

На правах рукописи



КОПТЕВ Александр Игоревич

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва

2011

Работа выполнена на кафедре динамической геологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

*Научный руководитель:*

Доктор геолого-минералогических наук  
**Гончаров Михаил Адрианович**

*Официальные оппоненты:*

Доктор геолого-минералогических наук  
**Костюченко Сергей Леонидович**

Доктор физико-математических наук  
**Родкин Михаил Владимирович**

*Ведущая организация:*

Институт Океанологии им.П.П.Ширшова РАН

Защита состоится **28 октября 2011 г. в 14 час. 30 мин.** на заседании диссертационного совета Д 501.001.39 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, аудитория 415.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке геологического факультета МГУ (главное здание, корпус А, 6 этаж).

Автореферат разослан 27 сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.39  
доктор геол-мин. наук, профессор



А.Г. Рябухин

## *Общая характеристика работы*

**Актуальность работы.** В качестве главных источников современного поля напряжений в литосфере Земли обычно рассматривают три типа сил: силы разности гравитационного потенциала, или обобщенные топографические силы (силы, вызванные рельефом и плотностными неоднородностями внутри литосферы), силы затягивания в зонах субдукции (силы, связанные с погружением океанической литосферной плиты), силы мантийных течений (силы, вызванные воздействием на литосферу течений вещества под ее основанием вследствие конвекции в мантии). На современном этапе исследований относительной роли этих сил в формировании напряжений наметилось некоторое противоречие между результатами регионального и глобального моделирования. Результаты региональных работ в большинстве своем указывает на преобладающую роль сил разности гравитационного потенциала (Richardson, Reding, 1991; Coblenz, Sandiford, 1994; Sandiford et al., 1995; Coblenz et al., 1995, 1998; Coblenz, Richardson, 1996; Reynolds et al., 2002), а глобальных – наоборот, на доминирование сил мантийных течений (Bird, 1998; Lithgow-Bertelloni, Gynn, 2004). Для решения этого противоречия необходимо глобальное моделирование, в рамках которого с высокой степенью детальности и с учетом большого количества исходной информации произведена оценка сил гравитационных неоднородностей, а также выполнен расчет поля напряжений, возникающих вследствие действия этих сил. Помимо этого целесообразно провести и региональное моделирование, которое за счет своей большей детальности позволяет зафиксировать особенности моделируемых полей, не заметные при более грубом разрешении. Производительная мощность современной вычислительной техники позволяет в разумные сроки произвести соответствующие расчеты, а опубликованные данные – получить необходимую для этих расчетов входную информацию. Сравнение результатов расчетов с фактическими данными становится все более эффективным способом оценки качества моделей в связи с ростом количества замеров литосферных напряжений.

Моделирование напряженного состояния литосферы Земли является крайне важной задачей, позволяющей приблизиться к правильному пониманию относительной роли движущих сил тектоники плит.

**Цель работы:** оценка роли сил разности гравитационного потенциала в формировании современного распределения напряжений в литосфере Земли с помощью численного моделирования.

Степень соответствия полученного таким образом модельного поля напряжений данным «Мировой Карты Напряжений» (Heidbach et al., 2008) позволяет оценить величину вклада сил разности гравитационного потенциала в существующее в литосфере распределение напряжений. Если уровень совпадения рассчитанных и наблюдаемых данных низкий, то роль обобщенных топографических сил в образовании поля напряжений незначительная. Если же соответствие между модельным и фактическим распределениями удовлетворительное, то силы, вызванные плотностными неоднородностями в литосфере, можно считать доминирующими с точки зрения формирования современного напряженного состояния.

Исходя из сказанного выше, достижение поставленной цели предполагает решение следующих **основных задач**:

1. Разработка алгоритма для расчета распределения напряжений (трехмерного, двумерного на плоскости и двумерного на сферической поверхности) и его реализация в действующем программном коде;

2. Построение трехмерной модели распределения температур и плотностей в литосфере Земли с использованием имеющихся данных по топографии, структуре земной коры, возрасте океанического дна, гравитационным аномалиям, температуре на поверхности Земли;

3. Количественная оценка сил разности гравитационного потенциала (обобщенных топографических сил) на базе рассчитанной температурно-плотностной модели литосферы;

4. Расчет модельных полей напряжений в литосфере Земли при различных граничных условиях и параметрах среды и сопоставление полученных распределений с фактическими данными по напряженному состоянию в литосфере Земли (или с результатами визуальной и/или статистической обработки этих данных);

5. Расчет региональных моделей распределений напряжений и порожденных этими напряжениями литосферных складок упругого изгиба.

**Фактический материал.** В качестве исходных в настоящей работе были использованы следующие имеющиеся в свободном доступе данные:

1. цифровая модель рельефа ETOPO5 (National Geophysical Data Center, 1988);

2. структурно-вещественный состав земной коры по данным глобальной модели CRUST 2.0 (Bassin et al., 2000; Mooney et al., 1998) и модели для Европейского региона EuCRUST-07 (Tesauro et al., 2008);
3. гравитационные аномалии (гравитационная модель EGM96 (Lemoine et al., 1998));
4. возраст океанического дна (Muller et al., 1997);
5. распределение среднегодовых температур на поверхности Земли (Leemans et al., 1991; Lieth et al., 1972);
6. положение и геотектонический тип границ литосферных плит (Bird, 2003);
7. современное напряженное состояние литосферы по данным международного исследовательского проекта «Мировая Карта Напряжений» (World Stress Map, WSM) (Zoback et al., 1989; Zoback, Zoback, 1989; Zoback, Zoback, 1991; Zoback, 1992; Heidbach et al., 2004; Heidbach et al., 2007; Heidbach et al., 2008).

**Научная новизна работы:**

1. Для расчетов глобальных и региональных полей напряжений предложен оригинальный алгоритм количественной оценки распределения напряжений в трехмерном и двумерном (на плоскости и на сфере) пространстве, который основан на методе конечных объемов с использованием явной консервативной численной схемы в Лагранжевых координатах;
2. При расчетах распределения температур в литосфере Земли была введена изостатическая поправка, позволяющая снизить степень влияния на итоговый результат таких факторов как нестационарность теплового режима, неточность знаний о величине поверхностного теплового потока, коэффициента теплопроводности и параметров, определяющих теплогенерацию пород;
3. На основании рассчитанного распределения температур получена глобальная модель термальной мощности литосферы Земли (разница между абсолютной отметкой изотермы 1300°C и дневной поверхностью);
4. Рассчитана глобальная модель распределения напряжений, возникающих в результате действия обобщенных топографических сил, вычисленных с использованием широкого спектра входных данных;
5. На примере глобальной модели показана существенная роль сил разности гравитационного потенциала в формировании современного поля напряжений;

6. Показана реальность модели упругого изгиба литосферы, возникающего вследствие действия тектонических напряжений, для объяснения быстрого плиоцен-четвертичного погружения Восточно-Черноморской и Южно-Каспийской впадин.

#### **Практическое значение работы:**

1. Предложенная методология и технология моделирования полей напряжений может быть использована для изучения катастрофических событий, непосредственно связанных с напряженно-деформированным состоянием литосферы, с учетом дополнительной информации о входных параметрах расчетов для конкретных сейсмоопасных территорий;

2. Данные глобального и регионального моделирования поля напряжений могут быть использованы в качестве граничных условий при построении более детальных трехмерных моделей околоскважинного пространства, разрабатываемых месторождений углеводородов, горных выработок (карьеров, шахт) и пр.;

3. Разработанные алгоритмы и методики представляют собой полезный вычислительный инструмент для построения моделей напряженного состояния.

#### **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1. Разработан и реализован в программном коде «*Earth Stresses*» оригинальный алгоритм расчета поля напряжений, основанный на методе конечных объемов с использованием явной консервативной численной схемы в Лагранжевых координатах, в трехмерном и двумерном (на плоскости и на сфере) пространстве;

2. Предложена методика и выполнен расчет термальной мощности литосферы Земли, в которой нашли свое отражение все главные тектонические структуры земной коры и литосферы;

3. Поле напряжений, рассчитанное как результат действия сил разности гравитационного потенциала, в главных своих особенностях соответствует современному напряженному состоянию литосферы Земли;

4. Быстрое плиоцен-четвертичное погружение Восточно-Черноморского и Южно-Каспийского бассейна может быть объяснено в рамках модели упругого изгиба литосферы, возникающего в результате воздействия тектонических напряжений.

**Публикации и апробация работы.** Основные положения и разделы диссертации опубликованы в 18 работах, в том числе в 3 статьях в рефери-

руемых журналах. Результаты исследований докладывались на конференциях и совещаниях различного уровня: XLIII Международном Тектоническом совещании «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя» (Москва, 2010); международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина "Современное состояние наук о Земле" (Москва, 2011); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2009; Москва, 2010; Москва, 2011); российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной «Году Планеты Земля» «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых» (Москва, 2009); международной конференции, посвященной «Мировой Карте Напряжений» (Потсдам, Германия, 2008); Генеральной Ассамблее Европейского Союза Наук о Земле (Вена, Австрия, 2010); Ежегодной европейской конференции Американской Ассоциации Нефтяных Геологов (Киев, 2010).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Она имеет объем 181 страницу, включая 115 иллюстраций и 1 таблицу. Список использованной литературы включает 161 название.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность доценту кафедры региональной геологии и истории Земли геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кандидату геол.-мин. наук Андрею Викторовичу Ершову за постоянные консультации и помощь на всех этапах выполнения данной работы; доценту кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кандидату физ.-мат. наук Владимиру Сергеевичу Захарову за продуктивное сотрудничество при написании работы; главному научному сотруднику ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, доктору физ.-мат. наук Шамилю Ахмедовичу Мухамедиеву за плодотворные дискуссии и замечания, высказанные при рецензировании статьи по теме работы; доценту кафедры региональной геологии и истории Земли геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кандидату геол.-мин. наук Максиму Валерьевичу Коротаеву за внимание и поддержку.

Также хочется поблагодарить заведующего кафедрой динамической геологии, профессора, доктора геол.-мин. наук Николая Владимировича Короновского и заведующего кафедрой региональной геологии и истории

Земли, профессора, доктора геол.-мин. наук Анатолия Михайловича Никишина за постоянное благожелательное внимание к работе.

Выражаю признательность моему научному руководителю, заведующему лабораторией тектонофизики и геотектоники им. В.В. Белоусова кафедры динамической геологии, доктору геол.-мин. наук Михаилу Адриановичу Гончарову за всестороннюю поддержку при подготовке работы.

Особая благодарность моему первому наставнику Всеволоду Николаевичу Вадковскому<sup>†</sup>, открывшему мне дорогу в мир науки.

В заключение хочу выразить благодарность всем сотрудникам кафедры динамической геологии и кафедры региональной геологии и истории Земли геологического факультета МГУ, которые всегда очень доброжелательно относились ко мне и моим исследованиям.

## ***Глава 1. Моделирование напряжений в литосфере Земли: Современное состояние проблемы***

В ранних моделях тектоники литосферных плит основная причина движения литосферных плит виделась в мантийной конвекции, которая воздействовала на литосферные плиты за счет сил вязкого сцепления на границе литосфера-астеносфера (Уэда, 1980).

В дальнейшем пришло понимание того, что источник движения плит может лежать в них самих. Вариации мощности коровых слоев в совокупности с плотностными неоднородностями, возникающими вследствие гетерогенности термального режима и состава, обуславливают возникновение сил, стремящихся уничтожить эти неоднородности и привести систему в более однородное состояние, характеризующееся меньшими значениями потенциальной энергии. К этим силам относятся так называемая сила сползания с хребта, определяемая термальной неоднородностью под срединными хребтами, силы гравитационного растекания утолщенной коры горных поясов, силы растекания в областях термальных сводов и др. Методика количественной оценки величины такого рода сил как разности вертикальных интегралов литостатического давления в латерально разнесенных колонках была предложена в работах (Frank, 1972; Artyushkov, 1973). Кроме того, плита испытывает действие так называемой силы затягивания в желоб, возникающей вследствие гравитационной неустойчивости сравнительно холодной и, следовательно, более плотной океанической литосферы погружающейся плиты (Forsyth, Uyeda, 1975).



Относительная роль этих трех источников современного поля напряжений (силы мантийных течений, силы разности гравитационного потенциала и силы затягивания в желоб) по-разному оценивалась различными исследователями в работах 70-х гг. (Harper, 1975; Forsyth, Uyeda, 1975, Solomon et al., 1975; Richardson et al., 1976, 1979)

В работах конца 70-х – начала 90-х годов двадцатого века доминируют представления о том, что главным источником напряжений являются силы, вызванные гравитационными неоднородностями литосферы Земли (Lister, 1975; Molnar, Tapponier, 1978; Parsons, Richter, 1980; Dahlen, 1981; Houseman et al., 1981; England, McKenzie, 1982; Fleitout, Froidevaux, 1982; Fleitout, Froidevaux, 1983; England, 1987; Molnar, Lyon-Caen, 1988; Zhou, Sandiford, 1992).

Численное моделирование полей напряжений в пределах крупных регионов Земли – Европы (Golke, Coblentz, 1996; Mantovani et al., 2000; Pfiffner et al., 2000; Jimenes-Munt et al., 2001; Marotta et al., 2002; Marotta et al., 2004). Индо-Австралийской плиты (Sandiford et al., 1995; Coblentz et al., 1995, 1998; Reynolds et al., 2002), Австралийской плиты (Burbidge, 2004), Северо-Американской плиты (Richardson, Reding, 1991; Liu, Bird, 1998; Flesch et al., 2000), Южно-Американской плиты (Coblentz, Richardson, 1996; Meijer et al., 1997), Африканской плиты (Coblentz, Sandiford, 1994), Новой Зеландии (Liu, Bird, 2002) и др. – имело своей целью на примере конкретных областей определить природу имеющихся там напряжений.

Результатом большинства этих работ стало признание того факта, что наибольшую роль в формировании современного поля напряжений играют силы разности гравитационного потенциала. Однако общим выводом работ по моделированию глобального поля напряжений (Bird, 1998; Bird, Liu, 1999; Lithgow-Bertelloni, Guynn, 2004) было утверждение о том, что для наилучшего соответствия расчетного поля наблюдаемому необходимо включение в модель мантийных сил, а только топографические силы (силы, вызванные разностью гравитационного потенциала) оказывались неспособными формировать правдоподобное распределение напряжений.

Для решения этого противоречия между результатами глобального и регионального в настоящей работе было произведено изучение роли сил разности гравитационного потенциала в формировании глобального поля напряжений путем построения глобальной модели поля напряжений, возникающего в результате действия сил этого типа.

## **Глава. 2. Методика расчета поля напряжений**

В данной главе приведена разработанная методика расчета поля напряжений. Глава состоит из разделов, которые посвящены основному циклу расчетов, геометрии расчетной сетки и численному дифференцированию с использованием теоремы о дивергенции (для двухмерной и трехмерной моделей), выбору величины шага по времени, а также учету сферичности расчетной сетки и границ плит и разрывных нарушений.

В рамках настоящей работы разработаны и реализованы в действующем программном коде алгоритмы для расчета поля напряжений  $s_{ij}$  как в двумерном (2d), так и в трехмерном (3d) пространстве. Для моделирования напряженного состояния в литосфере Земли предложен специальный алгоритм для расчетов на сферической оболочке, представляющий собой некоторую модификацию решения плоской двумерной задачи. При этом методика допускает наличие разрезов на расчетной сетке (оболочке) и предполагает изменяющиеся в пространстве реологические свойства среды.

Поле напряжений  $s_{ij}$  рассчитывалось путем численного решения уравнения равновесия

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_i} + F_j = 0. \quad (1)$$

Поле внешних сил  $F_i$  задавалось в качестве входных данных для расчетов (в случае моделирования напряжений в литосфере Земли оно рассчитывалось из разности гравитационного потенциала литосферы).

Реология среды предполагалась упруго-пластической. Принималось, что полная деформация представляет собой сумму упругой и неупругой частей.

Уравнение (1) количественно решалось методом конечных объемов с использованием явной консервативной численной схемы в Лагранжевых координатах. Расчетная сетка представляла собой набор ячеек гексаэдральной (в случае 3d-модели) и четырехугольной (в случае 2d-модели) формы. При моделировании напряжений в литосфере Земли четырехугольные ячейки покрывали сферу с радиусом 6371 км.

В ходе расчетов производился циклический пересчет скоростей смещений в скорости деформаций, скоростей деформаций в напряжения, напряжений в силы, а сил обратно в скорости смещений. Часть этих величин

(скорости смещений, силы) центрированы в узлах расчетной сетки, а часть (скорости деформаций, напряжения) – в ячейках.

Длительность временного промежутка, в течение которого выполнялся расчет, определялась условием достижения стационарного состояния. Временной шаг выбирался таким, чтобы обеспечить устойчивость численной схемы.

### ***Глава 3. Свойства литосферы и движущие силы тектоники плит***

В данной главе вводится принятое в настоящей работе понятие литосферы и ее термальной мощности, рассказывается о методике и результатах расчетов термальной мощности и прочности литосферы Земли и принципе оценки сил разности гравитационного потенциала, а также методике расчета литосферных складок.

Предлагаемая методика расчета распределения напряжений основана на численном решении уравнения равновесия (1), поле внешних сил  $F_i$  для которого задавалось в качестве входных данных. Также в качестве входных данных в расчетах поля напряжений выступали свойства моделируемой среды – плотность, модуль Юнга, прочность. Моделируемой средой в настоящей работе является литосфера Земли, а основными источниками напряжений в ней предполагаются силы разности гравитационного потенциала. Поэтому необходимым условием для моделирования напряженного состояния в литосфере Земли является не только разработка и реализация алгоритмов расчета поля напряжений, но и подготовка необходимых для этих расчетов входных данных.

Под полем внешних сил  $F_i$  в настоящей работе понимались обобщенные топографические силы, расчет которых сводился к количественной оценке разности интегралов распределения по глубине литостатического давления (Artyushkov, 1973; Артюшков, 1979). Соответственно, для расчета распределения по глубине литостатического давления для каждой литосферной колонки необходимо предварительно рассчитать трехмерную температурно-плотностную модель литосферы.

Распределение температур  $T(z)$  с глубиной ( $z$ ) в континентальной литосфере принималось стационарным и рассчитывалось как

$$T(z) = T_0 + \int_{z_0}^z \frac{q(V)}{k(V)} dV, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура на поверхности Земли,  $z_0$  – абсолютная отметка рельефа,  $k(z)$  – коэффициент теплопроводности,  $q(z)$  – тепловой поток.

Распределение температур в океанической литосфере рассчитывалось в зависимости от ее возраста в рамках модели остывающего полупространства (Теркот, Шуберт, 1985):

$$\frac{T(z) - T_0}{T_m - T_0} = \operatorname{erf} \left( \frac{z - z_0}{2\sqrt{c \cdot t}} \right) \quad (3)$$

где  $T_m$  – температура подлитосферной мантии (принималась равной  $1444^\circ\text{C}$ ),  $c$  – коэффициент температуропроводности (принят –  $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) (Stein, 1995),  $\operatorname{erf}$  – функция ошибок,  $t$  – возраст литосферы. Возраст океанического дна был взят по данным (Muller et al., 1997).

Основными параметрами, определяющими термальное состояние литосферы, в данном случае, оказываются поверхностный тепловой поток для континентальной литосферы и возраст океанической литосферы. Вообще говоря, рассчитанное таким образом распределение температур будет содержать неточности, связанные с тем, что мы не очень хорошо знаем величину радиоактивной теплогенерации и коэффициент теплопроводности коровых пород, мощности коровых слоев, тепловой поток на поверхности, а также с невыполнением предположения о стационарности теплового режима для континентальной литосферы или с учетом в модели дополнительных термальных факторов, таких как эффект горячих точек. Модель, рассчитанная только на основании выше приведенных термальных алгоритмов, далее в работе будет называться «базовой».

«Базовую» модель можно улучшить, если использовать дополнительную информацию. Как известно, изменение температуры пород литосферы ведет к изменению их плотности, которая в свою очередь влияет на изостатическое состояние литосферы. Как следствие, оказывается возможным использовать модель изостатической компенсации для корректировки термальной модели. Согласно гипотезе локальной изостаии для литосферы, находящейся в состоянии локального изостатического равновесия, веса любых двух вертикальных колонок литосферы от поверхности до глубины изостатической компенсации должны быть равны.

Поправки к «базовой» модели за счет модели изостатической компенсации вводились следующим образом. Поверхностный тепловой поток в уравнении (2) и возраст в уравнении (3) не полагались независимыми

входными параметрами при расчетах распределения температур в континентальной и океанической литосфере соответственно, но рассчитывались из положения изотермы 1300°C (подошвы литосферы), которое определялось из условия локальной изостазии.

Термальная мощность литосферы в каждой точке земной поверхности определялась в данной работе как разница между глубиной расчетной изотермы 1300°C и абсолютной отметкой рельефа. Расчет выполнялся на сетке с размером ячейки 0,5°x0,5°; границы ячеек были ориентированы вдоль параллелей и меридианов.

Результаты расчета термальной мощности литосферы приведены на рис.1.

Главные особенности полученного распределения термальной мощности литосферы заключаются в следующем:

1) значительное утонение литосферы (вплоть до нулевых значений ее мощности) в области срединно-океанических хребтов и областей континентального рифтогенеза;

2) по мере удаления от срединно-океанических хребтов наблюдается постепенное увеличение мощности литосферы (до 120-140 км на границе континент-океан);

3) в областях развития плюмового океанического магматизма фиксируется значительное уменьшение мощности литосферы;

4) области развития древних платформ характеризуются мощностью литосферы в 150-200 км.

Отличие от ранее опубликованных глобальных моделей термальной мощности литосферы (Artemieva, Mooney, 2001; Artemieva, 2006) заключается в том, что, во-первых, в настоящей работе производилась корректировка «базовой» термальной модели за счет поправок на изостатическую компенсацию литосферы, и во вторых, в том, что выполнен расчет для всей литосферы Земли, а не только для литосферы континентов (Artemieva, 2006).

Методика расчета прочности литосферы Земли основана на использовании реологического профиля, который представляет собой комбинацию профилей прочности в хрупком и пластическом режимах (Ranalli, 1995). Расчет прочностных свойств литосферы необходим для учета в модели неупругого поведения среды.

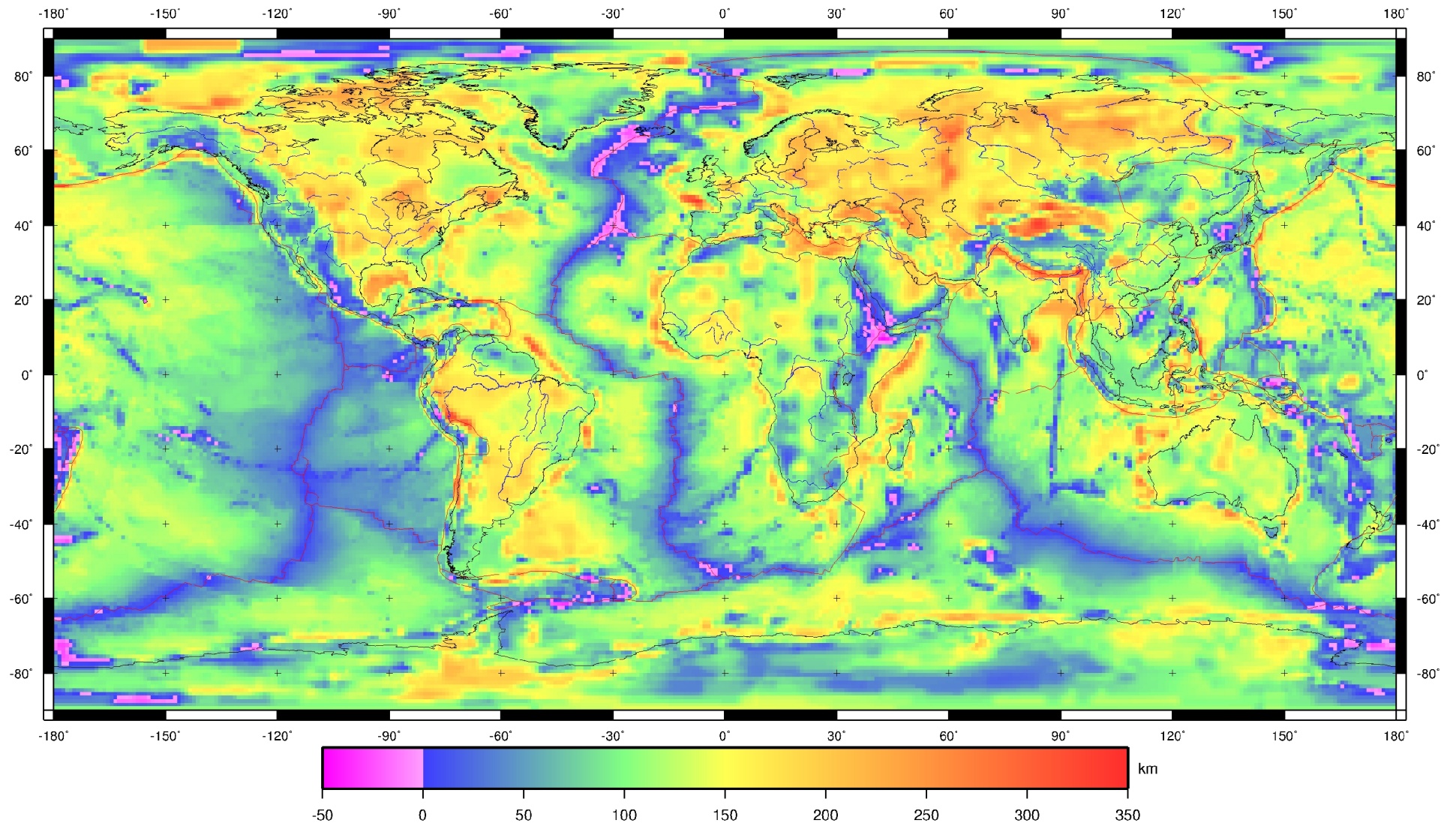


Рис.1. Расчетная термальна мощность литосферы. Модель, учитывающая изостатическую поправку для океанической литосферы

В заключительном разделе главы приведены уравнения, численное решение которых позволяет моделировать возникновение общелитосферных складок упругого изгиба под воздействием предварительно рассчитанных напряжений. Такого рода моделирование необходимо для проверки правильности интерпретации авторами систем антиклиналеподобных структур, наблюдающиеся в Индийском океане (Zuber, 1987), Австралии (Stephenson, Lambeck, 1985), Канаде (Stephenson et al., 1990), центральной Азии (Nikishin et al., 1993; Burov et al., 1993) и в пределах территории Евразии (Nikishin et al., 1997) как литосферных складок, возникающих в результате действия тектонических напряжений.

#### ***Глава 4. Результаты глобального моделирования***

В данной главе приводится методика и результаты интерполяции и экстраполяции данных «Мировой Карты Напряжений», а также результаты моделирования глобального поля напряжений в литосфере Земли с использованием методик и подходов, описанных в предыдущих главах, и сравнение этих результатов как с собственно фактическими данными (данными «Мировой Карты Напряжений»), так и с результатами их статистической обработки.

Представлены четыре модели глобального поля напряжений, которые наиболее показательны среди всех рассчитанных. Отличия между этими моделями заключаются в том, что две из них рассчитаны на сплошной, «неразрезанной» сетке, а две другие получены при «разрезании» сетки вдоль границ литосферных плит. При этом в пределах каждой из этих двух пар моделей тоже есть отличие – в одном случае обобщенные топографические силы получены из модели литосферы, учитывающей изостатическую поправку в океанах, а в другом – из модели, в рамках которой температурный режим океанической литосферы рассчитывался только на основании ее возраста.

Наилучшей из предложенных считается модель, учитывающая изостатическую поправку в океанах и не имеющая «разрезов» на расчетной сетке (рис.2), главные особенности которой состоят в следующем:

- 1) четко выраженное растяжение вдоль всей протяженности всемирной системы срединно-океанических хребтов. Главная ось наибольшего растяжения практически повсеместно ориентирована перпендикулярно простиранию хребта;



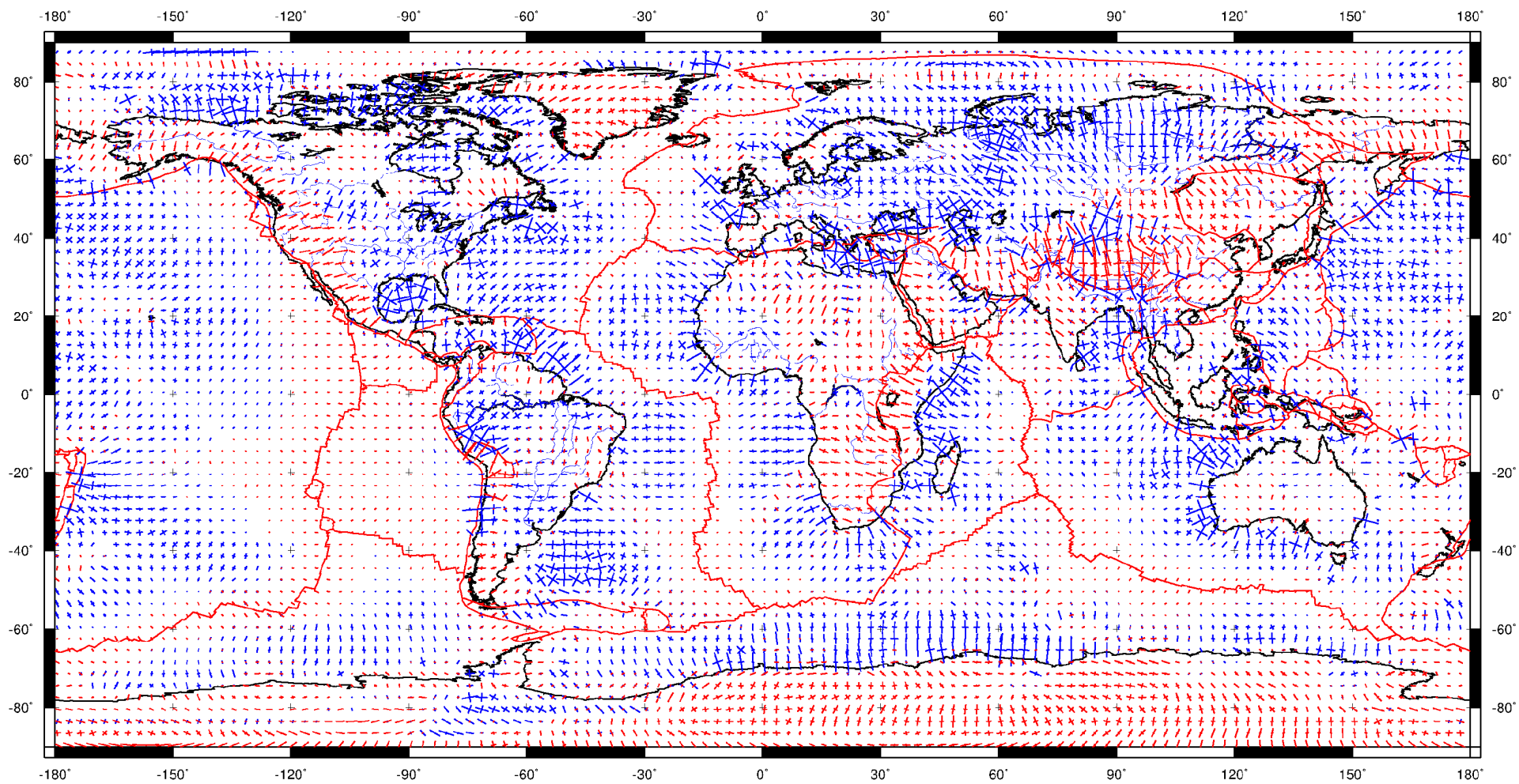


Рис.2. Расчетное распределение напряжений. Синими линиями показаны главные оси сжатия, красными – растяжения



2) хорошо проявленная обстановка сжатия вдоль северной и западной субдукционных границ Тихоокеанской литосферной плиты (Алеутская, Курило-Камчатская, Японская, Идзу-Бонинская, Марианская зоны субдукции), Филиппинской и Зондской зон субдукции; менее отчетливо сжатие, ориентированное по направлению движения погружения океанического слэба, выражено в пределах Центрально-Американской и Андской субдукционных зон;

3) преобладание сжимающих напряжений в областях сочленения океанической и континентальной литосферы (в том числе в пределах пассивных окраин континентов) вследствие противонаправленного действия сил сползания с хребта и сил гравитационного расплывания континентов. Главная ось максимального сжатия в данном случае чаще всего направлена перпендикулярно береговой линии континентов;

4) океанические структуры, связанные с внутриплитным магматизмом – хребет Девяностого градуса и Маскаренский хребет в Индийском океане, Гавайский и Императорские хребты в Тихом океане, Азорские острова, хребты Китовый, Рио-Гранде и Св. Марии в Атлантическом океане – маркируются обстановкой растяжения;

5) наличие напряжений растяжения в пределах континентальных рифтовых систем – Восточно-Африканской-Красноморской, Байкальской, Момской, провинции Бассейнов и Хребтов – вследствие действия сил сползания с термального свода. Главная ось растяжения, также как и в случае океанических спрединговых зон, ориентирована по нормали к простиранию континентальной рифтовой границы литосферных плит;

6) обстановка растяжения в крупных континентальных орогенах – Центральных Андах, Тибете, Кавказе, Альпах – как результат действия сил гравитационного расплывания;

7) доминирующая роль сжимающих напряжений в пределах Евразийского, Северо- и Южно-Американского континентов вследствие действия сил сжатия со стороны прилегающих океанических областей на континенты.

Степень соответствия результатов моделирования данным «Мировой Карты Напряжений» (и результатам усреднения этих данных) в целом можно характеризовать как очень хорошую, но она различная для разных регионов. При этом большое расхождение между данными расчетов и замеров в пределах какого-либо отдельного района может быть связано не

только с недостаточной корректностью модельных построений, но и с малым количеством точных определений напряженного состояния в рассматриваемой области или невозможностью применения используемых алгоритмов статистической обработки для этих данных.

По результатам выполненного моделирования можно заключить, что обобщенные топографические силы (силы отталкивания от хребта в океанах, силы гравитационного растекания орогенов на континентах) способны сформировать поле напряжений, в главном соответствующее наблюдаемому (по данным «Мировой Карты Напряжений»).

## ***Глава 5. Результаты регионального моделирования***

В данной главе приводятся результаты расчетов для Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и Европы, демонстрирующие возможности регионального моделирования по разработанной методике. Необходимость в региональном моделировании обусловлена тем, что региональные модели распределения напряжений по сравнению с моделями глобальными обладают большей детальностью, что позволяет зафиксировать особенности моделируемых полей, не заметные при более грубом разрешении.

### ***5.1. Черноморско-Кавказско-Каспийский регион***

Одной из проблем в понимании истории развития Черноморской и Каспийской впадин является выяснение причин значительного увеличения скорости погружения этих бассейнов в плиоцен-четвертичное время. В работах (Nikishin et al., 2003; Brunet et al., 2003) для объяснения быстрого плиоцен-четвертичного погружения в пределах Черного и Каспийского морей была предложена модель прогибания литосферы под воздействием сжимающих напряжений, которые, как известно (Милановский, 1991; Милановский, 1996), доминируют в данном регионе начиная с олигоцена вследствие коллизии Аравийской и Евразийской плит. Данная модель была подтверждена численными расчетами, которые показали возможность подбора таких сжимающих сил на границах моделируемого разреза, что вызванное этими силами прогибание упругой пластины, тождественной по свойствам реальной литосфере, будет сопоставимо с наблюдаемыми данными.

В данном разделе представлены результаты расчета термального состояния литосферы Черноморско-Кавказско-Каспийского региона, модели

напряженного состояния и модель синкомпрессионного упругого изгиба реологически неоднородной литосферы под действием внутриплитных напряжений (рис.3).

Для рассчитанных распределений напряжений характерны следующие общие особенности. В Черном и Каспийском морях доминирует обстановка сжатия. В Черном море субмеридиональное сжатие в его восточной части сменяется сжатием СЗ-ЮВ простирания в центральной и западной частях, которое переходит в субмеридиональное растяжение в северо-западной части.

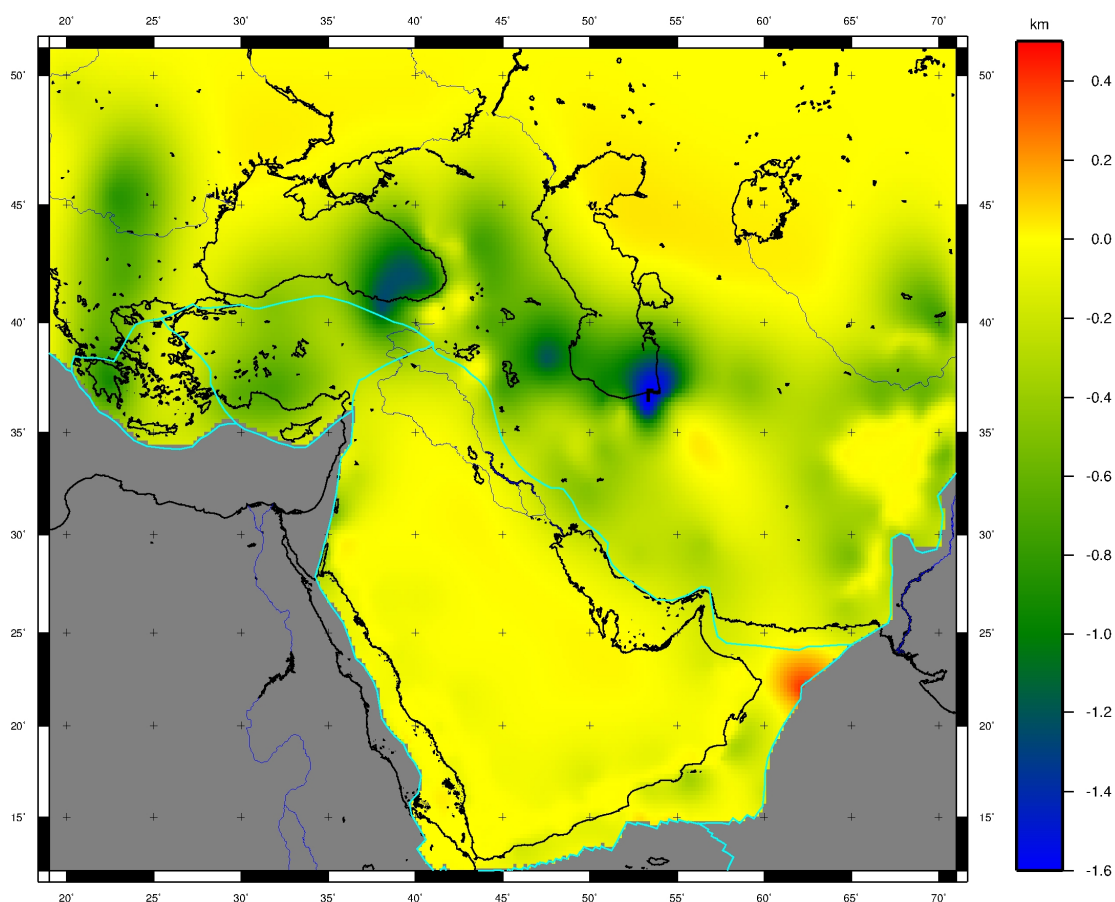


Рис.3. Расчетное распределение амплитуды литосферных складок в Черноморско-Кавказско-Каспийском регионе

Для Каспийского моря характерна достаточно выдержанная ЮЗ-СВ ориентировка главных осей сжатия в Центральной Каспии, сменяющаяся на почти строго меридиональную на севере. Обстановка растяжения приурочена главным образом к области развития орогенов: практически весь хребет Большого Кавказа находится в состоянии СВ-ЮЗ растяжения, причем в восточной части это растяжение сменяется интенсивным сжатием

примерно того же простираения по периферии горного сооружения. Также стоит отметить региональное растяжение в пределах Эгейского моря, которое подтверждается фактическими данными и получено в настоящей работе в результате действия только сил разности гравитационного потенциала без привлечения каких-либо дополнительных источников, связанных с процессами, вызванными субдукцией.

Как видно из рис.3, где показаны амплитуды литосферных складок, возникающие в результате действия рассчитанных напряжений, наибольшие значения величины прогибания литосферы (около 1,5 км) наблюдаются в Восточно-Черноморской и Южно-Каспийской впадинах, именно для которых в работах (Nikishin et al., 2003; Brunet et al., 2003) и была предложена модель синкомпрессионного прогибания под воздействием сжимающих напряжений. Таким образом, выполненные на новом уровне расчеты подтверждают эти ранее опубликованные модели.

## *5.2. Европейский регион*

Геодинамическая позиция Европейского региона определяется тем, что в его пределах друг на друга накладываются два источника напряжений – силы отталкивания от Северо-Атлантического хребта и коллизионные силы, действующие вдоль южной границы Евразийской плиты. При этом важно учитывать, что взаимодействие этих сил происходит на фоне сложного строения разновозрастной литосферы и достаточно расчлененного рельефа территории. Именно в связи с неоднородностью среды в этом регионе при геодинамическом моделировании крайне важным фактором становится высокое разрешение расчетов и детальный учет как можно большего количества данных.

Рассчитано два варианта распределения свойств литосферы, топографических сил и порожденных этими силами напряжений. В одной модели (модель 1) в качестве входных данных по структуре земной коры использовалась глобальная модель Crust2.0 (Mooney et al., 1998; Bassin et al., 2000), имеющая исходное разрешение  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ , которое было увеличено до расчетного ( $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ ) в Европейском районе с помощью линейной интерполяции. Во втором случае (модель 2) была использована локальная для рассматриваемого региона модель структуры коры EuCRUST-07 (Tesauro et al., 2008) с разрешением  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ .

Для обоих рассчитанных модельных распределений напряжений характерна *ориентировка* главных осей, в целом хорошо согласующаяся с полученной в результате визуального (Müller et al., 1992) и количественного (Olaiz et al., 2009) усреднения данных «Мировой Карты Напряжений». Что касается распределения *режимов* деформаций, то оно не противоречит предлагаемому в работе (Olaiz et al., 2009): в пределах континентальной части Европы в целом преобладают близкие к сдвиговым растягивающие деформации, обстановка растяжения проявлена в горных поясах Пиренеев и Альп, Эгейском море и Апеннинском полуострове, а сжатия – в Тирренском, Адриатическом и Ионическом морях.

В целом полученные результаты показывают, что даже в таком сложном с тектонической точки зрения регионе как Европа при детальном учете достаточного количества входной информации компьютерное моделирование может дать хорошо согласующиеся с наблюдаемыми данными результаты.

### *Заключение*

В рамках настоящей работы разработан и реализован в действующем программном коде алгоритм для расчета распределения напряжений (трехмерного, двумерного на плоскости и на сферической поверхности). Построенная трехмерная модель распределения температур и плотностей в литосфере Земли позволила произвести количественную оценку сил разности гравитационного потенциала (обобщенных топографических сил), которые выступали в качестве основного источника при моделировании напряжений в литосфере Земли. Результаты моделирования поля напряжений (в глобальном и региональном масштабах) сравнивались с данными «Мировой Карты Напряжений» с целью оценки качества полученных моделей.

Выполненное в рамках настоящей работы численное моделирование поля напряжений позволило определить роль сил разности гравитационного потенциала в формировании напряженного состояния литосферы Земли. Поскольку распределение напряжений, хорошо согласующееся с наблюдаемым и описывающие все главные структуры литосферы Земли, может быть получено при использовании в качестве источников напряжений только обобщенных топографических сил, можно говорить о значительной роли сил разности гравитационного потенциала в формировании современного поля напряжений.

## ***Список работ, опубликованных по теме диссертации***

### ***Статьи в периодических изданиях (перечень ВАК)***

1. **Коптев А.И.**, Ершов А.В. Роль гравитационного потенциала литосферы в формировании глобального поля напряжений. // Физика Земли. 2010. №12. с. 66-81.
2. **Коптев А.И.**, Ершов А.В. Термальная мощность литосферы: численная модель. // Вестник Московского Университета. Сер.4. Геология. 2011. №5. с. 62-79.
3. **Коптев А.И.**, Ершов А.В. Численное моделирование термального состояния литосферы, распределения внутриплитных напряжений и литосферных складок в Черноморско-Кавказско-Каспийском регионе. // Бюллетень МОИП. Отд. геологии. 2011. т.86. вып.5. с. 3-11.

### ***Тезисы докладов и материалы конференций***

4. **Коптев А.И.** Компьютерная модель напряженного состояния в литосфере Земли. // Материалы XLIII Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». Москва, МГУ, 2-5 февраля 2010 г., т.1, 356-359 с.
5. **Коптев А.И.** Математическое моделирование напряженного состояния в литосфере Земли. // Материалы российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной «Году Планеты Земля» «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых». Москва, МГУ, 6-7 апреля 2009 г., т.1, 47-52 с.
6. **Коптев А.И.** Математическое моделирование поля напряжений в Индо-Австралийской плите. // Материалы XXI молодежной научной конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца. Санкт-Петербург, 18-25 октября 2010 г., т.1, 12-15 с.
7. **Коптев А.И.** Моделирование напряжений и деформаций в литосфере Земли. // Материалы докладов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Секция «Геология». Москва, МГУ, 15-16 апреля 2009 г.
8. **Коптев А.И.** Численное моделирование литосферных напряжений и складок в Индийском океане. // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2010», Секция «Геология». Москва, МГУ, 12-15 апреля 2010 г.

9. **Коптев А.И.** Численное моделирование распределения напряжений в Европе. // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2011», Секция «Геология». Москва, МГУ, 11-15 апреля 2011 г.
10. **Коптев А.И.**, Ершов А.В. Количественная модель термальной мощности литосферы Земли. // Тезисы международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина "Современное состояние наук о Земле". Москва, МГУ, 1-4 февраля 2011 г.
11. **Коптев А.И.**, Ершов А.В. Моделирование поля напряжений и литосферных складок в Черноморско-Кавказско-Каспийском регионе. // Тезисы международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина "Современное состояние наук о Земле". Москва, МГУ, 1-4 февраля 2011 г.
12. **Коптев А.И.**, Ершов А.В. Структура литосферы и распределение напряжений в Европейском регионе. // Тезисы международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина "Современное состояние наук о Земле". Москва, МГУ, 1-4 февраля 2011 г.
13. Ershov A., **Koptev A.** Origination of lithosphere folds as a result of stress field reorganization. // 3rd World Stress Map Conference. Potsdam, 15-17 October 2008, P. 64.
14. Ershov A., Brunet M.-F., **Koptev A.**, Nikishin A. Meso-Cenozoic tectonic history and modelling of the Eastern Black Sea - Western Caucasus and Forecaucasus region. // AAPG European Region Annual Conference. Kiev, Ukraine, 17-19 October 2010.
15. **Koptev A.** Global model of stress field in the Earth's lithosphere based on numerical solution of the force's balance equation. // 1st students international geological conference. Krakow, Poland, 16-19 April 2010, P. 25.
16. **Koptev A.**, Ershov A. Modelling of global lithospheric stress field on the spherical Earth. // 3rd World Stress Map Conference. Potsdam, 15-17 October 2008, P. 77.
17. **Koptev A.**, Ershov A. Modelling of the stress field and buckling in the Black Sea-Caucasus-Caspian region. // AAPG European Region Annual Conference. Kiev, Ukraine, 17-19 October 2010.
18. **Koptev A.**, Ershov A., Levchenko O. Numerical modeling of lithospheric stress field and buckling in the Indian ocean. // EGU General Assembly 2010. Vienna, Austria, 02-07 May 2010, Vol.12, EGU2010-14199, 2010.