

УДК 551.24.02

А.И. Коптев¹, А.В. Ершов², Е.А. Маловичко³

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ: РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МИРОВОЙ КАРТЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Разработана методика статистической обработки фактических данных о напряженном состоянии литосферы Земли, которая предполагает учет исходной информации о положении главных осей напряжений в трехмерном пространстве. Подход основан на том, что при определении среднего напряжения в рамках какой-либо выборки выполняется расчет среднего арифметического значения для каждой из шести независимых компонент тензора. При определении выборки для вычисления среднего напряжения для текущей ячейки расчетной сетки в эту выборку предлагается помещать замеры, пространственное положение которых таково, что расстояние от точки замера до центра ячейки меньше некоторой величины, называемой радиусом усреднения. Радиус усреднения либо задавали постоянным для всех ячеек расчетной сетки, либо определяли из условия не превышения дисперсией среднего тензора некоторой заданной величины. Представлены результаты применения предлагаемого подхода на примере обработки замеров из Мировой карты напряжений (2008) [Heidbach et al., 2008]. Полученные наборы карт усредненного поля напряжений отражают генерализованную картину распределения напряжений в литосфере Земли.

Ключевые слова: напряженное состояние, статистическая обработка, радиус усреднения, Мировая карта напряжений, усредненное поле напряжений.

The methods of statistical processing of the input data about stress field in the Earth lithosphere are developed. These methods assume the account of the input information on position of the main stress axes in three-dimensional space. The approach is based on calculation of arithmetic mean value for each of six tensors independent component for definition of average stress within any extract of input data list. For definition of extract for calculation average stress in the current grid's cell it is offered to insert in this extract only these data distance to which from center of this cell not exceeds some value named as search radius. The search radius was set to constants for all cells of calculation grid or defined from condition not exceeding of dispersion of the average tensor by some preset value. Results of application of the offered approach on example of processing World Stress Map data [Heidbach et al., 2008] is presented. The calculated number of cards of the average stress field reflects the main features of distribution of the stresses in the Earth lithosphere.

Key words: stress state; statistical processing; search radius; World Stress Map; average stress field.

Введение. Один из главных недостатков любой базы данных о напряженном состоянии в земной коре или литосфере — неравномерность распределения замеров. При использовании этих данных для сравнения с результатами численного 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 носи-

ли исключительно качественный характер. Однако слишком высокая доля субъективизма, присущая визуальному обобщению информации, не позволяет считать такую методику достаточно надежной.

Глобальная карта распределения напряжений, полученная в результате статистической обработки фактических данных, впервые была представлена в работе [Coblentz, Richardson, 1995], где в качестве входной информации использовались 4537 замеров, соответствующих качеству А–С, из Мировой карты напряжений (1992). Средняя ориентировка оси сжатия для ячейки размером $5 \times 5^\circ$ определялась как среднее значение ориентировок проекций на горизонтальную плоскость главных осей сжатия по данным замеров, попадающих в эту ячейку. Из 582 ячеек, для которых

¹ ООО «Лаборатория геологии и моделирования осадочных бассейнов» (SBmG), ведущий геолог; e-mail: koptev06@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, доцент; e-mail: andrey_ershov@list.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, студент; e-mail: alena_mob@mail.ru

эта ориентировка определена, 200 ячеек содержали только один замер. Поэтому оценивать величину дисперсии вычисленной средней величины имело смысл только для оставшихся 382 ячеек, для которых существует два замера или более. Существенной проблемой, с которой столкнулись авторы, было превышение дисперсией допустимых значений в 196 из этих 382 ячеек (т.е. более чем в половине случаев).

Принцип определения среднего значения какой-либо величины для текущей ячейки расчетной сетки на основе обработки только тех данных, которые попадают в эту ячейку, применявшийся в работе [Coblentz, Richardson, 1995], можно считать соответствующим использованию постоянного радиуса усреднения (около 250 км в данном случае). Под радиусом усреднения здесь и далее будем понимать некоторую величину, определяющую максимальную дистанцию от центра текущей ячейки расчетной сетки до проекции на горизонтальную плоскость точки текущего замера из используемой базы данных, не превышение которой допускает присутствие этого замера в выборке для определения среднего значения напряжения для рассматриваемой ячейки.

Большие значения дисперсии, полученные в работе [Coblentz, Richardson, 1995] для значительного числа ячеек, для которых определена средняя ориентировка осей сжатия, связывают именно с использованием постоянного радиуса усреднения для всех ячеек расчетной сетки. Поэтому в более поздних работах [Heidbach et al., 2007; Heidbach et al., 2010] было предложено проводить усреднение для разных ячеек сетки с различным радиусом. Выбор радиуса усреднения для текущей ячейки выполнялся путем последовательного перебора в диапазоне от 1000 до 100 км с шагом 100 км. Для каждого радиуса при этом переборе определяли 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). Если это отклонение не превышало заданную величину, перебор прекращали и для текущей ячейки фиксировали соответствующий радиус усреднения. Таким образом, на выходе получалось распределение ориентировок главных осей сжатия на равномерной сетке; причем каждый элемент этого распределения был рассчитан в результате усреднения при стандартном отклонении, не превышающем заданный порог. При таком подходе величину радиуса усреднения можно рассматривать в качестве меры степени неоднородности напряженного состояния того или иного региона Земли.

В работах [Ребецкий, 1999, 2003] для реконструкции параметров напряженного состояния по данным о механизмах землетрясений предложен метод катаклического анализа, который позволяет не только определить ориентацию главных осей напряжений, но и оценить значения максимальных касательных

напряжений и эффективного всестороннего давления. В рамках этой методики выделяются три этапа. На первом этапе устанавливают ориентировки главных осей тензора напряжений и значения коэффициента Лодэ—Надаи путем выбора из всех возможных напряженных состояний такого, для которого достигается максимум диссипации энергии, накопленной в упругих деформациях. 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 успешно применен для реконструкции поля напряжений в пределах западного фланга Зондской субдукционной зоны до Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г. [Ребецкий, Маринин, 2006].

Существенный недостаток подходов, предложенных в работах [Coblentz, Richardson, 1995; Heidbach et al., 2010], заключается в том, что в качестве величины, среднее значение которой разными способами авторы пытались определить, выступала ориентировка *проекции* (главной оси сжатия) *на горизонтальную плоскость*. При этом основная информация, представленная в Мировой карте напряжений, — положение главных осей зафиксированных напряжений *в пространстве*. Таким образом, уже на этапе отбора информации для статистического анализа терялась значительная ее часть, т.е. 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. Отметим, что определение усредненного режима напряжений приведено в работе [Coblentz, Richardson, 1995]. Однако процедура сводилась к тому, что каждому замеру в зависимости от зафиксированного в нем режима напряжений присваивалось некоторое численное значение (от 0 при взбросовом режиме до 1 при сбросовом), а затем эти величины усреднялись для событий, попавших в соответствующую выборку. Такой подход нельзя считать вполне корректным.

Мы предлагаем методику статистического анализа фактических данных о напряженном состоянии литосферы Земли, предполагающую учет информации о положении главных осей напряжений в трехмерном пространстве, а также представляем результаты применения разработанного подхода на примере обработки замеров из Мировой карты напряжений (2008) [Heidbach et al., 2008].

Методика расчетов и исходные данные. Предлагаемая методика обработки фактических данных состоит в следующем.

В качестве исходных данных в каждом замере выступает информация о положении в пространстве главных осей напряжений, представленная в виде азимута и угла падения для каждой оси. Поскольку для большинства замеров, имеющих в используемой базе данных, величина напряжений на главных осях неизвестна, мы решили использовать единичные значения на главных осях напряжений сжатия и растяжения (-1 и +1 соответственно), а напряжения на промежуточной главной оси полагать нулевыми. В этом случае в системе координат, в которой ось X совпадает с главной осью сжатия, ось Y — с промежуточной осью, а ось Z — с главной осью растяжения, тензор напряжений любого замера может быть записан в виде

$$\sigma' = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Единой для всех замеров системой координат была выбрана такая, где ось X направлена по меридианам на север, ось Y — по параллелям на восток, а ось Z — по радиусу от центра Земли. Чтобы получить тензор в этой системе координат, необходимо выполнить преобразование

$$\sigma_{kl} = \sum_{r=1}^3 \sum_{s=1}^3 \alpha_{kr} \alpha_{ls} \sigma'_{rs}, \quad (2)$$

где σ_{kl} — текущий элемент тензора, получаемого в процессе пересчета; σ' — исходный тензор; α_{kr} и α_{ls} — соответствующие элементы матрицы поворота [Кочин, 1965].

Матрица поворота для любого тензора представляет собой таблицу косинусов углов между осями координатных систем, для которых проводится данное преобразование [Лурье, 1961]. Если направляющие косинусы этой матрицы выразить через элементы залегания главных осей напряжения, она будет выглядеть следующим образом:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \cos(azP)\cos(plP) & \cos(azB)\cos(plB) & \cos(azT)\cos(plT) \\ \sin(azP)\cos(plP) & \sin(azB)\cos(plB) & \sin(azT)\cos(plT) \\ \sin(plP) & \sin(plB) & \sin(plT) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где azP и plP — азимут и угол падения главной оси сжатия, azB и plB — азимут и угол падения промежуточной главной оси, azT и plT — азимут и угол падения главной оси растяжения соответственно.

Таким образом, предложенный подход позволяет перевести информацию о положении в пространстве главных осей напряжений в тензорный вид для всех замеров.

Далее для определения среднего напряжения $\langle \sigma_{ij} \rangle$ в рамках какой-либо выборки рассчитывается среднее арифметическое для каждой из шести независимых компонент тензора:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N \sigma_{ij}^k, \quad (4)$$

где σ_{ij}^k — значение текущего элемента тензора напряжения для k -го замера используемой выборки, а N — суммарное число замеров в данной выборке.

Вес каждого замера в выборке при определении среднего значения одинаков (т.е. не зависит ни от качества данных, ни от расстояния до центра текущей ячейки, ни от магнитуды события).

Для визуализации и анализа полученного среднего тензора напряжений стандартным способом рассчитывалась ориентировка его главных осей в пространстве [Мэйз, 2007].

Наиболее существенный момент в этом подходе — определение подмножества событий из используемой базы данных, которые участвуют в выборке при определении среднего тензора напряжений для каждой ячейки расчетной сетки. В такую выборку предлагается помещать события, пространственное положение которых таково, что расстояние от эпицентра (проекция точки замера на горизонтальную плоскость) до центра ячейки меньше некоторой величины, которая была определена выше как радиус усреднения.

Для определения величины радиуса усреднения предложено два подхода: в первом случае его полагали постоянным (рассчитаны модели, соответствующие радиусам в 100, 200, 300, 400, 500 и 600 км), а во втором — определяли по методике, в основе аналогичной предложенной в работе [Heidbach et al., 2010], т.е. радиус определяли для каждой ячейки в отдельности в пределах диапазона от 2000 до 50 км (перебор выполняли с шагом 50 км) таким образом, чтобы средняя дисперсия для 6 независимых компонент тензора не превышала наперед заданной величины (в рамках нашей работы эта величина принимала значения 0,1; 0,15 или 0,2). Дисперсию s_{ij} компоненты тензора напряжений рассчитывали по стандартной формуле:

$$s_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\sigma_{ij}^k - \langle \sigma_{ij} \rangle)^2. \quad (5)$$

Ячейка считалась «заполненной», если число замеров в пределах области, определяемой радиусом усреднения, было равно или превышало заданную величину (для рассчитанных нами моделей оно принято равным 1 или 5). Режим полученного указанным способом напряженного состояния (взбросовый, сбросовый, взбросо-сдвиговый или сбросо-сдвиговый) для каждой «заполненной» ячейки расчетной сетки определяли согласно классификации, принятой в Мировой карте напряжений, из величины угла между главными осями тензора и горизонтальной плоскостью.

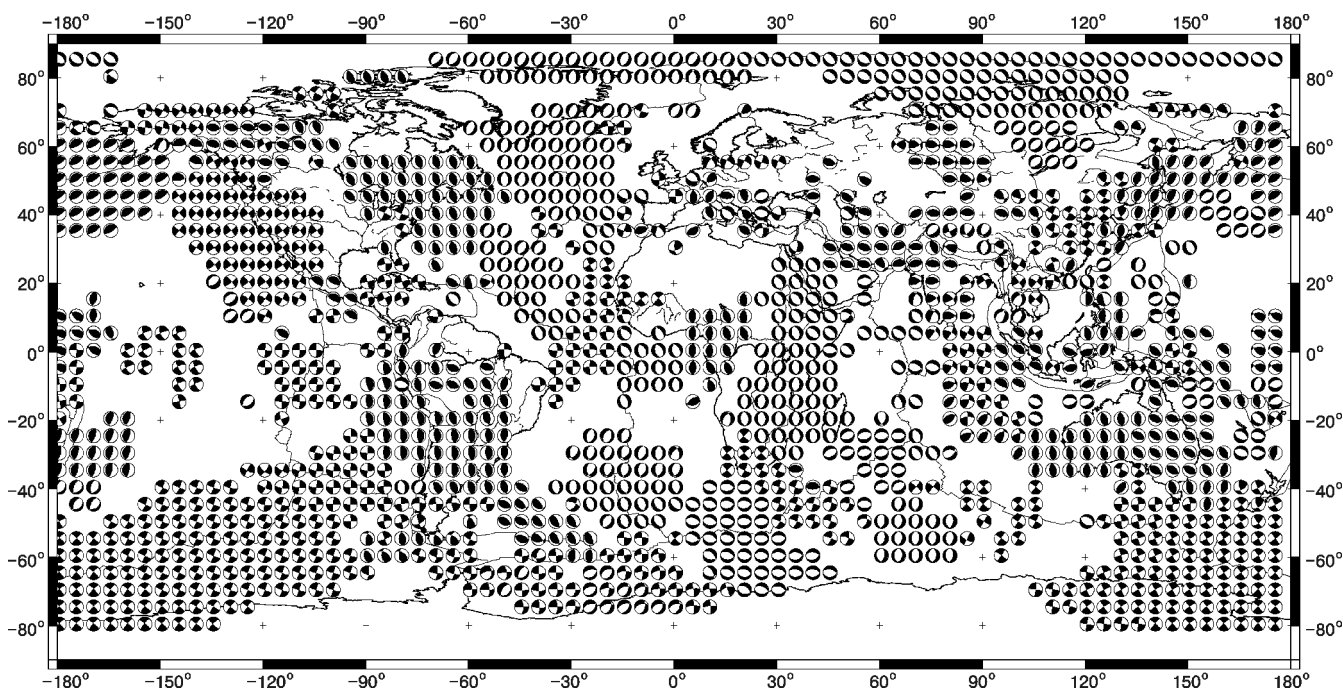


Рис. 1. Результаты статистической обработки данных Мировой карты напряжений (максимальная допустимая дисперсия — 0,15; минимальное число событий — 5). Усредненные тензоры напряжений представлены в виде диаграммы «beachball plot» (нодальные плоскости в стереографической проекции на нижнюю полусферу)

В качестве входной информации при расчетах использованы все замеры из Мировой карты напряжений (2008), для которых есть данные о положении главных осей напряжений и с качеством не ниже категории С. Подчеркнем, что релиз к Мировой карте напряжений (2008) содержит 21 750 замеров, что почти в 3 раза больше, чем к Мировой карте напряжений (1992). При этом почти 17 000 замеров соответствуют категории качества от А до С (т.е. для этих замеров ориентировка проекции главной оси сжатия на горизонтальную плоскость 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 plate boundary events, РВЕ), из рассмотрения при обработке не исключали. Размер ячейки расчетной сетки составлял $1 \times 1^\circ$.

Отметим, что использованные нами исходные данные о фокальных механизмах — *кинематические*, т.е. при прямом пересчете они позволяют получить параметры тензора снимаемых упругих деформаций в областях соответствующих очагов землетрясений. Поэтому надо иметь в виду, что переход от этих данных к тензору снимаемых напряжений возможен, если только предположить, что среда обладает упругими изотропными свойствами.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1 показаны результаты обработки данных из Мировой карты напряжений, полученные при переменном радиусе усреднения, определявшемся из условия, что дисперсия среднего тензора не превышает 0,15 (минимальное допустимое число событий равно 5). Среди всех рассчитанных моделей именно

модель, полученная при таких параметрах обработки, точнее всего отражает генерализованную картину напряженного состояния литосферы Земли. Границы литосферных плит на рис. 1 и других рисунках построены по данным цифровой модели П. Берда [Bird, 2003].

В представленном поле напряжений можно выделить следующие главные особенности:

1) вдоль спрединговых границ (а также в прилегающих к этим границам внутриплитных океанических областях) преобладает сбросовый тип напряжений (исключение — 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 в западной части Тихого океана (Японская и Курило-Камчатская), а также в центральной части Андской зоны субдукции хорошо выражен взбросовый характер напряженного состояния, а главные оси сжатия ориентированы перпендикулярно конвергентным границам;

4) в юго-западной части Северной Америки (область развития разлома Сан-Андреас) преобладают напряжения сдвигового типа;

5) в пределах северо-восточной части Северной Америки и центральной части Африки и Южной Аме-

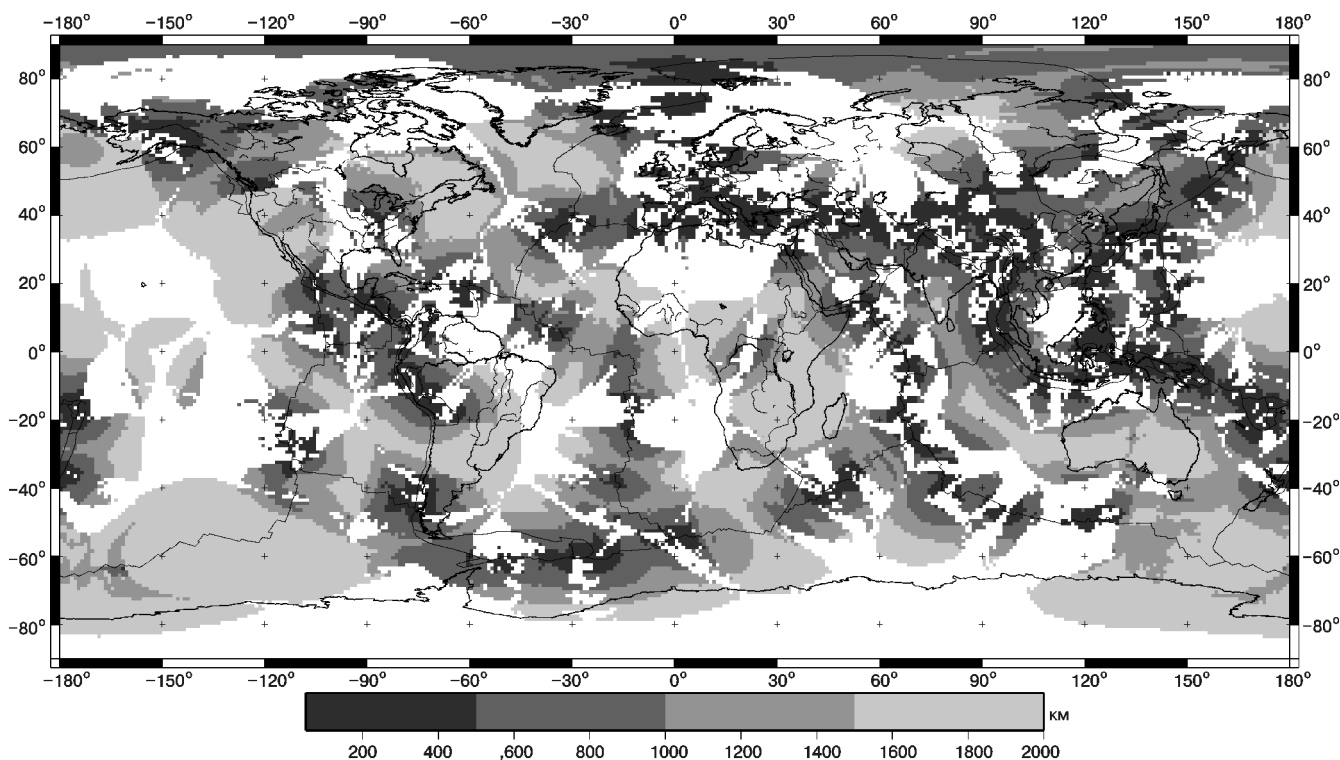


Рис. 2. Радиус усреднения, использованный при вычислении средних значений тензоров напряжений, показанных на рис. 1

рики имеют место взбросовые напряжения, характеризующиеся главным образом субширотной (местами до северо-западной — юго-восточной) ориентировкой главных осей сжатия;

6) вся Австралия находится под воздействием напряжений взбросового типа, причем главные оси сжатия меняют субширотное простирание в западной части континента на северо-восточное и на юго-западное в восточной;

7) взбросовый режим напряжения, характеризующийся субмеридиональной ориентировкой главных осей сжатия, распространен в северо-западной части Северной Америки и центральной части Евразии.

Как указано 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, которые связаны с локальными плотностными неоднородностями и активными системами разломов. При этом участки литосферы, для которых при расчете средних напряжений использован большой радиус усреднения, полагаются регионами, где напряженное состояние контролируется главным образом так называемыми силами границ литосферных плит, которые передаются на большое расстояние во внутриплитные области. Однако такое противопоставление «внутрилитосферных» и «границных» сил не вполне корректно, потому что, например, силы отталкивания от хребта, позиционирующиеся в качестве примера «границных»

сил, на самом деле являются частным случаем сил разности гравитационного потенциала, связанных с плотностными неоднородностями внутри литосферы (т.е. тех сил, которые в работе [Heidbach et al., 2010] названы «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 [Коптев, Ершов, 2010].

На рис. 2 градациями серого цвета показан радиус усреднения, который использован при расчете средних напряжений, обсуждавшихся выше и показанных на рис. 1. На рис. 2 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 фиксируется в Австралии, на большей части Африки, Северной и Южной Америки, а также на значительном пространстве Мирового океана.

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

При постоянном радиусе усреднения «заполненными» оказываются в основном те ячейки, которые непосредственно прилегают (т.е. отстоят на расстояние, не большее заданного радиуса) к областям, содержащим значительное число замеров. Замеры из Мировой карты напряжений сконцентрированы главным образом 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 число замеров (1 или 5) задано. Разница относительно ощутимо проявляется только для 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.

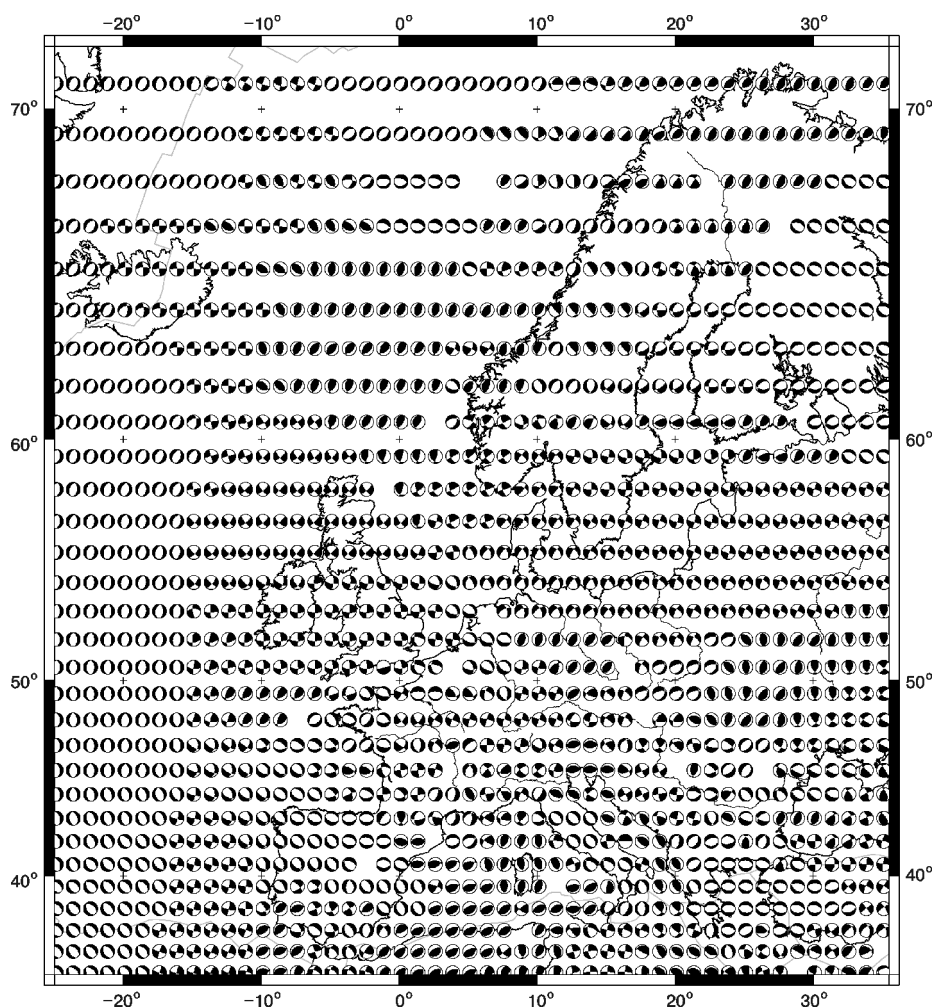


Рис. 3. Результаты статистической обработки данных Мировой карты напряжений для Европейского региона (максимальная допустимая дисперсия — 0,15; минимальное число событий — 1). Усредненные тензоры напряжений представлены в виде диаграммы «beach-ball plot» (нодальные плоскости в стереографической проекции на нижнюю полусферу)

Если радиус усреднения для каждой ячейки определяли из условия непревышения дисперсией среднего тензора заданной величины (0,1; 0,15 или 0,2), отмечалась 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 числа замеров наиболее интенсивно проявляется при минимальном значении 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 замеров напряженного состояния, который предполагает, что дисперсия усредненного тензора напряжений в каждой из «заполненных» ячеек расчетной сетки не превышает некоторую наперед заданную величину, выглядит целесообразнее 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 разной дисперсией, следовательно, их нельзя рассматривать в качестве однородной информации (это информация имеет разную степень достоверности).

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

Для Европы 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 км (с шагом 50 км), а от 2000 до 10 км (с шагом 10 км). Уменьшить минимальный из возможных радиусов и соответственно шаг перебора было необходимо в связи с уменьшением размера ячейки расчетной сетки.

Кроме того, выполнены дополнительные расчеты, направленные на определение чувствительности получаемых результатов

к диапазону и шагу перебора радиуса усреднения. В частности, рассчитан полный набор моделей при шаге перебора, равном 25 км, и при таком же минимальном значении диапазона перебора. В результате установлено, что 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.

Выявлены следующие особенности полученного распределения напряжений:

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 северо-западной — юго-восточной до север-северо-западной — юг-юго-восточной;

3) обстановка растяжения фиксируется в пределах Западной Анатолии и Балканского п-ова, где главные оси растяжения имеют преимущественно субмеридиональную ориентировку; на Аппенинском п-ове и в Карелии, где простирание главных осей растяжения северо-западное — юго-восточное, и на Пиренейском п-ове, где ориентировка осей максимальных напряжений изменяется 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 п-ова и Северного моря, где минимальные оси напряжений характеризуются северо-западным — юго-восточным (до запад-северо-западного — восток-юго-восточного) простиранием;

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 преобладает субмеридиональное растяжение.

Распределение радиуса усреднения, использованного 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 участка, соответствующего Восточно-Европейской платформе) радиус усреднения не превышает 800 км;

2) большая часть европейской части альпийско-герцинского складчатого сооружения имеет низкие значения (<200 км) радиуса усреднения; лишь в самой северной части Пиренейского п-ова и на Британских островах он достигает величины 500 км;

3) восточной части Средиземного моря, а также Ионического и Северного морей свойственны значения радиуса усреднения от 200 до 400 км, но на некоторых участках он превышает 400 км;

4) радиус усреднения в пределах Скандинавского п-ова 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 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 главные особенности, которые установлены и описаны для глобального усредненного поля напряжений (см. выше).

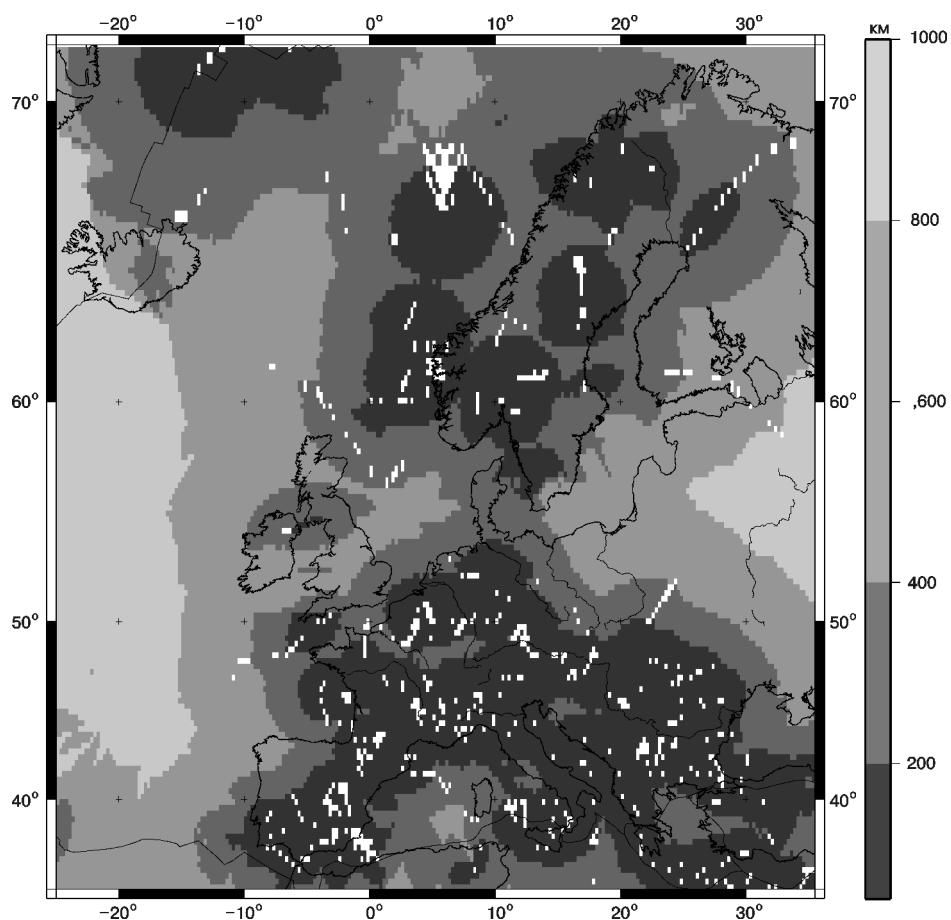


Рис. 4. Радиус усреднения, использованный при вычислении средних значений тензоров напряжений, показанных на рис. 3

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

Результаты статистической обработки данных Мировой карты напряжений использованы для количественной оценки степени соответствия между фактическими данными и численными моделями напряженного состояния литосферы Земли. Методика, использованная для построения этих моделей, и результаты расчетов приведены в работах [Коптев, Ершов, 2008; Коптев, 2009, 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 разность значений углов между главными осями расчетного и наблюдаемого тензоров напряжений [Burbidge, 2004; Liu, Bird, 2002].

Мы предлагаем альтернативный критерий. Для каждой ячейки, «заполненной» в результате усреднения данных из Мировой карты напряжений, рассчитывали 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 более независимую и объективную меру соответствия модельных построений наблюдаемым данным, что крайне полезно не только с точки зрения оценки качества рассчитанной модели, но и с позиций возможности правильной коррекции входных параметров будущих моделей для получения результатов, более точно отражающих реальность.

Заключение. Предложена методика количественного анализа фактического материала по наблюдаемому в литосфере Земли полю напряжений, которая предполагает расчет среднего арифметического для каждой из 6 независимых компонент тензора при

определении среднего напряжения в пределах какой-либо выборки. Такой подход позволяет учитывать исходную информацию о положении главных осей напряжений в трехмерном пространстве, а не только их горизонтальную составляющую, как это принято в предыдущих работах [Coblentz, Richardson, 1995; Heidbach et al., 2010].

Разнообразие рассчитанных по этой методике моделей усредненного поля литосферных напряжений определялось разными вариантами распределения по расчетной сетке радиуса усреднения — величины, обозначающей максимальное допустимое расстояние от центра текущей ячейки до эпицентральной точки замера, попадающего в выборку для данной ячейки. В одном случае радиус усреднения полагали постоянным (при этом рассчитано несколько моделей, соответствующих разным его значениям), а во втором его рассчитывали для каждой ячейки из условия неперевышения дисперсией среднего тензора некоторой заданной величины (рассчитана серия моделей, соответствующих разным значениям максимально допустимой дисперсии).

Представленные результаты обработки данных из Мировой карты напряжений (2008) [Heidbach et al., 2008] демонстрируют возможности предлагаемой нами методики для построения карт генерализованного распределения напряжений как в глобальном, так и в региональном масштабе.

Такого рода статистическая обработка позволяет избавиться от главного недостатка любой базы данных о напряженном состоянии литосферы — нерегулярности распределения приведенных в ней замеров. Сравнение с результатами такого анализа позволяет количественно оценить результаты численного моделирования поля напряжений, что очень полезно с точки зрения выбора правильного направления дальнейших исследований в этой области.

Построенные нами наборы карт усредненного поля напряжений представляют собой самостоятельную научную ценность, поскольку отражают генерализованную картину распределения напряжений в литосфере Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коптев А.И. Компьютерная модель напряженного состояния в литосфере Земли // Мат-лы XLIII Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». Москва, МГУ, 2–5 февраля 2010 г. Т. 1. М., 2010. С. 356–359.

Коптев А.И. Математическое моделирование напряженного состояния в литосфере Земли // Мат-лы российской конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых». Москва, МГУ, 6–7 апреля 2009 г. Т. 1. М., 2009. 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.

Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. М.: Наука, 1965. 424 с.

Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961. 824 с.

Мэйз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: ЛКИ, 2007. 320 с.

Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмоструктурных деформаций на основе современной теории пластичности // Докл. РАН. 1999. Т. 365, № 3. С. 392–395.

Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-

кинематическим характеристикам трещин: Автореф. докт. дисс. М., 2003. 56 с.

Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 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. // Докл. РАН. 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 // *Geochem., Geophys., Geosystems*. An electronic journal of the Earth sciences, 2003. Vol. 4, N 3. 1027. doi: 10.1029/2001GC000252.

Burbridge 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. et al. 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. et al. 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. et al. The World Stress Map — Release 2008. Paris: Commission for the Geological Map of the World, 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. Potsdam, 2008.

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. et al. 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.

Поступила в редакцию
16.05.2012