

УДК 551.2.3

## ПОЛЕ СОВРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КОРЫ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ И СРЕДИЗЕМНОМОРЬЯ

© 2014 Ю.Л. Ребецкий<sup>1</sup>, О.О. Овчаренко<sup>1,2</sup>, П.А. Саввичев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, 123995; e-mail: reb@ifz.ru<sup>2</sup>Московский Государственный Университет, г. Москва, 119991

В статье представлены результаты реконструкции современного поля тектонических напряжений, полученные по данным о механизмах очагов землетрясений с использованием метода каткластического анализа разрывных смещений. Установлено, что современное напряженное состояние коры Западной Европы и Средиземноморья не связано с каким-то одним фактором внешнего воздействия. Наиболее крупной тектонической структурой, напряженное состояние которой выглядит закономерно взаимосвязанным в единое поле, является кора впадины Эгейского моря и ее ближнего окружения. Обращает на себя внимание наличие большого числа областей коры (более 40%) с геодинамическим типом напряженного состояния, отвечающим горизонтальному растяжению. Области, для которых имеет место обстановка горизонтального сжатия, существенно менее представительны (менее 15%). Это может говорить о том, что суммарные внешние боковые усилия, воздействующие на литосферу Западной Европы и Средиземноморья, не велики, а деформационные процессы в исследуемом регионе связаны с воздействием на подошву коры со стороны мантии, а также внутрикоровыми или внутрилитосферными процессами.

*Ключевые слова:* тектонофизика, механизмы очагов землетрясений, напряжения, условия деформирования коры.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача исследований, представленных в настоящей работе, состояла в тектонофизической реконструкции современного поля тектонических напряжений (обратная задача тектонофизики), действующих в коре юго-западной части Европы, включающей Средиземноморье и северные участки Африканской плиты (рис. 1). Исследования напряженного состояния в коре Западной Европы по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений выполнялись и ранее, однако, как правило, в этих работах изучалось напряженное состояние отдельных регионов. Так, в работе (Meijer, Wortel, 1997) исследования относились для коры Эгейской региона, в работе (Pasquale et al., 1997) для коры Апеннинского полуострова, а в работе (Pondrelli et al., 2006) для коры Италии, Альп и северной Адриатики. В фундаментальных статьях Дана Маккензи (Jackson, McKenzie, 1988a, 1988b; McKenzie, 1972) изучалось напряженное состояние в коре южной части Европы, Кавказа и Копетдага. Для исследуемого региона имеются также работы, в которых анализируется современная де-

формационная картина на основе данных GPS – геодезии (Reilinger et al., 1997; Provost et al., 2003; и др.). Следует отметить, что при изучении современных напряжений во всех указанных работах переход от механизмов очагов землетрясений к параметрам напряженного состояния базировался на сейсмологических представлениях о напряжениях, восходящих к первым работам в этой области (Балакина, 1962; Балакина и др., 1972; Введенская, 1961). В этом устаревшем подходе ориентацию главных осей напряжений связывают с данными об осях  $P$  и  $T$  отдельных механизмов землетрясений. Примером такого подхода являются результаты проекта «World stress map» (Zobak, 1992), в рамках которого в мировую карту напряжений были включены данные об ориентации осей главных снимаемых напряжений  $P$  и  $T$  в очагах наиболее сильных землетрясений ( $M_b \geq 7$ ). На карту в точке, отвечающей эпицентру очага сильного землетрясения, наносились проекции осей  $P$  на горизонтальную плоскость. Выполнялось разделение напряженных состояний по кинематическим типам очага землетрясения: взброс, сброс, сдвиг по простиранию. В работе (Zobak, 1992) фактически делалось ут-

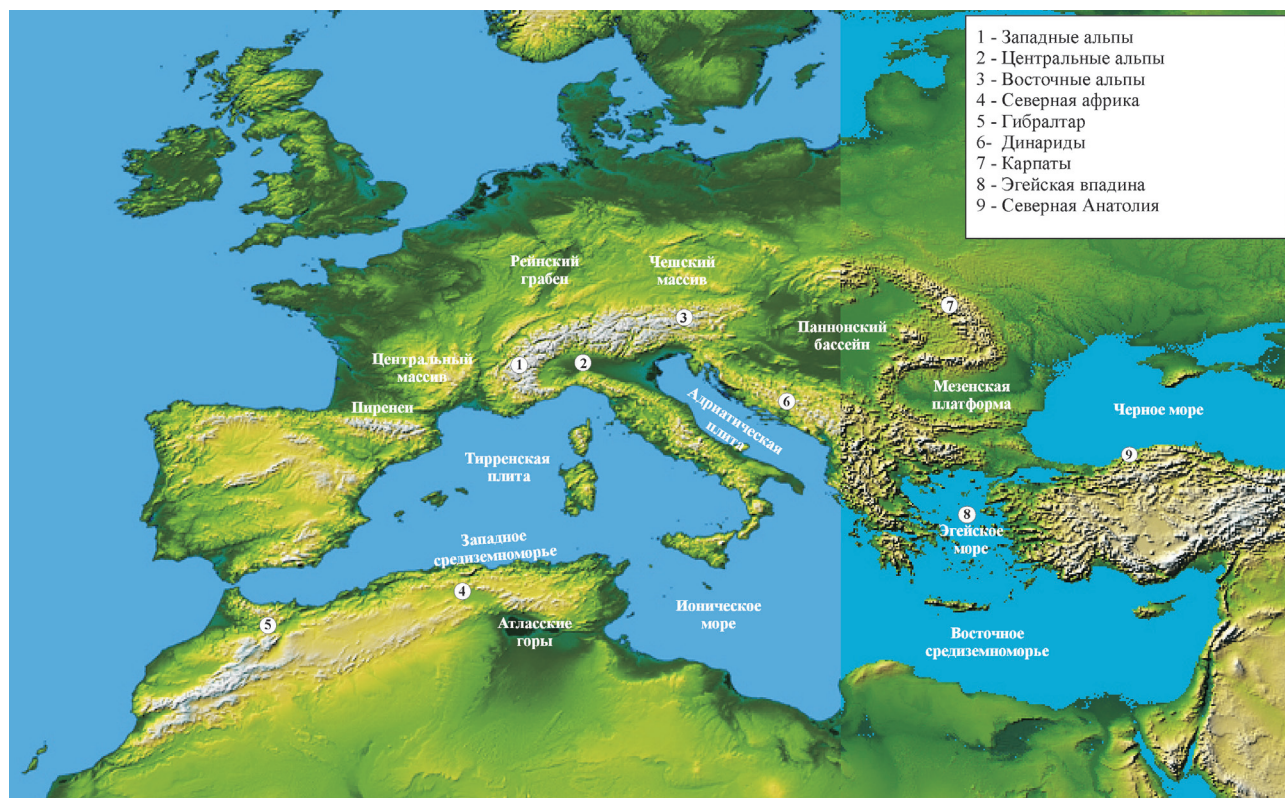


Рис. 1. Топография и основные тектонические элементы Западной Европы и Средиземноморья.

верждение, что оси  $P$  и  $T$  механизмов очагов сильных землетрясений совпадают по ориентации с осями главных тектонических напряжений. В продолжение подхода М.Л. Зобак в работах (Coblentz, Richardson, 1995; Heidbach et al., 2007, 2008, 2010) с использованием только данных о  $P$  и  $T$  осях отдельных механизмов очагов землетрясений получены новые данные о поле глобальных напряжений. Здесь результаты проекта «World stress map» (Zobak, 1992) в части механизмов очагов были дополнены новыми сейсмологическими данными о более поздних сильных землетрясениях. С целью более плотного покрытия поверхности Земли данными о напряженном состоянии ее коры в данной работе выполнялось усреднение и интерполяция ориентации проекций на горизонтальную плоскость осей  $P$  на участки коры, где данных о сильных землетрясениях не было. Радиус усреднения составлял от 100 до 1000 км.

Современные подходы к реконструкции природных напряжений базируются на фундаментальных тектонофизических работах (Ризниченко, 1977; Гущенко, Кузнецов, 1979; Юнга, 1979; Ребецкий, 1997, 1999; Angelier, 1979; Carey-Gailhardis, Mercier, 1987; Gephart, Forsyth, 1984; Michael, 1984), в которых переход от сейсмологических или геологических данных о разрывных смещениях к напряжениям использует положения механики разрушений и механики пластических сред (Работнов, 1979). В работе (Ребецкий, Алексеев, 2014) критически рассмотрены

положения подхода, использовавшегося в работах М.Л. Зобак и ее последователей. Показано, что если в качестве главных осей напряжений принимать направления осей  $P$  и  $T$  механизмов очагов сильных землетрясений, то это фактически означает предположение о совпадении плоскости разрыва в очаге с плоскостью действия максимальных касательных напряжений. Подобные представления существовали в геологии и в сейсмологии в первой половине прошлого века, но после экспериментальных исследований (Ставрогин, Протосеня, 1992; Brace, 1978; Byerlee, 1968, 1978; Mogi, 1964 и др.) были отвергнуты. В этих экспериментах было показано, что трещины в изначально однородных и ненарушенных образцах горных пород развиваются вблизи положения плоскости скалывания, отвечающей предельному уровню кулоновых напряжений. Сама эта плоскость по ориентации может отличаться от плоскости действия максимальных касательных напряжений на  $12-15^\circ$ . В свою очередь для образцов, имевших предварительно подготовленные внутренние дефекты прочности, хрупкое разрушение может развиваться на плоскостях трещин, имеющих достаточно сильное отклонение от ориентации плоскости скалывания (Ребецкий, 2007). Методы тектонофизического анализа учитывают подобную экспериментально наблюдаемую закономерность, а подход, используемый М.Л. Зобак и ее последователей – нет.

Применительно к исследуемому региону следует отметить исследования Жака Анжелье (Angelier, 1975, 1978), в работах которого изучались палеонапряжения для коры Эллингской дуги по геологическим данным о бороздах скольжения. Здесь использовался авторский подход инверсии разрывных смещений, позволяющий говорить об определении именно параметров напряжений, ответственных за активизацию выявленных геологических трещин.

Представляемые далее результаты реконструкции природных напряжений выполнены с применением метода катакластического анализа (МКА) разрывных смещений (Ребецкий, 2003, 2005, 2007, 2009а, 2009б), теоретические положения которого суммируют и развивают положения методов Ж. Анжелье, Е. Гальпхардис, Ф. Гефарда, Э. Майкла, О.И. Гущенко, С.Л. Юнга и Ю.В. Ризниченко (Ризниченко, 1977; Гущенко, Кузнецов, 1979; Юнга, 1979; Angelier, 1979; Carey-Gailhardis, Mercier, 1987; Gephard, Forsyth, 1984; Michael, 1984). В МКА используются принципы теории пластичности, на основе которых разработаны энергетические критерии создания однородных выборок механизмов очагов землетрясений. По этим однородным выборкам землетрясений определяются параметры напряженного состояния. Они характеризуют квазиоднородную фазу деформирования локального участка земной коры – домена, которому и присваиваются полученные данные о напряженном состоянии.

### ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА МКА ПРИ УСРЕДНЕНИИ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Обработка исходных сейсмологических данных каталогов производилась на основе программы STRESSsesim, алгоритм которой базируется на МКА (Ребецкий, 1997, 2003, 2005, 2009). Определяемые в МКА напряжения следует рассматривать как средние в некотором обобщенном пятимерном пространстве. Первый, наиболее очевидный вклад в усреднение напряжений в некотором объеме горного массива вносит разброс гипоцентров землетрясений по латерали и глубине коры (литосферы). Поскольку землетрясения происходят не одновременно, то время является еще одним параметром, определяющим усреднение напряжений. Землетрясения, для которых в сейсмологии определяются механизмы очагов, имеют разные магнитуды, изменяющиеся почти в пределах одного порядка (от 1 до 9.5). Такому диапазону магнитуд отвечает разброс в размерах очагов землетрясений около пяти порядков, от сотен километров до десятков метров. Поскольку очаги землетрясений и определяемые для них механизмы следует рассматривать как интегранты –

усреднители напряжений, создавших хрупкий разрыв, то пятым параметром рассматриваемого обобщенного пространства должны являться магнитуды землетрясений.

Практика реконструкции природных напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений показала, что с уменьшением магнитуды землетрясений резко возрастает вариабельность механизмов их очагов. Это связано с повышенной изменчивостью напряжений при малых площадях усреднения, исследованной ранее в работах Д.Н. Осокиной на упругих моделях с трещинами разного линейного размера (Осокина, 1987). В силу этого факта при тектонофизической реконструкции напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений используется предварительный отбор землетрясений, определяющий максимальный разброс магнитуд в пределах трех единиц. В этом случае размеры очагов землетрясений не отличаются более чем на 1-1.5 порядка и некоторая вариабельность механизмов в начальных выборках землетрясений, вызванная масштабным фактором, все же позволяет найти параметры тензора напряжений, им удовлетворяющие.

В МКА проблема создания начальных выборок землетрясений (НВЗ) для расчета напряжений решается следующим образом. Для выбранной точки расчета, имеющей координаты в виде широты, долготы и глубины, из каталога механизмов очагов землетрясений отбираются те события, области упругой разгрузки которой накрывают данную точку (рис. 2) (Ребецкий, 1999, 2003, 2005, 2007). Размер области упругой разгрузки  $R^a$  зависит от магнитуды землетря-

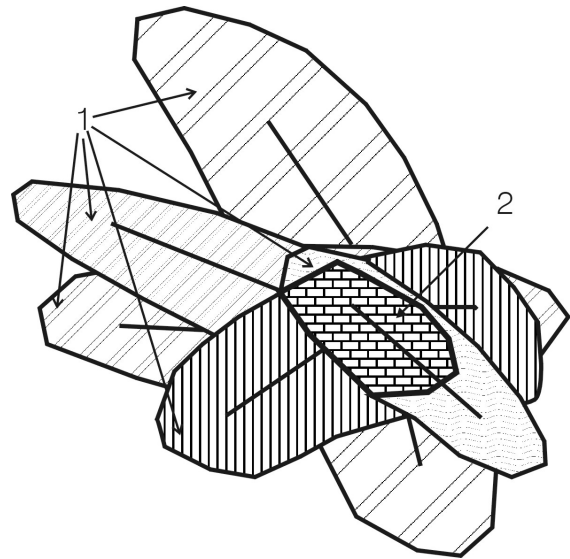


Рис. 2. Кумулятивный принцип формирования начальной выборки механизмов очагов землетрясения на основе попадания точки расчета напряжений в зону кумулятивного пересечения (2) областей упругой разгрузки землетрясений (1).

сения ( $\alpha$  – порядковый номер землетрясения в каталоге) и определяется по формуле:

$$R^\alpha = A + B \times L^\alpha / 2 \text{ при } L^\alpha = 10^{(a+b \times M_b^\alpha)} \text{ км, (1)}$$

где  $A$  – точность определения гипоцентра землетрясения (обычно изменяется от 2 до 20 км и зависит от магнитуды события и сейсмической сети);  $B$  – коэффициент, определяющий радиус области влияния на деформации землетрясения с магнитудой  $M_b^\alpha$ , очаг которого имеет длину  $L^\alpha$  (он может изменяться от 10 – упругое состояние коры до 100 – катакластическое (тектонофиз.) или псевдопластическое (мех.) состояние коры);  $a$  и  $b$  – коэффициенты, которые могут зависеть от кинематического типа механизма очага (Wells, Coppersmith, 1994).

Созданная на основе такого кумулятивного принципа (КП) начальная выборка землетрясений далее анализируется на однородность во времени. Под однородностью понимается определенная согласованность механизмов очагов землетрясений, включенных в нее. Эта согласованность механизмов проверяется на основе энергетических критериев однородности МКА (Ребецкий, 2007), представляющих собой систе-

му неравенств. С физических позиций критерии однородности требуют наличие острого угла между направлением смещения на плоскости разрыва (очага) и касательным напряжением искомого напряженного состояния. Это означает, что для искомого напряженного состояния землетрясения приводят только к уменьшению упругой энергии. Фактически эти критерии требуют, чтобы вариабильность механизмов очагов землетрясений не была слишком большой.

Сама проверка на однородность механизмов очагов осуществляется последовательно для каждого землетрясения, вошедшего в начальную выборку. При этом землетрясения в выборке располагаются в порядке их возникновения, то есть согласно шкале времени (рис. 3). Начало проверки осуществляется от события, имеющего наименьшую дату. Когда число событий, удовлетворяющих критериям однородности будет больше максимально необходимой (обычно > 10), однородная выборка землетрясений (ОВЗ) считается созданной. По данной выборке производится расчет напряжений, отвечающих дате, равной половине суммы дат первого и последнего события в ОВЗ. В случае если ОВЗ создать не удастся, то следующее по дате собы-



Рис. 3. Процедура создания однородной выборки механизмов очагов землетрясения (горизонтальная фигурная скобка) на основе начальной выборки (полный набор событий за весь период наблюдения, удовлетворяющих КП) состоящий в последовательной по шкале времени (горизонтальная ось) проверке событий на критерии МКА. Механизмы очагов показаны условно, прямой и косой крестик соответственно первое и последнее события в ОВЗ (их даты определяют временной период усреднения напряжений), кружком и треугольником показано соответственно первое и последнее события в НВЗ. Надписи на горизонтальной шкале соответствуют годам. См. пояснение в тексте.

тие выбирается в качестве первого при попытке создания ОВЗ.

Если создание ОВЗ произошло, но эта выборка не включила в себя последнее по дате событие в НВЗ, то расчет напряжений в данной точке пространства продолжается. Первым событием новой ОВЗ выбирается событие, имеющее дату, следующую после первого события в предыдущее ОВЗ. Расчет прекращается, когда все события из НВЗ прошли проверку при созданиях ОВЗ. Таким образом, для одной точки пространства может быть получено несколько значений тензора напряжений, отвечающих разным временам усреднения, что позволяет проводить мониторинг напряжений. Полученные для одной точки параметры тензора напряжений усредняются на весь период наблюдения с учетом временного интервала каждой ОВЗ.

#### КАТАЛОГ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ EMSC

Для реконструкции параметров современного поля напряжений в земной коре юго-западной части Европы, включающей Средиземноморье и северные участки Африканской плиты, был использован каталог механизмов очагов землетрясений, существующий на Веб-узле <http://www.emsc-csem.org> Европейского Средиземноморского Сейсмологического Центра (European Mediterranean European Seismological Center – EMSC). В этом каталоге для коры юго-западной части Европы, включающей Средиземноморье, представлены параметры сейсмического момента в виде двойного диполя, собранные из различных источников: National Research Institute of Astronomy and Geophysics – Helwan, Египт, Laboratoire de Detection et de Geophysique и других. В основном каталог состоит из данных, полученных в институтах следующих стран: Франция, Испания, Италия, Греция, Германия, Швейцария, Турция, США. Каталог насчитывает 1876 событий в магнитудном диапазоне  $M_b$  от 1.8 до 8.4, произошедших на глубинах 0–650 км

в области  $2^\circ$  ю.ш. –  $63^\circ$  с.ш. и  $35.9^\circ$  з.ш. –  $72.9^\circ$  в.д. в период с начала двадцатого века по 1988 год. Район наших исследований был несколько меньшим –  $35$ – $50^\circ$  с.ш.  $0$ – $30^\circ$  в.д. – при глубинном диапазоне от 0 до 60 км. Выборка в указанном диапазоне из полного каталога EMSC позволила создать каталог из 1234 событий.

Анализ сейсмологических данных этого каталога (рис. 4а) показал, что большая часть землетрясений (981 событие) приходится на глубины до 16 км. В диапазон магнитуд от 3.5 до 6.5 каталог механизмов очагов землетрясений, вероятно, имеет наименьшее число пропусков событий, так как здесь график повторяемости имеет близкую к линейной зависимость (рис. 4б). Для меньших магнитуд землетрясения регистрировались с пропусками, что сказывается на полноте каталога. Наиболее регулярные определения механизмов очагов землетрясений приходятся на вторую половину прошлого столетия (рис. 4в). Тенденция увеличения числа землетрясений в каталоге в это время связывается с увеличением числа сейсмических станций и развитием методов расчета механизмов очагов землетрясений. На этом фоне 1980 г. выделяется по числу событий, что, возможно, говорит о некотором повышении сейсмической активности в конце прошлого столетия.

Согласно отмеченному выше требованию на диапазон магнитуд землетрясений, участвующих в расчете напряжений, каталог EMSC был преобразован в два каталога с диапазонами магнитуд  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$  и  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$ . Этим двум диапазонам магнитуд отвечают два каталога по 858 и 690 событий соответственно. На рис. 5 в эпицентрах землетрясений показаны механизмы этих двух каталогов. Разница в распределении эпицентров двух каталогов в основном связана с корой Эгейского моря и ближайшего окружения. Для каталога малых магнитуд  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$  эта область имеет мало событий, что связано с отсутствием достаточного числа близких сейсмических станций. Землетрясения из этого каталога в основном приходятся на континентальную часть коры, где

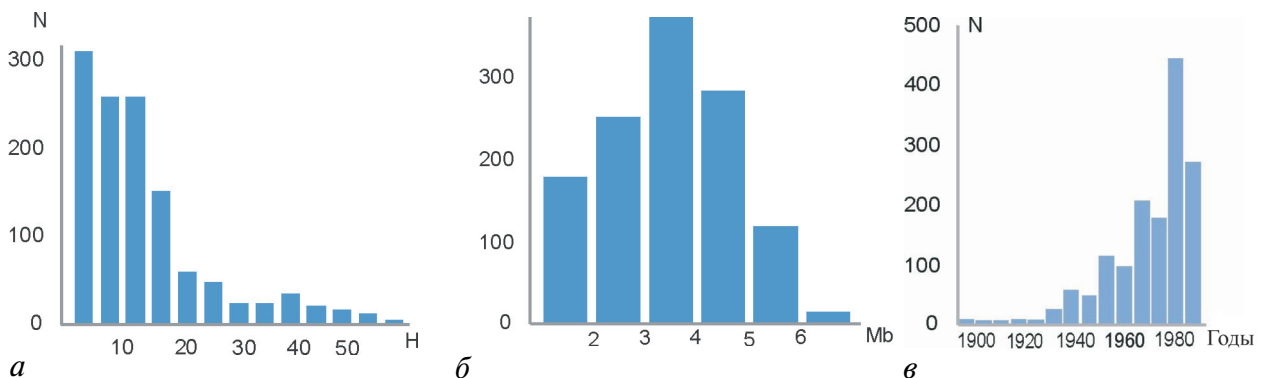
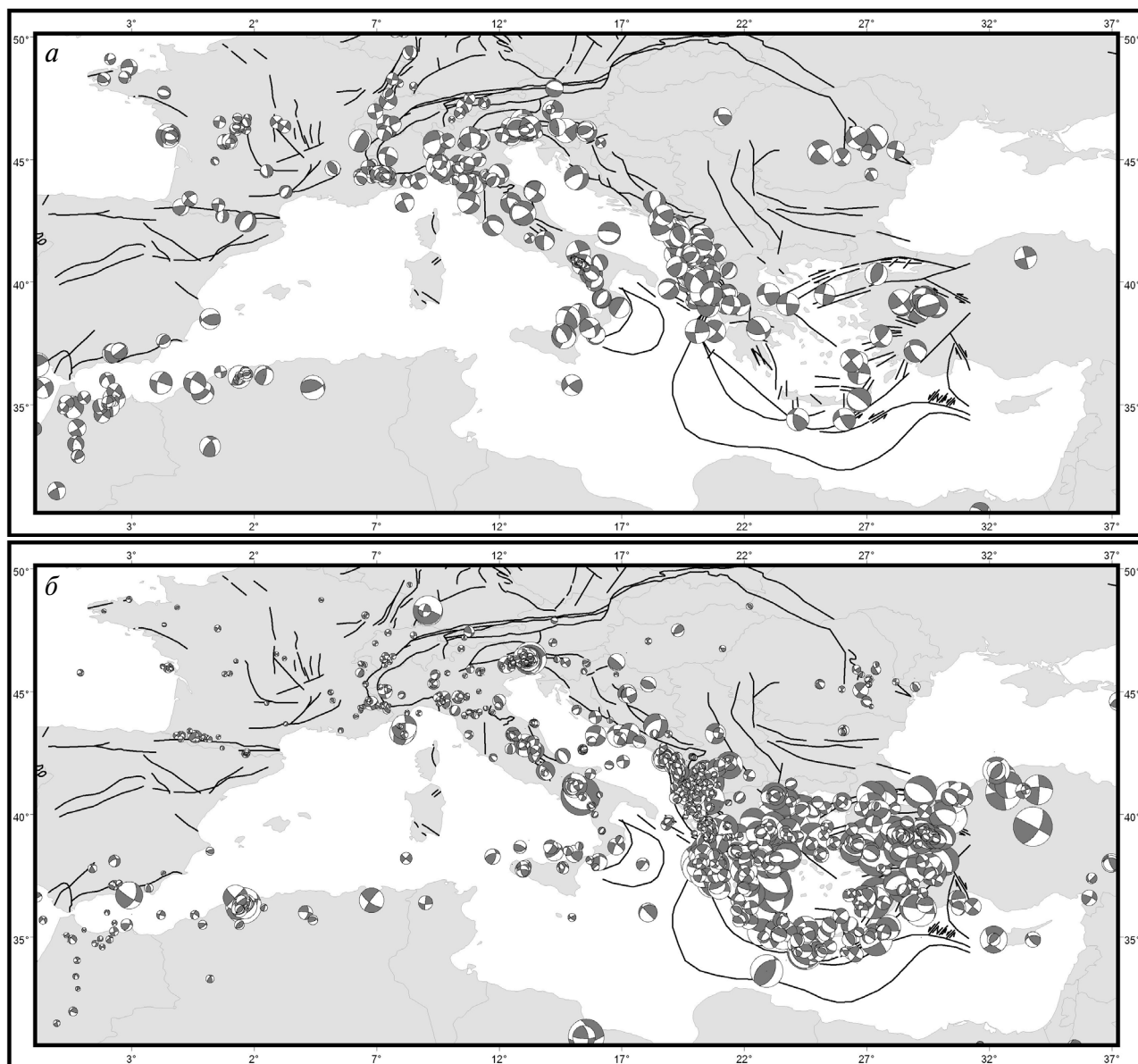


Рис. 4. Диаграммы представительности – числа событий по: а) глубинам, б) магнитудам, в) годам.

## ПОЛЕ СОВРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ



**Рис. 5.** Эпицентры землетрясений и их механизмы очагов для двух каталогов *a)*  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$ ; *б)*  $4 \leq M_b \leq 6.5$ . Масштаб изображения механизмов разный для рисунков *a* и *б*.

расположены локальные сейсмические сети различных европейских стран.

Как следует из анализа представительности осей  $P$  и  $T$  механизмы очагов каталогов, имеющих разные диапазоны магнитуд, достаточно близки.

Реконструкция выполнялась в узлах сетки  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  и глубиной 30 км (середины условной коры). Узлы сетки определяли только центры формирования однородных выборок. В результате расчетов для каталога  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$  данные о напряжениях были получены для 199 доменов земной коры, а для каталога  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$  для 336 доменов.

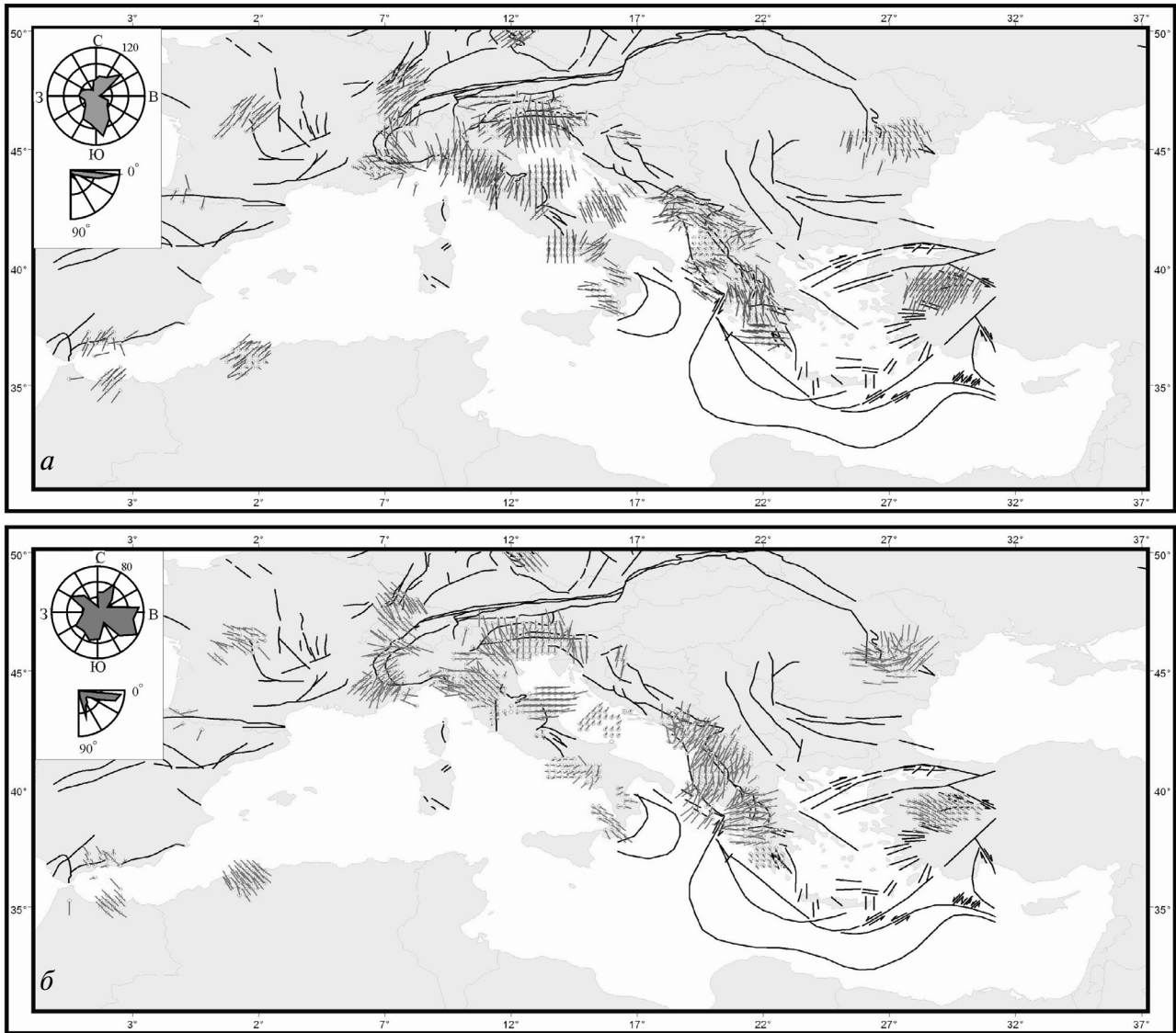
Разница двух расчетов по каталогу механизмов очагов землетрясений состоит в том, что усреднение параметров напряженного состояния для каталога  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$  производится по меньшей площади, чем для каталога  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$ .

В настоящей работе было реализовано два

первых этапа МКА, позволяющих получать данные о форме и направлениях ориентации главных осей эллипсоида напряжений (главные оси напряжений).

### ПАРАМЕТРЫ ЭЛЛИПСОИДА НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА $1.8 \leq M_b \leq 5.0$

На рис. 6 для созданного каталога малых магнитуд землетрясений представлены результаты тектонофизической реконструкции современных напряжений в виде проекций на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений  $\sigma_1$  (максимальное девиаторное растяжение) и минимальных  $\sigma_3$  (максимальное сжатие). Отметим, что в используемой в работе терминологии напряжения растяжения, как и



**Рис. 6.** Параметры эллипсоида напряжений, полученные по данным каталога  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$ : проекции на горизонтальную плоскость осей погружения алгебраически максимальных  $\sigma_1$  (а) и минимальных  $\sigma_3$  (б) главных напряжений. В верхнем левом углу показаны роза – диаграммы представительности простираний и углов погружения соответствующих осей главных напряжений. Кружок определяет начало вектора погружения, а его длина зависит от крутизны погружения оси главного напряжения. Если угол погружения составлял менее  $15^\circ$ , то эта ось изображалась в виде вектора с кружком в середине.

деформации удлинения, имеют положительный знак.

Как следует из рис. 6а и 6б, для коры юго-запада исследуемой области существует три участка с данными о напряжениях вдоль южных границ Африканской плиты и для севера Испании. Они относятся к северным отрогам горной системы Восточного и Западного Атласа, а также к горной системе юга Испании. Здесь оси главных напряжений максимального девиаторного растяжения  $\sigma_1$  имеют в основном единое северо-восточное простирание. Для участка коры Западного Атласа имеется локальная зона с субвертикальной ориентацией этих осей. Оси напряжения максимального сжатия  $\sigma_3$  для коры северной Африки направлены субгоризон-

тально с простиранием на юго-запад – северо-восток.

В соответствии с полученными данными о близости к той или иной оси главного напряжения (Гущенко и др., 1990; Ребецкий, 2007; Шерман, Днепровский, 1989) возможно выполнить районирование по геодинамическому типу напряженного состояния: горизонтальное сжатие, растяжение, сдвиг. Этот параметр используется только в геодинамике и тектонофизике, поскольку позволяет характеризовать деформационную обстановку, отражающуюся в характере тектоники исследуемых областей. В классической механике термин тип или вид напряженного состояния носит более обобщенный характер, определяющий условия нагружения и свойства среды

(простое напряженное состояние, упругое или пластическое напряженное состояние, напряженное состояние простого сдвига и т.д.). Другой параметр, определяемый в рамках МКА после первого этапа реконструкции напряжений, – это значение коэффициента Лоде – Надаи. Он характеризует вид тензора напряжений (одноосное сжатие или растяжение, чистый сдвиг), отражающийся в форме эллипсоида напряжений.

Для участка Западного Атласа имеет место геодинамический тип напряженного состояния в виде горизонтального сдвига, а для участка коры Восточного Атласа наблюдается сочетание областей горизонтального сдвига и горизонтального растяжения со сдвигом (рис. 7а). В коре южной части Испании эти оси в основном имеют такое

же простирание, но круто погружаются на северо-запад. Несколько определений напряжений  $\sigma_3$  дают для этого участка крутое погружение на юго-запад. Как следствие, геодинамический тип напряженного состояния здесь близок к горизонтальному растяжению. Вид эллипсоида напряжений для коры двух участков, расположенных друг против друга, близок к чистому сдвигу, а для коры Восточного Атласа он отвечает одноосному сжатию.

Для участка коры горного массива Централ на территории Франции оси  $\sigma_1$  полого погружены на северо-восток. Оси максимального сжатия имеют здесь северо-западное простирание. При этом в северном сегменте этого участка оси  $\sigma_3$  имеют достаточно крутое погружение, а в южном сегменте погружаются полого. В со-

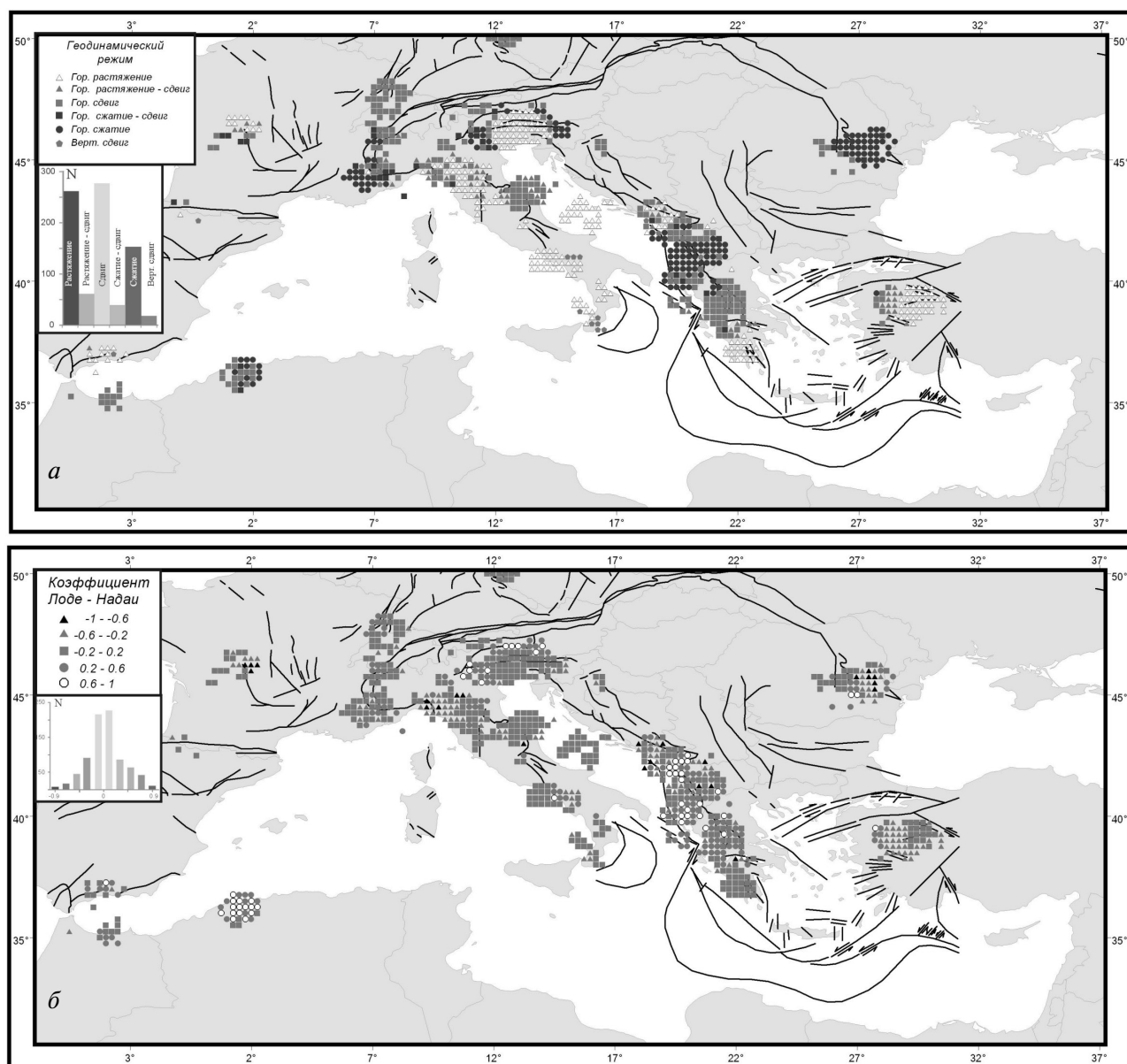


Рис. 7. Параметры эллипсоида напряжений, полученные по данным каталога  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$ : геодинамический тип напряженного состояния (а), коэффициент Лоде – Надаи (б).



ответствии с полученной ориентацией главных осей в северном сегменте участка коры горного массива Централ имеет место геодинамический тип напряженного состояния горизонтального растяжения, в то время как в южном наблюдается горизонтальный сдвиг с небольшим растяжением. Для этих двух сегментов разные значения имеет также и коэффициент Лоде – Надаи. Если в южном сегменте его значения близки к нулю – чистый сдвиг, то в северном чистый сдвиг сочетается с одноосным растяжением. Заметим, что оси алгебраически максимального и минимального главных напряжений составляют углы, близкие к  $45^\circ$  относительно крупных разрывов этого региона.

В коре расположенных южнее Пиренеев ориентация осей максимального сжатия для южного и северного склонов различная. Если вблизи границы Испании и Франции в коре северного склона Пиренеев оси  $\sigma_3$  субгоризонтальны и имеют субширотное протирание, то для коры южного склона эти напряжения полого погружаются на юго-запад. Здесь ориентация осей алгебраически максимального напряжения (девиаторного растяжения) имеет северо-восточное простирание. Соответственно различным участкам коры северного и южного склонов Пиренеев отвечает геодинамический тип напряженного состояния горизонтального сдвига с небольшим растяжением (к северу) и горизонтального растяжения (к югу). Значение коэффициента Лоде – Надаи для всех определений напряженного состояния близко к нулю (чистый сдвиг).

Для территории Германии имеются два участка коры на границе с Францией и Чехией с данными о напряженном состоянии. Для обоих этих участков простирание осей максимального девиаторного растяжения имеет северо-восточное направление, а оси максимального сжатия полого погружаются на северо-запад. Первый из этих участков отвечает коре западной окраины Богемского массива, а второй захватывает кору южной части Рейнского грабена. Заметим, что наблюдаемое для него простирание осей максимального девиаторного растяжения параллельно простиранию самого грабена, а ортогонально к нему действуют оси максимального сжатия. Соответственно субвертикально здесь ориентирована ось промежуточного главного напряжения. Известно, что активным грабенам должна отвечать субвертикальная ориентация осей максимального сжатия и ортогональная к разломам и субгоризонтальная ориентация осей максимального девиаторного растяжения. Столь необычная ориентация осей главных напряжений по отношению к разломам Рейнского грабена, полученная по результатам реконструкции напряжений, показывает, что на современном этапе кинематика этих разломов

должна соответствовать взбросам. Вероятно, характер поля напряжений коры Рейнского грабена диктуется активностью развития расположенной на юго-востоке от него горной системы Альп. В частности, оси максимального сжатия стремятся быть ортогональными краевой системе разломов коры северо-западного и западного склона Альп, разворачиваясь вслед за ними почти на  $90^\circ$ .

Вблизи границы Швейцарии и Италии, в коре южного склона Западных Альп, ориентация осей максимального девиаторного растяжения принимает юго-восточное простирание с соответствующим пологим погружением. Для территории Франции в коре Альп простирание этих осей сохраняется, но резко увеличивается погружение. Для рассмотренных участков коры также изменяется и ориентация осей максимального сжатия, имеющих погружение на юго-запад. Эти напряжения по мере смещения на юго-запад изменяют крутизну своего погружения от пологого до более крутого. Соответствуя изменению ориентации осей  $\sigma_1$ , изменяется и тип напряженного состояния с горизонтального сдвига до горизонтального сжатия.

В коре Восточных Альп преобладает пологое погружение осей максимального сжатия в южном направлении при субширотном и запад – юго-западном простирании осей максимального девиаторного растяжения. Резко изменяется напряженное состояние в расположенном к югу участке коры восточной части долины реки По. Здесь оси максимального девиаторного напряжения полого погружены на юг, а оси максимального сжатия испытывают крутое погружение на север. Таким образом, рядом сосуществуют два участка с диаметрально противоположным типом напряженного состояния: горизонтальным сжатием и горизонтальным растяжением. Также различаются в этих участках и значения коэффициента Лоде – Надаи.

Для коры северной и центральной части Апеннин, северной части Адриатики, оси  $\sigma_1$  субгоризонтальны и имеют субмеридиональное направление. Резко изменяется ориентация осей этих напряжений в южном окончании Апеннинского полуострова, где существуют два участка с северо-восточным и северо-западным погружением. В коре центральной части Адриатики оси  $\sigma_1$  имеют пологое погружение на юг – юго-восток. Ориентация осей максимального сжатия в коре Апеннин имеет еще более дробный характер. Здесь выделяется практически субвертикальная ориентация  $\sigma_3$  для западного побережья центральной части полуострова и центральной части Адриатики, а также достаточно крутое погружение осей этого напряжения на северо-запад для северной части. Для восточного побережья центральной части полуострова характерно по-

логое погружение на восток, а для южной оконечности полуострова оси главных напряжений  $\sigma_3$  имеют крутое погружение на северо-восток. Соответственно полученной ориентации главных напряжений основной геодинамический тип напряженного состояния отвечает горизонтальному растяжению. Также на фоне большой изменчивости в ориентации осей главных напряжений поле значений коэффициента Лоде – Надаи выглядит достаточно единообразным, близким к нулю при наличии нескольких локальных участков, сочетающих чистый сдвиг с одноосным сжатием (кора западного побережья в зоне сочленения Центральной и Южных Апеннин) и растяжением (кора западного побережья на севере Апеннинского полуострова).

Для коры южной части Динарид и Балканского полуострова характерна высокая изменчивость ориентации осей максимального девиаторного растяжения. Простираение этих осей изменяется от субмеридиональной до субширотной при движении с юга на север, а погружение изменяется от крутого до пологого с разворотом от северо-западного до субширотного. Соответственно высокая изменчивость представляется и в типе напряженного состояния. С севера на юг в коре Динарид сменяется обстановка горизонтального растяжения на сдвиг и горизонтальное сжатие. В коре Балканского полуострова также с севера на юг сменяется обстановка горизонтального сдвига на горизонтальное растяжение. Тип эллипсоида напряжений в основном сочетает чистый сдвиг и сдвиг с одноосным сжатием. Участки одноосного растяжения со сдвигом представлены только в коре южных Динарид.

В области коры Вранча оси напряжений максимального девиаторного растяжения имеют преимущественно крутое погружение с простираением, изменяющимся от юг – юго-запада до юго-юго-востока при продвижении в широтном направлении с запада на восток. Оси максимальных сжимающих напряжений субгоризонтальны и погружаются на юго-запад в западном сегменте и на северо-восток в восточном. Поскольку в западном сегменте значение коэффициента Лоде – Надаи приближается к -1, то здесь имеет место состояние, близкое к равномерному латеральному сжатию. В восточном сегменте коэффициент Лоде – Надаи близок к нулю.

Для участка коры западной Анатолии направления осей напряжений максимального девиаторного растяжения субгоризонтальны или с пологим погружением на юго-запад, то есть действуют перпендикулярно системе грабенов, что определяет активность этого типа разрывов и на современном этапе. Оси напряжений максимального сжатия имеют юго-восточное простираение при пологом погружении в этом

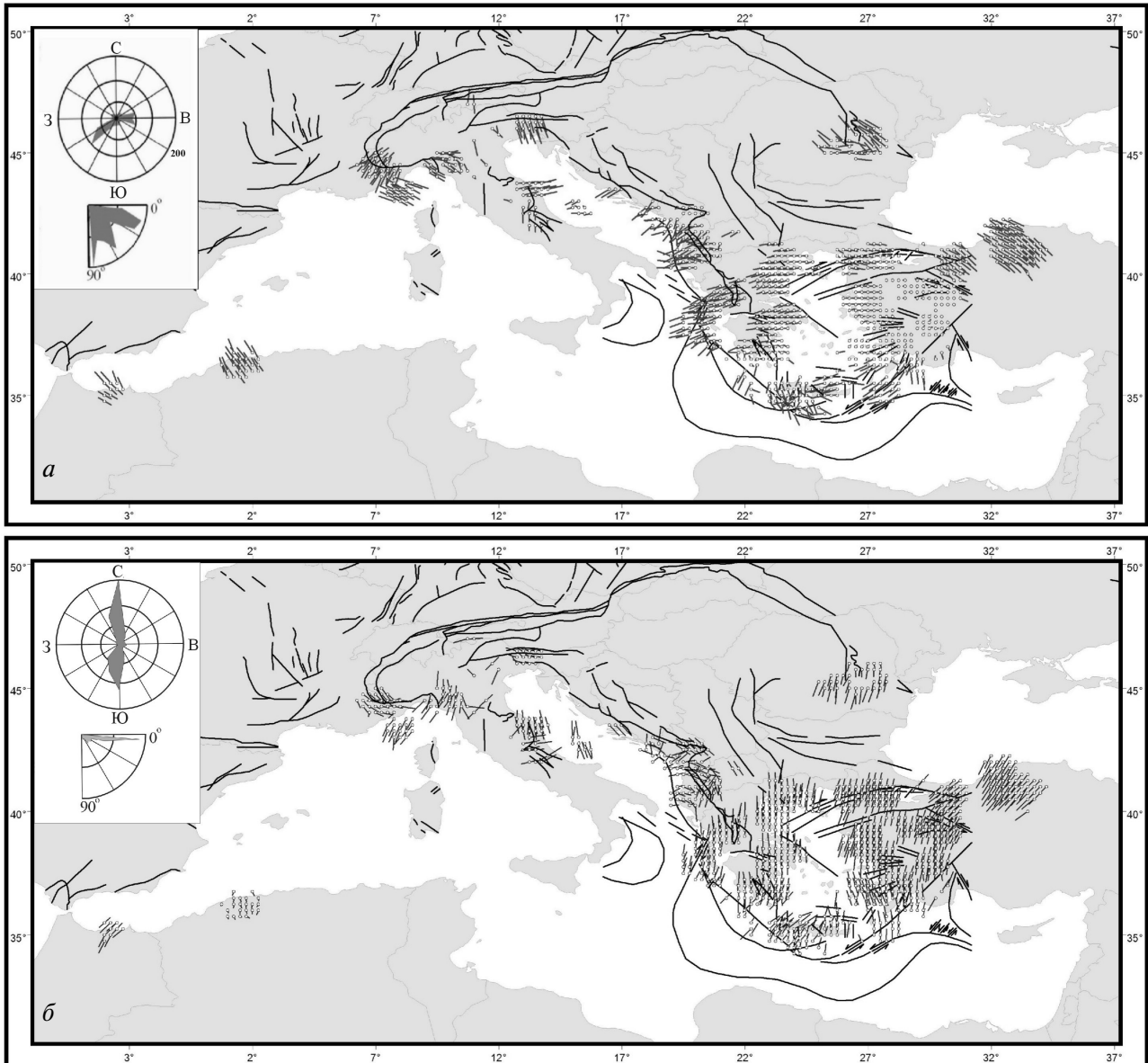
направлении в северо-западном сегменте этого участка и крутом в юго-восточном. Геодинамический тип напряженного состояния испытывает изменения от горизонтального сдвига в северо-западном сегменте до горизонтального растяжения в юго-восточном.

#### ПАРАМЕТРЫ ЭЛЛИПСОИДА НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА $4.0 \leq M_b \leq 6.5$

Сопоставляя результаты реконструкции двух каталогов в диапазонах малых и больших магнитуд (рис. 6-9), то замечаем, что существуют области, где имеются данные о напряжениях для одного каталога, но нет таковых для другого. Там, где данные о напряженном состоянии земной коры имеются для обоих каталогов, они в большинстве случаев совпадают. Последнее говорит о том, что отсутствие представительности событий в малом диапазоне магнитуд не влияет на результаты реконструкции природных напряжений. Здесь более важно, чтобы данные о механизмах очагов землетрясений участка коры содержали минимально достаточное число событий, необходимое для создания однородной выборки землетрясений.

Рассмотрим вначале те участки коры, где в результатах двух каталогов имеются различия. Так, для северного побережья Африки для коры Восточного Атласа совпадает ориентация осей максимального сжатия, но есть отличия в ориентации осей максимального девиаторного растяжения, для каталога  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$  они субвертикальны (рис. 8а). Здесь тип напряженного состояния отвечает горизонтальному сжатию. Также отличается для этого участка и значение коэффициента Лоде – Надаи. Вторым участком является кора центральной части Динарид. Здесь имеется небольшой участок, где при сохранении простираения осей максимального сжатия меняется их погружение (рис. 8б).

Если для малых магнитуд землетрясений оси этого напряжения полого погружались на северо-восток, то для больших они полого погружаются на юго-запад. Еще одно отличие имеется для участка коры Западной Анатолии. Здесь резко различна ориентация осей максимального сжатия. Если для каталога малых магнитуд землетрясений оси этого напряжения были пологими, то для каталога больших магнитуд они становятся субвертикальными. Соответственно для этого участка отличается и геодинамический тип напряженного состояния (рис. 9а). Поскольку реконструкция напряжений по каталогу землетрясения меньшего уровня магнитуд отвечает усреднению по меньшей площади, то именно с этим можно связывать выявленные некоторые



**Рис. 8.** Параметры эллипсоида напряжений, полученные по данным каталога  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$ : проекции на горизонтальную плоскость осей погружения алгебраически максимальных  $\sigma_1$  (а) и минимальных  $\sigma_3$  (б) главных напряжений. В верхнем левом углу показаны роза – диаграммы представительности простираций и углов погружения соответствующих осей главных напряжений.

различия поля напряжений двух каталогов механизмов очагов.

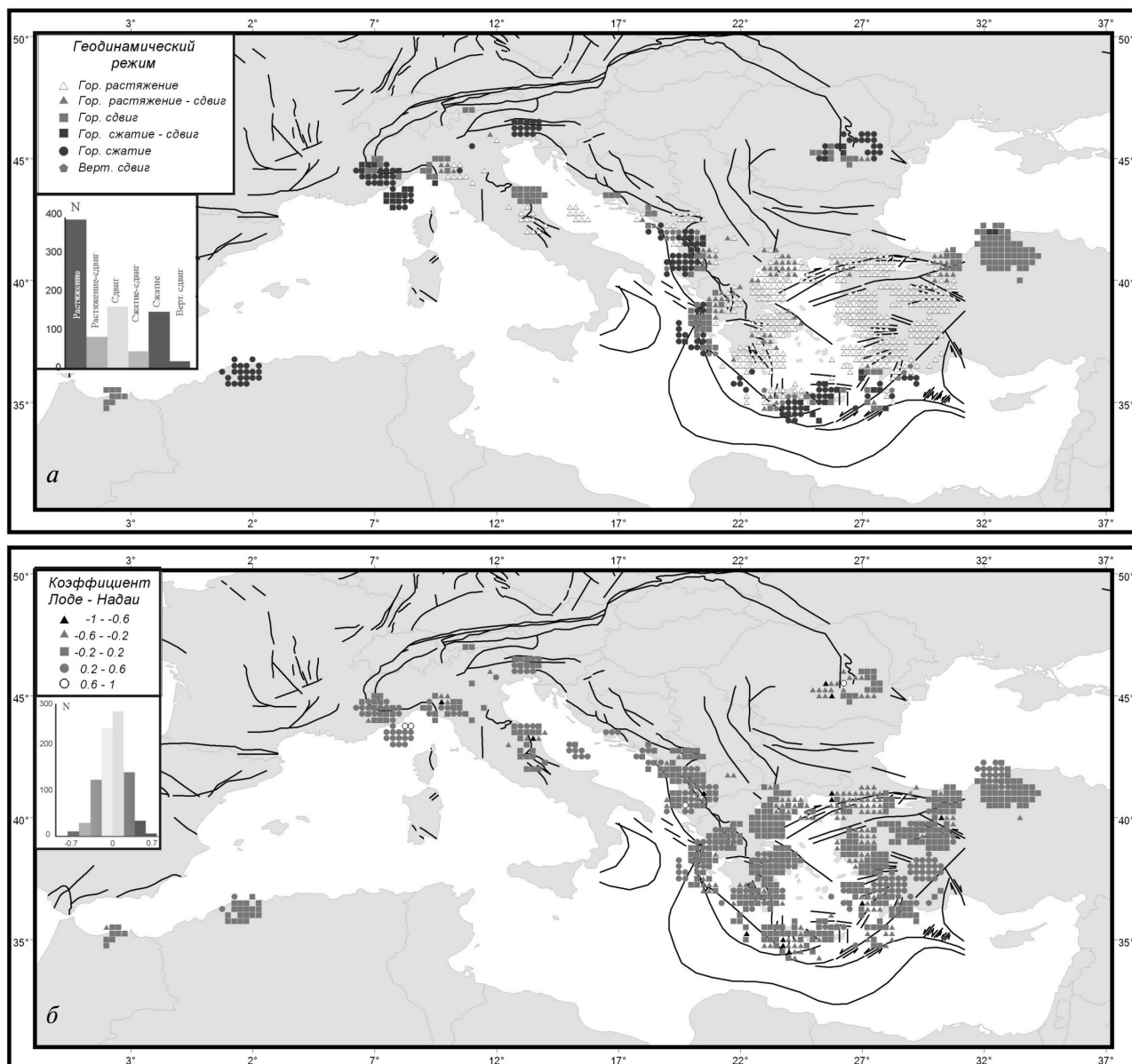
Теперь рассмотрим области, где по каталогу малых магнитуд землетрясений данных напряжений нет, а для каталога  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$  они получены. Это прежде всего район коры Эгейского моря и окружающих ее областей. Оси максимального девиаторного растяжения для коры восточной части Балканского полуострова и западной части Анатолии имеют достаточно крутое погружение при субмеридиональном простираии. Здесь оси максимального сжатия ориентированы субширотно при пологом погружении на запад и восток соответственно. В коре вблизи о. Крит и для северо-западной Анатолии оси максимального девиаторного растяжения изменяют простираание до

северо-восточного, а оси максимального сжатия в коре центральной части Анатолии субвертикальны.

Подобные закономерности ориентации главных осей в коре Эгейской впадины и ее ближайшего окружения приводят к формированию здесь преимущественно геодинамической обстановки горизонтального растяжения. Обстановка горизонтального сжатия наблюдается в южной части региона в коре вблизи о. Крит и к востоку от него. В коре северной части Анатолии наблюдается обстановка горизонтального сдвига.

Тип тензора напряжений, определяемый значением коэффициента Лоде – Надаи, (рис. 9б) в основном чистый сдвиг при наличии участков коры, где сочетается чистый сдвиг с одноосным сжатием (южная часть западной Анатолии) и

## ПОЛЕ СОВРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ



**Рис. 9.** Параметры эллипсоида напряжений, полученные по данным каталога  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$ : геодинамический тип напряженного состояния (а), коэффициент Лодэ – Надаи (б).

одноосным растяжением (кора Мраморного моря и к югу от о. Крит).

### ОБСУЖДЕНИЕ

В коре исследуемого региона субмеридиональная ориентация осей максимального сжатия  $\sigma_3$  с пологим погружением отмечена только для коры Восточных Альп, небольшого участка Южных Динарид и северного фрагмента зоны Вранча. Северо-западная – юго-восточная или северо-восточная – юго-западная ориентация этих осей также с пологим их погружением существует в коре южного участка Рейнского грабена, Богемского массива, северной части Африканской плиты, большей части Динарид, восточного фрагмента зоны Вранча, вблизи южной оконеч-

ности Апеннинского полуострова, в массиве Централ, для Западных Альп и в южной части Адриатического моря. Субширотная ориентация осей максимального сжатия с пологим погружением присутствует в коре южного участка зоны Вранча, северного склона Пиренеев, в северном участке Адриатического моря и юго-восточного фланга Апеннинского полуострова, западного побережья и центральной части Балканского полуострова.

Столь разнообразная ориентация главных осей максимального сжатия с пологой ориентацией не дает возможность сделать однозначный вывод о преимущественном направлении внешнего бокового сжимающего воздействия соседних плит (например, Африканской), на кору исследуемого региона.

Анализ ориентации осей напряжений  $\sigma_1$  – растягивающих девиаторных напряжений – показывает, что для исследуемой территории существуют два крупных кластера, где они имеют преимущественную субмеридиональную ориентацию. Это кора Эгейской впадины и ее ближайшего окружения: Балканский полуостров, юго-восточная часть Динарид, Вранч, Западная Анатолия, а также кора Италии: северная и центральная части Апеннинского полуострова и Адриатического моря, включая долину реки По. Отметим, что последняя область с севера (Восточные Альпы) и юга (южные Апеннины) ограничена областями с субширотной ориентацией осей  $\sigma_1$ . Это говорит о локальности воздействия, ответственного за механизм формирования данного напряженного состояния.

Выявленный характер параметров поля напряжений для коры Эгейской впадины в рамках тектоники литосферных плит объясняется механизмом субдукции океанической литосферы со стороны Африканской плиты с откатыванием океанического желоба на юг, что и создает субмеридиональное растяжение. Однако вопрос вызывает обширность проникновения на север этих растягивающих напряжений. Считается, что горизонтальное сжатие способно передаваться в коре на большие расстояния, а растяжение нет, так как прочность пород на растяжение многократно ниже прочности пород на сжатие. Формирование грабенообразных структур приводит к локализации деформаций горизонтального удлинения и снижению уровня напряжений, приводящих к горизонтальному растяжению.

Поскольку формирование растягивающих или сжимающих напряжений в коре возможно также за счет касательных напряжений, возникающих на границе контакта коры и мантии, то нами был произведен анализ закономерности их распределения в исследуемом регионе. На рис. 10 показана ориентация таких касательных напряжений, построенных на горизонтальных площадках с нормальными, направленными к центру земли. Ориентация таких касательных напряжений, которые именуется как поддвиговые, отражает характер воздействия со стороны мантии на кору.

Для напряженного состояния, полученного по данным каталога механизма очагов землетрясений с магнитудами  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$ , ориентация этих поддвиговых касательных напряжений в коре Апеннинского полуострова и Динарид носит блочный характер. Здесь рядом могут соседствовать участки коры с резко изменяющейся ориентацией таких напряжений. Так вблизи границы между Центральными и Южными Апеннинами рядом расположены две области, где ориентация поддвиговых касательных на-

пряжений взаимно противоположная. Таких же два участка имеются и для границы между Динаридами и Балканами. В северной части Балканского полуострова наблюдаются упорядоченно направленные на северо-восток сильные поддвиговые касательные напряжения, а в южной части Динарид наблюдаются аналогичные касательные напряжения, направленные на юго-запад, то есть в противоположном направлении. В коре Альп ориентация анализируемых касательных напряжений становится еще более непостоянной. Здесь сложно выделить относительно крупные блоки с единой ориентацией этих напряжений.

Существенно более единой выглядит ориентация поддвиговых касательных напряжений в коре Вранча, массива Централ, вдоль южных границ Пиренеев и для западной Анатолии.

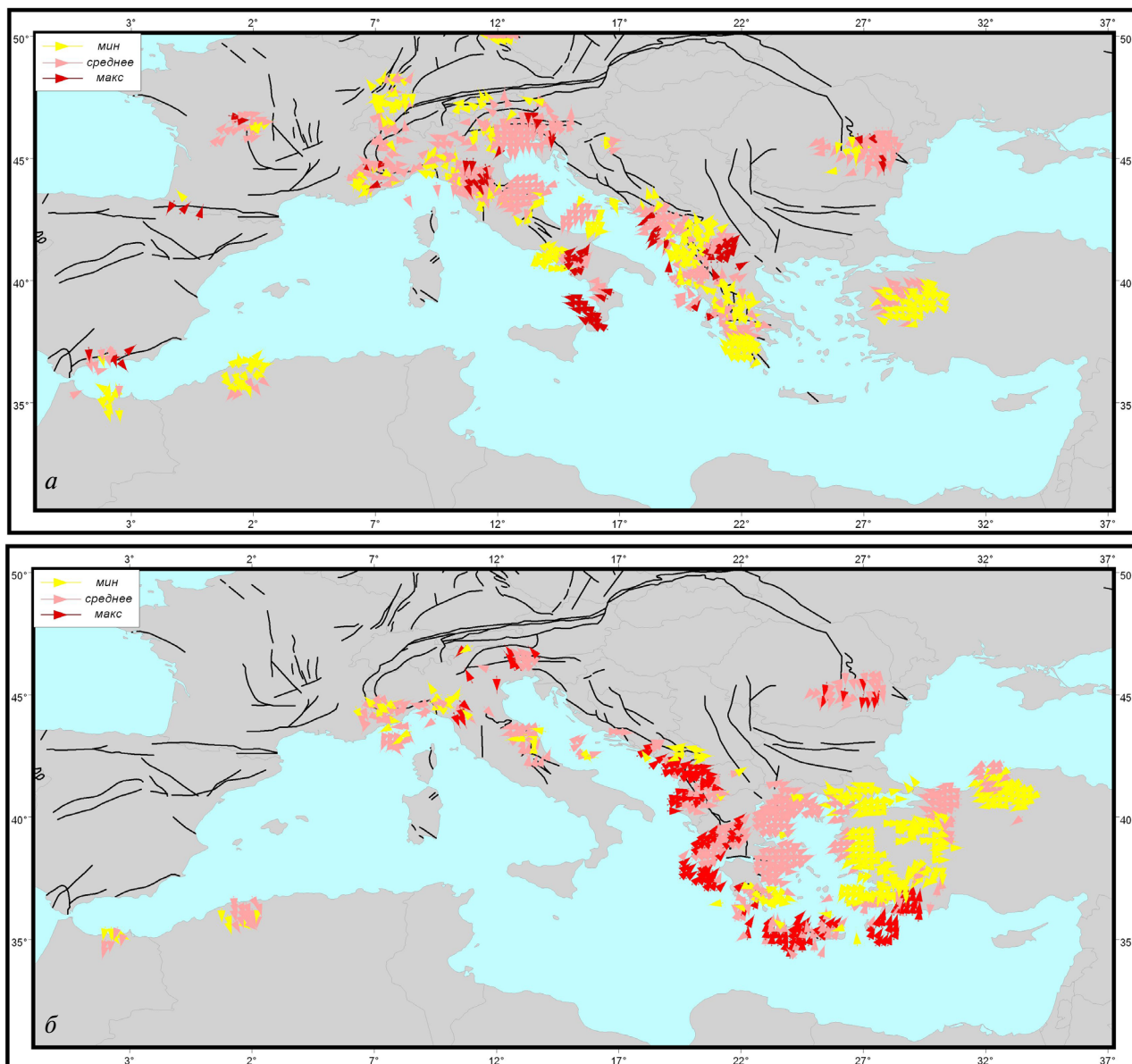
Следует отметить, что на рис. 10 показаны поддвиговые касательные напряжения, нормированные на максимальные касательные напряжения. Максимальные значения этого отношения, близкие к единице, отражают тот факт, что на данном участке коры ее подошва является плоскостью действия максимальных касательных напряжений. Такие участки коры можно воспринимать двояко, как области:

- где на границе кора-мантия возникают повышенные силы сопротивления горизонтальному движению коры, вызванному латеральным давлением со стороны соседних блоков;
- через которые мантия, испытывающая горизонтальное течение, воздействует на кору.

Отметим, что для двух выделенных ранее областей южных Динарид и северных Балкан есть зоны, где на подошве коры действуют разнонаправленные максимальные касательные напряжения. Подобный характер напряженного состояния, скорее всего, связан с боковыми разнонаправленными усилиями.

Анализ характера поддвиговых касательных напряжений для коры Эгейского моря можно сделать, используя данные реконструкции по каталогу механизмов очагов землетрясений  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$ . Здесь основная часть касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с запада (Балканы), востока (Анатолия) и юга (о. Крит), направлена к центру Эгейской впадины. При этом для коры Балкан, южной окраины Эгейского моря поддвиговые касательные напряжения наиболее близки по уровню к значениям максимальных касательных напряжений. Выявленная закономерность распределения поддвиговых касательных напряжений говорит о том, что либо мантия двигается относительно коры, как бы стекая к центру впадины, либо кора Эгейского моря расширяется во все стороны. Последнее можно объяснить восходящими движениями в мантии,

## ПОЛЕ СОВРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ



**Рис. 10.** Ориентации и относительные величины (нормировка на максимальные касательные напряжения) поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормальными, ориентированными к центру земли: *а)* каталог  $1.8 \leq M_b \leq 5.0$ ; *б)* каталог  $4.0 \leq M_b \leq 6.5$ . Дана градация интенсивности нормированных касательных напряжений по трем уровням: низкая, средняя и максимальная интенсивность.

выдавливающим вверх кору Эгейского моря, или увеличением объема коры за счет дилатационных процессов (Николаевский, 1996) и/или диффузионного внедрения мантийных флюидов (Шевченко и др., 2001). Другим объяснением подобного распределения касательных напряжений является предположение о существовании в мантии под центральной частью Эгейской впадины нисходящей ветви конвективной ячейки. Соответственно в сопредельных областях имеет место горизонтальное течение мантии к центру Эгейской впадины, создающий радиально направленное поле поддвиговых касательных напряжений.

Сопоставляя результаты реконструкции двух каталогов, отметим, что имеется несколько

участков, где наблюдается противоположная ориентация поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках. Это кора центральной части Адриатики и южные Динариды. Подобная разнонаправленность в ориентациях данных напряжений может отражать взаимодействие различных блоков земной коры, вовлекаемых в однонаправленный латеральный перенос вещества. Но может также свидетельствовать о мелкомасштабных глубинных источниках движений в мантии, определяющих глубинную неоднородность поля напряжений и разные особенности сейсмического режима в разных блоках земной коры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований показали, что современное напряженное состояние коры Западной Европы и Средиземноморья не связано с каким-то одним фактором внешнего воздействия. Наиболее крупной тектонической структурой, напряженное состояние которой выглядит закономерно взаимосвязанным в единое поле, является кора впадины Эгейского моря и ее ближнего окружения (Балканы, западная Анатолия, юго-восточное Средиземноморье). Поле напряжений остальных областей распадается на фрагменты, которые сильно отличаются по ориентации главных осей напряжений, что говорит о сложном и, возможно, многофакторном характере воздействия на кору.

Обращает на себя внимание наличие большого числа доменов коры (>40%) с данными, отвечающими геодинамическому типу напряженного состояния в виде горизонтального растяжения. Этому состоянию отвечает кора практически всех Апеннин, Западной Анатолии и Восточных Балкан. Области, для которых имеет место обстановка горизонтального сжатия, существенно менее представительны (<15%) и включают в себя южные Динариды, зону Вранча и Альпы. Поскольку геодинамическая обстановка горизонтального сжатия, как правило, сопряжена с областями горизонтального сдвига, то можно предположить, что в исследуемом регионе напряженное состояние сжатия и растяжения близко к взаимному равновесию. Это может говорить о том, что суммарные внешние боковые усилия, воздействующие на литосферу Западной Европы и Средиземноморья, не велики, а деформационные процессы в исследуемом регионе связаны с воздействием на подошву коры со стороны мантии, а также с внутрикоровыми или внутрилитосферными процессами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 13-05-00892 и программы №6 ОНЗ РАН.

## Список литературы

- Балакина Л.М.* Общие закономерности в направлениях главных напряжений, действующих в очагах землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 1. С. 1471-1483.
- Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева И.В. и др.* Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 192 с.
- Введенская А.В.* К дискуссии по поводу теоретической модели очага землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 2. С. 261-263.
- Гуценко О.И., Кузнецов В.А.* Определение ориентаций и соотношения величин главных напряжений по совокупности направлений сдвиговых тектонических смещений // Поля напряжений в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 60-66.
- Гуценко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А.* Структура поля современных региональных напряжений сейсмоактивных областей земной коры восточной части средиземноморского подвижного пояса // Доклады ДАН. 1990. Т. 312. № 4. С. 830-835.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М. Недра. 1996. 446 с.
- Осокина Д.Н.* Об иерархических свойствах тектонического поля напряжений // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. С. 136-151.
- Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Реконструкция тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии и Океании // Доклады ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 101-104.
- Ребецкий Ю.Л.* Методы реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Доклады РАН. 1999. Т. 365. № 3. С. 392-395.
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады ДАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 237-241.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 39-54.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический Журнал. 2009. Т. 31, № 2. С. 93-106.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // ДАН. 2009. Т. 428, № 3. С. 397-402.
- Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С.* Тектоническое поле современных напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. Вып. 1. С. 257-290.
- Ризниченко Ю.В.* Расчет скоростей деформаций при сейсмическом течении горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 10. С. 34-47.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 223 с.

- Шевченко В.И., Добровольский И.П., Лукк А.А.* Напряженно-деформированное состояние литосферы Эгейского сектора Средиземно-морского подвижного пояса // *Физика Земли*. 2001. № 12. С. 52-63.
- Шерман С.И., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры. Новосибирск. Наука Сиб. отд. 1989. 155 с.
- Юнга С.Л.* О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1979. С. 14-23.
- Angelier J.* Sur l'analyse des déplacements dus au jeu d'une population de failles. Exemple en Crete (Grece) // *C. R. Acad. Sci. Paris. D*. 1975. V. 280. P. 1657-1660.
- Angelier J.* Tectonic evolution of the Hellenic arc since the Late Miocene // *Tectonophysics*. 1978. V. 49. P. 23-36.
- Angelier J.* Determination of mean principal directions of stresses for a given fault population // *Tectonophysics*. 1979. V. 56. T17-T26.
- Brace W.F.* Volume changes during fracture and frictional sliding // *A Rev. Pure and Applied geoph.* 1978. V. 116. P. 603-614.
- Byerlee J.D.* Brittle-ductile transition in rocks // *JGR*. 1968. V. 73. № 14. P. 4741-4750.
- Byerlee J.D.* Friction of Rocks // *Pure and applied geophys.* 1978. V. 116. P. 615-626.
- Carey-Gailhardis E., Mercier J.L.* A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseismic and microseismicity of Southern Peru // *Earth and Plan. Sci. Let.* 1987. V. 82. P. 165-179.
- Coblentz D., Richardson R.M.* Statistical trends in the intraplate stress field // *JGR*. 1995. V. 100. № B10. P. 20245-20255.
- Gephart J.W., Forsyth D.W.* An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence // *JGR*. 1984. V. 89 (B11). P. 9305-9320.
- Heidbach O., Reinesker J., Tingay M. et al.* Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress pattern highlighted in the World Stress Map database // *Tectonics*. 2007. V. 26 (TC6014). Doi: 10.1029/2007/TC002133.
- Heidbach O., Tingay M., Batrth A et al.* The World Stress Map – Release 2008. Paris: 2008. Commission for the Geological Map of the World.
- Heidbach O., Tingay M., Batrth A. et al.* Global crustal stress pattern based on the World Stress Map data base release 2008 // *Tectonophysics*. 2010. V. 482. P. 3-15.
- Jackson J.A., McKenzie D.* The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and the Middle East // *Geophys. J.* 1988a. V. 93. P. 45-73.
- Jackson J.A., McKenzie D.* Rates of active deformation in the Aegean Sea and surrounding areas // *Basin Res.* 1988b. V. 1. P. 121-128.
- McKenzie D.* Active tectonics of the Mediterranean region // *JGR*. 1972. V. 30. P. 109-185.
- Meijer P.T., Wortel M.J.* Present-day dynamics of the Aegean region: A model analysis of the horizontal pattern of the stress and deformation // *Tectonics*. 1997. V. 16. № 6. P. 879-895.
- Michael A.J.* Determination of stress from slip data: faults and folds // *JGR*. 1984. V. 89. № B11. P. 11517-11526.
- Mogi K.* Deformation and fracture of rocks under confining pressure (2) compression test on dry rock sample // *Bul. Earth. Res. In. Univ. Tokyo*. 1964. V. 42, Part 3. P. 491-514.
- Pasquale V., Verdoya M., Chiozzi P., Ranalli G.* Rheology and seismotectonic regime in the northern central Mediterranean // *Tectonophysics*. 1997. V. 270. P. 239-257.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Ekstrem G. et al.* The Italian CMT dataset from 1977 to the present // *Phys. Earth Pl. Int.* 2006. V. 159. P. 286-303. Provost A.-S., Chery J., Hassani R. 3D mechanical modeling of the GPS velocity field along the North Anatolian fault // *Earth Pl. Sci. Let.* 2003. V. 209. P. 361-377.
- Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E.* Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // *Tectonophysics*. 2012. V. 581. P. 114-131. 10.1016/j.tecto.2012.09.027.
- Reilinger R.E., McClusky S.C., Oral M.B.* Global Position System measurements of present-day crustal movements in the Arabian-Africa-Eurasia plate collision zone // *JGR*. 1997. V. 102. № B5. P. 9983-9999.
- Zobak M.L.* First- and second order pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // *JGR*. 1992. V. 97. № B8. P. 11703-11728.



**PRESENT STRESS FIELD OF THE CRUST IN SOUTH-WEST  
EUROPE AND THE MEDITERRANEAN SEA**

**Yu.L. Rebetsky<sup>1</sup>, A.A. Ovcharenko<sup>1, 2</sup>, P.A. Savvychev<sup>1, 2</sup>**

*<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences*

*<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991*

The article presents the results from the reconstruction of modern tectonic stress field obtained from data on earthquake focal mechanisms using the method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. It was revealed that the present state of crustal stress of Western Europe and the Mediterranean is not associated with any single externality. The major tectonic structure with the stress state, which looks naturally interrelated in a single field, is a depression crust of the Aegean Sea and its near environment. Noteworthy is the large number of cortical areas (over 40%) with type geodynamic stress state corresponding to horizontal extension. Areas with a horizontal compression are significantly less representative (less than 15%). This may indicate that the total external lateral forces affecting the lithosphere of Western Europe and the Mediterranean are not great, and deformation processes in the study region are associated with the impact on the bottom of the crust caused by the mantle, as well as with intracrustal or intralithosphere processes.

*Keywords: Tectonophysics, earthquake source mechanisms, stresses, crust deformation conditions.*