

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ 2D ПЛОТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ С УЧЕТОМ УСЛОВИЯ ИЗОСТАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ГЛУБИНЕ

Бызов Д.Д., Цидаев А.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В работе рассматривается оригинальная поэтапная методика для построения двумерных слоисто-блоковых плотностных моделей вдоль исследуемых профилей с использованием сейсмических разрезов различной протяженности и глубины. Блоки ниже границы Моховичича выделяются исходя из условия изостатической компенсации на глубине 80 км.

Двумерная обратная задача гравиметрии, гипотеза изостатической компенсации, литостатическое давление.

METHOD FOR CONSTRUCTION 2D DENSITY MODEL OF UPPER MANTLE IN CONDITIONS OF ISOSTATIC COMPENSATION AT THE DEPTH

Byzov D.D., Tsidaev A.G. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. In this paper, the stepwise methodology for constructing two-dimensional block-layered density models along studied profiles using seismic sections of different length and depth was considered. Blocks below the Moho was allocated based on the condition of isostatic compensation at a depth of 80 km.

2D inverse gravimetric problem, condition of isostatic compensation, lithostatic pressure.

Введение

Процесс построения плотностных моделей по аномалиям гравитационного поля сводится к решению прямых и обратных задач гравиметрии. В классически некорректной постановке обратная задача гравиметрии обладает множеством неустойчивых решений (Страхов, 1972). Для повышения устойчивости и снижения неоднозначности метода гравитационного моделирования необходимо привлекать плотностные модели начального приближения. Такие «нулевые» модели строятся по сейсмическим профилям и должны отражать характерные (интегральные) закономерности распределения плотности, а соответствующее им аномальное гравитационное поле, лишь в основных чертах, повторять морфологию наблюдаемых аномалий (Мартышко и др., 2012а).

В работе представлена оригинальная поэтапная методика для построения двумерных слоисто-блоковых плотностных моделей вдоль исследуемых профилей с использованием сейсмических разрезов различной протяженности и глубины. Блоки ниже границы Моховичича выделяются исходя из условия изостатической компенсации на глубине 80 км. Применяе-

мый математический аппарат опирается на решение прямых и обратных задач гравиметрии. Все этапы вычислений проводились созданным авторами пакетом прикладных программ, исключая влияние субъективного фактора интерпретации на всех этапах промежуточных расчетов. Последнее немаловажно для геолого-геофизического анализа полученных результатов. Методика применена для построения двумерных плотностных моделей вдоль шести профилей в области Тимано-Печорской плиты.

В качестве исходной информации нами были использованы данные сейсмических исследований и карта аномалий гравитационного поля в редукции Буге. Для сейсмических профилей ГСЗ, расположенных в пределах исследуемой области 60–67° с.ш., 48–62° в.д. (рис. 1, цветная вкладка), В.В. Колмогоровой проведена интерпретация полей времен, построенных по фоновым материалам, и в едином модельном представлении построены градиентные разрезы распределения скоростей продольных волн по профилям Агат-2 и Кварц. Скоростная модель земной коры по Красноленинскому профилю построена по материалам Баженовской геофизической

экспедиции В.С. Дружининым. Скоростные модели по фрагментам геотраверсов Рубин-1 и Глобус составлены на основе авторских слоисто-блоковых разрезов Центра «ГЕОН».

Модель по Сыктывкарскому профилю МОВЗ составлена В.В. Удоратиным.

Рассмотрим поэтапно предлагаемую методику на примере профиля Кварц.

Построение плотностной слоисто-блоковой модели начального приближения на основе имеющейся скоростной модели

Использовавшаяся для построений градиентная модель распределения скоростей продольных волн вдоль профиля Кварц представлена на рис. 2 (цветная вкладка). Ее нижняя граница – предполагаемая граница Мохоровичича (М).

Границы слоев и блоков будущей плотностной модели были выбраны среди изолиний скорости сейсмической модели, с тем чтобы сохранить ее основные структурные особенности. Далее произведен переход к параметру плотности по эмпирической зависимости скорость-плотность, полученной ранее в лаборатории математической геофизики ИГФ УрО РАН для территории Тимано-Печорской плиты (Мартышко и др., 2012б):

$$\sigma(V) = \begin{cases} 0,113V + 2,034; & 2,35 \leq V < 5 \\ 0,2V + 1,6; & 5 \leq V < 7,75 \\ 0,25V + 1,3; & 7,75 \leq V < 8,5. \end{cases}$$

Затем в выбранных границах вполне усреднение плотности, и полученный разрез принят в качестве начальной плотностной модели (рис. 3, цветная вкладка).

Модель ограничена снизу восьмьюдесятью километрами, которые мы принимаем за глубину изостатической компенсации. Вычисленное модельное гравитационное поле имеет невязку 26,17 мГал в сравнении с наблюдаемым для данного профиля. Следует отметить, что на данном этапе средняя плотность в верхней мантии не важна и указана только исходя из предполагаемой средней скорости продольных

волн на границе М (в пересчете по формуле «скорость-плотность»).

Подбор плотностей в земной коре и средней плотности верхней мантии с помощью решения линейной обратной задачи

Двумерная линейная обратная задача гравиметрии в общей постановке относится к классу некорректно поставленных неустойчивых задач. Использование скоростных разрезов позволяет построить плотностные модели начального приближения. Поиск небольших отклонений от модели начального приближения в пределах заданного каркаса границ позволяет существенно увеличить устойчивость решения обратной задачи.

На практике также возникают особенности, которые должны быть учтены при решении обратной задачи:

- 1) гравиметрические измерения проводятся дискретно, причем регулярность сети съемки нередко нарушается из-за природных условий;
- 2) область проведения съемок всегда конечна, причем региональные аномалии наблюдаемого поля редко оканчиваются выходом в нормальное поле, т. е. остаются не выявленными явно.

Таким образом, задача ставится так.

Задано: 1) гравитационные измерения Δg с некоторым шагом на профиле; 2) геометрия разреза, представленного слоисто-блоковой моделью; 3) начальные значения плотностей слоев и блоков; 4) ограничения, накладываемые на значения плотности.

Необходимо определить набор плотностей слоев и блоков в рамках накладываемых ограничений, который обеспечивает близость измеренного и модельного полей.

Предлагаемый метод решения заключается в реализации следующих шагов:

- 1) параметризация слоисто-блоковой модели (Мартышко и др., 2010);
- 2) применение алгоритма послойного подбора плотностей (Кошелева, 2014).

На начальном этапе методом минимизации подбирается плотность только для одного слоя модели. На каждом последующем шаге количество слоев, участвующих

в минимизации, увеличивается на единицу.

Такой подход позволяет интерактивно определять:

1) гравиактивный слой, формирующий кривую гравитационного поля;

2) слой, поле которого существенно увеличивает норму разности измеренного и модельного полей. Такая ситуация возможна, когда нулевое приближение границ слоя задано с погрешностью, либо слой на самом деле существенно неоднороден. В этом случае требуется либо уточнение границ слоя, либо разбиение однородного слоя на несколько блоков с разными плотностями, например, на основе гипотезы об изостатической компенсации на некоторой глубине.

Модель по профилю Кварц после подбора плотностей блоков (в том числе в верхней мантии) путем решения линейной обратной задачи с использованием модели начального приближения представлена на рис. 4 (цветная вкладка). Невязка модельного и наблюдаемого полей составила 21,21 мГал.

Выделение блоков в верхней мантии исходя из условия изостатической компенсации на глубине

Для приведенной (см. рис. 4, цветная вкладка) модели с однородной мантией на каждой глубине h рассчитано отклонение $\Delta P(x, h)$ литостатического давления $P(x, h)$ от его среднего значения $\bar{P}(h)$ на этом уровне (рис. 5, цветная вкладка) по формулам:

$$\Delta P(x, h) = P(x, h) - \bar{P}(h) = g_a \int_h^0 \Delta \sigma(x, y) dy;$$

$$P(x, h) = g_a \int_h^0 \sigma(x, y) dy;$$

$$\begin{aligned} \bar{P}(h) &= \frac{1}{L} \int_0^L P(x, h) dx = \\ &= \frac{g_a}{L} \int_h^0 \int_0^L \sigma(x, y) dx dy = g_a \int_h^0 \bar{\sigma}(y) dy; \end{aligned}$$

$$\bar{\sigma}(y) = \frac{1}{L} \int_0^L \sigma(x, y) dx;$$

$$\Delta \sigma(x, y) = \sigma(x, y) - \bar{\sigma}(y),$$

где $g_a = 9,80665 \text{ м/с}^2$ – среднее значение ускорения свободного падения; $\sigma(x, y)$ – значение плотности в соответствующей точке профиля; L – длина профиля; $\bar{\sigma}(y)$ – среднее значение плотности модели на соответствующей глубине; $\Delta \sigma(x, y)$ – отклонение плотности от ее среднего значения на глубине. На том же рисунке отдельно приведен график $\Delta P(x, h_i)$ при $h_i = -80 \text{ км}$ – предполагаемом уровне изостатической компенсации. Его среднеквадратичное отклонение равно 117 бар.

В качестве дополнительного граничного условия для построения блоков в верхней мантии использовалось условие изостатической уравновешенности модели на глубине $h_i = -80 \text{ км}$. На уровне изостатической компенсации латеральных изменений давления быть не может, т. е. в уравновешенной модели

$$\Delta P(x, h_i) = 0. \tag{1}$$

Для построения такой модели с изменением только верхов мантии была введена функция-компенсатор $\rho(x)$, которая показывает, какое значение плотности нужно вычесть из мантии (т. е. из слоя между границей M и уровнем h_i), чтобы на глубине h_i выполнялось условие (1). Пусть ΔP_{hom} и $\Delta \sigma_{hom}$ – отклонения литостатического давления и плотности от их средних значений на глубине для модели с однородной мантией (см. рис. 4, цветная вкладка), тогда при изменении плотности в мантии на $\rho(x)$ аномальное литостатическое давление на глубине h_i в новой модели будет равно

$$\Delta P(x, h_i) = \Delta P_{hom}(x, h_i) - g_a [h_m(x) - h_i] \rho(x),$$

где $y = h_m(x)$ – уравнение границы M .

Из условия (1):

$$\begin{aligned} \rho(x) &= \frac{\Delta P_{hom}(x, h_i)}{g_a [h_m(x) - h_i]} = \\ &= \frac{1}{[h_m(x) - h_i]} \int_{h_i}^0 \Delta \sigma_{hom}(x, y) dy. \end{aligned}$$

При помощи вычисленной таким образом $\rho(x)$ из модели с однородной мантией была построена идеально скомпенсированная на глубине 80 км плотностная модель (рис. 6, цветная вкладка). Невязка модель-

ного и наблюдаемого полей составила 17,21 мГал. Следует отметить, что графики $\rho(x)$ и $\Delta P_{hom}(x, h_i)$ похожи, поскольку $h_m(x)$ существенно более гладкая, чем $\Delta P_{hom}(x, h_i)$.

Как можно видеть, распределение плотности в верхах мантии получившейся модели очень неоднородно и никак не соотносится с действительностью. Чтобы привести разрез в порядок ниже М, модель была разбита на несколько блоков вертикальными границами, внутри которых было проведено усреднение плотности. X-координаты разбиения выбирались по нулям и экстремумам функции $\rho(x)$ с тем расчетом, чтобы получившиеся блоки не имели слишком малую протяженность вдоль профиля. Результирующая слоисто-блоковая плотностная модель по профилю Кварц показана на рис. 7 (цветная вкладка). Невязка модельного и наблюдаемого полей мало изменилась по сравнению с предыдущим шагом и составила 17,4 мГал. Среднеквадратичное отклонение аномального литостатического давления на глубине 80 км предполагаемой изостатической компенсации стало равным 48 бар. Довольно резкие пики на графике $\Delta P(x, h_i)$ говорят о том, что, скорее всего, соседние блоки в мантии должны непрерывно переходить один в другой, а не скачкообразно.

Заключение

В работе представлена методика двумерного гравитационного моделирования, позволяющая унаследовать основные структурные особенности сейсмической модели разреза; учитывать различную априорную информацию (структурные границы, начальное распределение плотности, ограничения на него накладываемые); добиться хорошего соответствия наблюдаемого и модельного гравитационных полей; выполнять устойчивый подбор плотностей для большого числа блоков; изменять блочную структуру модели ниже определенной границы исходя из условия изостатического равновесия на заданной глубине

и в достаточной степени уменьшить аномалии литостатического давления на ней. Все разработанные алгоритмы реализованы в прикладных программах для современных вычислительных систем. Для профилей на территории Тимано-Печорской плиты Агат-2, Кварц, Глобус, Сыктывкарский, Рубин-1, Красноленинский созданы двумерные модели распределения плотности, в которых выбором конфигурации блоков верхней мантии удалось с хорошей точностью выполнить условие изостатического равновесия на глубине 80 км.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 14-05-31083.

Литература

- Кошелева Н.В. О решении линейной обратной задачи гравиметрии для 2d слоистой модели с интерактивным учетом априорной информации // Уральский геофизический вестник. № 2. (24). 2014. С. 50–59.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г. Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных // Физика Земли. 2010. № 11. С. 23–35.
- Мартышко П.С., Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Осипов В.Ю., Цидаев А.Г. Схематическое тектоническое районирование Уральского региона на основе разработанных алгоритмов и методики создания объемной геофизической модели верхней части литосферы // Литосфера. 2012а. № 4. С. 208–218.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Колмогорова В.В., Цидаев А.Г., Бызов Д.Д. Применение сеточных функций в задачах трехмерного плотностного моделирования // Уральский геофизический вестник. 2012б. № 1(19). С. 30–34.
- Страхов В.Н. К вопросу о единственности решения плоской обратной задачи теории потенциала // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 2. С. 38–49.

К статье Бызова Д.Д., Цидаева А.Г. – «Методика построения 2D плотностной модели верхней мантии с учетом условия изостатической компенсации на глубине»

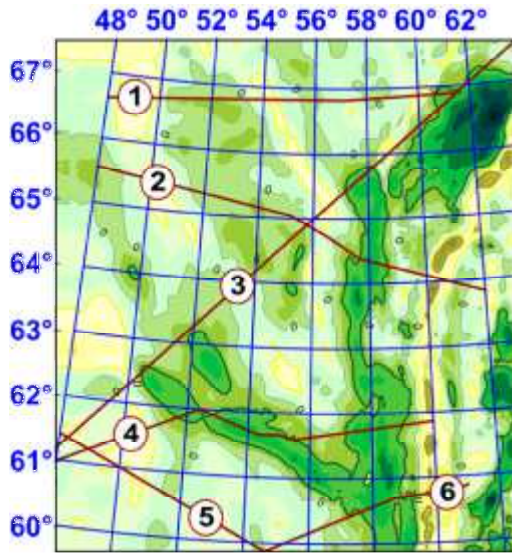


Рис. 1. Схема расположения профилей ГСЗ, МОВЗ, совмещенная с картой аномального гравитационного поля Δg .

Обозначения профилей:

- 1) Агат-2,
- 2) Кварц,
- 3) Глобус,
- 4) Сыктывкарский,
- 5) Рубин-1,
- 6) Красноленинский

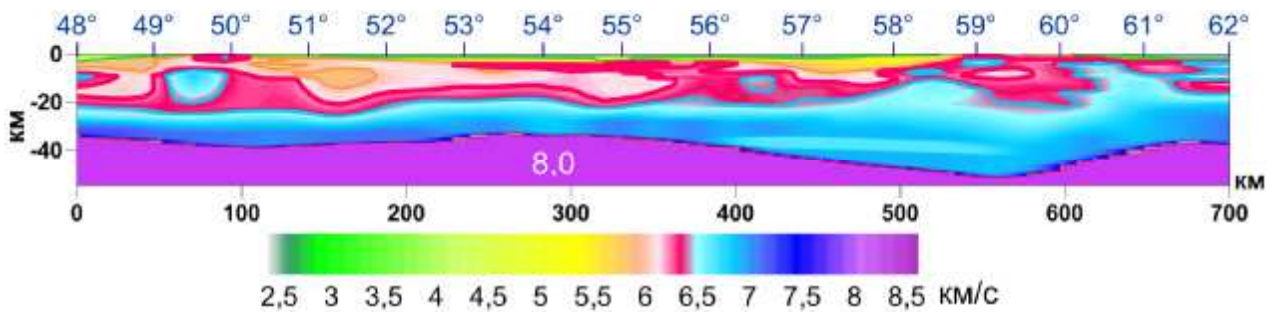


Рис. 2. Скоростной разрез по профилю Кварц с нанесенными отметками меридианов

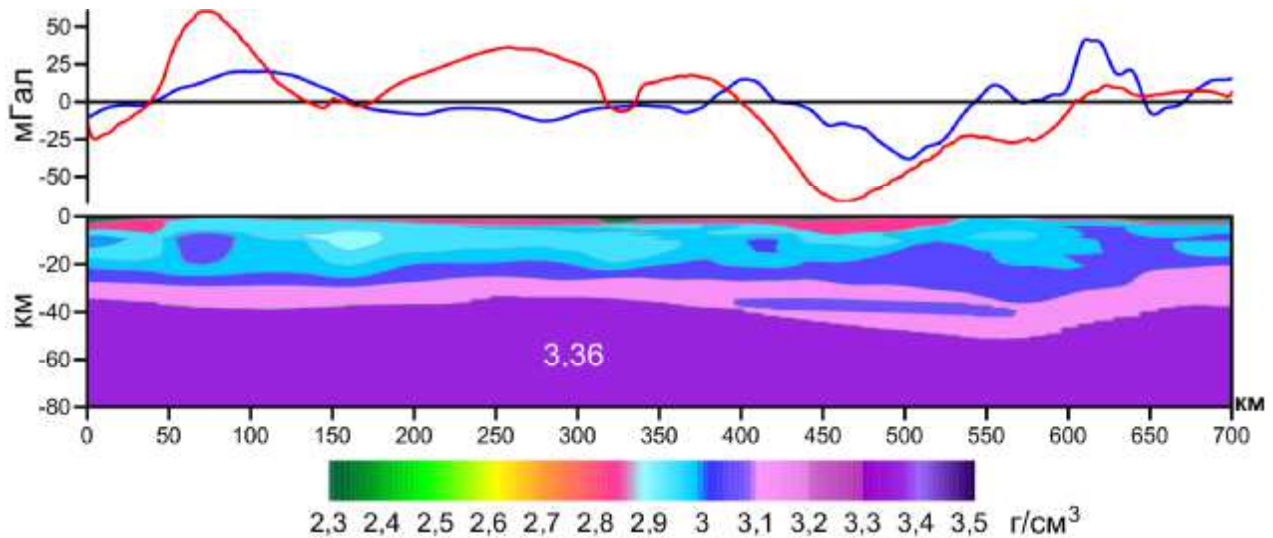


Рис. 3. Плотностная модель начального приближения и графики гравитационных полей: наблюдаемого (синим) и модельного (красным)

К статье Бызова Д.Д., Цидаева А.Г. – «Методика построения 2D плотностной модели верхней мантии с учетом условия изостатической компенсации на глубине»

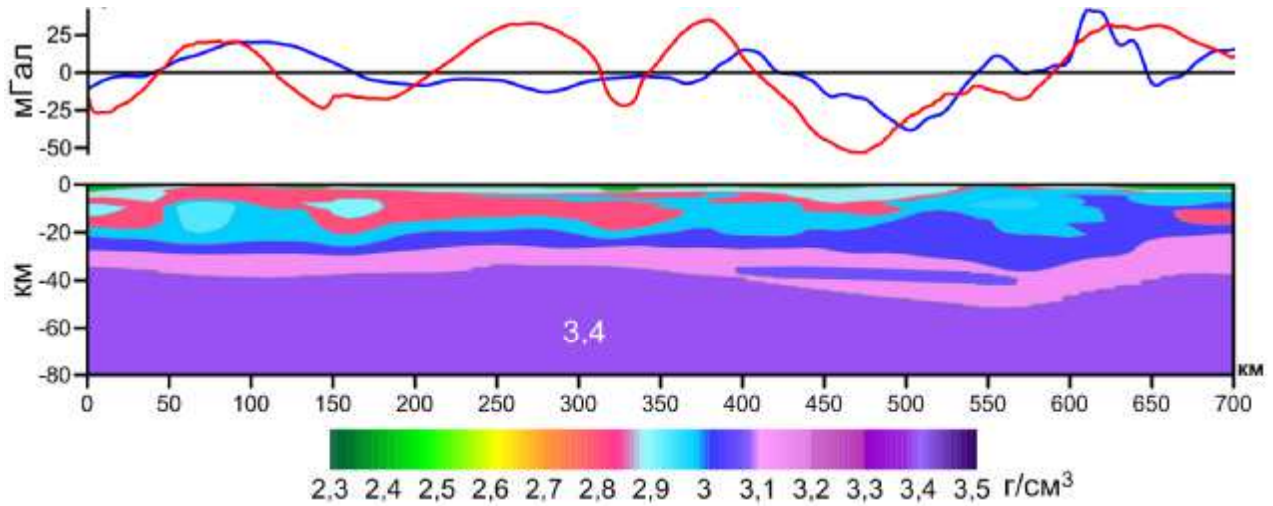


Рис. 4. Модель с однородной мантией по профилю Кварц (с подобранными плотностями в блоках выше М и средней плотностью верхней мантии).
Графики гравитационных полей: наблюдаемого (синим) и модельного (красным)

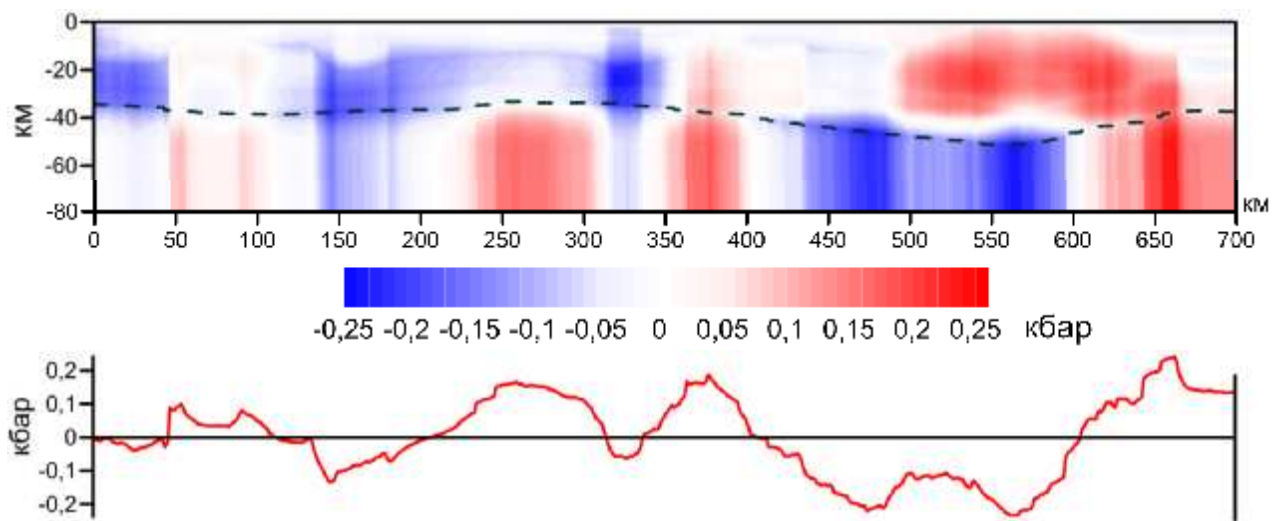


Рис. 5. Распределение аномального литостатического давления ΔP в модели с однородной мантией по профилю Кварц (пунктиром нанесена граница М) и его график для глубины 80 км

К статье Бызова Д.Д., Цидаева А.Г. – «Методика построения 2D плотностной модели верхней мантии с учетом условия изостатической компенсации на глубине»

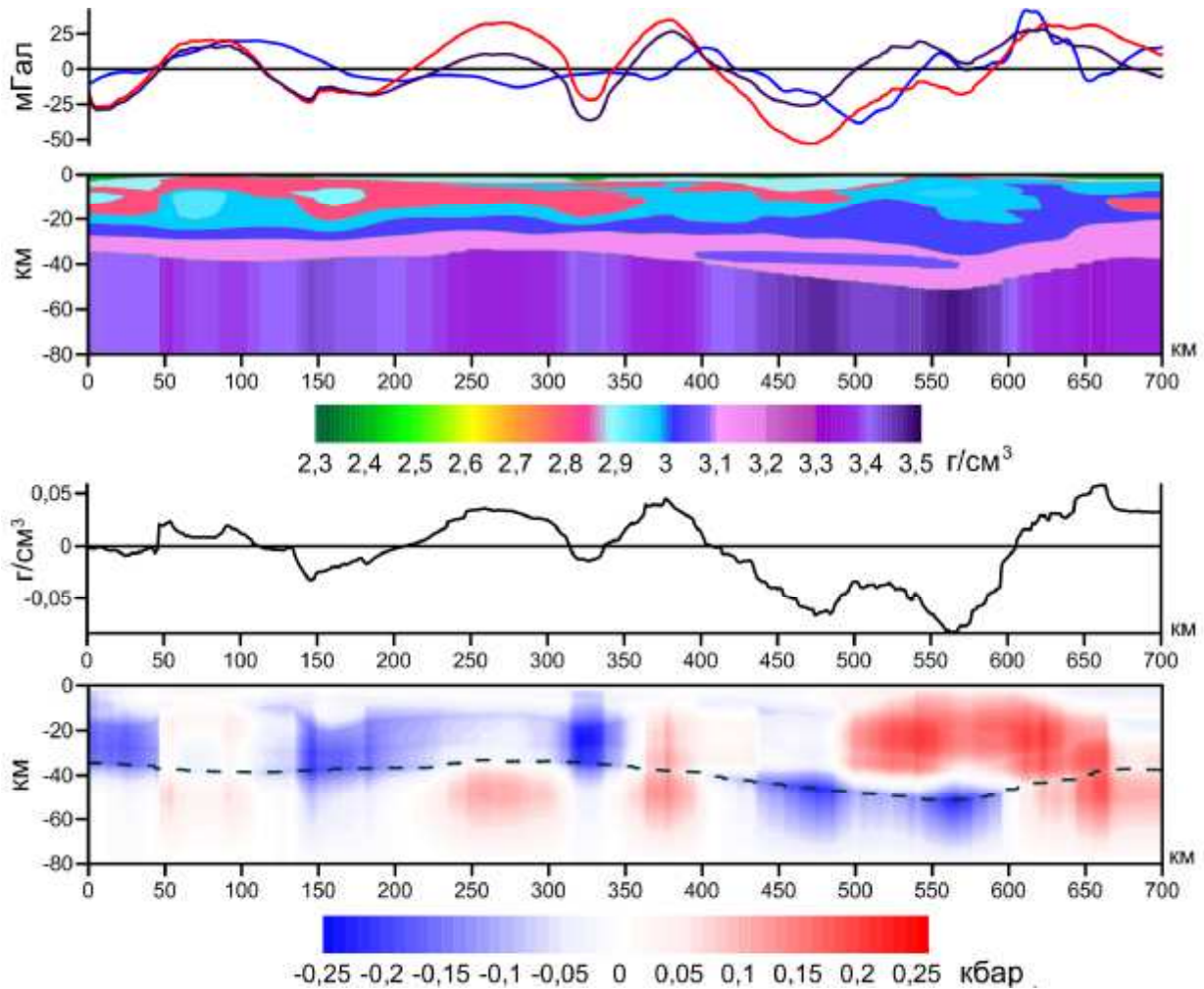


Рис. 6. Идеально скомпенсированная на глубине 80 км плотностная модель.

Выше приведены графики гравитационных полей:
наблюденного (синим), модели с однородной мантией (красным),
идеально скомпенсированной модели (темно-фиолетовым).

Ниже – график функции-компенсатора $r(x)$.

Внизу – распределение аномального литостатического давления ΔP
в идеально скомпенсированной модели (пунктиром нанесена граница М)

К статье Бызова Д.Д., Цидаева А.Г. – «Методика построения 2D плотностной модели верхней мантии с учетом условия изостатической компенсации на глубине»

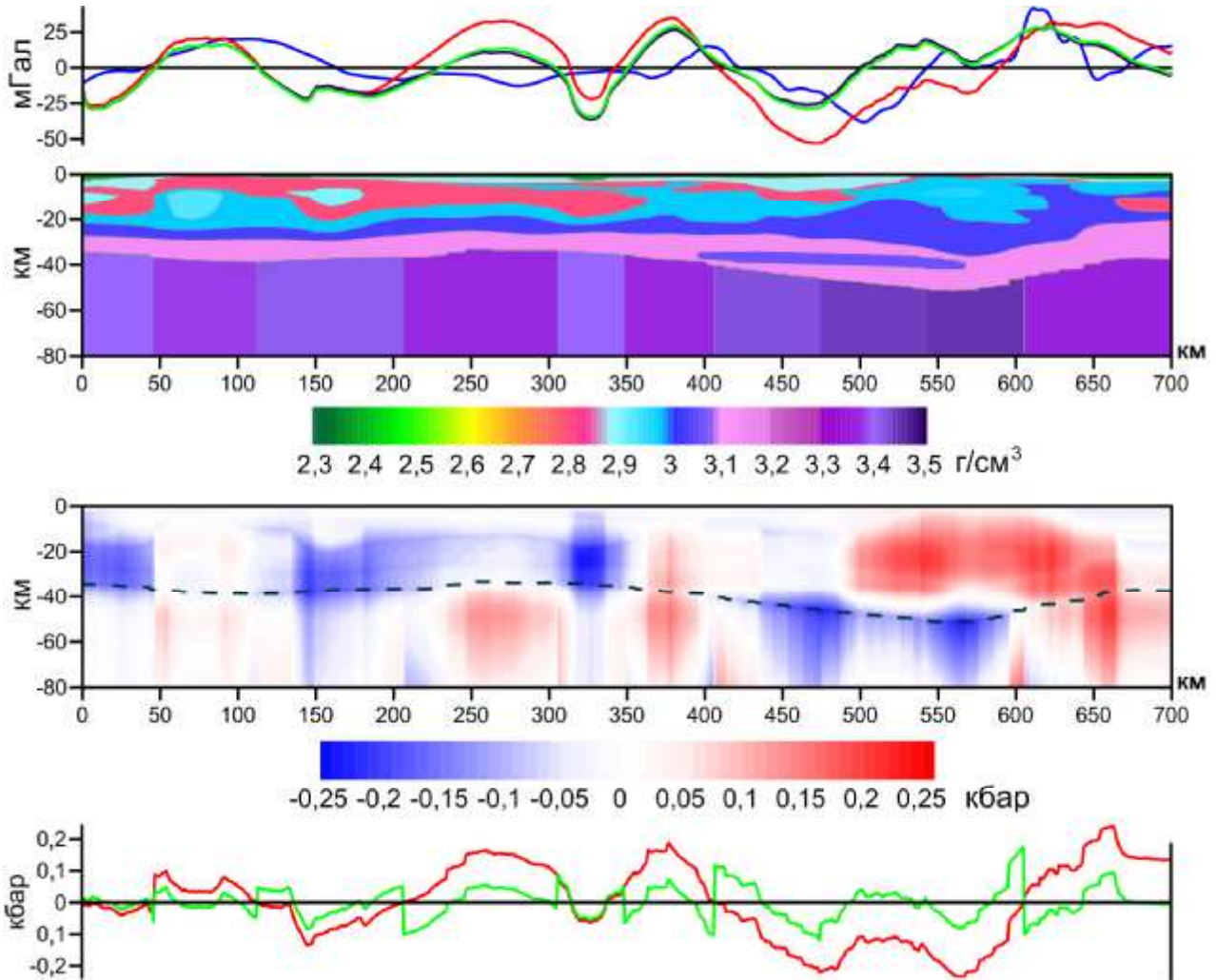


Рис. 7. Результирующая слоисто-блоковая плотностная модель по профилю Кварц.
Выше приведены графики гравитационных полей:
наблюденного (синим), модели с однородной мантией (красным),
идеально скомпенсированной модели (темно-фиолетовым), результирующей (зеленым).
Ниже – распределение аномального литостатического давления ΔP
в результирующей модели (пунктиром нанесена граница М).
Внизу – его график для глубины 80 км