

УДК 551.24.02

**Численное моделирование термального состояния литосферы,
распределения внутриплитных напряжений и литосферных складок
в Черноморско-Кавказско-Каспийском регионе**

А.И. Коптев, А.В. Ершов

**(Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,
Геологический факультет)**

Реферат

Построена численная модель термального режима литосферы, поля внутриплитных напряжений и порожденных им литосферных складок в пределах Черноморско-Кавказско-Каспийского региона. Показано, что действие только сил разности гравитационного потенциала литосферы без участия источников сил, связанных с мантийной конвекцией или субдукцией, приводит к формированию обстановок сжатия в областях Черного и Каспийского морей и обстановок регионального растяжения в пределах горных сооружений и в Эгейском море. Показано, что наблюдаемое вращательное движение Аравийской плиты на север и индуцированное им воздействие на поле напряжений литосферы Евразийской плиты может быть объяснено как результат сползания литосферы Аравийской плиты с Красноморского термального свода без привлечения каких-либо других механизмов. Значительные перепады термальной мощности литосферы в регионе (200-300 км в Черноморском и Каспийском бассейнах и около 50 км в пределах горных сооружений) обуславливают наличие существенного изгиба средней линии литосферы, что под действием сжимающих внутриплитных напряжений приводит к формированию общелитосферных складок упругого изгиба. Рассчитанное распределение амплитуд литосферных складок демонстрирует наличие синклиналиподобных впадин в пределах Черного моря и южной части Каспийского моря. Это свидетельствует в пользу гипотезы, объясняющей быстрое плиоцен-четвертичное погружение этих бассейнов в рамках модели синкомпрессионного изгиба упругой пластины.

Ключевые слова: литосфера; поле напряжений; литосферные складки; история погружения; численное моделирование, геодинамика.

Numerical modelling of the lithosphere's thermal state, the stress field and buckling in Black Sea-Caucasus-Caspian region

A.I. Koptev, A.V. Ershov

Abstract

It was carried out numerical modelling of lithosphere's thermal state, intraplate stress field and induced lithospheric folds in the Black sea-Caucasus-Caspian region. It was shown that action of only gravitational potential difference forces (without any forces produced by mantle convection or subduction) leads to formation of compressional environments in the Black sea and Caspian sea areas and extensional environment in the orogenic areas and in the Egean sea region. It is demonstrated, that observed rotational northward movement of Arabian plate and induced influence on lithospheric stress field of Eurasian plate could be explained as a result of Arabian lithosphere sliding ("ridge push") from Red sea thermal dome without involvement of any other mechanisms. Significant difference in thermal lithosphere thickness in the region (200-300 km in the Black sea and Caspian sea basins and about 50 km in the orogenic areas) lead to considerable flexure of the effective middle surface of the lithosphere, which results in formation of whole-lithospheric elastic bending folds under the action of intraplate stresses. Computed distribution of lithospheric folds magnitudes shows an occurrence of synclinal depressions in the area of Black sea and South Caspian sea. This testifies to the hypothesis, explaining rapid Pliocene-Quaternary subsidence of these basins as a result of syncompressional bending of lithosphere in the framework of thin elastic plate model.

Keywords: lithosphere; stress field; buckling; burial history; numerical modelling; geodynamics.

Введение

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. Альтернативным объяснением быстрого погружения в осадочных бассейнах является точка зрения, согласно которой его главной причиной является уплотнение пород основного состава в нижней части коры вследствие перехода базальта (габбро) в гранатовые гранулиты и эклогит (Артюшков, 1993; Артюшков, 2005; Артюшков, Егоркин, 2005; Артюшков, 2007; Артюшков, 2010).

В настоящей работе представлены результаты расчета термального состояния литосферы Черноморско-Кавказско-Каспийского региона (рис.1), две модели напряженного состояния (рис.2-4) и модель синкомпрессионного упругого изгиба реологически неоднородной литосферы под действием внутриплитных напряжений (рис.6). Расчет термального состояния литосферы позволяет выполнить оценку обобщенных топографических сил, приводящих к возникновению внутриплитных напряжений, которые, в свою очередь, порождают литосферные изгибы. Общая методика моделирования и алгоритмы расчета совпадают с теми, которые были уже использованы для построения глобальных моделей поля напряжений литосферы Земли (Коптев, Ершов, 2010). Необходимость в региональном моделировании обусловлена тем, что региональные модели распределения напряжений и литосферных складок по сравнению с моделями глобальными обладают большей детальностью, что позволяет зафиксировать особенности моделируемых полей, не заметные при более грубом разрешении.

Произведенное компьютерное моделирование упругого изгиба реологически неоднородной литосферы под действием внутриплитных напряжений дало возможность получить количественную оценку величины этого изгиба под действием не произвольно подобранных сил, как это было сделано в работах (Nikishin et al., 2003; Brunet et al., 2003), а напряжений, возникающих в результате действия тектонических сил, имеющих реальную физическую

природу (сил разности гравитационного потенциала литосферы). Полученное в результате этих расчетов распределение изгиба литосферы позволяет оценить обоснованность модели быстрого погружения осадочных бассейнов под воздействием тектонических напряжений.

1. Методика

Расчет термального состояния литосферы выполнялся по методике, описанной в работе (Коптев, Ершов, 2011), которая предполагает, что подошва литосферы совпадает с изотермой 1300°C. При этом распределение температур в континентальной литосфере полагалось стационарным, а в океанической - рассчитывалось в рамках модели остывающего полупространства. Введение в эти расчеты изостатической поправки позволило снизить степень влияния на итоговые результаты таких факторов как нестационарность теплового режима, неточность знаний о величине поверхностного теплового потока, коэффициента теплопроводности и параметров, определяющих теплогенерацию пород.

Моделирование поля напряжений базировалось на оригинальном алгоритме расчета двумерного поля напряжений литосферы Земли, предполагающем численное решение двумерного уравнения равновесия упруго-пластической среды методом конечных объемов с использованием явной консервативной численной схемы в Лагранжевых координатах. Детально методика вычисления двумерного поля напряжений описана в работе (Коптев, Ершов, 2010). Согласно принятой методике расчета в качестве источников напряжений в литосфере были приняты силы разности гравитационного потенциала (так называемые обобщенные топографические силы), величина которых определялась из разности вертикальных интегралов литостатического давления в латерально разнесенных колонках (Artyushkov, 1973; Артюшков, 1979). Этот подход к был успешно применен к построению глобальных моделей распределения напряжений (Коптев, Ершов, 2008; Коптев, 2010; Коптев, Ершов, 2010).

Расчет порожденной этими напряжениями литосферной складчатости, глобальная модель которой представлена в работе (Ershov, Koptev, 2008), сводился к численному решению методом конечных разностей дифференциального уравнения изгиба упругой плиты (Ershov, 1999; Коротаев, Ершов, 1999; Коротаев и др., 2002; Коротаев и др., 2004).

Разработанные подходы предполагают использование следующих входных данных: топография (цифровая модель рельефа ETOPO5 (National Geophysical Data Center, 1988)), структурно-вещественный состав земной коры (по данным модели CRUST 2.0 (Bassin et al., 2000; Mooney et al., 1998)), гравитационные аномалии (гравитационная модель EGM96

(Lemoine et al., 1998)), возраст океанического дна (Muller et al., 1997), распределение среднегодовых температур на поверхности Земли (Leemans et al., 1991; Lieth et al., 1972).

В настоящей работе представлены две модели распределения напряжений в пределах рассматриваемого региона. Общие черты и различия в постановке начальных и граничных условий, а также области расчетов для этих моделей состоят в следующем. Для обеих моделей использовались стандартные для разработанной методики расчета напряжений начальные условия: нулевые смещения, скорости смещений и напряжения. «Фиксированная» северная граница области расчетов выступала в качестве условия граничного. Под «фиксированной» границей в данном случае понимаются нулевые смещения и скорости смещений во всех узлах сетки, принадлежащих этой границе, на всех шагах расчета. Южная, западная и восточная границы при этих вычислениях полагались «свободными», т.е. при расчете баланса сил в принадлежащих этим границам узлах, напряжения, действующие извне расчетной области, принимались нулевыми. Расчетная область первой модели (модель 1) была выбрана следующим образом: ее южная граница соответствовала южному обрамлению Аравийской плиты в центральной части и северной границе Африканской и Индийской плит на западе и востоке соответственно; западная и восточная – долготам 18° в.д. и 72° в.д.; северная – широте 52° с.ш. Разрешение выполненных расчетов составляло $0,2^{\circ} \times 0,2^{\circ}$. Границы литосферных плит брались по данным цифровой модели П. Берда (Bird, 2003). Включение в область расчетов всей Аравийской плиты необходимо для того, чтобы учесть силы сползания с термального свода Красноморской рифтовой системы при определении распределения напряжений в Черноморско-Каспийском регионе. Вторая модель (модель 2) отличалась только тем, что в ней из области рассмотрения была исключена Аравийская плита, т.е. южная граница расчетной области проводилась в центральной части по южной границе не Аравийской, а Евразийской плиты.

2. Результаты

На рис.1 приведены результаты расчетов термальной мощности литосферы. Расчет мощности литосферы с одной стороны необходим для оценки величин обобщенных топографических сил, а с другой имеет самостоятельную ценность применительно к пониманию геодинамики Черноморско-Кавказско-Каспийского региона. Так, например, можно отметить, что наибольшую мощность (200-300 км) литосфера имеет в Черноморском и Каспийском бассейнах, а также в восточной части зоны Предкавказских краевых прогибов, а наименьшую (0-50 км) – в пределах горных областей (например, горного сооружения Большого Кав-

каза). Столь значительный контраст (до 300 км) мощности литосферы в смежных областях приводит к значительному изгибу в пространстве ее эффективной средней линии (Ershov, 1999; Ершов, 2002), что при наличии сколь-нибудь значимых внутриплитных напряжений может привести к дополнительному изгибу литосферы под действием этих напряжений и, таким образом, вызвать образование литосферных складок.

Рассчитанные в рамках настоящей работы поля напряжений представлены на рис.2 (модель 1) и рис.3 (модель 2). Видно, что полученные распределения напряжений в целом схожи (что определяется большой степенью общности источников напряжений, начальных и граничных условий), но имеются и некоторые различия.

Общие для первой и второй моделей черты распределения расчетных напряжений следующие. 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. Для Каспийского моря характерна достаточно выдержанная ЮЗ-СВ ориентировка главных осей сжатия в Центральном 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 простирания 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.

Таким образом, рассчитанные модели слабо отличаются друг от друга в пределах практически всего Черноморско-Кавказско-Каспийского региона. Исключение представляет лишь область Южно-Каспийской впадины (рис.4а, рис.4б), где поля напряжений, полученные в рамках разных моделей, имеют различные ориентировки главных осей сжатия.

Распределение напряжений модели 2 (не учитывающей влияния Аравийской плиты), характеризуется субширотной ориентировкой осей сжатия в южной части Каспийского моря и ЗСЗ-ВЮВ вдоль южного берега Каспийского моря (рис.4б). Включение в расчеты Аравийской плиты (модель 1) приводит к изменению этих ориентировок на СВ-ЮЗ или ВСВ-ЗЮЗ в южной части Каспийского моря и на субширотные вдоль его южного берега (рис.4а).

Сравнение полученных результатов с наблюдаемыми в Южном Каспии напряжениями (решения фокальных механизмов по данным Мировой Карты Напряжений (Heidbach et al.,

2008)) показывает, что поле напряжений модели 1 гораздо лучше согласуется с фактическими данными по сравнению с распределением напряжений из модели 2. Несколько замеров базы данных Мировой Карты Напряжений отчетливо показывают наличие СВ-ЮЗ ориентировок главных осей сжатия в южной части Каспийского моря, что находит свое отражение в первой модели, но не проявлено во второй. На рис.4а и рис.4б серыми линиями показаны ориентировка проекций на горизонтальную плоскость главных осей сжатия для взбросовых и сдвиговых режимов деформаций по данным Мировой Карты Напряжений. Важно отметить, что в Мировой Карте Напряжений (Heidbach et al., 2008) в пределах показанной на этих рисунках области не имеется замеров, представляющих иные режимы деформаций (напр., сбросы или сбросо-сдвиги). Данный факт подтверждает наличие полученной в обеих рассчитанных моделях (модель 1 и модель 2) обстановки сжатия в Южном Каспии.

Как говорилось выше, распределения напряжений в моделях 1 и 2 были сформированы одними и теми же источниками – обобщенными топографическими силами. Разница заключалась только в том, что в первом случае учитывалось суммарное действие сил разности гравитационного потенциала от Аравийской плиты на Черноморско-Кавказско-Каспийский регион учитывалось, а во втором – нет. Полученные в этих моделях различные распределения напряжений для южной части Каспийского моря свидетельствуют о том, что сами по себе локальные силы разности гравитационного потенциала литосферы в этом районе должны приводить к формированию обстановки субширотного сжатия (что и показывает модель 2); однако, за счет того, что вследствие раскрытия Красного моря Аравийская плита совершает вращательное движение против часовой стрелки, в области Южного Каспия она оказывает сжимающее воздействие практически субмеридионального направления (см. направления движения Аравии относительно Евразии по данным GPS (Reilinger et al., 2006)). Таким образом, субширотное сжатие, вызванное локальными топографическими силами, накладываясь на субмеридиональное движение Аравийской плиты, переходит в сжатие СВ-ЮЗ простирания, которое отчетливо фиксируется в данном регионе по данным Мировой Карты Напряжений (Heidbach et al., 2008). Напомним, что при расчетах как первой, так и второй моделей никаких источников типа сил мантийных течений, которые по некоторым представлениям вовлекают в движение Аравийскую плиту, формируя наблюдаемое распределение скоростей движения земной коры, не учитывалось.

Выполненные численные эксперименты показали, что вращательное движение Аравийского полуострова относительно Евразийского континента, четко фиксируемое по данным GPS (Reilinger et al., 2006) и влияющее на распределение напряжений в приграничных с Аравийской плитой частях Евразии (в частности, как показано в настоящей работе, в Южном

Каспии), может быть объяснено в рамках модели соскальзывания Аравии с термального свода Красноморской рифтовой системы, без привлечения каких-либо мантийных источников этого движения. Следует также отметить некоторую ограниченность любого регионального моделирования, вследствие невозможности корректно учесть воздействие прилегающих к рассматриваемому району областей.

Результаты расчетов эффективной средней поверхности литосферы и амплитуды литосферных складок, возникающих в результате действия полученных в модели 1 напряжений, показаны на рис.5 и рис.6 соответственно. Наибольшие значения величины прогиба 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 прогиба под воздействием сжимающих напряжений. Таким образом, выполненные на новом уровне расчеты подтверждают эти ранее опубликованные модели.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты расчета термального состояния литосферы Черноморско-Кавказско-Каспийского региона (рис.1), модель напряженного состояния литосферы (рис.2-4) и модель синкомпрессионного упругого изгиба реологически неоднородной литосферы под действием внутриплитных напряжений (рис.6). Расчеты выполнялись на сетке $0,2^{\circ} \times 0,2^{\circ}$. В качестве главных источников напряжений выступали силы разности гравитационного потенциала.

Согласно результатам моделирования Черное и Каспийское море находятся в обстановке сжатия; региональное растяжение проявлено главным образом в пределах горных сооружений и в регионе Эгейского моря (причем это растяжение является результатом действия лишь сил разности гравитационного потенциала литосферы и не требует привлечения источников сил, связанных с конвекцией в мантии или субдукцией).

Более точное совпадение результатов расчетов с фактическими данными, полученное для южной части Каспийского моря в модели, учитывающей влияние Аравийской плиты (рис.2, 4а), по сравнению с моделью, рассчитанной без учета этого влияния (рис.3, 4б), говорит о существенной роли сжимающего воздействия Аравии на Евразию в формировании регионального поля напряжений в литосфере последней. Однако, тот факт, что данное воздействие было зафиксировано в модели без привлечения каких-либо иных источников кроме сил разности гравитационного потенциала литосферы, порожденных плотностными литосферными неоднородностями, позволяет объяснить наблюдаемое вращательное движение Ара-

вийской плиты в рамках теории его сползания с Красноморского термального свода без привлечения других механизмов.

Распределение амплитуд литосферных складок, возникающих в рассматриваемом регионе как результат действия расчетных напряжений, демонстрирует наибольшие величины прогибания в пределах восточной части Черного моря и Южно-Каспийской впадины. Это хорошо согласуется с данными о быстром плиоцен-четвертичном погружении в этих районах и подтверждает предложенную ранее модель, согласно которой это погружение связано с синкомпрессионным изгибом литосферы.

Литература

Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука. 1979.

Артюшков Е.В. Глубинный механизм образования крупных нефтегазоносных бассейнов и поиск новых бассейнов по геодинамическим признакам // Материалы XLIII Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». Москва. МГУ. 2-5 февраля 2010 г. т. 1. 13-18 с.

Артюшков Е.В. Механизмы образования Баренцевоморского прогиба // Геология и геофизика. 2005. т. 46. № 7. с. 698-711.

Артюшков Е.В. Образование сверхглубокой впадины в Южном Каспии вследствие фазовых переходов в континентальной коре // Геология и геофизика. 2007. т. 48. № 12. с. 1289-1306.

Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука. 1993. 456с.

Артюшков Е.В., Егоркин А.В. Физический механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Прикаспийская впадина // Докл. РАН. 2005. т. 400. № 4. с. 494-499.

Ершов А.В. Эффективная упругая толщина и эффективная средняя поверхность литосферы // Материалы Всероссийской научной конференции «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков». т.3. Геофизика. Москва. 2002 г. 196-197 с.

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.

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". 1-4 февраля 2011 г. Москва. МГУ.

Коптев А.И., Ершов А.В. Роль гравитационного потенциала литосферы в формировании глобального поля напряжений // Физика Земли. 2010. №12. с. 66-81.

- Коротаев М.В., Ершов А.В.* Осадочные бассейны с океанической корой в обстановке сжатия – моделирование погружения Южного Каспия, Черного и Баренцева морей // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма. Материалы XXXII тектонического совещания. Москва. МГУ. 1999 г. т.1. 325-327 с.
- Коротаев М.В., Ершов А.В., Никишин А.М.* Осадочные бассейны в обстановке сжатия: моделирование фаз быстрого погружения Южно-Каспийского, Черноморского и Баренцевоморского бассейнов // Материалы Всероссийской научной конференции «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков». т.1. Тектоника, стратиграфия, литология. Москва. 2002 г. 190-191 с.
- Коротаев М.В., Ершов А.В., Фокин П.А.* Синкомпрессионная литосферная складчатость Восточно-Европейской платформы // Вестник Московского Университета. сер.4. Геология. 2004. №4. 3-10 с.
- Милановский Е.Е.* Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М.: Московский Университет. 1996. 448 с.
- Милановский Е.Е.* Геология СССР. Часть 3. Средиземноморский и Тихоокеанский подвижные пояса. Заключение. М.: Московский Университет. 1991. 272 с.
- National Geophysical Data Center.* ETOPO-5 bathymetry and topography data. // Data Announc. 88-MGG-02. NOAA. Boulder. Colorado. 1988.
- Artyushkov E.V.* Stresses in the lithosphere caused by crustal thickness inhomogeneities // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, P. 7675-7708.
- Bassin C., Laske G., Masters G.* The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // EOS Trans AGU. 2000. 81. F. 897.
- Bird P.* An updated digital model of plates boundaries // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. An electronic journal of the Earth sciences. 2003. Vol. 4 (N3). 1027. doi: 10.1029/2001GC000252. ISSN: 1525-2027.
- Brunet M.-F., Korotaev M.V., Ershov A.V., Nikishin A.M.* The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling // Sedimentary Geology. 2003. V. 156. P. 119-148.
- Ershov A.V.* Effective middle surface of lithosphere // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 173. P. 129-141.
- Ershov A.V., Koptev A.I.* Origination of lithosphere folds as a result of stress field reorganization // 3rd World Stress Map Conference. Potsdam. 15-17 October 2008. P. 64.
- Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfeß D., Müller B. (eds.)* The World Stress Map – Release 2008. Commission for the Geological Map of the World. 2008. Paris.

- Koptev A.I., Ershov A.V.* Modelling of global lithospheric stress field on the spherical Earth // 3rd World Stress Map Conference. Potsdam. 15-17 October 2008. P. 77.
- Leemans R., Cramer W.* The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid // Research Report RR-91-18. International Institute of Applied Systems Analyses. Laxenburg. November 1991. P. 61.
- Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R.* The Development of the Joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96 // NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt. Maryland. 20771. USA. July 1998.
- Lieth H.* Modelling the primary productivity of the earth. Nature and resources // UNESCO. 1972. VIII. 2:5-10.
- Mooney A., Laske G., Masters G.* Crust 5.1: a global crustal model at 5x5 degrees // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 727-747.
- Muller R.D., Roest W.R., Royer J.-Y., Gahagan L.M., Sclater J.G.* Digital isochrons of the ocean age. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102 (B2). P. 3211-3214.
- Nikishin A.M., Korotaev M.V., Ershov A.V., Brunet M.-F.* The Black Sea basin: tectonic history and Neogene–Quaternary rapid subsidence modelling // Sedimentary Geology. 2003. V. 156. P. 149-168.
- Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., ArRajehi A., Paradisis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrotsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G.* GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111 (B05411). doi:10.1029/2005JB004051.

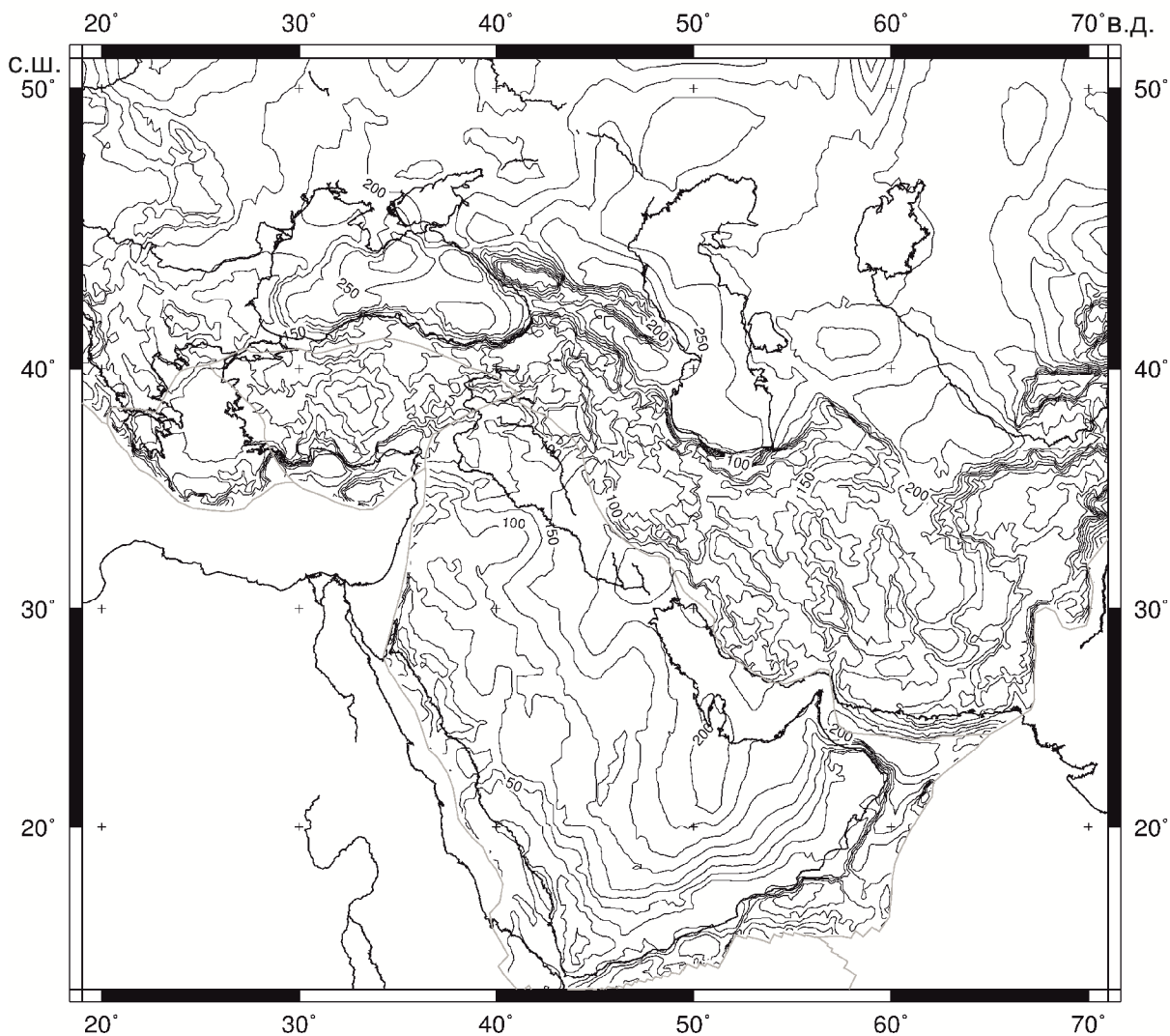


Рис.1

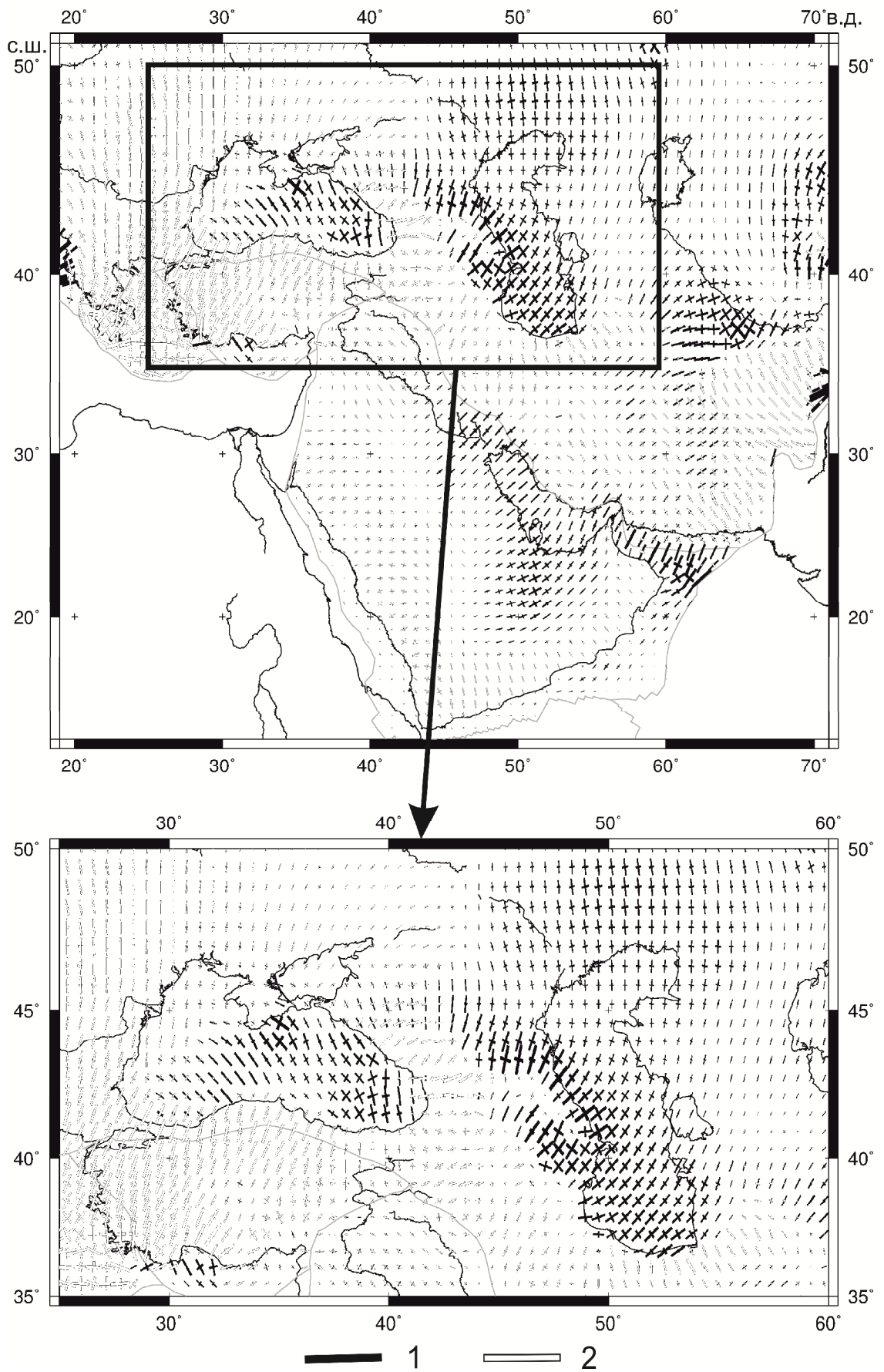


Рис.2

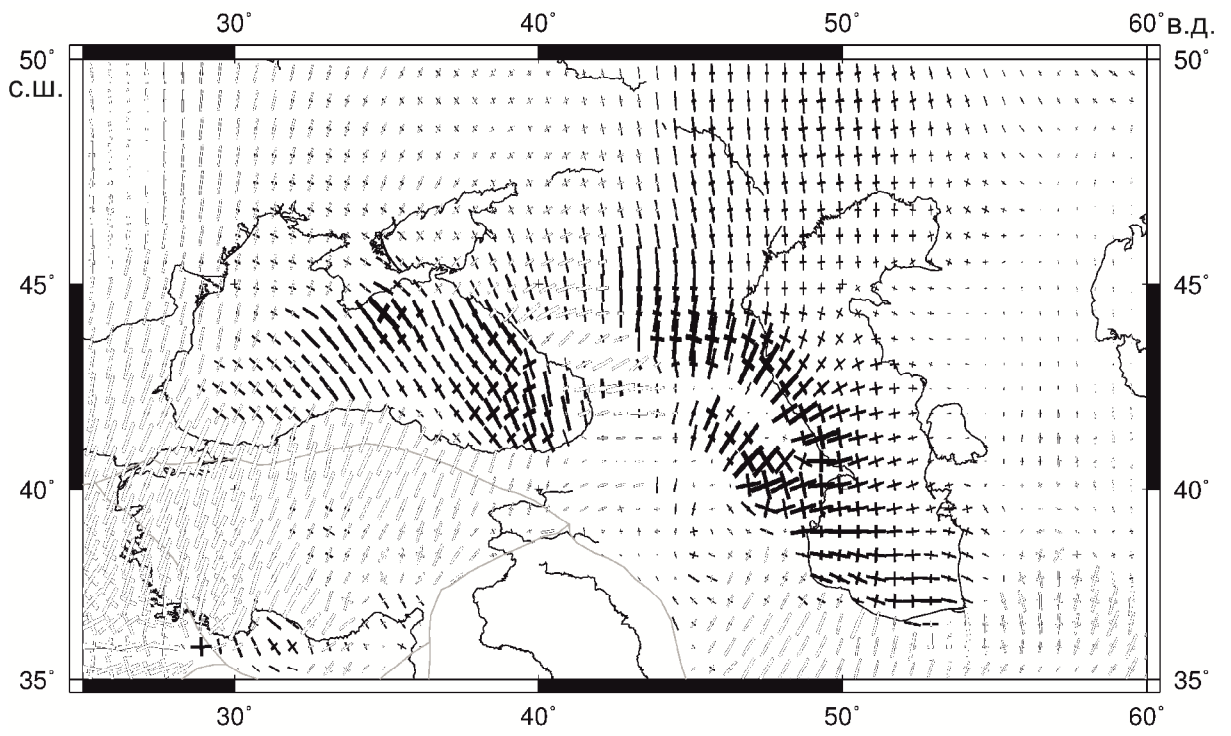


Рис.3

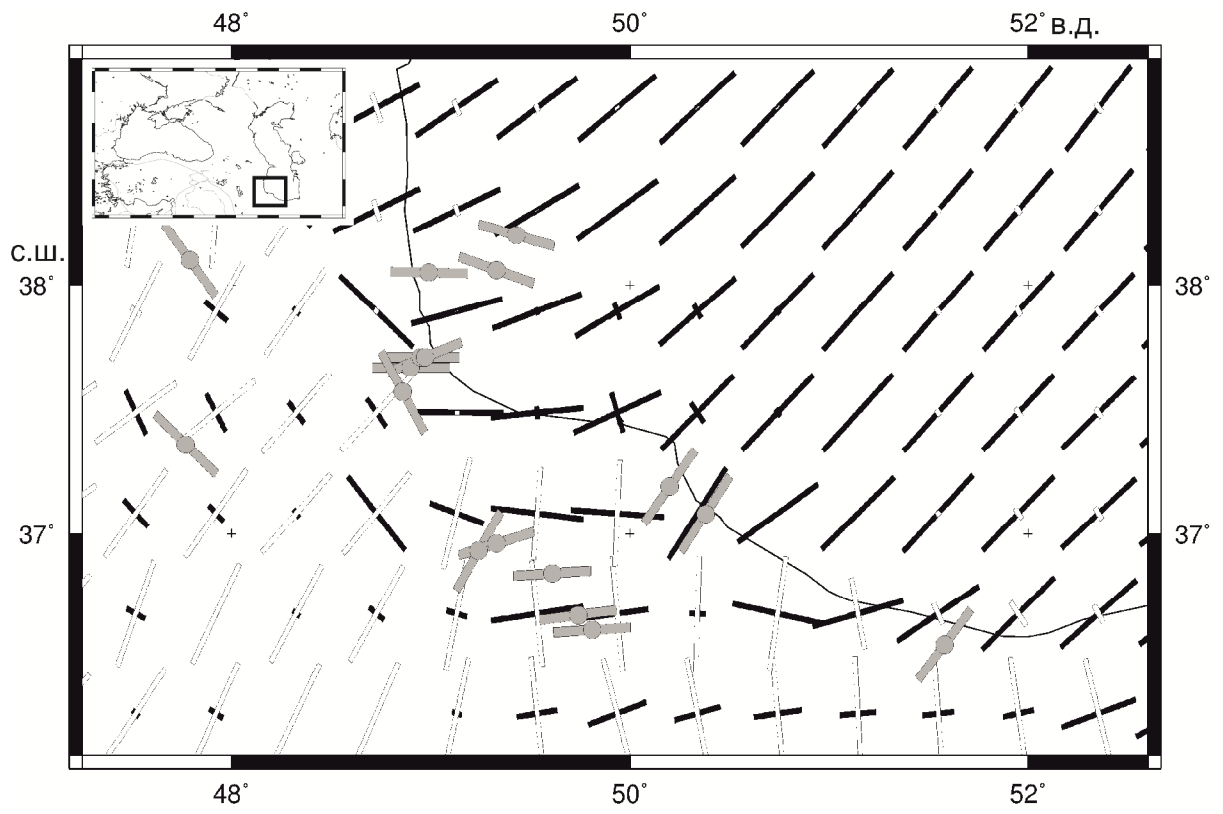


Рис.4а

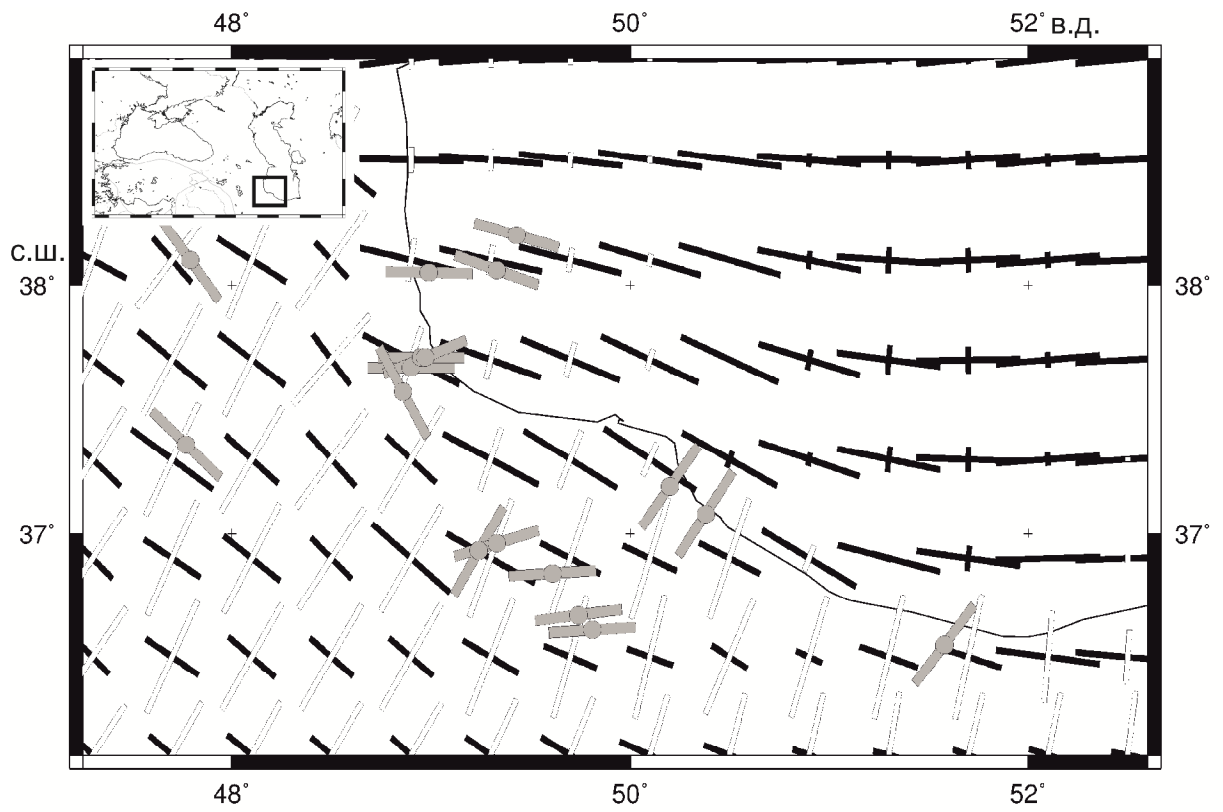


Рис.46

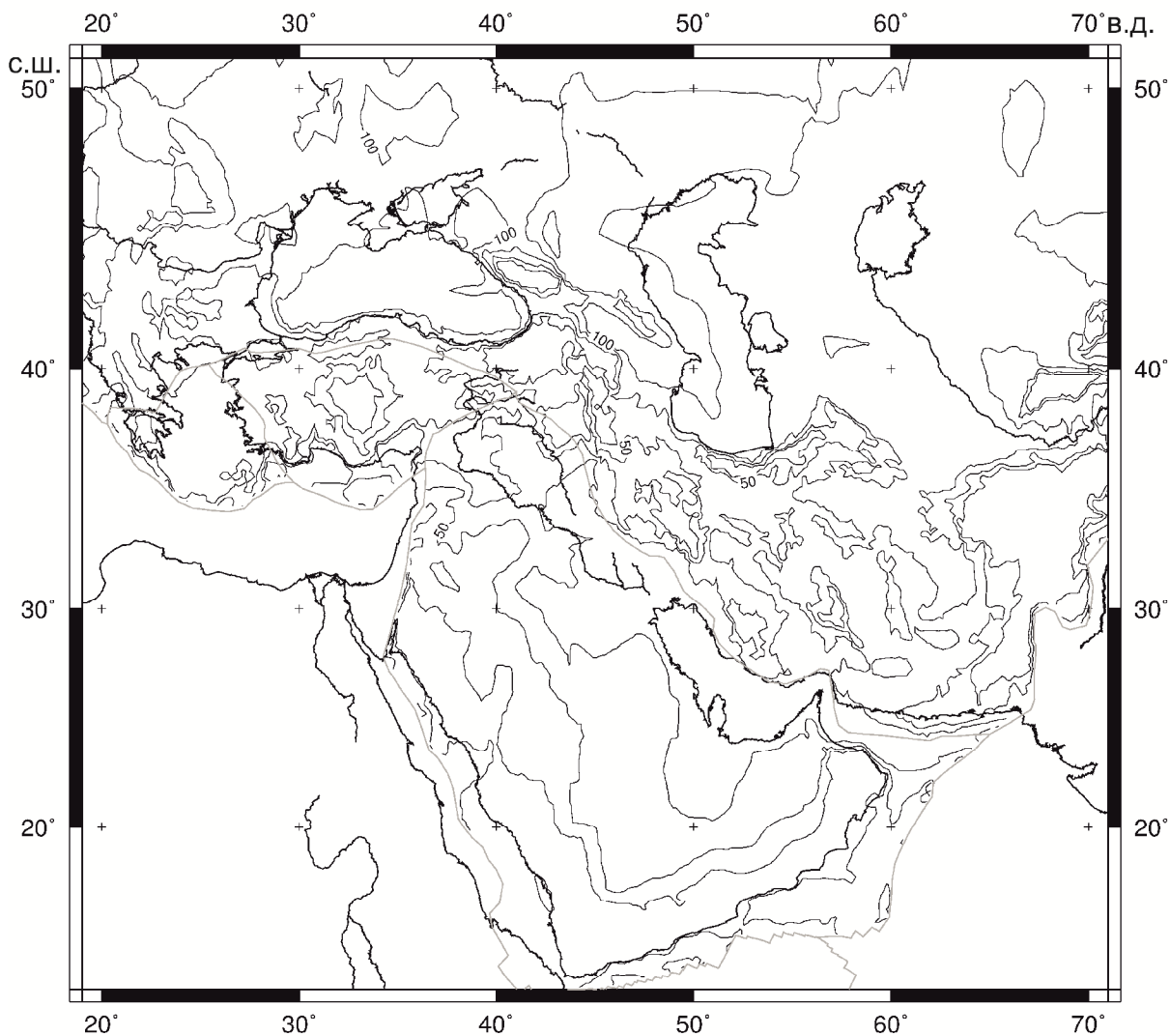


Рис.5

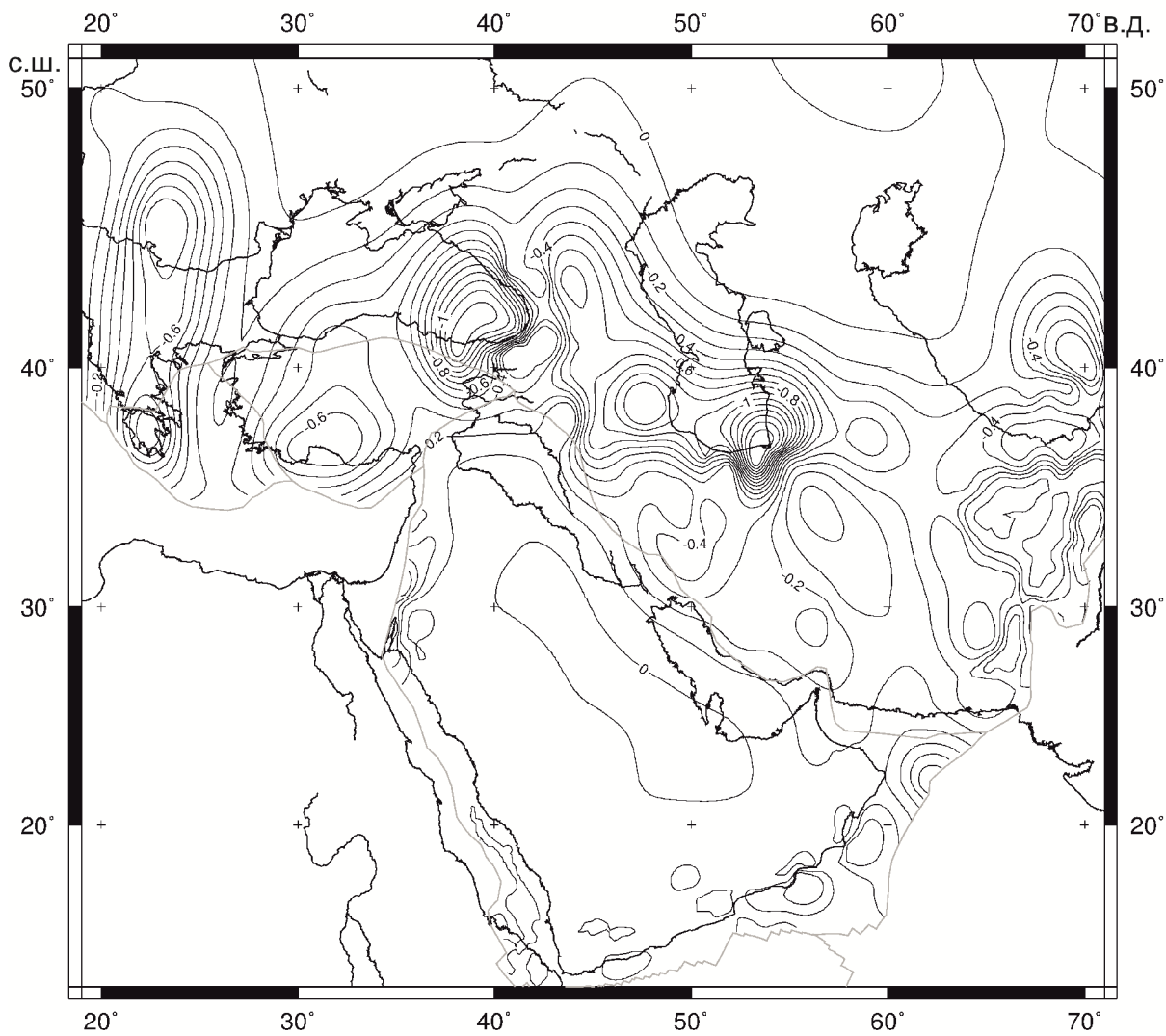


Рис.6

Подрисуночные подписи

Рис.1. Расчетная термальная мощность литосферы Черноморско-Южнокаспийского региона.

Рис.2. Расчетное распределение напряжений при включении в расчеты всей рассматриваемой области (модель1)

1 – сжатие, 2 – растяжение

Рис.3. Расчетное распределение напряжений при исключении из области расчетов Аравийской плиты (модель 2)

Рис.4а. Модель 1: распределение напряжений в Южном Каспии

Рис. 4б. Модель 2: распределение напряжений в Южном Каспии

Серые линии – проекции на горизонтальную плоскость осей сжатия взбросовых и сдвиговых режимов деформации по данным Мировой Карты Напряжений (Heidbach et al., 2008)

Рис.5. Расчетная эффективная средняя поверхность литосферы

Рис.6. Расчетная амплитуда литосферных складок