., Tkalic H. // SEDI 2006. Prague, 2006. P. 25.
9. Bergman M.I. // SEDI 2006. Prague, 2006. P. 56.
10. Krasnoshchekov D.N., Kaazik P.V., Ovtchinnikov V.M. // SEDI 2006. Prague, 2006. P. 26.
11. Zou Z., Koper K.D., Cormier V.F. // J. Geophys. Res. 2008. **113**. P. B05314.
12. Ishii M., Tromp J. // Science. 1999. **285**, N 5431. P. 1231.
13. Ishii M., Tromp J. // Phys. Earth Planet. Inter. 2004. **146**. P. 113.
14. Kuo C., Romanowicz B. // Geophys. J. Int. 2002. **150**. P. 162.
15. Дубошин Г.Н. Теория притяжения. М., 1961.
16. Чуйкова Н.А., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 4. С. 46 (Moscow University Phys. Bull. 2007. **62**, N 4. P. 248).
17. Чуйкова Н.А., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2005. № 4. С. 64.
18. Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 4. С. 48.
19. Lawrence J.S., Shearer P.M. // Geochem. Geophys. Geosyst. 2006. **7**, N 10. P. Q10012.
20. Dziewonski A.M., Anderson D.L. // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. **25**. P.297.
21. Amit H., Aubert J., Hulot G., Olson P. // Earth Planets Space. 2008. **60**. P. 845.
22. Aubert J., Amit H., Hulot G., Olson P. // Nature. 2008. **454**. P. 758.
23. Ishii M., Dziewonski A.M., Tromp J., Ekstrom G. // J. Geophys. Res. 2002. **107**, N B12. P. 2379.
24. Gubbins D. // SEDI 2006. Prague, 2006. P. 57.
25. Piersanti A., Boschi L., Dziewonski M. // J. Geophys. Res. 2001. **28**. N 8. P. 1659.

Density heterogeneities in the Earth's mantle and core

N. A. Chujkova^a, T. G. Maximova

*P. G. Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^achujkova@sai.msu.ru.*

The density lateral variations are determined at the depths, where are the seismic velocity anomalies. They are consistent with external gravity anomalies and with results of analysis of Earth's eigenfrequency normal modes and they minimize the departures of Earth's internal structure from hydrostatic structure. The determined anomalous structures results in gravity anomalies, that can caused the convective movements at Earth's mantle and core.

Keywords: the Earth's crust, the Earth's mantle, the Earth's core, density heterogeneities, gravity anomalies, hydrostatic equilibrium.

PACS: 91.35.-x, 91.35.Cb.

Received 19 November 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin 2(2010).*

Сведения об авторах

1. Чуйкова Надежда Алексеевна — докт. физ.-мат. наук, вед. научн. сотр.; тел.: (495) 939-50-24, e-mail: chujkova@sai.msu.ru.
2. Максимова Татьяна Геннадьевна — науч. сотр.; тел.: (495) 939-50-24.