

УДК 550.312:551.24

М.М. Довбнич¹, К.Ф. Тяпкин¹

ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИКИ ЧЕРНОМОРСКОЙ ВПАДИНЫ В ПОЛЯХ НАПРЯЖЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАРУШЕНИЕМ ГЕОИЗОСТАЗИИ

Рассмотрены методика и результаты оценки напряжений в тектоносфере, обусловленных нарушением геоизостазии, для территории Азово-Черноморского региона. Обсуждается возможность использования полей напряжений геоизостатической природы как дополнительного критерия при геотектонических построениях и сейсмотектоническом районировании.

Предисловие

В 1984 г. в г. Алматы состоялась Всесоюзная школа-семинар “Теория и практика геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий”, в которой мне пришлось принимать участие. По предложению руководства Института геологических наук АН Каз.ССР я сделал в этом институте доклад на тему: “Новая ротационная гипотеза структурообразования и основные ее следствия”. Здесь произошла первая встреча с Евгением Ивановичем Паталахой. Начиная с этого времени, наши научные контакты практически не прекращались, а после его переезда в Киев — стали систематическими.

Евгений Иванович был активным генератором новых научных идей в геотектонике, а главное, он обладал огромной эрудицией, которая позволяла ему в широком спектре новых предложений выделять имеющие реальное научное значение. Он весьма толерантно относился к научным идеям своих коллег. Так позволяют себе поступать только настоящие ученые.

В 2000 г. в рецензии на учебник “Физика Земли”, в котором в качестве основной геотектонической концепции принята “Новая ротационная гипотеза структурообразования в тектоносфере”, Евгений Иванович писал [5]: *Сегодня уже более или менее очевидно, что учет влияния космической энергетики на геологический процесс эволюции тектоносфере столь же необходим, как и учет излюбленной нами, как бы “домашней”, эндогенной энергетики. Только симметричный учет обеих энергетик способен вывести нас на путь поиска новых, принципиально более плодотворных геотектонических (а точнее — космогенных) концепций. Одну из таких интересных и, я бы сказал, довольно смелых попыток предпринял К.Ф.Тяпкин в своей недавно увидевшей свет крупной, хорошо изданной монографии, написанной в очень удачной, лапидарной форме учебного пособия [8]. Книгу отличает внутренняя целостность замысла, ясность логических линий, стройность построения, простой и понятный язык, сви-*

детельствующий о многом. Организующую роль сыграла здоровая идея расшифровки конкретных форм участия разломной тектоники в ведущих геологических процессах на примерах Украины, Сибири, Средней Азии, Урала и др. регионов, где в свое время работал он лично или работали его ученики — с одной стороны, и связи разломной тектоники в структурно-историческом аспекте с физическими полями Земли — с другой. Для этого им разработан ряд специальных (и в том числе диагностических) методик аналитической обработки и геологической интерпретации геофизических данных, что позволило в конечном итоге выйти на широкие геолого-генетические системные обобщения в контексте физики Земли”.

В 2000 г. Спецсовет при Национальном Горном университете выдвинул Евгения Ивановича официальным оппонентом по диссертационной работе моего аспиранта М.М. Довбнича “Обусловленность геологических процессов вариациями ротационного режима Земли”. Диссертация М.М. Довбнича была посвящена количественному обоснованию Новой ротационной гипотезы структурообразования в тектоносфере [10]. В заключение своего довольно эмоционального отзыва Евгений Иванович отметил: *Работа Михаила Михайловича Довбнича представляет собой не просто результативное, а глубоко аналитическое исследование, изящно выполненное целиком в компьютерном исполнении. На мой взгляд, это образец полноценной современной кандидатской диссертации, которая могла бы украсить имидж ученого учреждения самой высокой марки.*

Настоящая статья посвящена светлой памяти уважаемого коллеги члена-корреспондента НАН Украины Евгения Ивановича Паталахи. Выбор тематики статьи обусловлен тем, что она входила в круг научных интересов Евгения Ивановича [6]; для решения проблемы геодинамики Черноморской впадины использовано явление *геоизостази*, понятие о котором введено в научную литературу на 27^й сессии МГК [7, 13]. Геоизостазия является основой Новой ротационной гипотезы структурообразования в тектоносфере Земли, отношение Евгения Ивановича к которой следует из приведенного выше.

К.Ф. Тяпкин

Черноморская впадина является одним из интереснейших в неотектоническом отношении регионов, изучению которого посвящены многочисленные публикации. Высокая степень геолого-геофизической изученности позволяет сделать ряд заключений относительно строения и развития Черноморской впадины [3, 7]:

— Впадина — относительно молодая структура, для которой характерно погружение в последние 65 млн лет.

— Земная кора впадины характеризуется более чем двухкилометровым слоем воды, мощным (до 14 км в Западной и 13 км в Восточной котловинах) слоем осадков, относительно маломощной кристаллической частью, лишенной “гранитного” слоя, и малой глубиной залегания поверхности Мохоровичича.

Относительно происхождения и развития Черноморской впадины имеются различные гипотезы, наиболее полный обзор которых дан в работе

[11]. Кратко они сводятся к следующему. Гипотезы происхождения Черноморской впадины получили развитие в работах В.В. Белоусова, С.И. Субботина, М.В. Муратова, А.В. Чекунова и др. Ряд исследователей рассматривает Черноморскую впадину как новообразованную структуру, возникшую в результате воздействия на земную кору следующих глубинных процессов: уплотнение, оседание и преобразование “гранитного” слоя в “базальтовый”, а последнего — в мантию (процесс базификации коры); растяжение и перемещение материала в стороны, которое сопровождается разрывом “гранитного” и обнажением “базальтового” слоя или освобождением пространства, заполняющегося базальтовым субстратом новой генерации; вертикальный подъем и внедрение в литосферу одного или нескольких астенолитов (мантийных диапиров).

Другие приходят к выводу, что Черноморская впадина — реликт “первичного”, позднедокембрийско-палеозойского океана Тетис. Имеют место попытки объяснения возникновения Черноморской впадины с позиции тектоники плит. Таким образом, несмотря на хорошую изученность, на сегодняшний день не существует единого мнения о природе возникновения Черноморской впадины и ее геодинамике. Нам представляется, что дополнительную возможность пролить свет на процессы, повлекшие за собой формирование впадины и определяющие ее развитие, может дать анализ нарушений *геоизостазии* Азово-Черноморского региона.

Как уже указывалось выше, на 27^а сессии МГК была предложена новая модель равновесного состояния вращающейся Земли, названного *геоизостазией*. В основе этой модели лежат следующие условия: 1) равный вес секторов Земли, вырезанных одинаковыми центральными телесными углами; 2) такое распределение плотности в Земле, при котором значение ее потенциала в любой точке (включая точки дневной поверхности) соответствовали бы уровневным поверхностям, вычисленным в предположении, что оболочки вращающейся Земли стали жидкими. Следовательно, критерием уравниваемости Земли в каждой точке могут служить как отклонения геоида разного порядка от эллипсоида — фигуры равновесия вращающейся жидкости — обусловленные неоднородностями тектонической природы внутри планеты, так и отклонения эквипотенциальной поверхности потенциала силы тяжести под действием вариаций скорости вращения, изменения положения оси вращения в теле Земли, лунно-солнечных приливов и пр. В первом случае информацию о величине отклонений можно получить по данным спутниковых наблюдений и наземным гравиметрическим измерениям; во втором — главным образом — путем математического моделирования.

Таким образом, в общем случае нарушение геоизостазии можно рассматривать как функцию координат и времени. Наличие отклонений геоида от эллипсоида будет приводить к возникновению напряжений, направленных на выравнивание этих отклонений [1, 10]. Имея данные о величине нарушения геоизостазии в пространстве и времени, можно оценить величины напряжений в тектоносфере, связанные с этими нарушениями.

Ниже рассмотрен алгоритм и результаты расчета полей напряжений, обусловленных нарушениями геоизостазии, проявляющимися в виде анома-

лий геоида. В настоящее время изучение орбит искусственных спутников Земли значительно расширило наши знания об аномалиях геоида. В марте 2002 с космодрома Плесецк в рамках проекта GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) на орбиту Земли было выведено два спутника, совместно разработанных NASA и геофизиками Германии [12]. Основная цель данного проекта — исследование гравитационного поля Земли и климата на нашей планете. Получаемая в рамках проекта GRACE модель аномалий геоида является наиболее точной на сегодняшний день. Имеющаяся в свободном доступе база данных аномалий геоида послужила основой для выполнения настоящей работы. Исследования выполнялись для территории, охватывающей Азово-Черноморский регион и сопредельные площади.

Остановимся более детально на особенностях пространственного распределения аномалий геоида для Азово-Черноморского региона (рис. 1). Для рассматриваемой территории величина аномалий геоида меняется в интервале от 5 до 41 м. Непосредственно для территории Черноморской впадины аномальные значения убывают с запада на восток от 39 до 13 м. Монотонное изменение значений аномалий геоида осложнено положительными и отрицательными аномалиями более высокого порядка.

При расчете тензора напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии, были сделаны следующие допущения: сферичностью Земли пренебрегалось, задача решалась для изотропного упругого полупространства в системе прямоугольных координат, в которой ось X совпадает с направле-

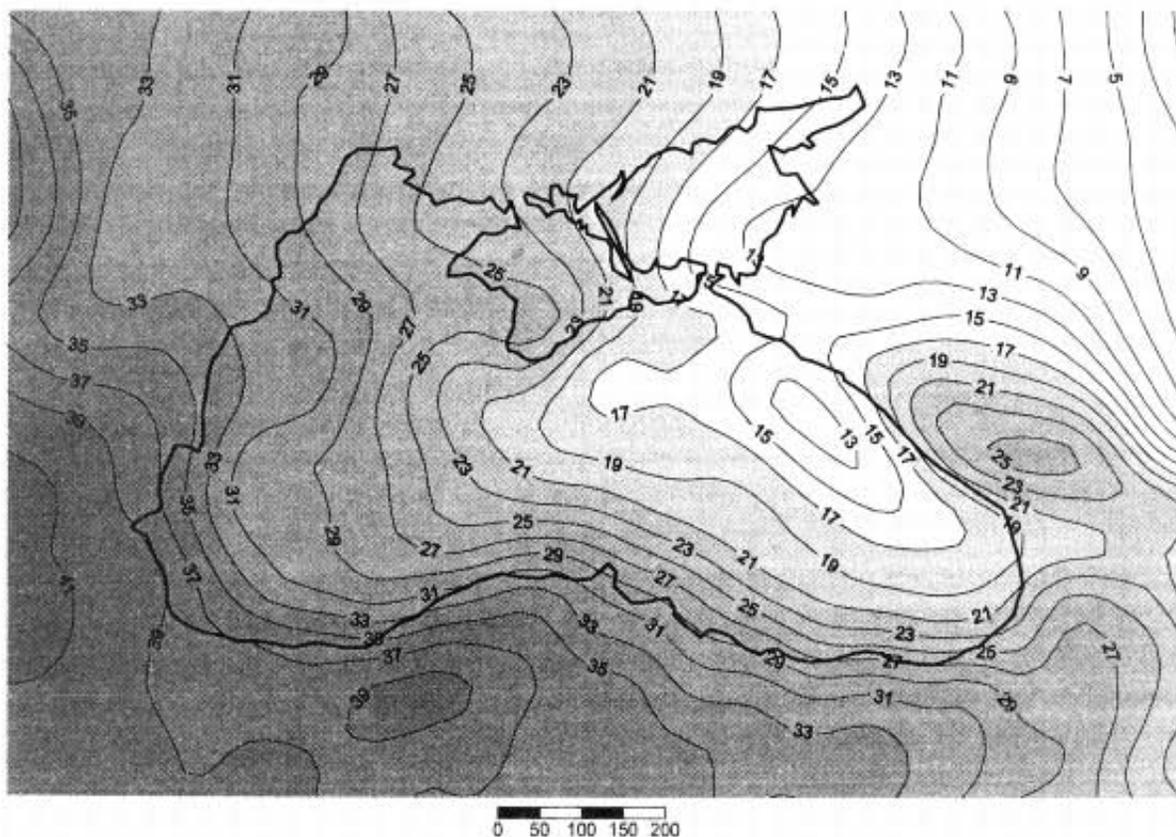


Рис. 1. Схема аномалий геоида Азово-Черноморского региона (по материалам проекта GRACE)

нием параллелей, ось Y — с направлением меридианов, ось Z — перпендикулярна земной поверхности; предполагалось, что деформации и напряжения вызываются нарушением геоизостазии, которое проявляется в виде отклонений геоида от эллипсоида; в качестве меры нарушения геоизостазии рассматривался вектор смещений поверхности полупространства \vec{U} , ориентированный по нормали к поверхности геоида в направлении компенсации нарушений геоизостазии и имеющий величину, равную величине отклонения геоида от эллипсоида в направлении нормали; кроме того, сделано допущение, аналогичное гипотезе Кирхгоффа, широко используемой в теории пластин и оболочек — прямолинейные волокна, перпендикулярные к поверхности полупространства, остаются после деформации перпендикулярными к изогнутой поверхности полупространства, сохраняя при этом свою длину. Сделанные допущения позволяют определить величину вектора смещений в любой точке полупространства по его значениям на поверхности полупространства. Дифференцированием компонент вектора смещений определяются компоненты тензора деформаций ξ_{ij} . На основании закона Гука для изотропной среды, полученные деформации легко перевести в элементы тензора напряжений σ_{ij} [4]. Коэффициенты Ламе λ и μ принимались равными 10^{10} Па. Применение такого подхода позволяет относительно быстро оценить величины напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии. Необходимо отметить, что данные напряжения являются индикатором тектонических напряжений, повлекших за собой возникновение плотностных неоднородностей в земной коре и верхней мантии, проявляющихся в виде нарушений геоизостазии, и могут быть использованы при анализе протекания тех или иных тектонических процессов.

На рисунках 2 и 3 приведены схемы локальных и региональных полей напряжений Азово-Черноморского региона и сопредельных территорий в кПа. Положительные напряжения соответствуют сжатию, отрицательные — растяжению.

Краткий анализ полей напряжений показывает хорошее соответствие локальной составляющей напряжений основным тектоническим элементам исследуемого региона (рис. 2). Как отмечалось ранее, любые тектонические процессы, независимо от их масштаба, приводят к перераспределению гравитирующих масс в тектоносфере, в результате чего происходит нарушение геоизостазии как на локальном, так и региональном уровнях. Особенно ярко в локальных полях напряжений проявляются “молодые” тектонические структуры, для которых характерна высокая современная тектоническая активность и как следствие — значительные нарушения геоизостазии. Наиболее высокие значения напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии, приурочены к Большому Кавказу, для территории которого характерны интенсивные напряжения сжатия; для областей севернее и южнее Главного Кавказского хребта отмечаются линейно вытянутые области аномально высоких касательных напряжений в вертикальной плоскости. На запад зоны аномально высоких напряжений прослеживаются в виде линейных аномалий, простирающихся к Южному Крыму и огибающих северную границу Черноморской впадины.

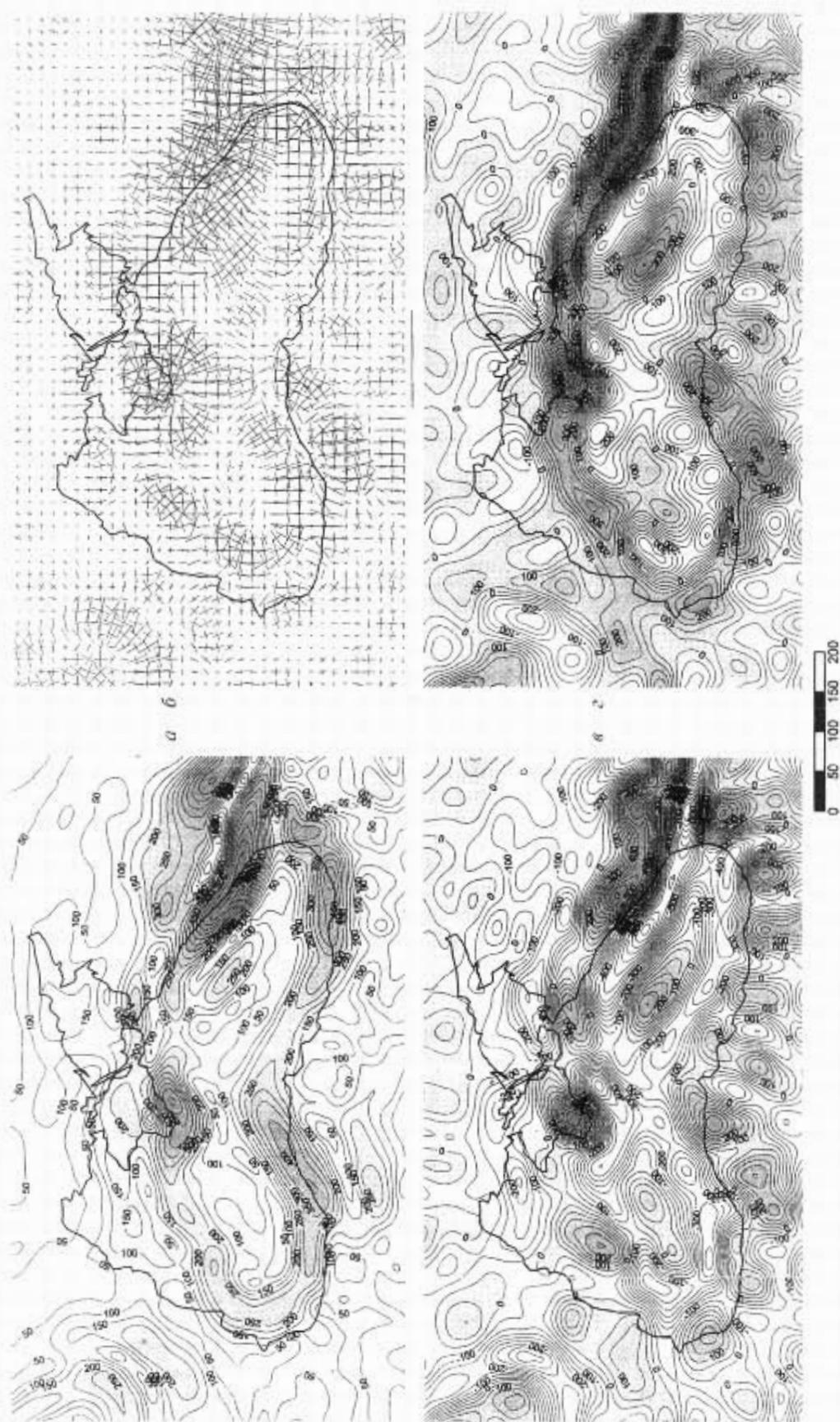


Рис. 2. Схемы локальной составляющей поля напряжений, обусловленных нарушением геостазии (кПа): *a* — максимальные касательные напряжения в вертикальной плоскости; *b* — оси действия максимальных горизонтальных напряжений сжатия-растяжения; *z*, *z* — максимальные горизонтальные напряжения сжатия-растяжения (положительные — сжатие, отрицательные — растяжение)

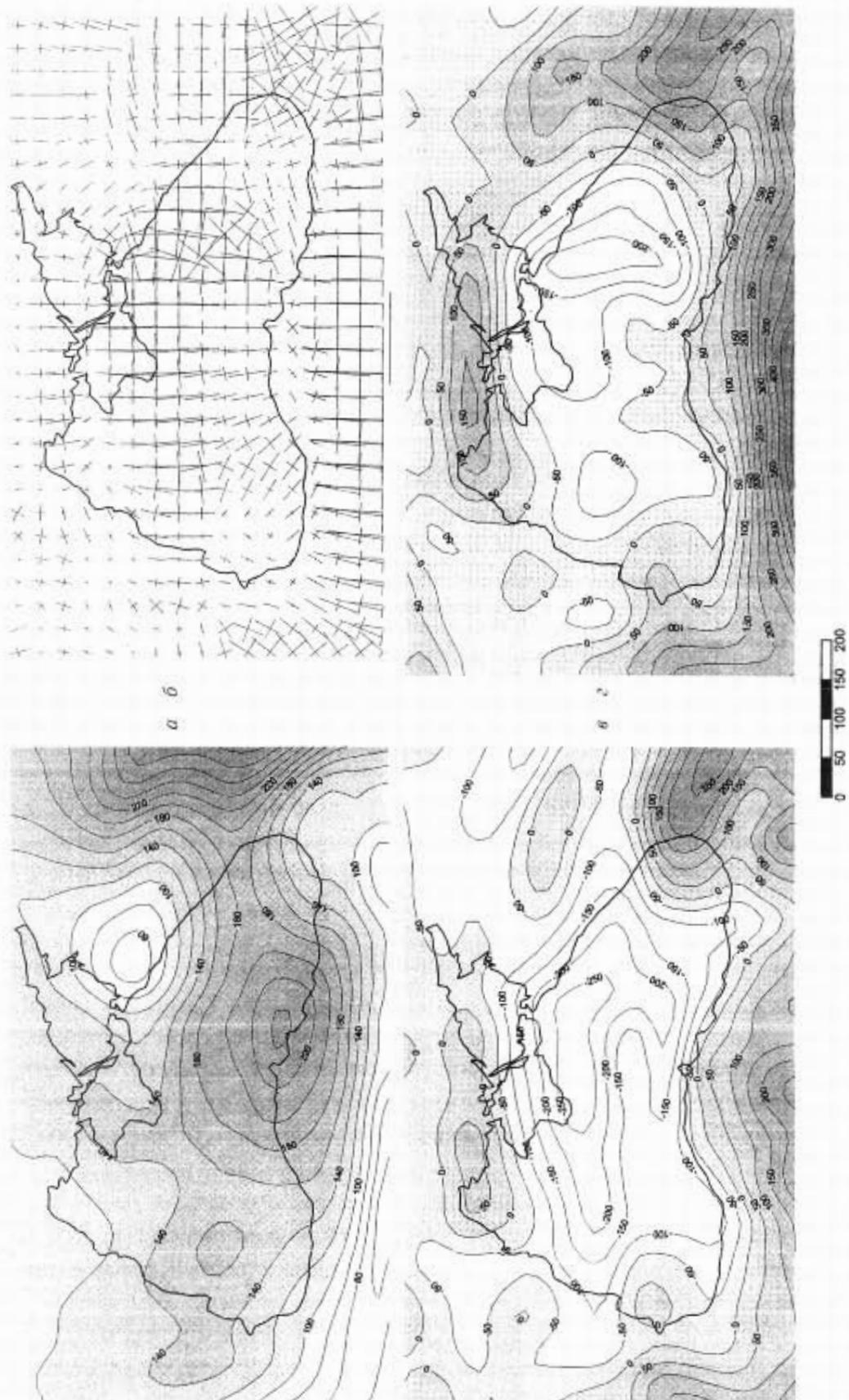


Рис. 3. Схемы региональной составляющей поля напряжений, обусловленных нарушением геостазии (кПа): а — максимальные касательные напряжения в вертикальной плоскости; б — оси действия максимальных горизонтальных напряжений сжатия-растяжения; в, г — максимальные горизонтальные напряжения сжатия-растяжения (положительные — сжатие, отрицательные — растяжение)

Для Горного Крыма характерны сжимающие напряжения, несколько менее интенсивные, чем для Кавказа. Южнее Крымского полуострова имеет место аномалия высоких касательных напряжений в вертикальной плоскости. Южная граница Черноморской впадины также четко отбивается аномалиями высоких касательных напряжений в вертикальной плоскости, южнее ее вдоль зоны Северо-Анатолийского разлома отмечается цепочка достаточно интенсивных аномалий сжатия и растяжения. Непосредственно Черноморская впадина в локальном поле напряжений находит отражение в виде аномалии растягивающих напряжений, осложненной аномалиями сжимающих напряжений в центральных частях Западной и Восточной котловин. Необходимо отметить, что особенность распределения локальных аномалий напряжений тесным образом коррелируется с остаточными изостатическими аномалиями и их горизонтальным градиентом [2].

Региональные аномалии поля напряжений (рис. 3), вероятно, обусловлены процессами, протекающими в верхней мантии и именно с их анализом, по мнению авторов, связано понимание природы возникновения Черноморской впадины. Особое внимание здесь необходимо уделить горизонтальным напряжениям сжатия-растяжения. Именно в их поле большая часть Черного моря проявляется в виде близко изометричной аномалии растягивающих напряжений и, по всей видимости, именно в них находят отражения те процессы, которые повлекли за собой происхождение и развитие Черноморской впадины. А именно процессы в верхней мантии, повлекшие за собой формирование зоны растяжений в земной коре, под действием которых происходило опускание блоков; границы последних хорошо выражены в локальном поле максимальных касательных напряжений в вертикальной плоскости (см. рис. 2а) с их последующей базификацией.

Остановимся более подробно на решении проблемы базификации земной коры (по В.В. Белоусову), или точнее — проблеме отсутствия так называемого “гранитного” слоя в глубоководных районах Черного моря, с использованием явления геоизостаии. Попытки ее решения привели к весьма дискуссионным результатам, с нашей точки зрения потому, что они проводились в рамках традиционной модели “неподвижной Земли”. В рамках модели “вращающейся Земли” рассматриваемая проблема решается достаточно просто. В результате опускания блоков земной коры, соответствующих глубоководным частям Черного моря, возникает нарушение геоизостаии в этих районах, которое частично компенсируется слоем воды. Поскольку опускание блоков земной коры происходит, как правило, в режиме растяжения тектоносферы, то остальная часть нарушения геоизостаии компенсируется интрузивными образованиями основного состава. Излияние магмы обусловлено декомпрессией глубинных частей тектоносферы вследствие возникновения в них серии разломов, которые создают эту декомпрессию и одновременно являются каналами транспортировки магм в направлении земной поверхности. Подробнее описание этого процесса приведено в [10]. Он регулируется законом сохранения количества движения в пределах отдельных секторов вращающейся Земли, вырезанных одинаковыми центральными телесными углами. Описанный выше процесс приво-

дит к насыщению дайкоподобными образованиями основного или ультраосновного состава так называемого “гранитного” слоя земной коры, в результате чего меняются его физико-геологические характеристики, в частности в нем увеличивается скорость распространения упругих волн, достигая наибольших значений в так называемом “базальтовом” слое. Преобразованную таким образом земную кору в настоящее время принято относить к океаническому типу.

Наряду с решением теоретических задач геотектоники и геодинамики, анализ напряженно-деформированного состояния тектоносферы, обусловленного нарушением геоизостазии, может дать ряд ответов и при рассмотрении прикладных проблем. Как отмечалось выше, напряжения, обусловленные нарушением геоизостазии, могут служить показателем тектонической активности; в то же время одним из наиболее ярких геодинамических явлений является сейсмичность. Следовательно, должна существовать связь между полями напряжений геоизостатической природы и местоположением эпицентров землетрясений. Если допустить, что механизм землетрясения тесным образом связан с субвертикальными подвижками блоков тектоносферы, то эпицентры землетрясений должны наилучшим образом коррелироваться с максимумами касательных напряжений в вертикальной плоскости. На рисунке 4 показаны схемы сопоставления эпицентров землетрясений Крыма с локальными аномалиями касательных напряжений в вертикальной плоскости. Данные о землетрясениях взяты из электронных каталогов Мирового Центра Данных по физике твердой Земли и

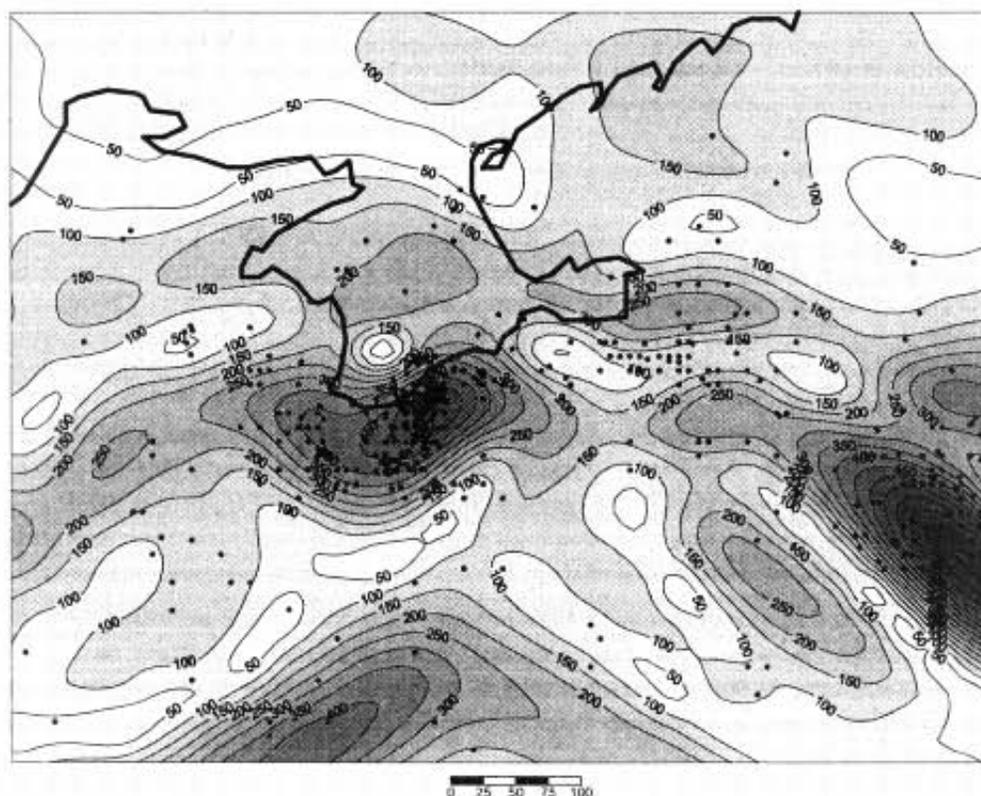


Рис. 4. Схема сопоставления максимальных касательных напряжений в вертикальной плоскости с эпицентрами землетрясений Крыма

Института Физики Земли, имеющихся в свободном доступе в сети INTERNET. Как видно из схемы, большинство землетрясений приурочено к максимумам касательных напряжений в вертикальной плоскости. Наличие такой связи позволяет допускать возможность использования полей напряжений, обусловленных нарушением геоизостазии, в качестве дополнительного критерия для имеющихся методик сейсмического районирования.

В заключение отметим, что в статье приведены поля напряжений, обусловленные нарушениями геоизостазии в Азово-Черноморском регионе, и их сопоставление с основными тектоническими структурами и известными элементами сейсмичности региона. Результаты этого сопоставления свидетельствуют о том, что использование явления геоизостазии, присущего модели “вращающейся Земли”, открывает новые возможности для изучения геодинамики и сейсмотектоники регионов нашей планеты, по сравнению с традиционным использованием для этих целей модели “неподвижной Земли”.

1. *Артемов М.Е., Дубровский В.А.* О связи упругих напряжений в литосфере с нарушениями изостазии // Физика Земли. — 1976. — № 10. — С. 93–97.

2. *Артемов М.Е.* Изостазия территории СССР. — М.: Наука, 1975. — 215 с.

3. Земная кора и история развития Черноморской впадины. — М.: Наука, 1975. — 358 с.

4. *Лурье А.И.* Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 939 с.

5. *Паталаха Е.И.* Космический фактор и тектогенез // Геодинамика. — 2000. — №1(3). — С. 142–143.

6. *Паталаха Е.И., Островерх Б.Н., Гончар В.В.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния Черноморской плиты и прогноз УВ-носности / Тектоника и нефтегазоносность Азово-Черноморского региона в связи с нефтегазоносностью пассивных окраин континентов. Материалы II Межд. конф. (Крым, Гурзуф, 5–8 сентября 2000 г.). — Симферополь, 2001 — С. 184–187.

7. Строение и эволюция земной коры и мантии Черного моря. — М.: Наука, 1989. — 207 с.

8. *Тяпкин К.Ф.* Новая модель изостазии Земли / Тезисы докл. 27 сессии МГК, М.: 1984. — С. 438–439.

9. *Тяпкин К.Ф.* Физика Земли. Киев: Вища школа, 1998. — 312 с.

10. *Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М.* О напряжениях, возникающих в тектоносфере в результате изменения ротационного режима упруго-вязкой Земли // Геофиз. журн. — 2002. — № 2. — С. 52–60.

11. *Чекунов А.В.* Проблемы Черноморской впадины // Геофиз. журн. — 2002. — 9, № 4. — С. 3–25.

12. *Reigber C., Schmidt R., Flechtner F., Kunig R., Meyer U., Neumayer K.H., Schwintzer P., Zhu S. Y.* An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S. Journal of Geodynamics, 39, 1–10, 2005

13. *Тяпкин К.Ф.* A new isostatic model of the Earth // Geophys. Trans. Hung. Geophys. Inst. 1984, № 30. — P. 3–10.

Розглянуто методику і результати оцінки напружень у тектоносфері, обумовлених порушенням геоізоастазії, для території Азово-Чорноморського регіону. Обговорюється можливість використання полів напружень геоізоастатичної природи як додаткового критерію при геотектонічних побудовах і сейсмотектонічному районуванні.

The technique and results of the estimation of stress state of the tectonosphere produced by the geoisostasy disturbances for the territory of Azov-Black sea regions is considered. The possibility of using of stress fields by geoisostatic nature as the characteristics when geotectonic constructing and seismotectonic zoning, are also discussed.