

УДК 551. 24

© Л.И. Гонтовая¹, В.В. Гордиенко², Л.Я. Гордиенко², 2009¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петр.-Камчатский,²Институт геофизики НАН Украины, Киев

ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕКТОНОСФЕРЫ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ ТИХООКЕАНСКОГО ТИПА В РАЙОНЕ КАМЧАТКИ

Рассмотрены результаты построения плотностных моделей тектоносферы вдоль трех профилей на Восточной Камчатке и соседней акватории. Для модели верхней мантии использована тепловая модель, отвечающая схеме глубинного процесса по адвекционно-полиморфной гипотезе. Показана возможность объяснения наблюдаемого гравитационного поля без подбора параметров моделей.

Введение. Использование данных гравиметрии для проверки глубинных процессов, постулируемых различными тектогеническими гипотезами, невозможно в случае, когда плотностные параметры моделей коры и верхней мантии подбираются под наблюдаемое поле [5 и др.]. Оно может быть объяснено весьма различным распределением плотностей в тектоносфере. Применяемый авторами подход заключается в следующем [4, 5]. По априорным геолого-геофизическим данным строится плотностная модель коры и определяется ее гравитационный эффект. По тепловой модели верхней мантии, отвечающей принятой – адвекционно-полиморфной – гипотезе (АПГ) строится аномальная плотностная модель верхней мантии, ее эффект суммируется с коровым. Сумма (расчетное поле) без подбора должна объяснить наблюдаемое поле, различия – не более обусловленных погрешностями обоих полей. Такие операции успешно выполнялись в разных районах континентов, океанов и переходных зон. В последнем случае построение достаточно точной модели часто сложно из-за неполноты геолого-геофизической информации. Цель данной работы – проверка гипотезы глубинного процесса в тектоносфере переходной зоны Камчатки, где сейсмологические исследования привели к созданию скоростных моделей коры и верхней мантии, которые можно привлечь к плотностному моделированию [2, 3, 9–14].

Постановка задачи. Предполагается, что в регионе протекают два молодых глубинных процесса: альпийский геосинклинальный, дополненный на части территории современной активизацией, и процесс океанизации, приведший к образованию Северо-Западной котловины Тихого океана [2, 5, 14]. Перемещения вещества, отвечающие этим событиям в соответствии с представлениями АПГ, рассмотрены в [2, 5]. Построение модели, уже применявшееся в этом регионе для аналогичного исследования на более раннем этапе развития гипотезы [4, 14 и др.], выполнено в коре для плотностей (σ), переведенных в аномальные по отношению к плотности верхов нормальной мантии ($3,32 \text{ г/см}^3$). Гравитационный эффект такой модели коры при нормальном распределении ρ в мантии отвечает 0 аномалии Буге на суше и

свободного воздуха на море при минус 870 мГл. Подобная привязка позволяет сравнить расчетное поле с наблюдаемым, разница между ними считается мантийной аномалией. Ее величина может быть установлена технически по-другому, данный путь привлекателен возможностью сравнивать результаты в разных регионах, для территориально разобщенных моделей.

В регионе построена одна тепловая модель верхней мантии, отражающая перечисленные выше глубинные процессы [2, 5]. Соответственно расчетная величина мантийной аномалии изменяется только вкострости простира-ния геосинклинали Восточной Камчатки и желоба. Усиления эффективности контроля можно достичь проведением моделирования по нескольким профилям, на которых различается наблюдаемое поле и плотностная структура коры (что обуславливает различия в ее расчетном эффекте).

Наблюдаемое поле. По данным [13] погрешность поля на море составляет 10 мГл; на суше она меньше, но едва ли ниже 5 мГл (такая величина характерна для Украины [4], на Камчатке условия съемки сложнее), скорее – погрешность составляет 5–10 мГл.

На профили (см. ниже) вынесены несколько сглаженные кривые Δg , отражающие распределение изолиний на схеме поля в районе исследований. На суше использованы данные [8], на море кроме них и сведений о глубине дна (для расчета аномалии свободного воздуха) использованы данные из работы [13]. Они не совпадают, что следует расценивать как возможность дополнительной погрешности. Оценка ошибки используемого далее гравитационного поля – около 10–20 мГл. Размещение профилей показано на рис. 1.

Изолинии наблюдаемого поля в целом указывают на двумерность основных гравитирующих объектов региона.

Плотностная модель коры. При построении плотностной модели использовались различные данные (рис. 2, 3): коровая часть трехмерной скоростной модели региона [3, 10], данные по отдельным профилям ГСЗ [7, 9, 14], сведения о мощности коры [11, 13] и ее осадочно-вулканогенного слоя [11]. Данные о глубине раздела М

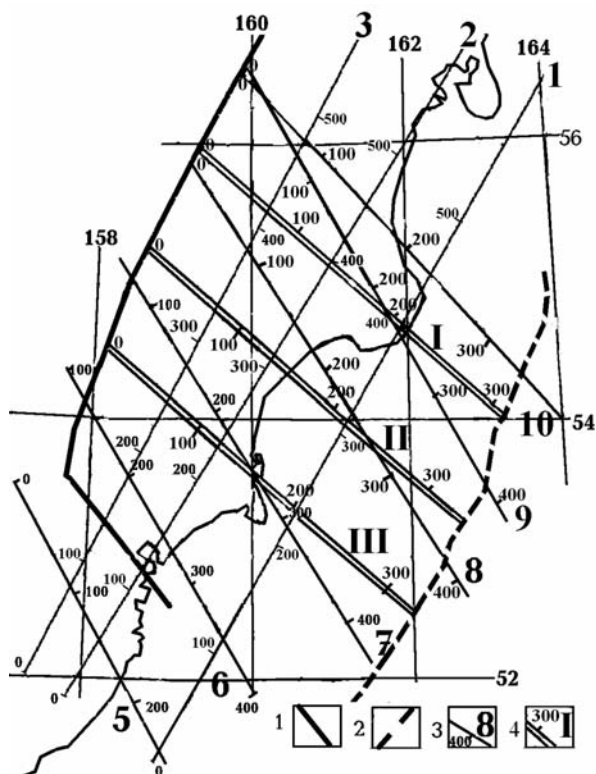


Рис. 1. Расположение профилей, вдоль которых построены модели. 1 – западная граница геосинклинали Восточной Камчатки, 2 – ось желоба, 3 – профили, вдоль которых построены скоростные модели коры и верхней мантии до 150–200 км [3, 10] (иллюстрирующие трехмерную скоростную модель региона), 4 – профили моделирования

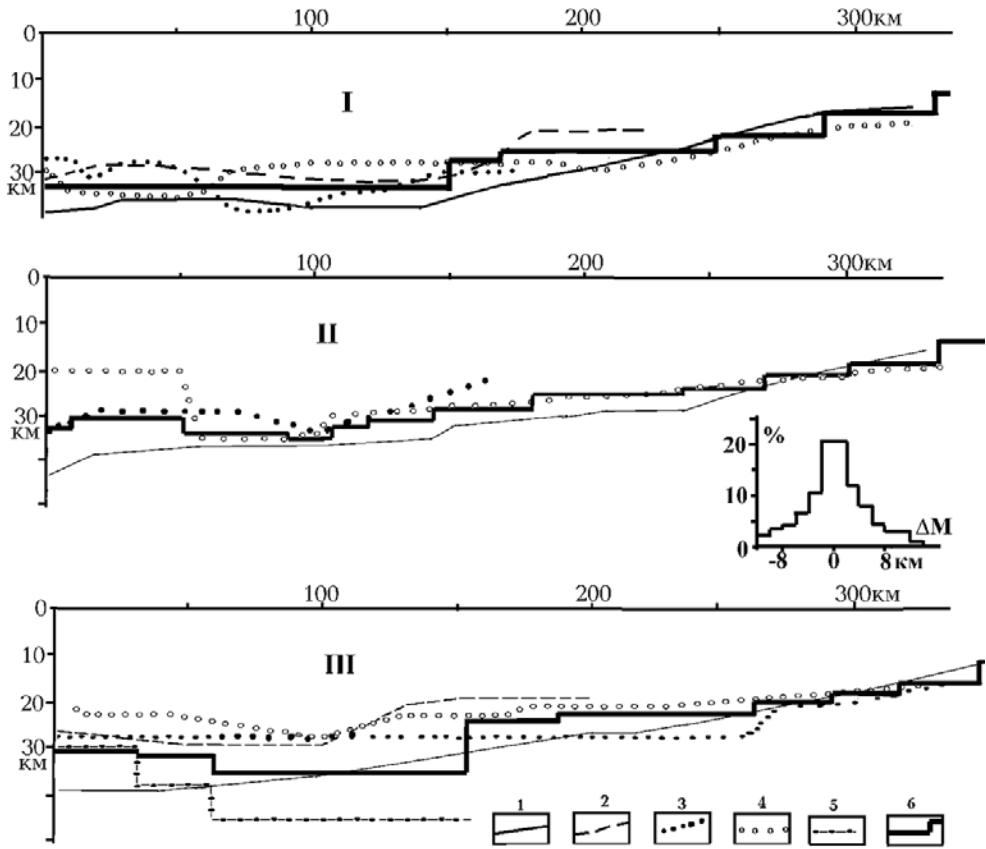


Рис. 2. Данные о глубине раздела М вдоль профилей I-III. 1 – по [13], 2 – по [11], 3 – по [7, 9], изолинии V_p : 4–7,0 км/с, 5 – по [14], 6 – среднее значение, использованное в модели

наиболее многообразны (рис. 2), на их примере можно рассмотреть возможные допуски определения глубин плотностных границ в коре региона.

Гистограмма распределения отклонений частных величин М от средней обнаруживает типичную величину около 4 км. При размерах блоков с корой аномальной мощности, характерных для региона, и обычном контрасте плотности между нижней корой и верхними горизонтами мантии (рис. 3), с такой погрешностью можно ожидать аномалии расчетного эффекта 10 ± 10 мГл. На морском конце профиля полученная мощность коры примерно соответствует типичной для Северо-Западной котловины Тихого океана [12 и др.], но это не обязательно верно: профили выходят на возвышенность Обручева, где кора может отличаться от обычной [1].

В коре были построены еще две границы – 6,5 км/с и поверхность фундамента. Они (и данные батиметрии) были использованы для определения плотности в средней и верхней частях коры (рис. 3). Представляется вероятным, что точность их определения сопоставима с полученной для раздела М, с использованием этих границ в модели могут быть связаны близкие значения погрешностей расчетного эффекта коры.

Между изолиниями 7 и 6,5 км/с пластовая скорость считалась равной 6,7 км/с. Значение V_p на поверхности фундамента [1, 7, 9, 14 и др.] принято

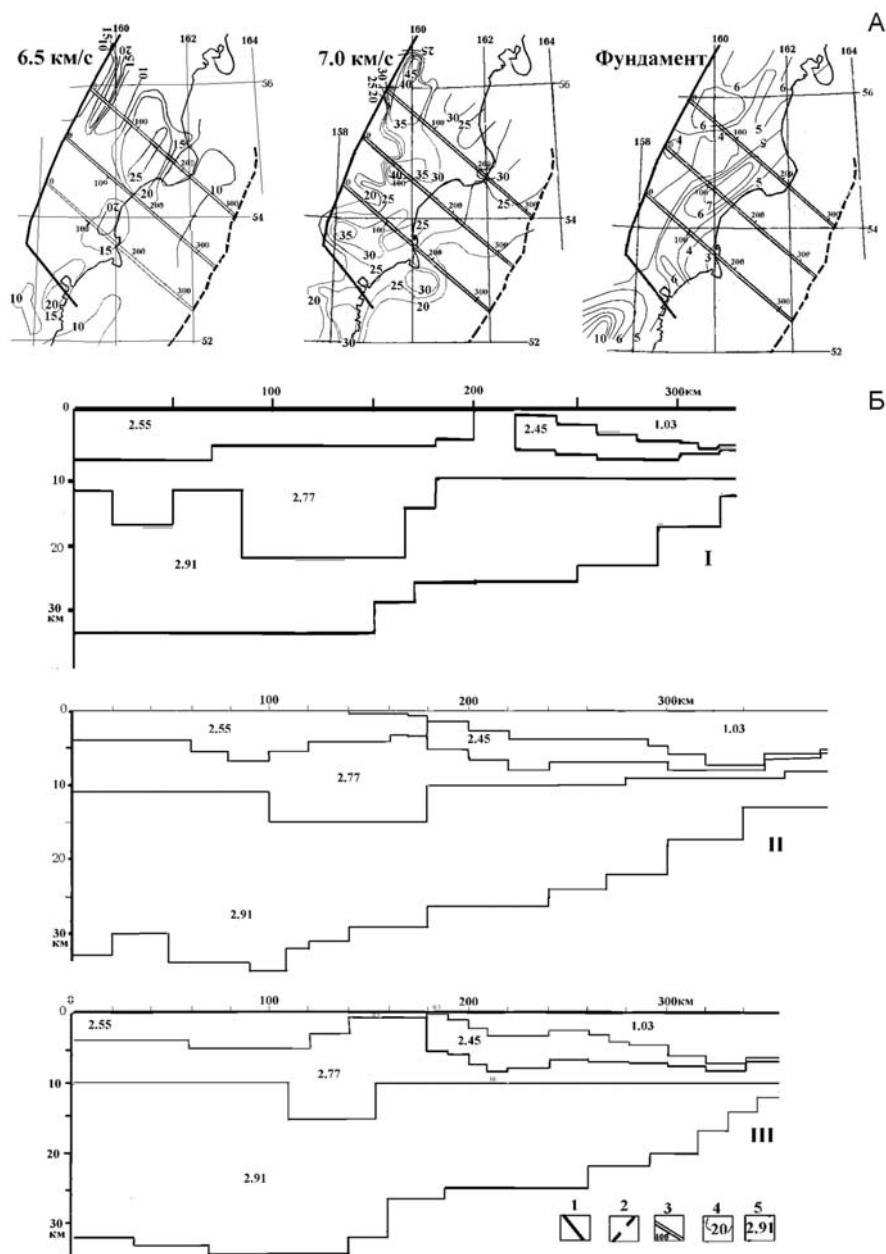


Рис. 3. А – глубины (в км) скоростных уровней 6,5, 7 км/с и фундамента. Б – плотностные разрезы коры вдоль профилей I–III. 1 – граница геосинклинали Восточной Камчатки, 2 – ось желоба, 3– профили моделирования. 4 – изоденсы, 5 – плотности слоев коры (в г/см³)

равным $6,0 \pm 0,5$ км/с, между ним и изолинией 6,5 км/с скорость считалась средней. Таким образом, использованный скоростной разрез очень схематизирован, но при имеющемся фактическом материале нельзя строить более подробный: детали будут недостоверны.

Широкое распространение в коре Камчатки основных и ультраосновных пород заставляет использовать наряду с обычными и формулы пересчета V_p в σ , применяемые для слоя коро-мантийной смеси (КМ): $\sigma = 2,69 +$

+ $0,26(V_p - 6)$ и $\sigma = 3,02 + 0,28(V_p - 7)$ [4]. Конечно, в большей мере это относится к нижнему слою консолидированной коры: без влияния высокой температуры значения скорости здесь отвечали бы слою КМ. Небольшие поправки ($0,005-0,01$ г/см³) учитывали аномальный прогрев коры [6]. Дополнительная коррекция возможна: 1) если будут независимо установлены зоны частичного плавления в коре и определено содержание магмы в них, 2) при определении аномальной намагниченности и размеров источников региональных магнитных аномалий [6]. Скорее всего, влияние этих поправок на региональное распределение расчетного Δg будет не очень большим.

Мощность и плотность ($2,55$ г/см³) осадочно-вулканогенного чехла на суше принята по [11, 14] (см. рис. 3). Она не противоречит немногочисленным и достаточно разнообразным данным о скорости сейсмических волн в чехле ($2,4-4,6$ км/с [9, 14 и др.]).

Мощность осадков под дном моря принята уменьшающейся от берега к желобу от $4-5$ до $1-0,5$ км в соответствии с типичными распределениями этого параметра в других районах на южной Камчатке, на Курилах и Хоккайдо [1, 5, 7, 9, 13 и др.]. Считалось, что плотность несколько ниже установленной на суше – $2,45$ г/см³. Материала для уточнения параметра нет, а влияние его изменения на эффект коры едва ли значительно.

В целом плотностные модели коры вдоль профилей приобрели вид, представленный на рис. 3. Расчетный эффект при условии нормального распределения плотностей в верхней мантии по форме напоминает распределение наблюдаемого поля, но по уровню не имеет с ним ничего общего: он выше примерно на 200 мГл ($170-190$ мГл на суше и более 200 мГл на море). Величина мантийной аномалии в общем напоминает распространенную в альпийской геосинклинали, охваченной современной активизацией, и в молодых океанических котловинах [5 и др.]. Она указывает на очень интенсивный прогрев верхней половины верхней мантии, который (согласно АПГ) неизбежно связан с охлаждением нижней половины и полиморфными преобразованиями мантийных пород.

Тепловая и плотностная модели верхней мантии. Для верхней части мантии (примерно до 200 км) тепловая модель уже была приведена в [2], в этой работе в нее внесены незначительные изменения в связи с уточнением представления о процессе в тектоносфере Северо-Западной котловины [5]. Новый вариант тепловой модели позволяет рассчитать значения V_p пород мантии, практически неотличимые от приведенных в [2]. Главная проблема построения тепловой модели котловины на всю мощность верхней мантии – в отсутствии достоверной геологической информации о событиях последних десятков млн. лет. Дело осложняется еще и тем, что под возвышенностью Обручева процесс может быть отличным от происходящего в собственно котловине [1]. При близких температурах в верхней половине верхней мантии для разных вариантов процесса T в нижней половине могут оказаться существенно разными, вызвать изменения плотности (в том числе значительные – при достижении условий полиморфного преобразования пород), отличные от использованных при расчете. Эти соображения заставляют ограничить область расчета осью желоба. Дальше к юго-востоку достоверность результатов может резко сократиться.

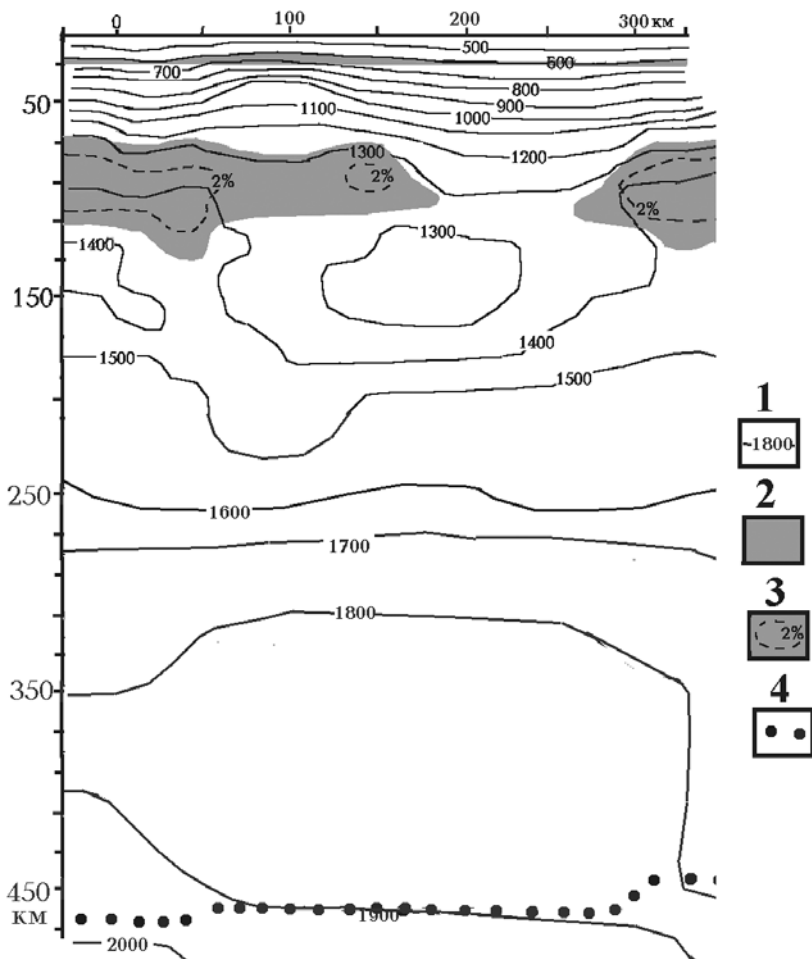


Рис. 4. Распределение T (в $^{\circ}\text{C}$) в нижней коре и мантии под профилями I–III. 1 – изотермы, 2 – зоны частичного плавления, 3 – области с содержанием расплава более 2%, 4 – глубины достижения температуры полиморфного преобразования оливин – шпинель

Расчетное распределение температуры в коре и верхней мантии под профилями показано на рис. 4.

Распределение температур использовано для расчета аномальных плотностей. На них влияют следующие факторы.

1. Изменение ρ по сравнению с нормальным распределением (T_N) под влиянием аномальной T , т.е. ее отличие от фоновой. На разных глубинах эти параметры для нормальной мантии показаны в таблице.

В точке солидуса (T_S) количество жидкости считалось равным 1%, для увеличения ее концентрации на 1% (до уровня сегрегации - предположительно в 3–5%) считался необходимым нагрев на 50°C . Появление 1% базальтовой жидкости (на глубинах, представленных в модели) уменьшало плотность на $0,0033 \text{ г/см}^3$ [5]. Эту связь нельзя распространять ниже: при составе выплавки, отвечающем составу породы, глубже 200–250 км расплав плотнее твердой мантии.

2. Высокие T привели к переходу мантийных пород в интервалах глубин примерно М–30 и 30–100 км соответственно в плагиоклазовую и спи-

Распределение нормальных температур и плотностей пород верхней мантии и изменение плотностей

| Н, км | $T_n, ^\circ\text{C}$ | $T_s, ^\circ\text{C}$ | $\sigma, \text{г/см}^3$ | $-\Delta\sigma/\Delta T, \text{г/см}^3/100^\circ\text{C}$ | Н, км | $T_n, ^\circ\text{C}$ | $T_s, ^\circ\text{C}$ | $\sigma, \text{г/см}^3$ | $-\Delta\sigma/\Delta T, \text{г/см}^3/100^\circ\text{C}$ |
|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---|
| 50 | 520 | 1200 | 3,32 | 0,016 | 300 | 1820 | 1850 | 3,47 | 0,009 |
| 100 | 940 | 1370 | 3,34 | 0,013 | 350 | 1920 | 1930 | 3,51 | 0,009 |
| 150 | 1220 | 1510 | 3,36 | 0,012 | 400 | 2000 | 1980 | 3,55 | 0,008 |
| 200 | 1460 | 1650 | 3,40 | 0,011 | 450 | 2060 | 2020 | 3,57 | 0,008 |

нелевую фации. Это понизило их плотности на 0,125 и 0,08 г/см³. [5]. Представление о сохранении под тонкой океанической корой реликтов переработанной континентальной (до 33 км) в Северо-Западной котловине [1] приводит к тем же плотностям.

3. При охлаждении низов верхней мантии опустившимся туда менее глубинным веществом создаются условия для перехода через температуру, при которой оливин преобразуется в минерал со структурой шпинели, что ведет к уплотнению породы примерно на 0,21 г/см³ [5]. При нормальном распределении T преобразование происходит на глубине около 470 км.

Аномальные и полные величины плотностей пород верхней мантии региона представлены на рис. 5 и 6.

Погрешность расчета эффекта аномальных плотностей мантии точно определить не удастся. Реальные погрешности расчета T [5] позволяют оценить ошибки установления границ зон полиморфных преобразований в первые километры. С ними могут быть в каждом случае связаны погрешности расчета поля 10–15 мГл.

Учитывая все перечисленные выше ошибки расчетного и наблюдаемого полей как $(\Sigma(\Delta g)^2)^{0,5}$, получим оценку обусловленного ими расхождение сравниваемых величин Δg около 40 мГл.

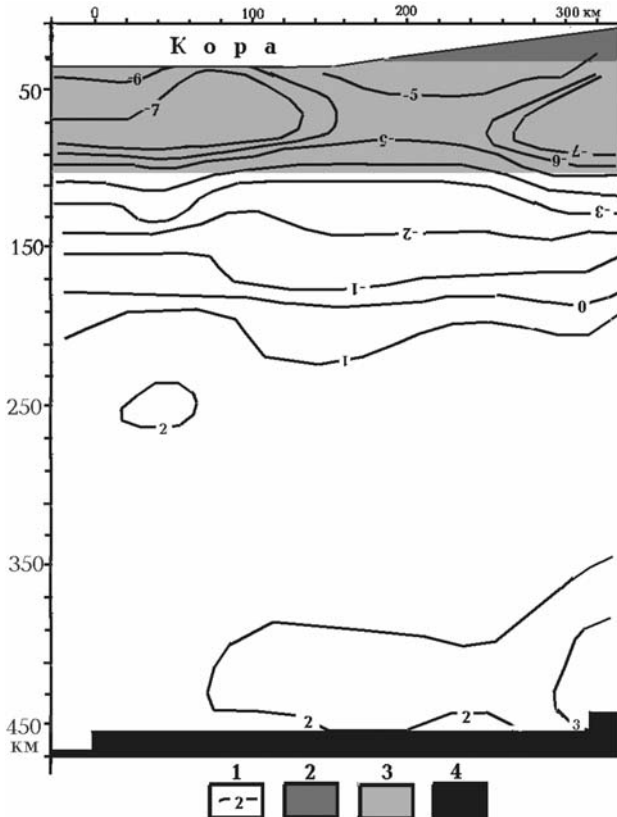


Рис. 5. Аномальные плотности в верхней мантии под профилями. 1 – изолинии аномальных плотностей (в 0,01 г/см³), связанных с аномальными температурами и частичным плавлением, 2 – зона плагиоклазового лерцолита, 3 – зона шпинелевого лерцолита, 4 – зона (выше 470 км) аномального уплотнения в связи с полиморфным переходом на подошве верхней мантии

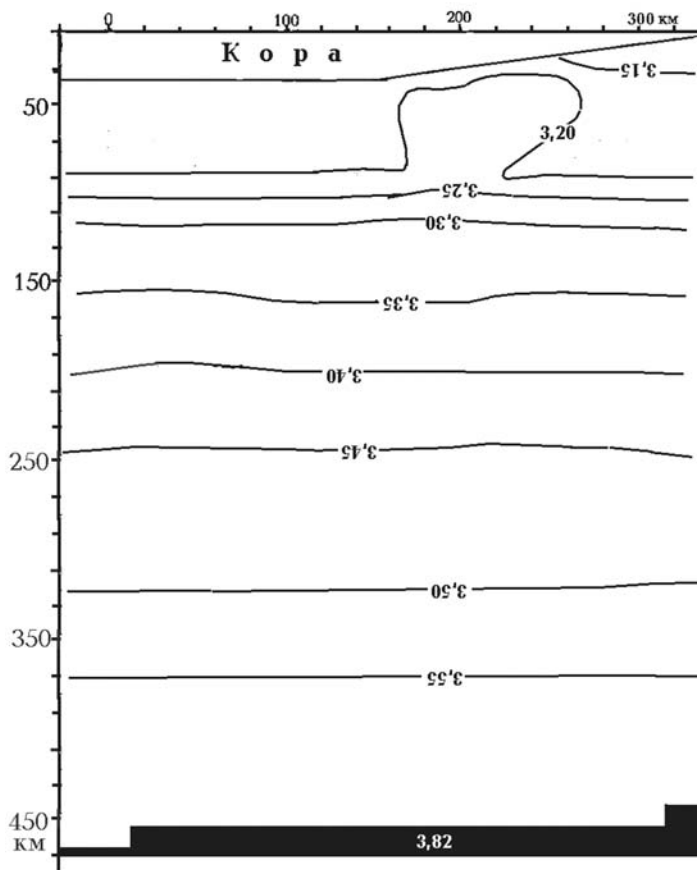


Рис. 6. Распределение плотности пород верхней мантии под профилями в г/см^3

Сравнение расчетного и наблюдаемого полей. Расчетный гравитационный эффект аномальных плотностей в верхней мантии под профилями позволяет примерно уравнивать расчетное и наблюдаемое поля (рис. 7). Значительные расхождения обнаруживаются преимущественно в морских частях профилей, где ошибки обеих сравниваемых величин могут возрастать. При уточнении используемой априорной информации не исключено приближение расчетного поля к наблюдаемому. В целом достигнутое согласование полей, учитывая неточность – а иногда и гипотетичность – привлеченных данных и колоссальные перепады значений гравитационного поля на профилях, можно признать удовлетворительным.

Максимальные расхождения расчетного и наблюдаемого полей достигают в некоторых пунктах 80–100 мГл, что очень много, но не противоречит сделанной выше оценке. Максимальные расхождения приходятся на желоб и район восточнее него. Полностью результаты сравнения полей представлены на рис. 8. Из них ясно, что среднее различие полей на всех трех профилях не превышает прогнозного и составляет 30–40 мГл. Гистограмма распределения расхождений более или менее симметрична и демонстрирует его относительную близость к нормальному распределению.

Проведенные расчеты гравитационных эффектов коры и верхней мантии были дополнены аналогичными вычислениями вдоль еще двух профи-

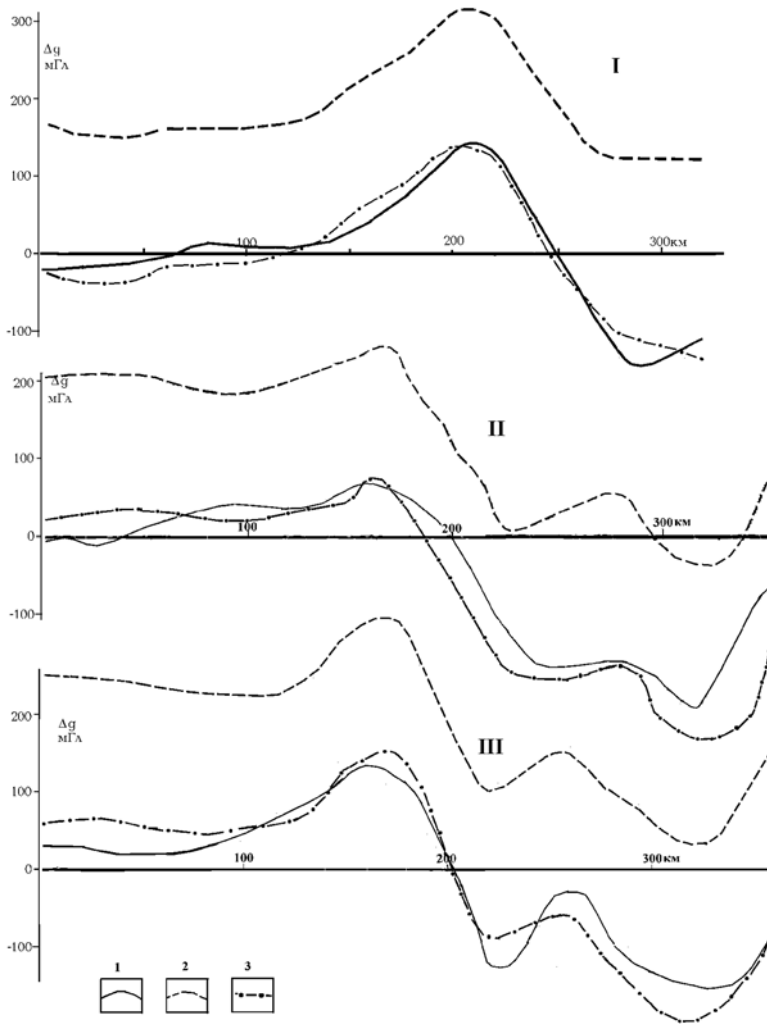


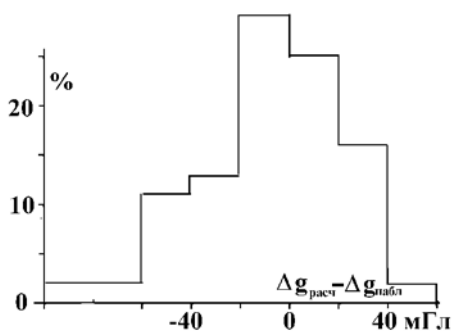
Рис. 7. Сравнение расчетного и наблюдаемого гравитационных полей вдоль профилей. 1–3 – гравитационное поле: 1 – наблюдаемое, 2,3 – расчетное (2 – эффект коры и нормальной мантии, 3 – с учетом аномальности плотности мантии)

лей, расположенных точно посередине между профилями I и II и профилями II и III. Считалось, что плотностные разрезы земной коры на этих дополнительных профилях средние между разрезами основных профилей. Результаты вычислений сопоставлены с наблюдаемым гравитационным полем вдоль дополнительных профилей, что иллюстрирует рис. 9.

Таким образом, поставленная задача решена: отвечающую адвекционно-полиморфной гипотезе плотностную модель тектоносферы региона со сложной геологической историей удалось согласовать без подбора с гравитационным полем, обнаруженные расхождения наблюдаемого и расчетного полей не превышают обусловленных погрешностями.

Выводы. Поставленная перед работой задача решена. Следует только отметить, что использованная методика гравитационного моделирования, ориентированная на изучение глубинных процессов в тектоносфере, выдвигает довольно жесткие требования к используемым геолого-геофизическим

Рис. 8. Гистограмма распределения расхождения наблюдаемого и расчетного полей на профилях I–III



ким данным. Как правило, при ее применении привлекаются детальные скоростные разрезы вдоль профилей ГСЗ, информация об осадочном слое по материалам бурения, подробная геологическая история региона, позволяющая надежно диагностировать тип эндогенного режима, пространственные и временные рамки его проявления. В данном случае по крайней мере часть этих предпосылок построения достаточно точной модели отсутствует. Поэтому достигнутое согласование расчетного и наблюдаемого полей, подтверждающее использованную гипотезу глубинного процес-

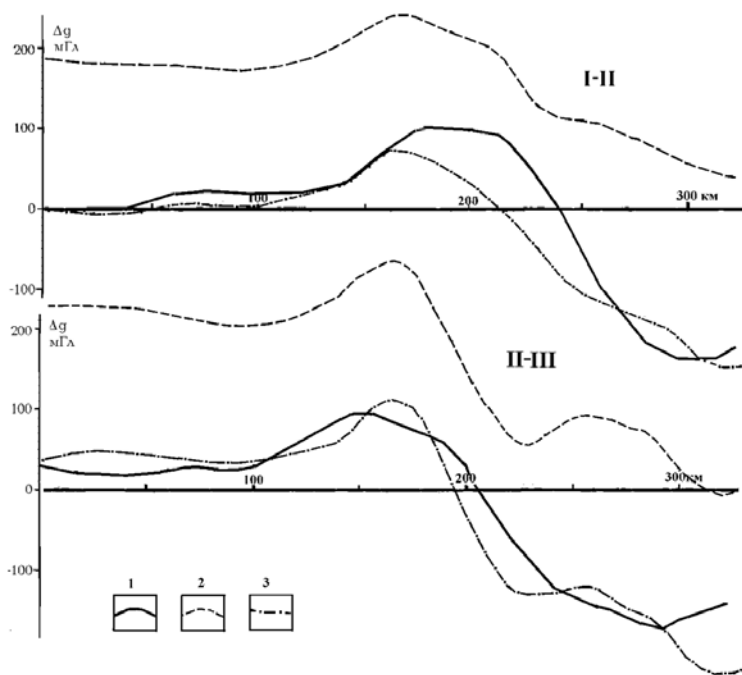


Рис. 9. Сравнение расчетного и наблюдаемого гравитационного полей вдоль линий между профилями I-II и II-III. Условные обозначения см. на рис. 7

са, следует расценивать как предварительный результат, который может быть пересмотрен с появлением новых данных.

1. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. IV. Структура и вещественный состав осадочного чехла северо-запада Тихого океана // Под ред. К.Ф. Сергеева. – Южно-Сахалинск: ИМГТ ДВО РАН. – 1997. – 178 с.
2. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2006. – 2. С.107-121.

3. Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А. и др. Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. – 2003. – 4. – С. 56–64.
4. Гордиенко В.В. Плотностные модели тектоносферы территории Украины. – К.: Интеллект. – 1999. – 101с.
5. Гордиенко В.В. Адвекционно-полиморфная гипотеза глубинных процессов в тектоносфере. – Киев: Корвін пресс. – 2007. – 170с.
6. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Загородняя О.В. и др. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). – К.: Корвін пресс. – 2005. – 210с.
7. Ермаков В.А. Особенности развития активной континентальной окраины (на примере Курило-Камчатского региона) // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. – М.: ИФЗ РАН. – 2002. – С.158-188.
8. Кабан М.К. Плотностные неоднородности литосферы и напряженное состояние литосферы // Новейшая тектоника. Геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. – М.: Наука. – 2000. – С. 267–290.
9. Материалы мирового центра данных. Б. Глубинное сейсмическое зондирование. Данные по Тихому океану. // Отв. редакторы И.П. Косминская. А.Г. Родников, Г.И. Семенова. – М.: МЦД. – 1987. – 104с.
10. Низкоус И.В., Кисслинг Э., Санина И.А. и др. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. – 2006. – 4. - С. 18–29.
11. Отчет “Глубинные геолого-геофизические исследования сейсморазведочными (МОВЗ) и электроразведочными (МТЗ, ГМТЗ, АМТЗ) методами на региональных профилях Ейск – Ставрополь – Нефтекумск – Каспийское море (850 пог. км) и Корф – Верхнее Пенжино (500 пог. км). Анализ и обобщение данных глубинных геофизических исследований, проведенных на Северном Кавказе, Камчатке и юге Сибири”. 2006 г. Гос. рег. №1 – 03 – 149/4.
12. Семенова Г.И. Структура земной коры Тихого океана // Сравнительная тектоника континентов и океанов. – М.: МГК АН СССР. – 1987. – С.85–94.
13. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря // Под ред. К.Ф. Сергеева. – М.: Наука. – 2006. – 132с.
14. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии // Под ред. К.Ф. Сергеева, В.В. Гордиенко, М.Л. Красного. – Владивосток. – 1992. – 238с.

Розглянуто результати побудови густинних моделей тектоносфери вздовж трьох профілів на Східній Камчатці та на сусідній акваторії. Для моделі верхньої мантії використано теплову модель, яка відповідає схемі глибинного процесу за адвекційно-поліморфною гіпотезою. Показано можливість пояснення спостереженого гравітаційного поля без підбору параметрів моделей.

The results of construction of density models of tectonosphere along three cross-sections on East Kamchatka and adjacent aquatorium are considered. For the model of the upper mantle a thermal model corresponding to the structure of a deep process according to the advection-polymorphous hypothesis is used. Possibility of explanation of the observed gravitational field without the selection of model parameters is shown.