

## АНОМАЛИИ “СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАНТИИ” ОХОТОМОРСКОГО РЕГИОНА И ИХ СВЯЗЬ С ГЛУБИННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

*В.Н. Сеначин*

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

В глубоководных впадинах окраинных морей Востока Азии рядом исследователей по разным признакам (Watanabe et al., 1977; Yoshii, 1973 и др.) было выявлено наличие крупного, изостатически скомпенсированного уплотнения в верхней мантии. Для определения происхождения данного уплотнения был проведен расчет аномалий глубины «свободной поверхности мантии» в Охотоморском регионе и их анализ. Результаты исследования показали, что Охотоморский регион характеризуется общим увеличением глубины “свободной поверхности мантии” с амплитудой около 0,5 км, на фоне которого наблюдаются региональные аномалии увеличенной и уменьшенной глубины, связанные с выраженными в рельефе дна структурами. Эти аномалии, видимо, образуются в процессе деструкции земной коры, приводящей к уменьшению её мощности. Они могут быть вызваны латеральными температурными аномалиями в литосфере, образующимися под впадинами в результате кондуктивного прогрева, подъема флюидов и магматизма в кору. Повсеместное углубление свободной поверхности мантии указывает на наличие крупного верхнемантийного уплотнения, распространяющегося, возможно, за пределы Охотского моря в прилегающие части континента и океана. Это уплотнение почти полностью изостатически скомпенсировано, что говорит о том, что в активных окраинах выполняется механизм глубинной изостатической компенсации, в которой уровень компенсации расположен, предположительно, в нижней мантии.

**Ключевые слова:** изостазия, “свободная поверхность мантии”, литосфера, верхняя мантия, Охотское море.

### ВВЕДЕНИЕ

“Свободная поверхность мантии” (далее – СПМ) – это одна из характеристик изостатического состояния земной поверхности. Она показывает, насколько поднята или опущена земная кора относительно нормального положения, соответствующего однородной мантии заданной плотности. По аномалиям СПМ можно судить о степени изостатической нескомпенсированности региона, либо о наличии плотностных неоднородностей в мантии.

Наиболее полное изучение СПМ в океанах и на континентах было проведено М.Е. Артемьевым и М.К. Кабаном [6,7,25,46]. Они показали, что даже в тектонически стабильных регионах глубина СПМ может значительно различаться. Это говорит о крупных латеральных изменениях плотности в верхней мантии.

Плотность верхней мантии зависит от температуры и вещественного состава. Температурный режим верхней мантии определяется, прежде всего,

возрастом литосферы. Это наглядно проявляется в глубине океанского дна: чем древнее возраст литосферы, тем она холоднее и плотнее, и тем глубже рельеф дна. В океанах глубина СПМ меняется от 2,5 км в осевых зонах срединно-океанических хребтов до 4,5 км в древних глубоководных котловинах [25]. Индикатором температурного режима верхней мантии может служить мантийный тепловой поток.

Наблюдаемый температурный режим верхней мантии неплохо объясняет модель охлаждающегося полупространства [41, 50]. Модель позволяет рассчитать глубину СПМ в изучаемых структурах, если известен возраст литосферы или мантийный тепловой поток. По разности наблюдаемой и “теоретической” глубин СПМ мы, в свою очередь, можем судить о наличии плотностных неоднородностей в верхней мантии, не связанных с процессом её охлаждения.

Такая неоднородность отмечается в глубоководных котловинах окраинных морей Азиатско-Тихоокеанской окраины. Она проявляется в аномалиях

глубины СПМ [49, 50], в аномалиях глубины дна [45], и в аномалиях гравитационного поля [24, 51].

Т. Ватанабе с соавторами [50] провели расчет глубины СПМ в котловинах Охотского, Японского, Филиппинского и других морей Азиатской окраины. Они обнаружили, что при одинаковых величинах наблюдаемого теплового потока глубина СПМ в этих структурах всегда больше, чем в океане, не менее чем на 1 км. Д. Хэйс [45], исследовав связь глубины дна окраинных бассейнов с возрастом коры, также отмечает закономерное увеличение глубины дна на 0,6–1 км в сравнении с океаном. Т. Йосии [24, 51] использовал другой подход в изучении мантийных неоднородностей. Он провел вычисление так называемых “остаточных мантийных гравитационных аномалий” (RGA) и исследования их зависимости от возраста дна и величины теплового потока, которые привели к выводу, что они повышены в бассейнах окраинных морей на 80–100 мГал, что соответствует углублению СПМ на 0,6–0,7 км.

В настоящее время нет обоснованного объяснения существования данного уплотнения, его природы и глубинного расположения. Оно может быть связано с предполагаемым в окраинных морях процессом преобразования континентальной коры, или с внедрением в литосферу мантийных диапиров, или с более глубинными аномалиями плотности, порождаемыми субдукцией.

Для решения данной проблемы автор провел расчеты площадного распределения аномалий СПМ в Охотоморском регионе, включающем глубоководные и мелководные окраинные бассейны, прилегающую часть Азиатского континента, континентальную и островную вулканическую дугу, глубоководный желоб.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Глубина СПМ рассчитывается следующим образом:

$$D = H_m - \frac{1}{\rho_m} \sum_{i=1}^k \rho_i \cdot M_i, \quad (1)$$

где  $D$  – глубина СПМ,  $H_m$  – глубина границы Мохо;  $\rho_m$  – плотность мантии;  $\rho_i$ ,  $M_i$  – соответственно плотность и мощность  $i$ -го слоя земной коры в расчетной точке;  $k$  – количество слоёв земной коры, которое в нашей модели равно 4 (водный, осадочный, “гранитный”, “базальтовый”).

Аномальная глубина СПМ находится как разность реальной глубины СПМ (1) и нормальной глубины СПМ  $D_q$ , определяемой по мантийному тепловому потоку  $Q_m$ :

$$D_a(Q_m) = D - D_q(Q_m). \quad (2)$$

Для расчета  $D_q(Q_m)$  использовалось выражение, полученное на модели охлаждающегося полупространства [50]:

$$D_q(Q) = D_0 + \frac{2\alpha T_a^2 k}{\pi} \cdot \frac{1}{Q_m}, \quad (3)$$

где  $D_0$  – уровень поверхности мантии в начальный момент образования литосферы;  $\alpha$  – коэффициент термального расширения,  $T_a$  – температура астеносферы,  $k$  – теплопроводность,  $Q$  – мантийный тепловой поток. По оценке М.К. Кабана параметр  $D_0$  можно принять равным 2,5 км [25]. Зададим остальные параметры аналогично принятым в работе [48]:  $\alpha=3,28 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $T_a=1350^\circ\text{C}$ ,  $k=3,138 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$  и получим выражение:

$$D_q(Q) = 2,5 + \frac{119,42}{Q_m}, \quad (4)$$

которое использовалось в наших расчетах.

При определении мантийного теплового потока по наблюдаемым поверхностным значениям необходимо учесть радиоактивные источники тепла в коре и потерю тепла, уходящую на прогрев накапливающегося осадочного слоя.

Расчет теплогенерации коры проводился с использованием следующей формулы:

$$Q_{me} = \sum_{i=1,3} A_i M_i, \quad (5)$$

где  $A_i$ ,  $M_i$  – соответственно удельная теплогенерация и мощность  $i$ -го слоя коры. Параметры удельной теплогенерации, используемые в нашей модели, были выбраны на основе данных [14]: осадочный слой –  $1,2 \times 10^{-3} \text{ мВт/м}^3$ , “гранитный” слой –  $0,4 \times 10^{-3} \text{ мВт/м}^3$ , “базальтовый” слой –  $0,2 \times 10^{-3} \text{ мВт/м}^3$ .

Накопление осадочного слоя на поверхности твердой Земли приводит к поглощению тепла. Так, по оценке Н.А.В олковой [16], тепловой поток во впадинах Дерюгина и ТИНРО занижается на 17%, а в Южно-Охотской впадине – до 27%. Сходные оценки даются в работе О.В. Веселова с соавторами [15].

Как показал А.Я. Гольмшток [18], степень уменьшения теплового потока на поверхности при постоянной скорости осадконакопления зависит от безразмерных параметров  $P = vt/2\sqrt{a_2 t}$ , и  $S = (\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{a_1/a_2}$ , где  $v$  – скорость осадконакопления,  $\lambda_1$ ,  $a_1$  и  $\lambda_2$ ,  $a_2$  – соответственно теплопроводность и температуропроводность фундамента и осадочного слоя. Получить точные значения этих пара-

метров по всей акватории Охотского моря не представляется возможным.

Для определения параметра  $P$  зададим температуропроводность осадков  $a_2 = 6 \times 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с, скорость осадконакопления  $v = 0,02$  см/год, что соответствует накоплению толщи мощностью 10 км за 50 млн лет, т.е. с эоцена, и согласуется с минимальными оценками этого параметра в Охотском море, приведенными в работах [15, 16]. При постоянной скорости осадконакопления возраст осадочной толщи можно определить по её мощности, считая, что осадконакопление продолжается в настоящее время. В результате таких допущений получим зависимость  $P$  от мощности осадков ( $H$ ):  $P = 0,0514\sqrt{H}$ , где  $H$  задается в километрах.

Теплопроводность осадков  $\lambda_2$  была принята равной 1,5 Вт/(м·К) на основании данных в работе [17]. Для нижележащего слоя можно использовать значение, приведенное в справочнике [43, с.202–203] для “гранитно-метаморфического слоя в геосинклинальном периоде” ( $\lambda_1 = 1,5$  Вт/(м·К)). Температуропроводность осадочных и магматических пород изменяется в широких пределах [43]. Определить точные значения этих параметров в нашем регионе не представляется возможным. По-видимому, температуропроводность фундамента должна быть не меньше, чем в осадках. Вместе с тем, уменьшение параметра  $S$  приводит к значительному увеличению поправки. В наших расчетах было принято значение  $S = 1$ , которое даёт наилучшее совпадение с оценками искажения теплового потока Н.А. Волковой [16] в котловинах Охотского моря.

На основе выбранных значений параметров  $P$ ,  $S$  и заданной мощности осадков в каждой точке расчетной сети можно определить степень уменьшения поверхностного теплового потока по приведенной в работе [18] диаграмме и пересчитать его в глубинный тепловой поток.

Процедура расчета аномальной глубины СПМ сводилась к следующему. Прежде всего, по формуле (1) рассчитывалась реальная глубина СПМ в каждой точке региона. Далее в наблюдаемый тепловой поток вводилась поправка за влияние осадочного слоя и вычитался вклад, создаваемый радиогенным теплом земной коры. После этого на основе полученной мантийной составляющей теплового потока  $Q_m$  вычислялась теоретическая глубина СПМ, соответствующая  $Q_m$  (4), а затем получали аномальную глубину СПМ как разность реальной и теоретической (2).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета глубины СПМ Охотоморского региона была построена численная модель земной коры на участке от 135° в.д. до 163° в.д. и от 43° с.ш. до 63° с.ш. (рис. 1). На данном участке была произведена оцифровка карт батиметрии, мощности осадочного чехла, мощности “гранитного” слоя земной коры и положения границы Мохо с шагом 0,2° по долготе и широте. При оцифровке использовались карты, подготовленные коллективом сотрудников ИМГиГ ДВО РАН по проекту тектонического районирования Охотского моря [1, 40] – карты батиметрии, мощности осадочного чехла, теплового потока, аномалий гравитационного поля на акватории Охотского моря и прилегающей части Тихого океана. Положение границ Конрада и Мохо определялось по схемам, рассчитанным В.А. Бабошиной с соавторами [9] по данным ГСЗ.

При расчете глубины СПМ очень важен правильный выбор плотности в слоях земной коры. Определение плотности по известным зависимостям плотности от скорости сейсмических волн не даёт достаточной точности, в связи с чем М.К. Кабан [25] предлагает проводить осреднение плотности как по глубине, так и по площади. В нашей работе был принят другой подход.

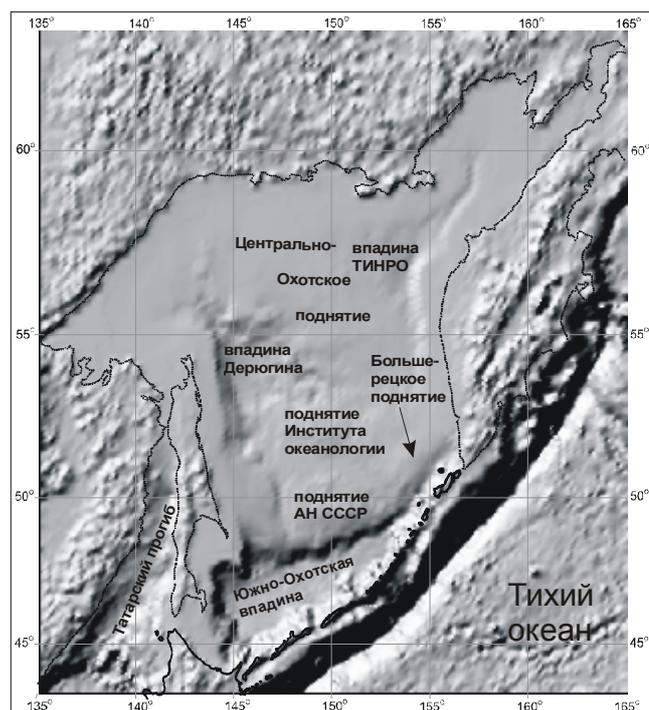


Рис. 1. Топографическая схема района исследований: Охотское море и прилегающие области Азиатского материка и Тихого океана.

Плотность в слоях земной коры (кроме осадочного) задаётся постоянной на всем протяжении исследуемого региона и соответствует плотности континентальной коры параметрической модели Земли РЕМ-С [47]. Это позволяет избежать ошибок при изменениях скорости, не связанных с плотностными аномалиями, но приводит к неучёту региональных вариаций плотности, которые, несомненно, имеют место. Вследствие этого, рассчитанные нами аномальные глубины СПМ указывают на наличие плотностных неоднородностей не только в мантии, но и в коре, что мы будем учитывать при интерпретации.

Таким образом, в построенной нами модели коры принято следующее плотностное распределение. Водный слой имеет плотность  $1,03 \text{ г/см}^3$ , “гранитный” –  $2,72 \text{ г/см}^3$ , “базальтовый” –  $2,92 \text{ г/см}^3$ , мантия –  $3,3 \text{ г/см}^3$ . Плотность осадочного слоя задавалась меняющейся в зависимости от мощности слоя, для чего была использована эмпирически установленная зависимость увеличения плотности осадков с глубиной в пробуренных скважинах на севере о. Сахалин [29]:  $\rho_{oc}(h) = 2,67 - 0,58e^{-0,3h}$ , где  $h$  – глубина от поверхности слоя (км),  $\rho_{oc}$  – плотность слоя.

#### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Наибольшую погрешность в расчет СПМ вносит ошибка определения параметров земной коры, которая находится в прямой зависимости от её мощности. При ошибке определения плотности в коре  $0,05 \text{ г/см}^3$  погрешность определения СПМ составляет  $0,015 t$ , где  $t$  – мощность коры. Из всех границ земной коры наибольшую ошибку вносит граница Мохо. По оценке В.В. Гордиенко и О.В. Усенко [19], погрешность её определения в континентальной коре при интерполяции данных сейсмических разрезов составляет не менее 5 км. Используемая нами схема положения границы Мохо по оценке авторов [9] имеет погрешность около 5 км в северной части (в субконтинентальной коре) и около 3 км в центральной и южной частях, где мощность коры уменьшается до субокеанической.

Допустим, положение границы Мохо определяется с погрешностью 15% от её мощности, что в определении СПМ для нашей модели приводит к ошибке  $0,076 t$ . В результате получим, что ошибка определения СПМ, обусловленная неточным заданием плотности в коре и глубины её подошвы в коре мощностью 30 км, составит около 0,5 км, а в коре мощностью 5 км – меньше 0,1 км.

В оценке влияния осадков на тепловой поток использовалось минимальное значение скорости

осадконакопления, что даёт минимальное значение параметра  $P$  (см. предыдущий раздел), при котором мантийный тепловой поток получается заниженным. Это приводит к увеличению теоретической глубины СПМ и, следовательно, к завышению уровня аномальной СПМ. Больше всего это завышение сказывается в глубоководных котловинах, где мощность осадочного слоя достигает наибольших значений. Величину завышения оценить трудно. Однако при изучении положительных аномалий СПМ, обнаруженных в окраинных морях, такая оценка представляется допустимой. Она позволяет, по крайней мере, выявить сам факт существования положительных аномалий.

Проведённая оценка показывает, что погрешность расчета СПМ довольно велика. В континентальных и субконтинентальных областях она сравнима с амплитудой ожидаемых региональных аномалий. Поэтому мы не можем проводить их детальный анализ. Можно лишь попытаться определить общие закономерности распределения аномалий СПМ в целом по региону и выделить общие черты в строении поднятий и впадин Охотоморского региона.

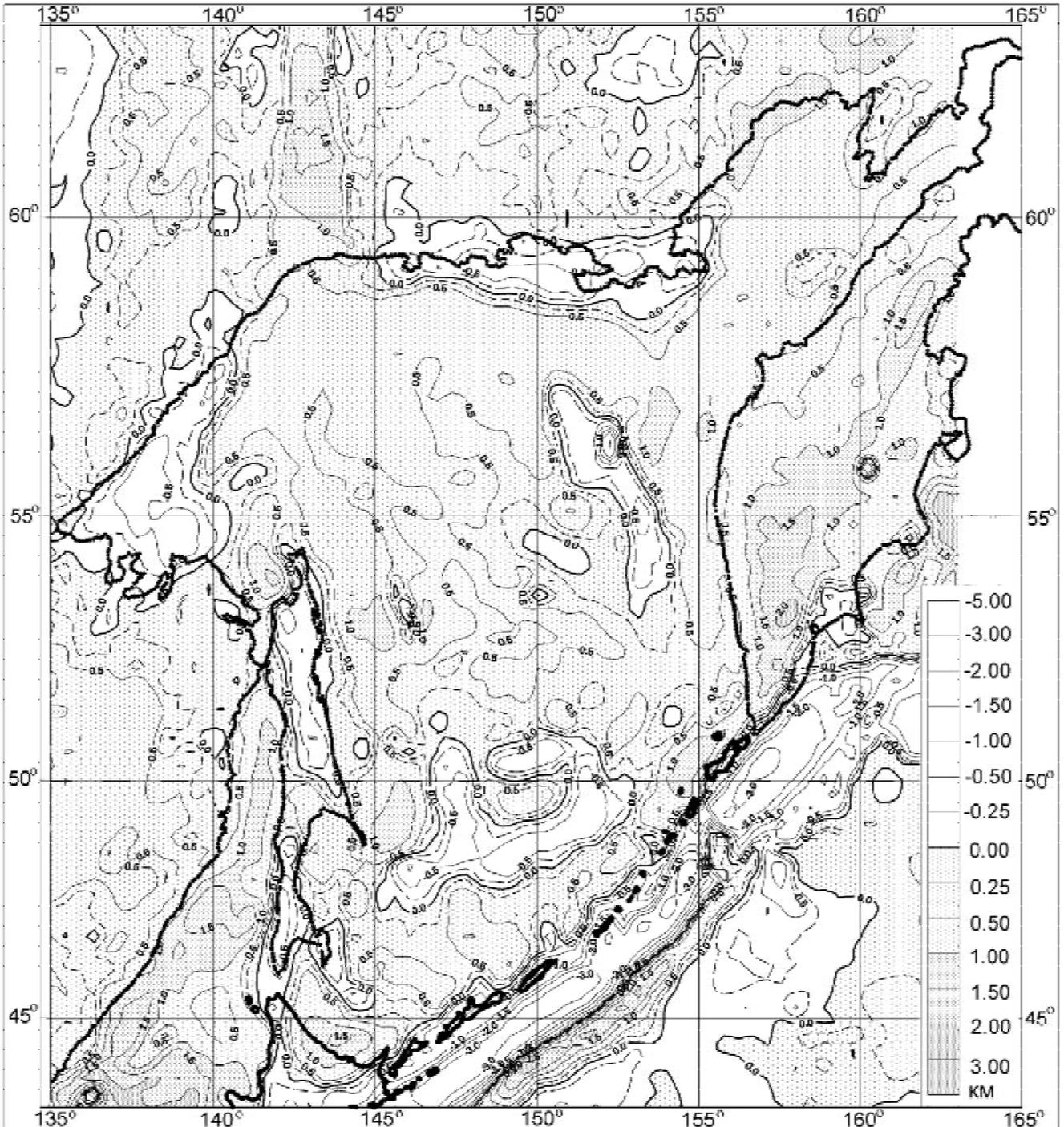
#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение аномальной глубины СПМ в Охотоморском регионе показано на рис. 2. Отрицательные значения на этой схеме соответствуют подъёму уровня СПМ, положительные – углублению.

Наиболее интенсивные аномалии СПМ наблюдаются в сопряженной системе изостатически некомпенсированных структур дуга–желоб–океанический вал. Курильская дуга характеризуется аномальным подъёмом уровня СПМ до -3 км, максимум которого приходится на внешнюю сторону дуги. В глубоководном Курило-Камчатском желобе глубина СПМ увеличена на 2 км с постепенным уменьшением до 1 км к северу. Океанический вал характеризуется обширной слабоотрицательной аномалией до -0,5 км.

По всей акватории Охотского моря наблюдается общий фон аномального углубления примерно на 0,5 км. На этом фоне выделяются зоны увеличенных до +1,5 км и уменьшенных до -0,5 км глубин.

Крупные зоны аномального углубления СПМ (до 1 км и более) наблюдаются в глубоководных впадинах Дерюгина, ТИНРО, в Гольгинском прогибе (восточное продолжение Южно-Охотской впадины), в районе поднятия Полевого (восточнее п-ова Терпения, о. Сахалин). Увеличена глубина СПМ также в зоне, приуроченной к северо-восточному побережью о. Хоккайдо.



**Рис. 2.** Схема аномалий СПМ Охотоморского региона. Положительные аномалии показывают аномальное углубление, отрицательные – повышение уровня СПМ. Значения аномалий на изолиниях даны в км.

В Татарском проливе отмечается зона углубления СПМ с тенденцией увеличения к югу, где она становится более 1,5 км. Отмечается также продолжение этой аномалии на север – в Сахалинский залив.

Как видим, все зоны увеличенной глубины СПМ приурочены к депрессиям в рельефе дна, имеющим, как правило, повышенный тепловой поток. В изостатических аномалиях они выражаются по-разному. Так, впадина Дерюгина и её продолжение на

юг характеризуются пониженным полем изостатических аномалий до  $-10$  мГал. Менее выраженное понижение до  $+10$  мГал, иногда до  $0$  мГал отмечается в Татарском проливе. Зоны прогибов Голыгинского и ТИНРО, напротив, характеризуются повышенным фоном изостатических аномалий до  $+40$  мГал и более.

Зоны подъёма глубин СПМ отмечаются вдоль северного и северо-восточного побережья Охотского моря, в северо-восточной части о. Сахалин, в пограничной зоне между впадиной ТИНРО и Центрально-Охотским поднятием, вдоль северной границы Южно-Охотской впадины, захватывая поднятия Академии Наук СССР и Института океанологии. Кроме того, на юге о. Сахалин выделяются 2 зоны уменьшенных глубин СПМ: западная оконтуривает п-ов Крильонский и уходит на юг вплоть до о. Хоккайдо; восточная захватывает Тонино-Анивский п-ов и простирается от него на юго-восток к Южно-Охотской впадине.

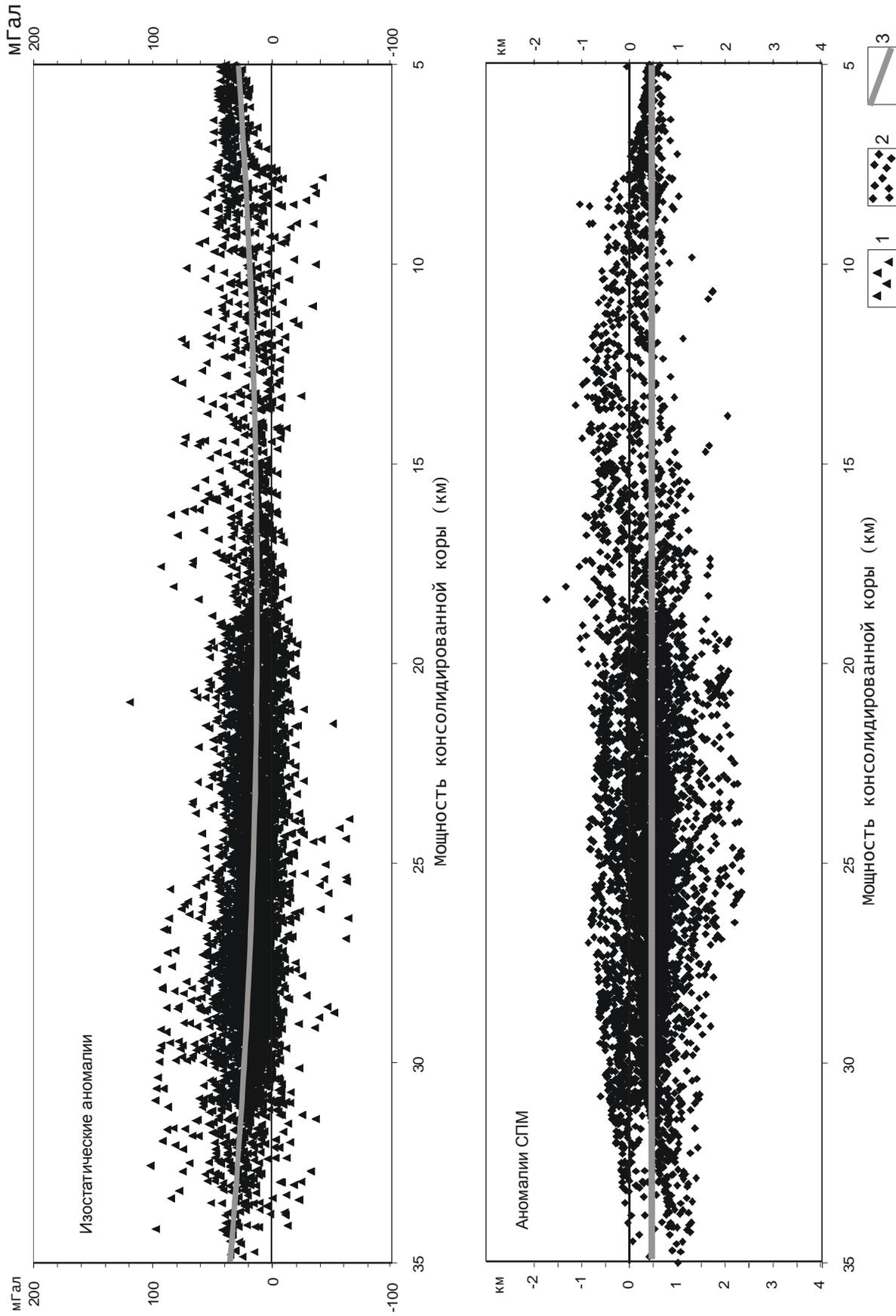
Все отрицательные аномалии СПМ расположены на континентальной или субконтинентальной коре и приурочены к зонам пониженного теплового потока. Большинство из них соседствует с глубоководными впадинами. В изостатических аномалиях они отражаются по-разному. Прибрежные зоны Азиатского материка и северо-востока о. Сахалин с отрицательными аномалиями глубины СПМ попадают в области повышенных изостатических аномалий. Зоны, расположенные близ впадин ТИНРО и Южно-Охотской, напротив, характеризуются пониженными значениями изостатических аномалий.

### **Аномалии СПМ и деструкция коры**

По мнению большинства учёных, в окраинных морях происходит процесс преобразования континентальной коры в океаническую. Механизмы этого процесса предлагаются разные – базификация коры [11]; мантиизация коры [36]; эклогитизация коры [8, 22]; десерпентинизация нижнего слоя коры [33]; магматизм и магматическое замещение [31, 32, 44], диффузный (рассеянный) спрединг [12] и другие. При этом, как отмечает В.А. Ермаков [22], одни исследователи считают, что процесс преобразования коры происходит в условиях растяжения, другие допускают только вертикальные перемещения. Наличие условий растяжения земной коры в окраинных морях подтверждается геологическими данными [12]. Современные представления о мантийной конвекции также указывают на существование условий растяжения в задуговых окраинных морях Азиатско-Тихоокеанской зоны [42].

Чтобы оценить вклад процессов преобразования коры в аномалии СПМ Охотского моря, необходимо знать, как изменялась мощность коры в этом регионе. В отношении образования Охотского моря существуют разные точки зрения. Ранее считалось, что оно является частью Азиатского континента с полноценной континентальной корой. Позднее на его западной и северной окраинах были выделены структуры, соответствующие активным в прошлом зонам субдукции – палеодугам и палеожелобам [10, 20], что позволило выделить Охотоморскую плиту как отдельную континентальную микроплиту, причлененную к Евразии в результате перемещения и субдукции древней океанической плиты Кула [26], или как океаническое вулканическое поднятие, образованное на стыке тройного сочленения плит Кула, Фараллон и Тихоокеанской [13]. В связи с этим возникает вопрос, происходило ли вообще уменьшение мощности земной коры в Охотском море? Даже глубоководные котловины Охотского моря в этом случае могут рассматриваться как отчленённые блоки древнего океана (Южно-Охотская впадина – [13]), или как бывшие глубоководные желоба (впадина Дерюгина – [34]).

На рис. 3 показаны графики зависимости изостатических аномалий и аномалий СПМ от мощности земной коры в акватории Охотского моря и Татарского пролива. Исходя из предположения о существовании процесса сокращения мощности коры, значения мощности на координатной оси абсцисс задаются с уменьшением слева направо. Представленное распределение изостатических аномалий в зависимости от мощности коры вполне согласуется с предположением о процессе преобразования континентальной коры в океаническую, в условиях растяжения. Для Охотского моря, как и для других окраинных морей Дальневосточного региона, характерен повышенный на  $20-25$  мГал уровень гравитационного поля [2, 3, 27, 38, 40]. М.Е. Артемьев объяснял это наличием уплотнения в мантии ниже уровня изостатической компенсации [4], которое может быть связано с процессом субдукции [5]. В среднем этот уровень выдерживается на концах графика – на участке с континентальной корой мощностью более  $30$  км и на участке с корой океанического типа мощностью  $5-7$  км. Эти участки соответствуют устойчивым, изостатически скомпенсированным структурам. Участок с субконтинентальной корой мощностью до  $19$  км проявляет тенденцию к понижению среднего уровня гравитационного поля с уменьшением мощности коры. Это можно объяснить нарушением изостати-



**Рис. 3.** Зависимость СПМ и изостатических аномалий от мощности консолидированной коры в Охотоморском регионе.

1 – расчетные точки изостатических аномалий (в мГал); 2 – расчетные точки аномалий СПМ (в км); 3 – линии тренда, рассчитанные по формулам полинома: для изостатических аномалий – полином 2-й степени, для аномалий СПМ – линейная зависимость (полином 1-ой степени).

ческого состояния, характерным для структур растяжения. Процесс деструкции континентальной коры продолжается до тех пор, пока мощность коры не достигнет критического значения, после которого происходит разрыв литосферы и формирование новой коры океанического типа. Как показывает график, таким критическим значением мощности для Охотского моря является мощность 19 км. Участок графика в диапазоне от 19 до 9 км характеризуется заметным разряжением точек, что говорит о том, что областей коры с такой мощностью в регионе немного. Они соответствуют граничным областям глубоководных котловин с океанической корой (в Охотском море – Южно-Охотская котловина).

Глубина СПМ (рис. 3) в диапазоне мощности от 33 до 19 км, предположительно являющейся областью, подверженной процессу деструкции коры, не проявляет тенденции к повышению или понижению, располагаясь в среднем на уровне +0,5 км. В зоне перехода от субконтинентальной к океанической коре в диапазоне мощности от 19 до 9 км наблюдается некоторое повышение уровня СПМ. И, наконец, участок графика с мощностью коры менее 9 км, соответствующий Южно-Охотской впадине, отражается в виде линейного сгущения точек, показывающих увеличение глубины СПМ с уменьшением мощности коры.

Понижение гравитационного поля на 20 мГал, отмечаемое в диапазоне мощности субконтинентальной коры (рис. 3), если оно связано с нарушением изостазии, должно отразиться в аномалиях СПМ углублением примерно на 0,15 км. Такое углубление, вероятно, происходит, но на нашем графике его трудно заметить из-за большого разброса значений. Если принять среднюю плотность коры равной  $2,85 \text{ г/см}^3$ , то отмечаемый нами эффект понижения гравитационного поля составляет 1,2% от общего веса 14-километровой толщи “потерянной” мощности коры.

Как видим, в диапазоне мощности субконтинентальной коры тенденции изменения глубины СПМ не наблюдается. Это даёт основание полагать, что уменьшение мощности коры, если оно имеет место, само по себе не приводит к уплотнению подкоровой мантии путем эклогитизации базальтов, внедрения тяжелых магматических расплавов в мантийную область литосферы или каким-либо иным способом. Вместе с тем, большой разброс значений аномалий СПМ в коре субконтинентальной мощности говорит о том, что какие-то процессы здесь всё-таки происходят.

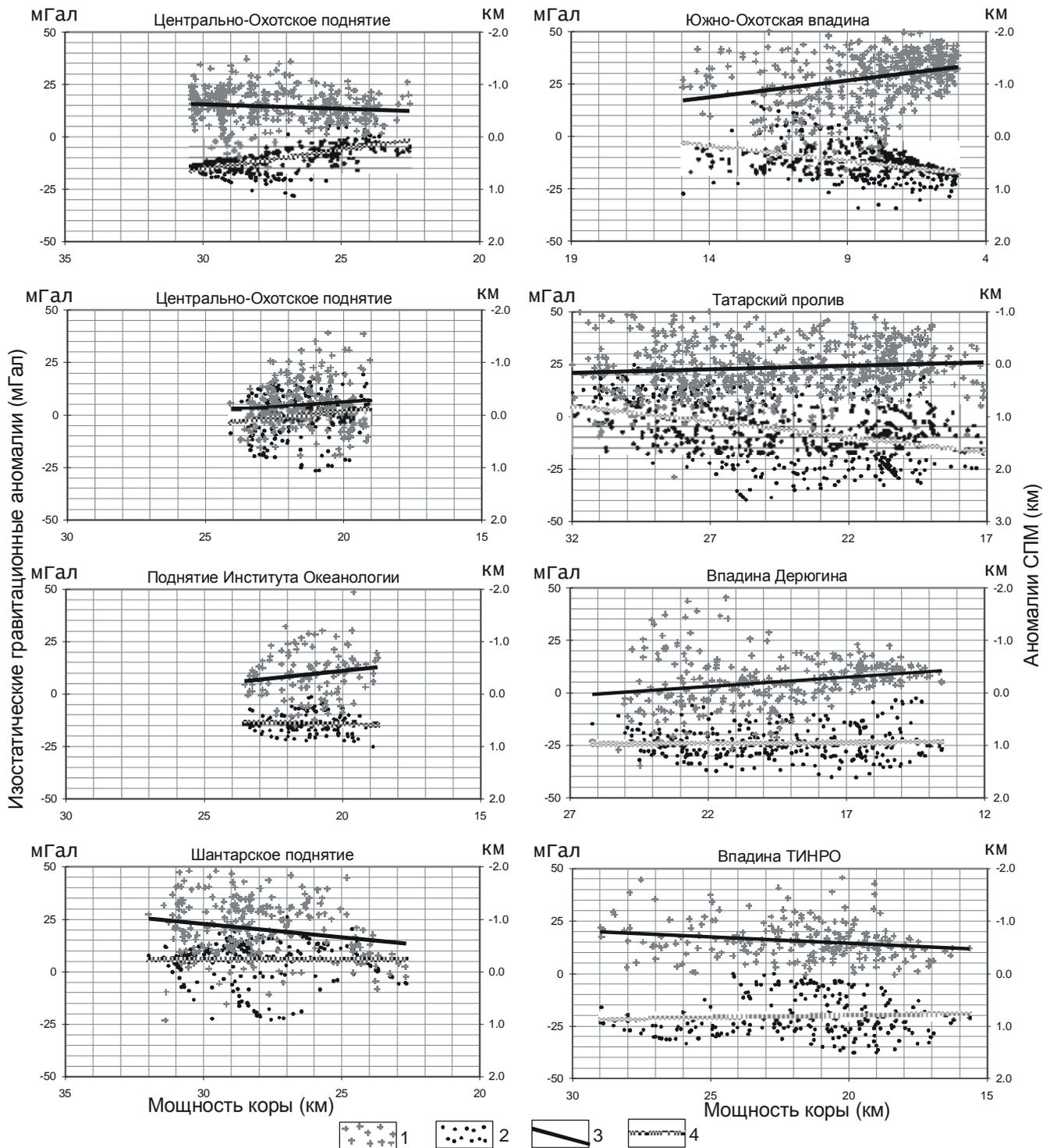
Рассматривая графики зависимости изостатических аномалий и аномалий СПМ от мощности коры отдельно по структурам (рис. 4), можно видеть,

что взаимосвязь с мощностью коры проявляется, но различно во впадинах и поднятиях. В большинстве поднятий Охотоморского региона уровень аномальной СПМ поднимается с уменьшением мощности коры при уменьшении изостатических аномалий. Во впадинах – напротив, СПМ и изостатические аномалии увеличиваются с уменьшением мощности коры. В обоих типах структур (в поднятиях и впадинах) такую картину можно объяснить наличием некоторого частично уплотнённого и частично нескомпенсированного тела в литосфере, приходящегося на центр поднятия или впадины, благодаря чему гравитационное поле над центром структуры повышено, а глубина СПМ – понижена относительно периферийной части.

Попробуем объяснить такое распределение с точки зрения предполагаемого процесса деструкции континентальной земной коры, происходящей в условиях растяжения. Прежде всего отметим, что разные поднятия, так же, как и впадины, выделяются в разных диапазонах мощности коры. Отметим также, что уровень аномальной глубины СПМ в поднятиях несколько выше, чем во впадинах. При этом уровень аномальной СПМ в центральной части поднятий ближе всего располагается к нормальному уровню в регионе +0,5 км. Учитывая, что глобальной зависимости уровня аномалий СПМ от мощности коры не наблюдается, хотя в отдельно взятых структурах она всё же есть, можно предположить, что процесс деструкции происходит поэтапно, эпизодически повторяясь то в одном, то в другом месте. Тогда поднятия и впадины можно рассматривать как структуры, подверженные этому процессу, но находящиеся на разных стадиях его развития.

Как уже отмечалось, предполагаемый в Охотоморском регионе процесс деструкции континентальной коры не приводит к уплотнению верхней мантии. Следовательно, процессы, связанные с появлением в литосфере аномалий вещественного состава, сохраняющихся после преобразования коры (путем эклогитизации или ультраосновного магматизма в мантийную часть литосферы), не действуют, если только нет каких-либо механизмов, убирающих аномально плотное вещество из литосферы. Наиболее подходящим процессом преобразования континентальной коры для рассчитанного распределения аномалий СПМ является магматическое замещение корового вещества под влиянием флюидов, поднимающихся из астеносферы [31, 32].

Процесс деструкции начинается с аномального прогрева литосферы снизу, причиной которого может являться тепловой диапир (рис. 5). Прогрев нижней



**Рис. 4.** Зависимость аномалий СПМ и изостатических аномалий от мощности консолидированной коры в областях поднятий и впадин Охотоморского региона.

1 – изостатические аномалии, 2 – аномалии СПМ, 3, 4 – линии тренда, рассчитанные для изостатических аномалий (3) и аномалий СПМ (4).

части литосферы на начальном этапе никак не сказывается на поверхностном тепловом потоке. Однако разуплотнение вещества нижней части литосферы немедленно приводит к подъёму уровня СПМ, создавая отрицательную аномалию или слабopоложительную, учитывая повсеместное углубление на 0,5 км. Ширина зоны прогрева литосферы такова, что захватывает всю зону будущей впадины и выходит на краевые части соседних поднятий. В центральной части зоны диапира начинается внедрение магмы в кору и подкоровую часть и подъем флюидов, которые приводят к прогреву всей литосферы и её утяжелению, что создаёт углубление СПМ. В этой зоне происходит магматическое замещение пород коры, уменьшается её мощность и начинается формироваться впадина. Весь процесс магматического замещения происходит, видимо, поэтапно, как показано в [37] для Цусимской котловины Японского моря. Такая поэтапность объясняет различие в диапазонах мощности консолидированной коры различных впадин: от кон-

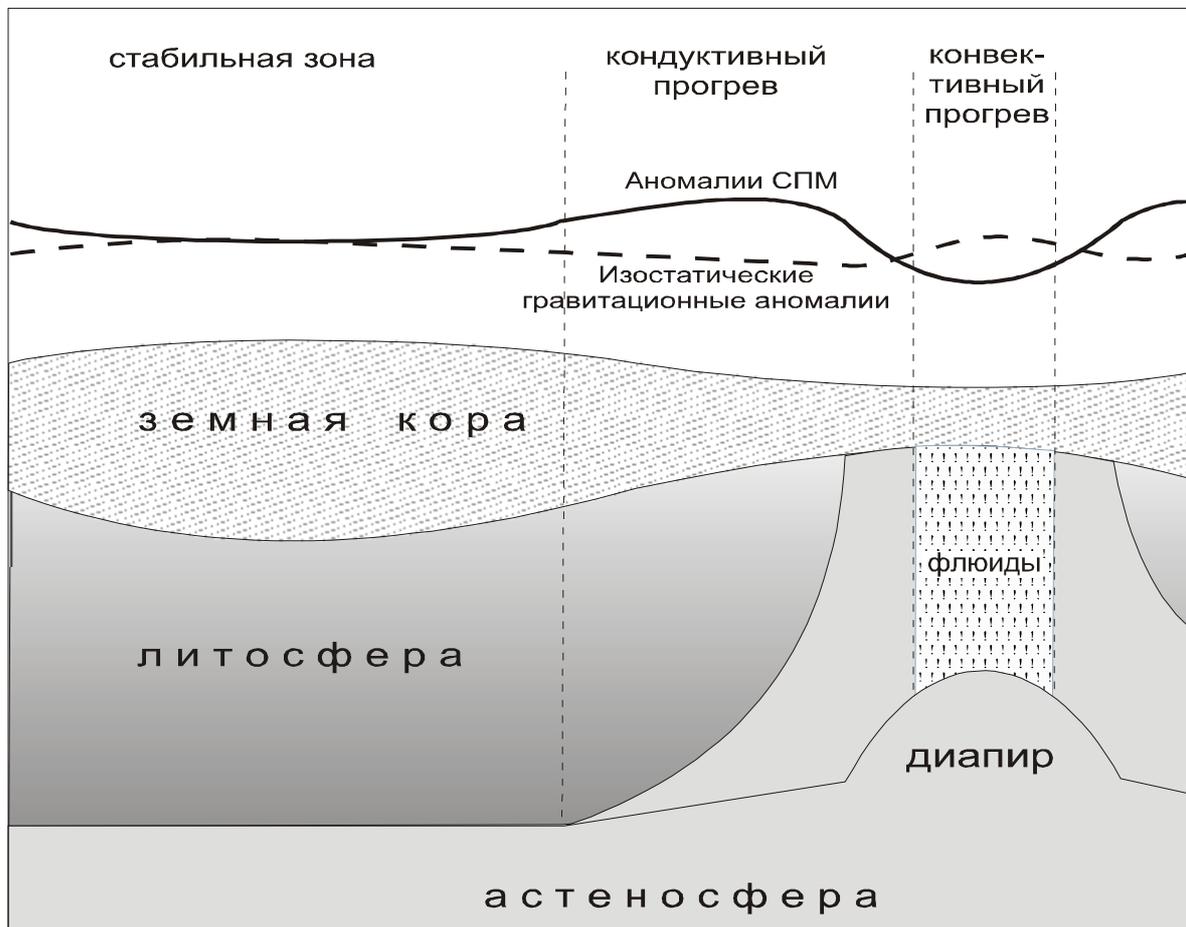
тинентальной в Татарском проливе до океанической в Южно-Охотской впадине.

Таким образом можно объяснить образование впадин с общим аномальным углублением СПМ, увеличивающимся в центральной части, и зоны поднятий с повышенным уровнем СПМ по краям и нормальным уровнем в центре.

Как отмечает П.М. Сычев [39], наиболее вероятным уровнем концентрации поднимающихся магматических расплавов является граница между корой и мантией, где наблюдается наибольший перепад плотности. Видимо, поэтому ультраосновной магматизм не оказывает существенного влияния на мантийную часть литосферы и не приводит к появлению аномалий СПМ, вызванных вещественными неоднородностями литосферы.

#### Глубинная изостазия активных окраин

Как уже отмечалось, в Охотском море наблюдается повсеместное увеличение глубины СПМ, амплитуды



**Рис. 5.** Схема кондуктивного и конвективного прогрева литосферы в поднятиях и впадинах, объясняющая различное поведение СПМ и изостатических гравитационных аномалий в этих структурах. Описание процессов дано в тексте.

литуда которого, если не везде, то, по крайней мере, в центральной его части составляет около 0,5 км. Основываясь на результатах расчетов СПМ Т. Ватанабе с соавторами [50], можно заключить, что это увеличение характерно для всех морей Азиатско-Тихоокеанской окраины. Его происхождение может быть связано с глубинными плотностными неоднородностями, возникающими в процессе конвективных течений верхней мантии, одним из проявлений которого является субдукция Тихоокеанской плиты. Данный процесс приводит к плотностным неоднородностям, распространяющимся на всю глубину верхней мантии, а по ширине охвата может выходить далеко за пределы окраинного моря. Соответственно, в СПМ он должен отражаться в виде обширной аномалии, выходящей за рамки окраинного моря на сторону континента и, возможно, на прилегающую часть океана. Должна также наблюдаться зависимость амплитуды аномалии от расстояния до оси желоба, который маркирует пространственное положение зоны конвергенции. По этим признакам попробуем определить в распределении глубины СПМ аномалию “планетарного” масштаба, вызванную конвективными течениями в мантии.

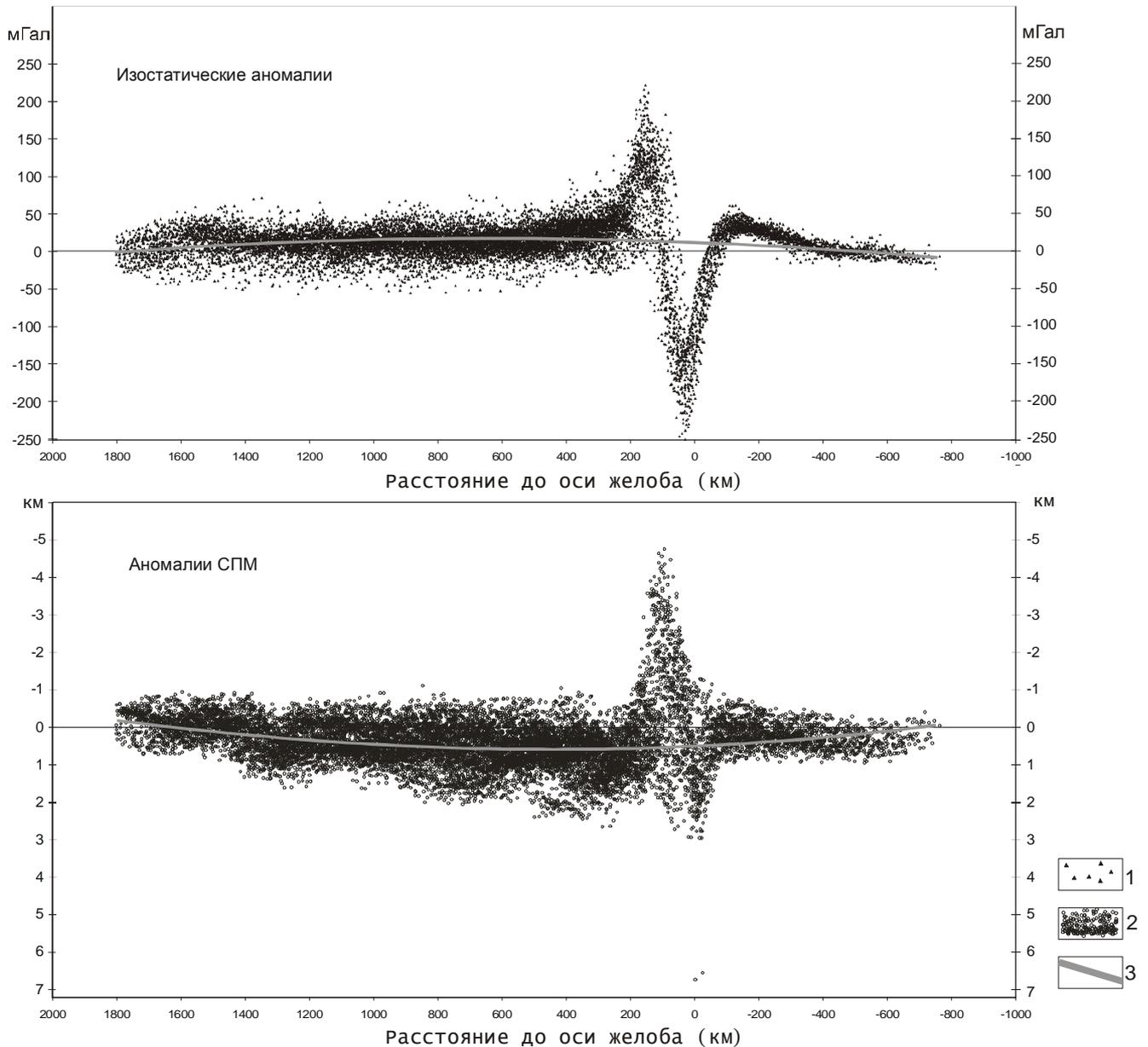
На рис. 6 показано распределение аномалий СПМ и изостатических в зависимости от расстояния до оси желоба и соответствующие им линии тренда. Как видим, линия тренда показывает “прогибание” среднего уровня аномалий СПМ с максимумом около 0,5 км на расстоянии 600–700 км от оси желоба. Изостатические аномалии, напротив, характеризуются нарастанием среднего уровня с максимумом около +20 мГал на той же отметке расстояния до желоба. При этом хорошо видно, что обе аномалии продолжают на океанической стороне от желоба.

Полученные зависимости явно указывают на влияние глубинных верхнемантийных масс на положение уровня СПМ, что говорит об их участии в процессе изостатической компенсации. Другими словами, для зон конвергенции плит, к которым относится Охотоморский регион, характерна глубинная изостатическая компенсация, осуществляющаяся, вероятно, в нижней мантии.

Учитывая явную корреляцию в поведении СПМ и изостатических аномалий на рис. 6, можно предположить, что они образуются под влиянием одного уплотнённого, частично нескомпенсированного слоя в верхней мантии. Аномалии СПМ указывают на скомпенсированную часть его массы, а изостатические аномалии – на нескомпенсированную. Это предположение позволяет нам оценить размер аномального слоя.

Предположим, аномальное увеличение плотности в слое составляет  $+0,02 \text{ г/см}^3$ , что соответствует плотности в погружающемся блоке океанической плиты по расчетам гравитационной модели тектоносферы Охотоморского региона [28]. Тогда скомпенсированная мощность, вызвавшая углубление СПМ на 0,5 км, составляет 82,5 км, а нескомпенсированная, проявившаяся в изостатической аномалии +20 мГал, составляет около 24 км, что в сумме даёт чуть более 100 км. Такой слой при ширине аномалии в 1000 км может образоваться из остатков погружившейся в мантию океанической плиты при скорости субдукции 7,5 см/год [30] менее чем за 15 млн лет. Однако субдуцирующая под углом 45 градусов плита сама по себе вряд ли может образовать уплотнение в мантии на океанической стороне. По-видимому, в конвективный процесс погружения вовлечена не только океаническая плита, но и окружающее её вещество.

Наличие уплотнения в верхней мантии активных окраин само по себе не вызывает сомнений. Но его изостатическая скомпенсированность (пусть даже неполная) требует объяснения. Классическая теория изостазии предполагает, что изостатическое выравнивание достигается в астеносфере путем горизонтального перетекания частично расплавленного вещества. Это объяснение допустимо только для вышележащих литосферных неоднородностей. Неоднородности, располагающиеся ниже астеносферы, также могут выравниваться изостатически, но уже на больших глубинах, где вязкость мантии много выше, чем в астеносфере. Таким образом, в активных окраинах, где плотностные неоднородности распространяются на всю глубину верхней мантии, мы имеем двухуровневую систему изостатического выравнивания: первый уровень располагается в астеносфере, а второй, вероятно, в нижней мантии (рис. 7). Наличие такой двухуровневой системы изостазии само по себе может создавать конвективное погружение масс в глубь Земли [35]. Проникновение погружающейся океанической плиты в глубь верхней мантии создаёт добавочную нагрузку на верхнемантийный блок, что вызовет изостатическое опускание всего блока вместе с литосферой. Это, в свою очередь, приведёт к недостатку масс на верхнем уровне изостазии. Астеносфера, естественно, должна увеличить свою мощность, чтобы скомпенсировать созданный дефицит масс на поверхности, а это вновь приведёт к избытку масс на нижнем уровне изостазии. Весь этот процесс в целом приводит к перекачке масс с поверхности в глубь Земли. Учитывая, что вязкость в астеносфере значительно ниже, чем в нижней мантии, в этом процессе следовало бы ожидать почти полной изостати-



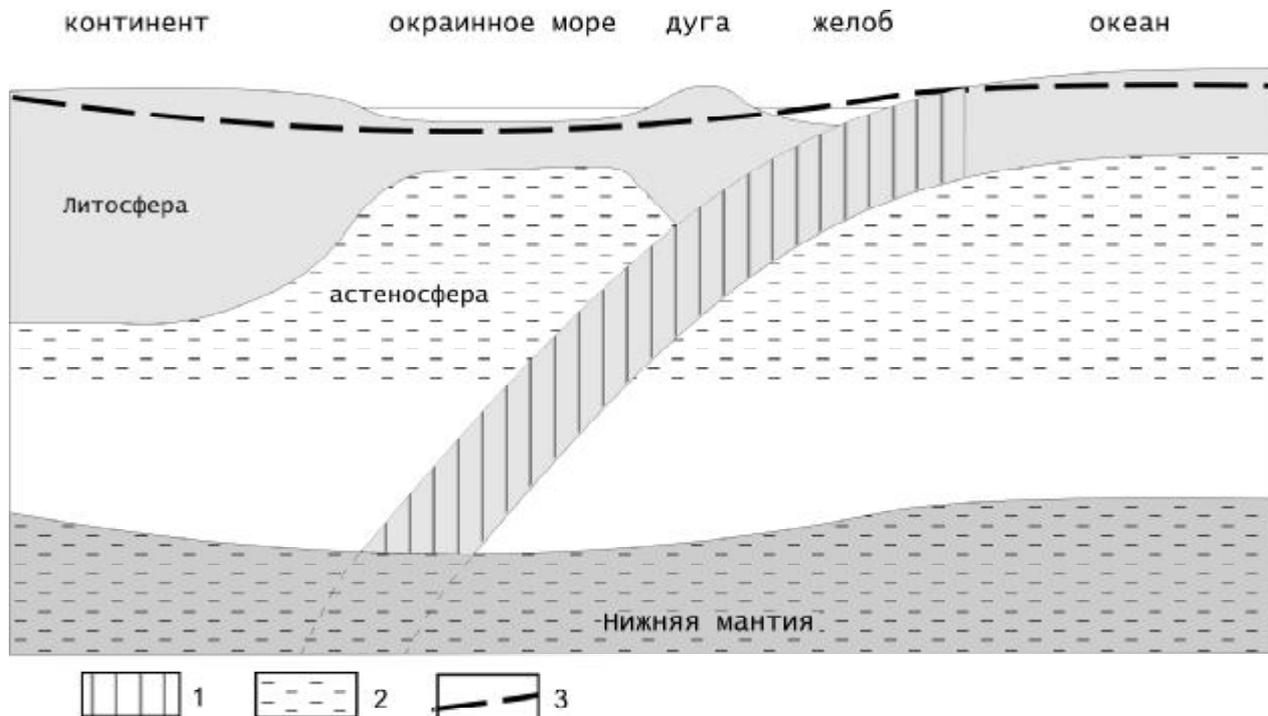
**Рис. 6.** Распределение СПМ и изостатических аномалий в зависимости от расстояния до оси желоба в Охотоморском регионе.

1 – расчетные точки изостатических аномалий (в мГал); 2 – расчетные точки аномалий СПМ (в км); 3 – линии тренда, рассчитанные по формулам полинома 2-й степени.

ческой скомпенсированности в астеносфере, т.е. изостатически некомпенсированная часть уплотнения должна намного превышать её скомпенсированную часть. Но, как показывает глубина СПМ, этого не происходит. Возможно, здесь определяющую роль играет соотношение горизонтальных и вертикальных размеров компенсирующих слоёв: в астеносфере мощность компенсирующего слоя много меньше ширины зоны верхнемантийной неоднородности.

Как показал Е.А. Артюшков [8], характерное время затухания возмущения, вызванного появлением изостатически некомпенсированной массы, сильно зависит от соотношения горизонтального размера неоднородности  $L$  и мощности компенсационного слоя  $H$ . При  $L \leq H$  характерное время затухания определяется зависимостью:

$$\tau = \frac{\eta}{\rho g L}, \quad (6)$$



**Рис. 7.** Схема изостатического погружения блока верхней мантии активной окраины, определяемое по аномалиям СПМ.

1 – область нагрузки (погружающаяся океаническая плита); 2 – зоны компенсации в астеносфере и нижней мантии; 3 – аномалия глубины СПМ, показывающая степень погружения тектоносферного блока.

где  $\tau$  – характерное время затухания,  $\eta$ ,  $\rho$  – соответственно вязкость и плотность в компенсирующем слое мантии,  $g$  – ускорение свободного падения. При  $L \gg H$  время затухания растет с увеличением  $L$ :

$$\tau \sim \frac{\eta}{\rho g H} \cdot \frac{L^2}{H^2} a. \quad (7)$$

При обширном изостатическом нарушении с горизонтальным размером 1000 км формула (6) показывает характерное время изостатического выравнивания в нижней мантии, а (7) – в астеносфере. По расчётам Н.Л. Добрецова с соавторами [21], вязкость нижней мантии на два порядка превышает вязкость астеносферы. Данная оценка показывает, что скорость восстановления давления для крупных изостатических нарушений в астеносфере может быть меньше, чем в нижней мантии, что подтверждается расчётами СПМ в Охотоморском регионе.

Проведенная нами оценка показывает, что в верхней мантии окраинных морей наблюдается избыток масс и процесс углубления СПМ должен про-

должаться. Таким образом, выявленная нами модель глубинной изостатической компенсации подтверждает наличие погружающихся конвективных течений в верхней мантии окраинных морей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акватория Охотоморского региона характеризуется общим увеличением глубины СПМ с амплитудой около 0,5 км, на фоне которого наблюдаются региональные аномалии увеличенной и уменьшенной глубины. Региональные аномалии коррелируются со структурами, выраженными в рельефе дна (поднятия и впадины), что говорит о возможной связи образования этих аномалий с процессом уменьшения мощности коры в окраинных морях. Если в глубоководных впадинах Охотского моря данный процесс начался с континентальной мощности коры, то, судя по общей зависимости аномалий СПМ от мощности коры, он происходил без изменения вещественного состава литосферной мантии. Наиболее вероятным механизмом деструкции коры в таких условиях пред-

ставляется магматическое замещение корового вещества под влиянием ультраосновного магматизма и флюидов, проникающих в кору из глубинного диапира, образующегося под литосферой

Повсеместное углубление СПМ в Охотском море указывает на наличие изостатически скомпенсированного уплотнения, распространяющегося на всё окраинное море и, возможно, выходящего за его пределы. Выход данной аномалии на прилегающие части континента и океана указывает на глубинное расположение аномалии – вероятно, она распространяется по всей глубине верхней мантии. Наличие изостатически скомпенсированного уплотнения в верхней мантии может вызывать конвективное погружение вещества под окраинными морями.

Как видим, изучение глубины “свободной” поверхности мантии даёт нам информацию не только об аномалиях плотности в верхней мантии, но и о процессах, происходящих в ней. Вместе с тем, следует признать, что точность определения аномалий СПМ в континентальной и субконтинентальной коре очень низка. Она зависит от точности определения параметров земной коры, прежде всего – от точности определения положения границы Мохо. Поэтому на данный момент мы не можем проводить площадное изучение отдельных структур по аномалиям СПМ – возможно лишь выявление общих закономерностей в структурах одинакового происхождения, что было сделано в данной работе при изучении региональных поднятий и впадин. Представленная модель глубинной изостазии не противоречит расчетным данным, но, в силу неуверенного определения аномалии СПМ в континентальной коре и прилегающей части океана, её следует рассматривать как гипотетическую.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность О.В. Веселову за помощь в проведении расчетов, связанных с оценкой мантийного теплового потока. Особая благодарность доктору геол.-мин. наук П.М. Сычеву, прежнему руководителю лаборатории геодинамики ИМГиГ, который в годы своей работы в ИМГиГ указал автору на существование проблемы изостазии окраинных морей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В.Н., Веселов О.В., Волгин П.Ф., Грецкая Е.В., Злобина Л.М., Ильёв А.Я., Кононов В.Э., Корнев О.С., Кочергин А.В., Кочергин Е.В., Патрикеев В.Н., Семакин В.П., Сеначин В.Н., Сергеев К.Ф. Тектоническое районирование Охотского моря // Структура, геодинамика и металлогения Охотского региона и прилегающих частей Северо-Западной Тихоокеанской плиты: Материалы междунар. науч. симпоз., Южно-Сахалинск, 24–28 сентября 2002 г. / Отв. ред. К.Ф. Сергеев и др. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2002. Т. 1. С. 146–147.
2. Аномальные гравитационные поля Дальневосточных окраинных морей и прилегающей части Тихого океана / Гайнанов А.Г., Павлов Ю.А., Строев П.А. Сычев П.М., Туезов И.К. Новосибирск.: Наука, 1974. 108 с.
3. Артемьев М.Е. Изостазия территории СССР. М.: Наука, 1975. 216 с.
4. Артемьев М.Е. Современное состояние проблемы изостазии // Структура и эволюция тектоносферы. М.: ИФЗ АН СССР, 1987. С. 216–252.
5. Артемьев М.Е., Бодин Дж. Плотностные неоднородности мантии под системами глубоководных желобов, островных дуг и окраинных морей // Изв. АН СССР, сер. физика Земли. 1978. № 2. С. 3–17.
6. Артемьев М.Е., Кабан М.К., Чесноков Е.М. Плотностные неоднородности мантии Земли. Океанические районы // Изв. АН СССР, сер. физика Земли 1983. №2. С. 21–30.
7. Артемьев М.Е., Кабан М.К., Чесноков Е.М. Плотностные неоднородности мантии Земли по данным о глубинах до её “свободной поверхности”. Континентальные районы // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. 1983. № 5. С. 3–11.
8. Артюшков Е.В. Геодинамика М.: Наука, 1979. 328 с.
9. Бабошина В.А., Терещенков А.А., Харахинов В.В. Глубинное строение Охотоморского региона по геофизическим данным. М.: ВНИИЭгазпром, 1984. 42 с.
10. Баженов М.Л., Жаров А.Э., Левашова Н.М., Кодама К., Брагин М.Ю., Федоров П.И., Брагина Л.Г., Ляпунов С.М. Палеомагнетизм позднемиоценовых островодужных комплексов юга Сахалина и конфигурация конвергентной границы на Северо-Западе Тихого океана // Геотектоника. 2002. №1. С. 42–58.
11. Белоусов В.В. Переходные зоны между континентами и океанами. М.: Недра, 1982. 150 с.
12. Богданов Н.А. О тектонической эволюции окраинных морей // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 159–169.
13. Богданов Н.А., Добрецов Н.А. Охотское океаническое вулканическое плато // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 2. С. 101–114.
14. Веселов О.В., Волкова Н.А. Радиоактивность горных пород Охотоморского региона // Геофизические поля переходной зоны Тихоокеанского типа. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 51–70.
15. Веселов О.В., Соинов В.В., Цвеляя З.Е. О тепловом потоке и возрасте тектоно-магматической активизации котловин средней и северной частей Охотского моря // Возраст геологических образований Охотоморского региона и прилегающих территорий. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1989. С. 81–90.
16. Волкова Н.А. Влияние процесса осадконакопления на тепловой поток окраинных морей северо-западного сектора Тихоокеанского подвижного пояса // Геофизические поля островных дуг Востока Азии Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 70–74.

17. Волкова Н.А., Веселов О.В., Кочергин А.А. Теплопроводность горных пород Охотоморского региона // Геофизические поля переходной зоны Тихоокеанского типа. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 44–50
18. Гольмшток А.Я. О влиянии осадконакопления на глубинный тепловой поток // Океанология. 1979. Т.19, № 6. С. 1133–1138.
19. Гордиенко В.В., Усенко О.В. Глубинные процессы в тектоносфере Украины. Киев, 2003. 147 с.
20. Гранник В.М. Древние сейсмофокальные зоны Сахалина Владивосток: Дальнаука, 2003. 120 с.
21. Добрецов Н.А., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Наука, 2001. 409 с.
22. Ермаков В.А. Геологические модели формирования эпиконтинентальных впадин задуговых бассейнов // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 175–191.
23. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Динамика сейсмико-тектонических процессов в зоне сочленения Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской плит (Северо-Восток Азии) // Отеч. геология. 2003. №6 С. 69–74.
24. Йосии Т. Строение коры и верхней мантии под Тихим океаном, Японскими островами и Японским морем // Геофизические исследования зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану М.: Наука, 1977. С. 7–13.
25. Кабан М.К. Изучение изостазии литосферы. М.: Наука, 1988. 125 с.
26. Кононов М.В. Тектоника плит Северо-Запада Тихого океана. М.: Наука, 1989. 168 с.
27. Косыгин В.Ю. Геологическая природа гравитационных аномалий Южно-Охотского региона. М.: Наука, 1981. 112 с.
28. Косыгин В.Ю., Сеначин В.Н. Плотностные неоднородности мантии активных окраин и тектоника // Тихоокеан. геология. 1995. Т. 14, № 6. С. 44–52.
29. Красиков В.Н., Кононов В.Э., Пятаков Ю.В. Методика объёмного моделирования по материалам сейсмогравиметрии с целью определения перспектив нефтегазоносности (на примере Северного Сахалина) // Строение земной коры и перспективы нефтегазоносности в регионах Северо-Западной окраины Тихого океана. Южно-Сахалинск: ИМГиГ СахНЦ ДВО РАН, 2000. Т.1. С. 167–201.
30. Ле Пишон К., Франшто Ж., Бонин Ж. Тектоника плит. М.: Мир, 1977. 287 с.
31. Маракушев А.А. Роль магматического замещения в процессах формирования и деструкции континентальной земной коры // Проблемы глобальной геодинамики: Материалы теоретического семинара ОГГГН РАН, 2001–2002 гг. М.: ОГГГН РАН, 2003. С. 214–227.
32. Перчук Л.Л., Фролова Т.И. К проблеме происхождения глубоководных впадин у активных окраин материков // Твердая кора океанов (проект “Литос”) / Тр. ГИН АН СССР. М.: Наука, 1987. Т. 414. С. 163–167.
33. Резанов И.А. Три возможных механизма океанизации континентальной коры // Тихоокеан. геология. 1982. №4. С. 7–14.
34. Родников А.Г., Сергеева Н.А., Забаринская Л.А. Глубинные причины образования осадочных бассейнов // Природа. 2004. № 10. С. 23–32.
35. Сеначин В.Н. К вопросу об изостазии окраинных морей: модель глубинной компенсации и её геодинамическое приложение // Геофизические поля и моделирование тектоносферы. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 252–255.
36. Сергеев К.Ф. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с.
37. Соинов В.В., Веселов О.В., Кочергин А.В., Сок Б.-Ч. Модель тепловой эволюции земной коры для южной части Японского моря в кайнозое // Геофизические поля и моделирование тектоносферы. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 91–101.
38. Строев П.А., Ромашова О.Н. Изостатические аномалии Курило-Охотского региона // Гравиметрические и магнитные исследования на море. М., 1989. С. 102–110.
39. Сычев П.М. Основные этапы геологического развития Охотского моря и прилегающих районов // Геофизические поля и моделирование тектоносферы. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 169–190.
40. Тектоника и углеводородный потенциал Охотского моря / Веселов О.В., Ильёв А.Я., Кононов В.Э., Кочергин Е.В., Патрикеев В.Н., Семакин В.П., Сеначин В.Н., Агеев В.Н., Васюк И.Б., Волгин П.Ф., Грецкая Е.В., Злобина Л.М., Жигулёв В.В., Корнев О.С., Кочергин А.В., Куделькин В.В. Владивосток: ДВО РАН, 2004. 160 с.
41. Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: геологическое приложение физики сплошных сред. Ч.1. М.: Мир, 1985. 376 с.
42. Трубицын В.П., Рыков В.В. Численная модель образования краевых морей и Японских островов при движении Евразии к зоне субдукции // Вычисл. сейсмол. 2001. №32. С. 248–256.
43. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Под. ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.
44. Фролова Т.И. Магматизм окраинных и внутренних морей и его роль в их образовании // Проблемы глобальной геодинамики: Материалы теоретического семинара ОГГГН РАН, 2001–2002 гг. М.: ОГГГН РАН, 2003. С. 247–275.
45. Хэйс Д. Окраинные моря Юго-Восточной Азии: их геофизические характеристики и структура // История и происхождение окраинных внутренних морей // Докл. 27 Междунар. геол. конгр. [Т.6, часть II]. Симпоз. S.06.2.3. М.: Наука, 1984. С. 30–43.
46. Artemjev M.E., Kaban M.K. The free mantle surface – new possibilities to reveal subcrustal inhomogeneities from the structure of the earth’s crust // Journ. Geodyn. 1986. V. 5, N 1. P. 25–44
47. Dziewonski A.M., Hales A.L., Lapwood E.R. Parametrically simple earth models consistent with geophysical data // Phys. Earth Planet. Inter. 1975. V.10, N 1. P. 12–48.
48. Parsons B., Sclater J.G. Analysis of ocean floor bathymetry and heat flow with age // J. Geophys. Res. 1977. V. 82, N 5. P. 803–827.
49. Senachin V.N. Isostasy of marginal seas as mechanism of their formation // Symposium on Humanity and the World Ocean: Interdependence at the Dawn of the New Millennium: PACON-99 Proceedings Moscow, 2000. P. 293–298.

50. Watanabe T., Langseth M.G., Anderson R.N. Heat flow in back-arc basins of the Western Pacific // Island arcs, deep sea trenches and back-arc basins / Eds. M.Talwani and W.C.Pitman. Washington D.C., 1977. P. 137–161.
51. Yoshii T. Upper mantle structure beneath the North Pacific and the margin seas // Journ. Phys. Earth. 1973. V. 21, N3. P. 313–328.

Поступила в редакцию 11 июля 2005 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

**V.N. Senachin**

**“Free mantle surface” anomalies of the Okhotsk Sea region, and their relation to deep processes**

Great isostatically compensated density anomalies were found by a number of scientists (Watanabe et al., 1977; Yoshii, 1973 et al., a.o.) in the upper mantle of deep sea basins of marginal seas in East Asia. The estimation of “free mantle surface” anomalies in the Okhotsk Sea region was aimed at the definition of the origin of the given density anomalies. The results of this research have shown that the Okhotsk Sea region is characterized by general increase in the depth of the free mantle surface with an amplitude about 0.5 km, and against the background of this increase, regional anomalies of the greater and lesser depth are observed which are linked with the structures marked in the bottom relief. These anomalies are, probably, formed in the process of destruction of the earth’s crust thus resulting in the reduction of its thickness. They can be caused by lateral temperature anomalies in the lithosphere which are formed under the basins as a result of conductive heating, fluid uplift and magmatism into the crust. The ubiquitous deepening of the free mantle surface points to the presence of a large upper mantle high density body probably distributed beyond the boundaries of the Okhotsk Sea into the adjacent parts of continent and ocean. This high density body is almost completely isostatically compensated. Therefore, the deep isostasy mechanism with a low mantle compensation level takes place in the active margins of East Asia.

**Key words:** isostasy, “free mantle surface”, lithosphere, upper mantle, Okhotsk Sea