

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ДАННЫХ «МИРОВОЙ КАРТЫ НАПРЯЖЕНИЙ»

А.И. Коптев, А.В. Ершов, Е.А. Маловичко

Московский государственный университет им. Ломоносова, Геологический факультет koptev06@mail.ru

Одним из главных недостатков любой базы данных напряженного состояния в земной коре или литосфере является неравномерность распространения замеров. При использовании этих данных для сравнения с результатами моделирования, которые обычно имеют равномерное пространственное распределение, эта проблема встает особенно остро. Поэтому необходим подход, позволяющий усреднять данные замеров в областях, где их плотность относительно высока, и экстраполировать информацию на районы, характеризующиеся отсутствием или малым числом данных.

Первые работы по усреднению данных «Мировой Карты Напряжений» в глобальном [Zoback, 1992] и региональном [Müller et al., 1992] масштабах носили исключительно качественный характер. Однако, слишком высокая доля субъективизма, присущая визуальному обобщению информации, не позволяет считать такую методику надежной.

Глобальная карта распределения напряжений, полученного в результате статистической обработки фактических данных, впервые была представлена в работе [Coblentz, Richardson, 1995]. В этой работе в качестве входной информации использовались 4537 замеров, соответствующих качеству А-С, из «Мировой Карты Напряжений» 1992 года выпуска. Средняя ориентировка оси сжатия для ячейки размером $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ определялась как среднее значение ориентировок проекций на горизонтальную плоскость главных осей сжатия по данным замеров, попадающих в эту ячейку. Из 582 ячеек, для которых эта ориентировка была определена, 200 ячеек содержали только один замер. Поэтому оценивать величину дисперсии вычисленной средней величины имело смысл только для оставшихся 382 ячеек, в пределах которых содержалось два или более замеров. Существенной проблемой, с которой столкнулись авторы, было превышение дисперсией допустимых значений в 196 из этих 382 ячеек (т.е. более чем в половине случаев).

Полученные в работе [Coblentz, Richardson, 1995] большие значения дисперсии для значительного количества ячеек, в которых была определена средняя ориентировка осей сжатия, главным образом связаны с тем, что при расчетах использовался постоянный (примерно 250 км) радиус усреднения. Поэтому в более поздних работах [Heidbach et al., 2007; Heidbach et al., 2010] было предложено производить усреднение для разных ячеек сетки с различным радиусом. Выбор области усреднения для текущей ячейки производился путем последовательного перебора (в диапазоне от 1000 км до 100 км с шагом 100 км) величины радиуса окружности, имеющей своим центром середину ячейки. Для каждого радиуса при этом переборе определялось стандартное отклонение среднего значения ориентировки оси сжатия (вклад в среднее значение от каждого замера имел прямую зависимость от его качества и обратную от расстояния между положением эпицентра замера и центром текущей ячейки). В случае если это отклонение не превышало заданную величину, перебор прекращался и для текущей ячейки фиксировался соответствующий радиус усреднения. Таким образом, на выходе имелось распределение ориентировок главных осей сжатия на равномерной сетке; при этом каждый элемент этого распределения был получен в результате усреднения при стандартном отклонении, не превышающем заданный порог. При таком подходе величина радиуса усреднения может рассматриваться в качестве меры степени неоднородности напряженного состояния того или иного региона Земли.

В работах [Ребецкий, 1999; Ребецкий, 2003] для реконструкции параметров напряженного состояния по данным о механизмах землетрясений предлагается метод катакластического анализа. Данный подход позволяет не только определить ориентацию главных осей напряжений, но и оценить значения максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления. В рамках этой методики выделяется три этапа. На первом этапе производится определение ориентировки главных осей тензора напряжений и значений коэффициента Лоде - Надаи путем выбора из всех возможных напряженных состояний такого, для которого достигается максимум диссипации накопленной в упругих деформациях энергии. На втором этапе реконструкции с помощью анализа на диаграмме Мора распределения механизмов землетрясений из однородной выборки оцениваются величины напряжений (с точностью до неизвестного значения внутреннего сцепления горных пород). На третьем этапе выполняется расчет значений флюидного давления и внутреннего сцепления. Разработанный алгоритм был успешно применен для реконструкции поля напряжений в пределах

западного фланга Зондской субдукционной зоны до Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г [Ребецкий, Маринин, 2006]

Существенный недостаток, которым обладают предложенные в работах [Coblentz, Richardson, 1995; Heidbach et al., 2010] подходы, заключается в том, что в качестве величины, среднее значение которой различными способами авторы пытались определить, выступала ориентировка проекции на горизонтальную плоскость главной оси сжатия. При этом основной информацией, представленной в «Мировой Карте Напряжений», является положение главных осей зафиксированных напряжений в пространстве. Таким образом, уже на этапе отбора информации для статистического анализа терялась значительная ее часть – вместо полноценного трехмерного тензора напряжений использовалась лишь ориентировка горизонтальной составляющей одной из его главных осей. В итоге, полученное путем такой обработки поле напряжений, по сути, двумерно (способно характеризовать только горизонтальную составляющую реального распределения), а также не несет никакой информации о тектоническом режиме – преобладании сжимающих, растягивающих или сдвиговых напряжений – в том или ином регионе. При этом отметим, что в работе [Coblentz, Richardson, 1995] определение усредненного режима напряжений производилось. Однако данная процедура сводилась к тому, что каждому замеру, в зависимости от зафиксированного в нем режима напряжений, присваивалось некоторое числовое значение (от 0 при взбросовом режиме до 1 при сбросовом), а затем производилось усреднение этих величин для событий, попавших в соответствующую выборку. Понятно, что такой подход до конца корректным считаться не может.

В настоящей работе предлагается методика статистического анализа фактических данных по напряженному состоянию в литосфере Земли, предполагающая учет информации о положении главных осей напряжений в трехмерном пространстве, а также представлены результаты применения разработанного подхода на примере обработки замеров «Мировой Карты Напряжений» 2008 года выпуска [Heidbach et al., 2008].

Методика обработки фактических данных состоит в следующем. Информация о положении в пространстве главных осей напряжений переводится в тензорный вид для всех замеров. Далее для определения среднего напряжения в рамках какой-либо выборки выполняется расчет среднего арифметического для каждой из шести независимых компонент тензора. Полученный таким образом «средний» тензор напряжений преобразовывается к более удобному для визуализации и понимания виду – ориентировке главных его осей в пространстве. Таким образом, на выходе получаются равномерно распределенные по расчетной сетке тензоры усредненных напряжений, которые могут быть представлены в виде положения в пространстве их главных осей.

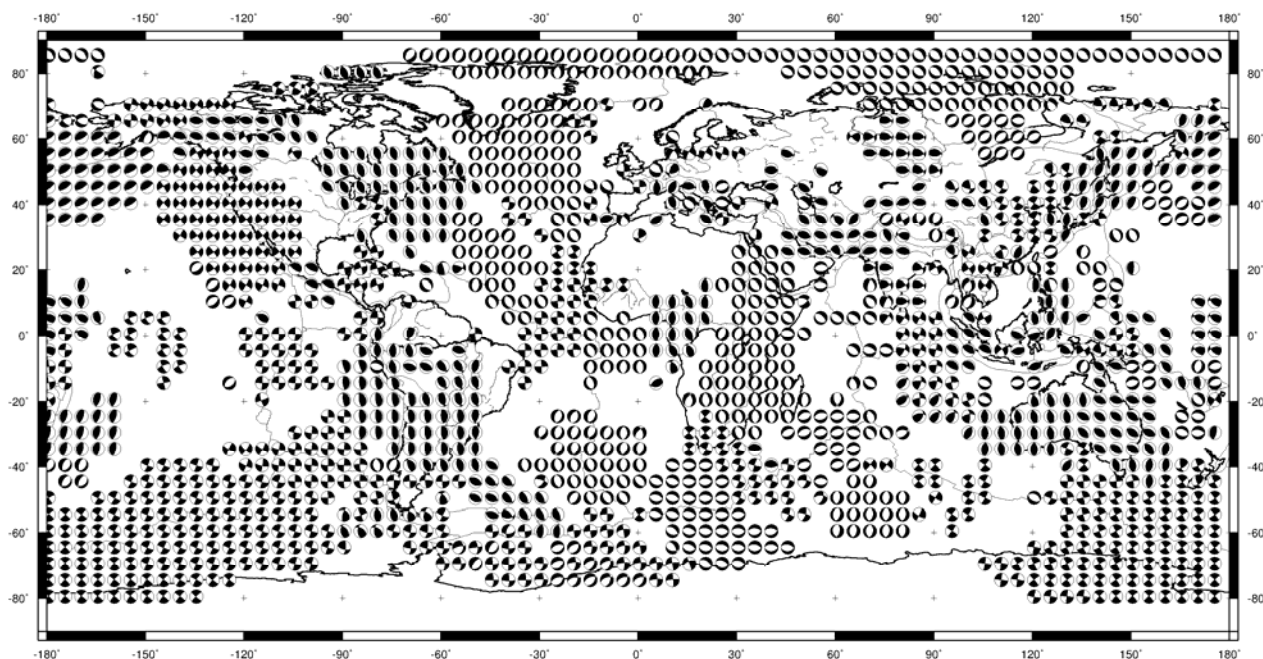


Рис. 1. Результаты статистической обработки данных "Мировой Карты Напряжений" (максимальная допустимая дисперсия – 0.15; минимальное количество событий 5). Усредненные тензоры напряжений представлены в виде диаграммы «beachball plot» (нодальные плоскости в стереографической проекции на нижнюю полусферу)

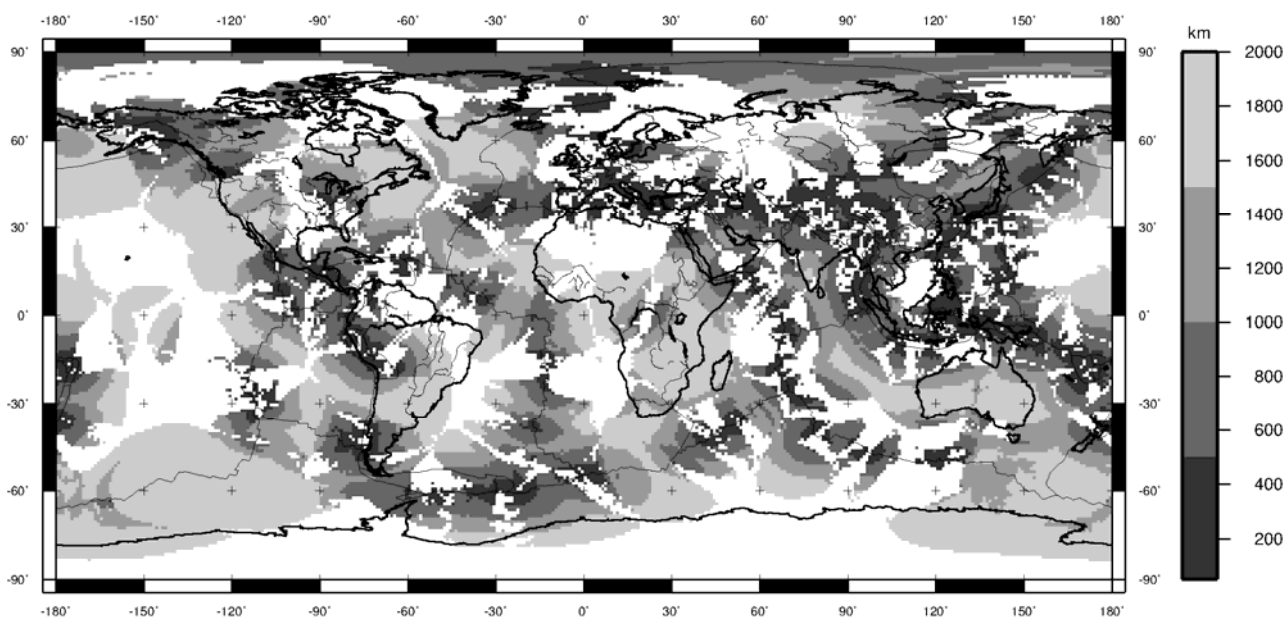


Рис. 2. Радиус усреднения, использовавшийся при вычислении средних значений тензоров напряжений, показанных на рис. 1

Понятно, что наиболее проблематичным моментом в этом подходе оказывается определение того, какие события из используемой базы данных необходимо поместить в выборку при определении среднего тензора напряжений для той или иной ячейки расчетной сетки. В такую выборку предлагается помещать события, пространственное положение которых таково, что расстояние от эпицентра до центра ячейки меньше некоторой величины, называемой радиусом усреднения.

Для определения радиуса усреднения предложено два подхода: в первом случае он полагался постоянным (рассчитаны модели, соответствующие радиусам в 100, 200, 300, 400, 500 и 600 км), а во втором – определялся по методике, которая, в целом, похожа на предложенную в работе [Heidbach et al., 2010]. Второй подход сводится к выбору среди набора радиусов, меняющихся в диапазоне от 2000 до 50 км с шагом 50 км, такого, при котором средняя для шести компонент тензора дисперсия не превышает заданную величину (в рамках данной работы эта величина принимала значения 0.1; 0.15 или 0.2). Вес каждого замера в выборке при определении среднего значения одинаков (т.е. он не зависит ни от качества данных, ни от расстояния до центра текущей ячейки, ни от магнитуды события). Минимальное количество замеров в рамках радиуса усреднения, необходимое для того, чтобы ячейка считалась «заполненной», принималось равным 1 или 5. Режим полученных таким образом для каждой «заполненной» ячейки расчетной сетки напряжений (взбросовый, сбросовый, взбросо-сдвиговый или сбросо-сдвиговый) определялся согласно классификации, принятой в «Мировой Карте Напряжений», из величины угла между главными осями тензора и горизонтальной плоскостью.

В качестве входной информации при расчетах, результаты которых обсуждаются в настоящей работе, использовались все замеры «Мировой Карты Напряжений»-2008, имеющие данные о положении главных осей напряжений и качеством не ниже категории С. Отметим, что релиз 2008 года содержит 21750 замеров, что почти в три раза больше по сравнению с «Мировой Картой Напряжений» 1992 года выпуска. При этом почти 17000 замеров соответствуют категории качества от А до С (т.е. для этих замеров ориентировка проекции на горизонтальную плоскость главной оси сжатия определена с точностью не ниже, чем $\pm 25^\circ$). В отличие от работы [Heidbach et al., 2010] данные, которые помечены как замеры, соответствующие событиям, приуроченным к границам литосферных плит (так называемые «РВЕ» (plate boundary events)), из рассмотрения при обработке не исключались. Разрешение расчетной сетки составляло $1^\circ \times 1^\circ$.

На рис. 1 показаны результаты обработки данных «Мировой Карты Напряжений», полученные при переменном радиусе усреднения, определявшемся из условия неперевышения дисперсией среднего тензора величины 0,15 (минимальное допустимое количество событий равно 5). Границы литосферных плит на рис. 1 и прочих рисунках построены по данным цифровой модели П.Берда [Bird, 2003].

В полученном поле напряжений можно выделить следующие главные особенности:

1) вдоль спрединговых границ (а также в прилегающих к этим границам внутриплитных океанических областях) преобладают сбросовые типы напряжений (исключениями являются Восточно-Тихоокеанский и Австрало-Антарктический срединно-океанические хребты, к которым главным образом приурочены сдвиговые режимы);

2) в пределах Восточно-Африканской, Красноморской и Байкальской континентальных рифтовых систем также четко фиксируется доминирование сбросовых напряжений. Отметим, что в случае и океанических, и континентальных дивергентных границ ориентировка главных осей растяжения почти всегда перпендикулярна их простиранию;

3) в зонах субдукции западной части Тихого океана (Японская и Курило-Камчатская), а также в центральной части Андской зоны субдукции хорошо выражен взбросовый характер напряженного состояния. Главные оси сжатия в данном случае ориентированы перпендикулярно конвергентным границам;

4) в юго-западной части Северо-Американского континента (области развития разлома Сан-Андреас) преобладают напряжения сдвигового типа;

5) в пределах северо-восточной части Северной Америки и центральной части Африканского и Южно-Американского континентов имеют место взбросовые напряжения, характеризующиеся главным образом субширотной (местами до СЗ-ЮВ) ориентировкой главных осей сжатия;

6) вся Австралия находится под воздействием напряжений взбросового типа; причем главные оси сжатия меняют свое субширотное простирание в западной части континента на СВ-ЮЗ в восточной;

7) взбросовые режимы напряжений, характеризующиеся субмеридиональной ориентировкой главных осей сжатия, распространены в северо-восточной части Северной Америки и центральной части Евразийского континента.

Как говорилось выше, определенная для каждой «заполненной» расчетной сетки величина радиуса усреднения определяет степень однородности напряженного состояния. Поэтому в работе [Heidbach et al., 2010] поле напряжений районов, характеризующихся небольшими значениями радиуса усреднения, считается порожденным силами, связанными с локальными плотностными неоднородностями и активными системами разломов. При этом участки литосферы, на которых при расчете средних напряжений использовался большой радиус усреднения, полагаются регионами, напряженное состояние которых главным образом контролируется так называемыми «силами границ литосферных плит», которые передаются на большие расстояния во внутриплитные области. Однако, такое противопоставление «внутрилитосферных» и «границных» сил не является до конца корректным, потому что, скажем, силы отталкивания от хребта, позиционирующиеся как пример «границных» сил, на самом деле являются частным случаем сил разности гравитационного потенциала, связанных с плотностными неоднородностями внутри литосферы (т.е. тех сил, которые в [Heidbach et al., 2010] называются «внутрилитосферными»). При численном моделировании поля напряжений в литосфере Земли силы отталкивания от хребта не привязывают к океаническим рифтовым системам, а распределяют по всей океанической литосфере, рассчитывая их по той же схеме, что и силы плотностных неоднородностей на континентах (см., напр., [Коптев, Ершов, 2010]).

На рис. 2 грациями серого цвета показан радиус усреднения, который использовался при расчете средних напряжений, обсуждавшихся выше и показанных на рис. 1. Из приведенной иллюстрации видно, что наибольшая неоднородность литосферных напряжений имеет место в пределах Альпийско-Гималайского складчатого пояса, вдоль большинства субдукционных границ (за исключением центральной части Андской зоны субдукции) и на некоторых участках всемирной рифтовой системы. Более однородное распределение напряжений фиксируются в Австралии, в большей части Африки, Северной и Южной Америки, а также на значительных пространствах мирового океана.

Если говорить о зависимости полученных в результате статистического анализа распределений напряжений от параметров этой обработки (постоянный или переменный радиус усреднения, минимальное допустимое количество замеров при определении средних значений компонент тензора, максимальная допустимая дисперсия при выборе радиуса усреднения), то отмечают следующие закономерности.

При постоянном радиусе усреднения «заполненными» оказываются в основном те ячейки, которые непосредственно прилегают (т.е. отстоят на расстояние, не большее чем заданный радиус) к областям, содержащим значительное число замеров. Главным образом, замеры базы данных «Мировой Карты Напряжений» сконцентрированы вдоль границ литосферных плит, но существуют и

внутриплитные области, характеризующиеся значительной плотностью замеров (например, Австралия, западная часть Северной Америки, Европа и пр.). При увеличении радиуса усреднения от 100 до 600 км происходит закономерное и постепенное увеличение числа «заполненных» ячеек. При этом результаты расчетов в пределах одного радиуса усреднения мало зависят от того, какое минимальное допустимое количество замеров (1 или 5) задано. Разница относительно ощутимо проявляется только в пределах внутренней части Тихоокеанской плиты, где к областям развития современного плюмового магматизма приурочены единичные замеры, которые в одном случае позволяют «заполнить» соответствующие ячейки, а в другом – нет.

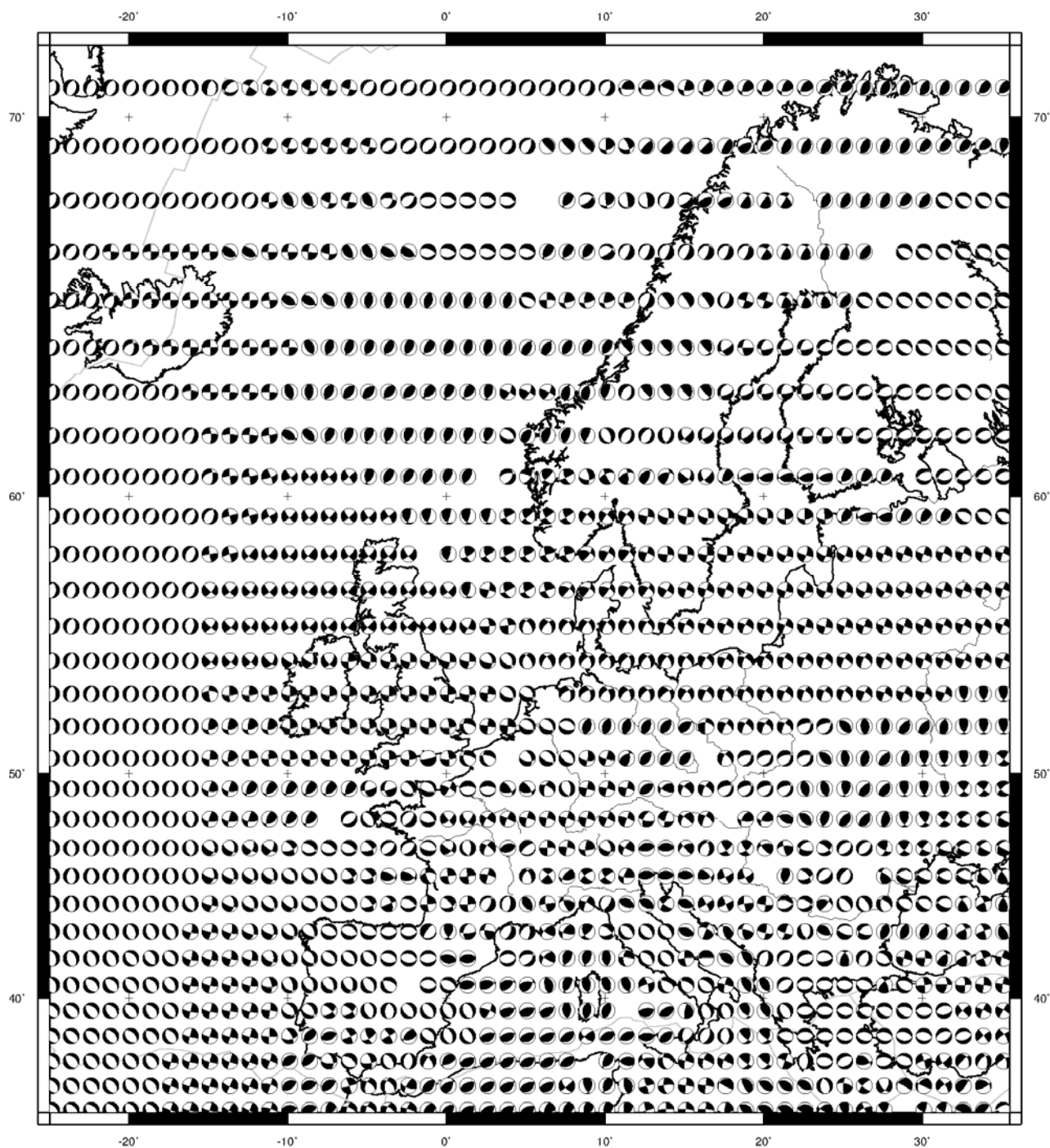


Рис. 3. Результаты статистической обработки данных "Мировой Карты Напряжений" для Европейского региона (максимальная допустимая дисперсия – 0.15; минимальное количество событий 1). Усредненные тензоры напряжений представлены в виде диаграммы «beachball plot» (нодальные плоскости в стереографической проекции на нижнюю полусферу)

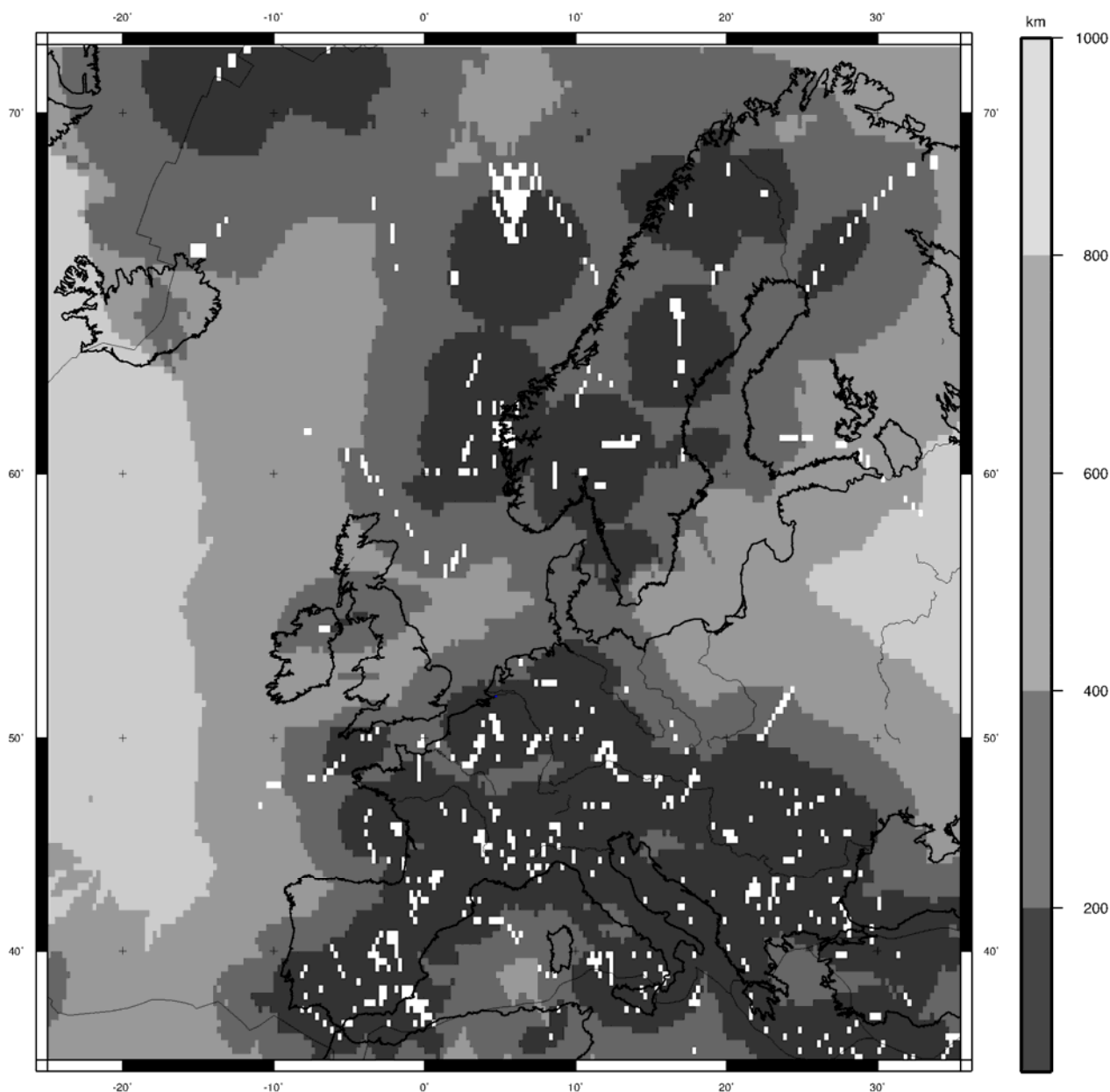


Рис. 4. Радиус усреднения, использовавшийся при вычислении средних значений тензоров напряжений, показанных на рис. 3

В случае, когда радиус усреднения для каждой ячейки определялся из условия непревышения дисперсией среднего тензора заданной величины (0.1; 0.15 или 0.2), отмечается достаточно высокая чувствительность итогового распределения напряжений к этому параметру. Чем выше значение допустимой дисперсии, тем меньше «незаполненных» ячеек в расчетной сетке и тем больше степень генерализации при усреднении фактических данных. Влияние минимального допустимого количества замеров наиболее интенсивно проявляется при минимальном из рассмотренных значений допустимой дисперсии (0.1). Это в первую очередь отражается в значительном уменьшении числа «заполненных» ячеек при его увеличении с 1 до 5.

В целом, подход к обработке данных по замерам напряженного состояния, который предполагает, что дисперсия усредненного тензора напряжений в каждой из «заполненных» ячеек расчетной сетки не превышает некоторую наперед заданную величину, выглядит более целесообразным по сравнению с методикой, основанной на использовании постоянного радиуса усреднения. Это связано с тем, что при определении рабочей выборки с помощью постоянного радиуса, полученные средние значения для разных ячеек характеризуются различной дисперсией и, следовательно, не могут рассматриваться в качестве однородной информации (это информация различной степени достоверности).

Возможности разработанной методики продемонстрированы также на примере Европейского региона (область, ограниченная на западе и востоке по меридианам 25° з.д. и $35,5^\circ$ в.д., на юге и севере – по параллелям $34,25^\circ$ с.ш. и $71,5^\circ$ с.ш. соответственно). Разрешение выполненных расчетов в данном случае составляло – $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Для Европы был рассчитан тот же набор моделей и при тех же параметрах, что в случае глобальных расчетов (см. выше), за одним исключением – диапазон изменения радиуса усреднения был выбран не от 2000 до 50 (с шагом 50 км), а от 2000 до 10 (с шагом 10 км). Уменьшение минимального из возможных радиусов и, соответственно, шага перебора были необходимы в связи с уменьшением размера ячейки расчетной сетки.

Были также произведены дополнительные расчеты, направленные на определение чувствительности получаемых результатов к диапазону и шагу перебора радиуса усреднения. В частности, был рассчитан полный набор моделей при шаге перебора в 25 км и таком же минимальном значении диапазона перебора. В результате было установлено, высокая чувствительность к этим параметрам отсутствует, т.е. относительно малые их вариации не приводят к заметным изменениям в выходных данных.

На рис. 3 приведены результаты, соответствующие максимальной допустимой дисперсии 0,15 при минимальном допустимом количестве событий, равном 1.

Главные особенности полученного распределения напряжений следующие:

- 1) в целом в пределах континентальной части Европы преобладают напряжения сдвигового типа;
- 2) ориентировка осей минимальных напряжений в континентальной части Западной Европы имеет ориентировку от СЗ-ЮВ до ССЗ-ЮЮВ;
- 3) обстановка растяжения фиксируется в пределах Западной Анатолии и Балканского полуострова, где главные оси растяжения имеют преимущественно субмеридиональную ориентировку; на Аппенинском полуострове и Карелии, где простираются главные оси растяжения СЗ-ЮВ, и на Пиренейском полуострове, где ориентировка осей минимальных напряжений меняется от субмеридиональной до субширотной;
- 4) напряжения взбросового типа распространены в области Пиренейского и Альпийского горных сооружений, где главные оси сжатия имеют крайне изменчивую ориентировку (от субширотной до субмеридиональной), а также в северной части Скандинавского полуострова и Северного моря, где минимальные оси напряжений характеризуется СЗ-ЮВ (до ЗСЗ-ВЮВ) простираем;
- 5) в западной части Средиземного моря, а также в Тирренском, Адриатическом и Ионическом морях доминирует обстановка сжатия, в то время как в пределах Эгейского моря имеет место субмеридиональное растяжение.

Распределение радиуса усреднения, использовавшегося при статистической оценке средних напряжений в Европе, приведено на рис.4. Можно отметить следующие главные черты этого распределения:

- 1) в пределах практически всей континентальной части рассматриваемой области (за исключением самого восточного ее участка, соответствующего Восточно-Европейской платформе) радиус усреднения не превышает 800 км;
- 2) большая часть европейского альпийско-герцинского складчатого сооружения имеет низкие значения (<200 км) радиуса усреднения. Лишь в самой северной части Пиренейского полуострова и на Британских островах он достигает величины 500 км;
- 3) для восточной части Средиземного моря, а также Ионического и Северного морей свойственны значения радиуса усреднения от 200 до 400 км, но на некоторых их участках он превышает 400 км;
- 4) радиус усреднения в пределах Скандинавского полуострова достаточно неравномерно изменяется в диапазоне от 100 до 600 км;
- 5) намечается зона быстрого перехода от областей с относительно малым радиусом усреднения (<200 км) на западе к зонам сравнительно больших его значений (>400 км) на востоке. Эта зона протягивается примерно вдоль линии Торнквиста.

Общие закономерности изменения результатов расчетов в зависимости от входных параметров статистической обработки для Европы имеют те же самые основные особенности, что и были установлены и описаны при вычислениях глобального усредненного поля напряжений.

С полным перечнем полученных в рамках настоящей работы результатов (как в глобальном масштабе, так и для Европейского региона) можно ознакомиться на сайте <http://sbmg.geol.msu.ru/pp/akoptev> (или <http://www.koptev.lgb.ru>).

Результаты статистической обработки данных «Мировой Карты Напряжений» были использованы для количественной оценки степени соответствия между фактическими данными и численными моделями напряженного состояния литосферы Земли. Методика, использовавшаяся при построении этих моделей, и результаты расчетов приведены в работах [Koptev, Ershov, 2008; Коптев, 2009; Коптев, 2010; Коптев, Ершов, 2011]. Обычно в качестве критерия соответствия расчетных данных фактическим используются степень совпадения режима деформации (процентная доля совпадений по отношению к общему числу точек сравнения) и/или среднеквадратичная разница углов между главными осями расчетного и наблюдаемого тензоров напряжений [Burbidge, 2004; Liu, Bird, 2002]. Нами предлагается альтернативный критерий. Для каждой «заполненной» в результате усреднения данных «Мировой Карты Напряжений» ячейки рассчитывалось три квадрата разницы между независимыми горизонтальными компонентами расчетного и «фактического» тензора (под «фактическим» в данном случае понимается тензор, полученный в результате усреднения). Среднее значение этих квадратов и определяет степень соответствия модельных расчетов наблюдаемым данным в текущей ячейке. Такой подход позволяет получить наиболее независимую и объективную меру соответствия модельных построений наблюдаемым данным, что крайне полезно не только с точки зрения оценки рассчитанной модели, но и с позиций возможности выбора правильного направления коррекции входных параметров моделирования для получения в модели более хорошо отражающих реальность результатов.

При этом важно отметить, что полученные в рамках данной работы наборы карт усредненного поля напряжений представляют собой самостоятельную научную ценность, поскольку они отражают генерализованную картину распределения напряжений в литосфере Земли, что может позволить сделать некоторые выводы применительно к геодинамике того или иного региона.

ЛИТЕРАТУРА

- 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. С. 356–359.
- Коптев А.И.* Математическое моделирование напряженного состояния в литосфере Земли // Материалы российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной «Году Планеты Земля» «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых». Москва, МГУ. 6-7 апреля 2009 г. Т. 1. С. 47–52.
- Коптев А.И., Ершов А.В.* Роль гравитационного потенциала литосферы в формировании глобального поля напряжений // Физика Земли. 2010. № 12. С. 66–81.
- Ребецкий Ю.Л.* Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмостектонических деформаций на основе современной теории пластичности // ДАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392–395.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированного состояния и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин // Автореферат на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М.: 2003. 56 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для величин тектонических напряжений // ДАН. 2003. Т. 388, № 2. С. 237–241.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры западного фланга Зондской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 г // ДАН. 2006. Т. 406, № 1. С. 106–110.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 11. С. 1192–1206.
- 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.
- Burbidge D.R.* Thin plate neotectonic models of the Australian plate // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. 10405. doi: 10.1029/2004JB003156.
- Coblentz D., Richardson R.M.* Statistical trends in the intraplate stress field // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100 (B10). P. 20245–20255.

- Heidbach O., Reinecker J., Tingay M., Müller B., Sperner B., Fuchs K., Wenzel F.* Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database // *Tectonics*. 2007. Vol. 26 (TC6014). doi: 10.1029/2007TC002133.
- Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfeß D., Müller B.* Global crustal stress pattern based on the World Stress Map data base release 2008 // *Tectonophysics*. 2010. Vol. 482. P. 3–15.
- 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. Paris. 2008.
- Koptev A., Ershov A.* Modelling of global lithospheric stress field on the spherical Earth // 3rd World Stress Map Conference. Potsdam/ 15-17 October 2008. P. 77.
- Liu Z., Bird P.* Finite element modeling of neotectonics in New Zealand // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107 (B12). 2328. doi: 10.1029/2001JB001075.
- Müller B., Zoback M.L., Fuchs K., Mastin L., Gregersen S., Pavoni N., Stephansson O., Ljunggren C.* Regional patterns of tectonic stress in Europe // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 11783–11803.
- Zoback M.L.* First and second order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 11703–11728.