

УДК 551.24

## ГЛОБАЛЬНОЕ ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*Ребецкий Ю.Л.*

*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, reb@ifz.ru*

### **Введение**

В настоящее время часто можно услышать мнение, что данные о закономерности пространственного распределения коровых напряжений в глобальном масштабе вполне хорошо представлены на интернет ресурсах проекта World Stress Map [8,11]. При этом здесь представлены как карты, показывающие ориентацию осей максимального сжатия (пользователь может самостоятельно их построить для интересующего его региона), так и исходные данные о главных напряжениях в виде файла данных формата Эксель. Однако внимательное рассмотрение содержания указанного Интернет-ресурса показывает, что в нем около 26% данных получены из ин-ситу методов, где напряжения определяются путем прямых измерений упругих деформаций или другими прямыми методами. Остальные определения напряжений (около 74%) отвечают результатам интерпретации сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений.

Отметим несопоставимость масштаба данных о напряжениях, получаемых ин-ситу методами и из сейсмологических данных. В первом случае масштаб усреднения напряжений изменяется от десятков сантиметров (тензометрия) до первых метров (гидроразрыв). Во втором размер очага землетрясения характеризует минимальный характерный размер усреднения напряжений. Поскольку в файлах проекта WSM минимальные магнитуды составляют около 3, то соответственно минимальный масштаб усреднения напряжений составляет минимум несколько сотен метров. Поскольку основное число данных о землетрясениях представлены каталогом Global CMT, то в большинстве своем эти данные отвечают масштабу усреднения от первых километров до десятков километров. Поэтому, когда речь идет о приложении данных о природных напряжениях к решению фундаментальных проблем геодинамики и физики очага землетрясений, то использоваться должны данные о напряжениях, получаемые из механизмов очагов землетрясений.

В базе данных WSM существует пять градаций точности определений ориентации осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия. Первые три (А, В, С) имеют соответственно точность 12, 20 и 25 градусов. Они связаны не с технологией перехода от ориентации осей главных напряжений к направлению действия напряжения наибольшего горизонтального сжатия, а с методом получения данных об осях главных напряжений. При этом наивысшей точности А в WSM отвечают данные о напряжениях, полученные из методов инверсии по совокупности механизмов очагов нескольких землетрясений (в базе данных WSM им соответствует аббревиатура FMF). К таким методам относятся методы Ж.Анжелье, О.И.Гущенко, Е.Кари, С.Л.Юнги, Дж.Гэфарда, А.Майкла, Ляля, Ю.Л.Ребецкого и др. К точности В относятся напряжения, полученные путем усреднения осей Р и Т для совокупности механизмов очагов землетрясений (в базе данных WSM - FMA) – средние механизмы по С.Л.Юнге. Соответственно к точности С относятся напряжения, полученные из данных об одиночных событиях (в базе данных WSM - FMS).

В руководстве по использованию базы данных WSM отмечено, что только данные качества А и в некоторой мере качества В следует воспринимать как достоверные. В то время как С следует рассматривать как неуверенные определения, которые в случае получения для исследуемых регионов данных методом инверсии следует отбросить. Точность Д и Е определений напряжений составляет более 30 градусов (около 400 определений) и поэтому ее не следует принимать в расчет.

Теперь самое главное! В базе данных WSM наивысшей точности определения главных напряжений отвечает только 2.84% данных (904 из 31768). Еще 0.305% отвечает средним механизмам. Точности С отвечает 84.17% определений.

Таким образом, заключаем, что база данных WSM мало информативна в случае использования данных качества А и В и поэтому работы по получению данных о природных напряжениях из методов инверсии должны рассматриваться как приоритетное направление в сейсмологии и тектонофизике. Этот вывод крайне важно осознать научной общественности, т.к. часто приходится отвечать на рецензии некоторых экспертов, которые искренне не понимают, зачем тратить время на получение данных о напряжениях в регионах, когда уже существуют карты WSM.

И последнее замечание, относящееся к качеству данных WSM проекта. В версиях этого проекта 1992 и 2008 годов за направление напряжений наибольшего горизонтального сжатия принималась проекция оси главного напряжения наибольшего сжатия на горизонтальную плоскость в топоцентрической системе координат, связанной с эпицентром определения напряжений (азимут оси наибольшего сжатия). Только в версии 2016 в руководстве WSM появилось указание на необходимость использовать правило тензорного анализа для расчета направления наибольшего горизонтального сжатия из данных об ориентации осей главных напряжений и формы эллипсоида напряжений (коэффициент Лоде-Надаи). При этом в самой базе данных до сих пор для этого напряжения указывается азимут оси главного напряжения наибольшего сжатия.

И еще важное замечание. Обращаю внимание, что в базе данных WSM определения напряжений, полученные из сейсмологических данных Китайского каталога механизмов очагов, представлены в виде векторов восстания (верхняя полусфера), а не падения (нижняя полусфера), как это принято, например, в проекте Global CMT и в проекте WSM для других данных. Эта ошибка не отразится на направлении оси наибольшего горизонтального сжатия, но может оказаться принципиально важной в случае оценки других параметров тензора напряжений.

### **Методика инверсии напряжений из сейсмологических данных**

Представляется мировая карта коровых напряжений, полученная на основе метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [1, 2, 3] и данных о 43664 фокальных механизмах землетрясений каталога Global CMT (<https://www.globalcmt.org>) для верхнего слоя литосферы 0-60 км (условная кора). Расчет напряжений выполнялся программой STRESSseism по алгоритму МКА в его новом варианте, позволяющим работать в едином режиме, но с разным масштабом усреднения напряжений, в сейсмоактивных районах с существенно разной плотностью эпицентров очагов землетрясений. МКА основан на инверсии напряжений из групп сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений (однородная выборка), для которых имеет место диссипация механической энергии в каждом событии и при этом для всей группы событий достигается наибольшая диссипация упругой энергии. В МКА существует возможность определения не только ориентации осей главных напряжений, но и относительные величины шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. Для этого используется анализ напряжений в очагах землетрясений из однородной выборки на диаграмме Мора. Дополнительные данные о величинах сброшенных напряжений в очагах наиболее сильных в регионе землетрясений позволяют оценивать и сами величины напряжений.

### **Результаты расчета и главные закономерности глобальных напряжений**

Расчеты выполнялись по сетке  $0.1 \times 0.1$  градус ( $76400$  точек расчета напряжений), с последующим прореживанием результатов расчета на сетку  $0.5 \times 0.5$  град ( $19058$  точек расчета напряжений). Результаты расчета компонент тензора в виде ориентации напряжений наибольшего горизонтального сжатия представлен на рис. 1.

Анализ результатов реконструкции напряжений позволяет выделить следующие закономерности:

1) Зоны океанского спрединга характеризуются ориентацией напряжений максимального горизонтального сжатия, как правило, параллельной их простирацию. Имеются также отдельные участки зон спрединга, где оси этих напряжений ориентированы косо (углы порядка  $20-30^\circ$ ). Исключение из этого правила составляет арктическая зона спрединга. Здесь оси максимального горизонтального сжатия на нескольких участках вблизи полюса почти ортогональны простирацию оси хребта. Небольшое число данных о напряженном состоянии за пределами зоны спрединга показывает, что здесь оси максимального горизонтального сжатия становятся ортогональными простирацию зоны (например, Индийская плита вблизи Западного фланга Зондской дуги).

2) Зоны спрединга практически никогда не представлены единым геодинамическим режимом и сочетают на разных участках напряженное состояние горизонтального растяжения или горизонтального сдвига (например, Антарктическая зона и Атлантическая в южном полушарии). Наиболее длинные и непрерывные участки горизонтального растяжения в северном полушарии Атлантической зоны спрединга не превышают  $1500 - 2000$  км. И здесь опять выделяется арктическая зона спрединга, которая без прерывания отвечает режиму горизонтального растяжения. Заметим, что из всех зон спредингов эта является единственной, для которой не выделяются трансформные разломы.

3) Наиболее протяженные трансформные зоны, как правило, представлены геодинамическими режимами горизонтального сдвига, хотя в них на отдельных участках могут наблюдаться режимы горизонтального растяжения и даже сжатия. Здесь оси максимального горизонтального сжатия составляют с простиранием зоны углы, близкие к  $45^\circ$ .

4) В зонах спрединга ориентация поддвиговых касательных напряжений, возникающих на подошве коры и литосферы, как правило, хаотичная. Только для небольших участков она может быть выдержана в одном направлении (например, северный сегмент Индийской зоны вблизи экватора). Отсутствует закономерная направленность этих касательных напряжений и в коре трансформных зон (например, Калифорнийская зона сдвига).

5) Зоны субдукции островных дуг имеют однотипное строение вдоль своего простирания и сложное - вкрест простирания. Наиболее стандартным является геодинамический режим горизонтального сжатия в коре островной дуги и континентальном склоне с направлением оси максимального горизонтального сжатия ортогонально простиранию дуги. В сопряженной литосфере океанского склона сразу за тальвегом желоба наблюдается режим горизонтального растяжения с ориентацией оси минимального сжатия также вкрест простирания островной дуги (например, Курильские острова).

6) Есть зоны субдукции с еще более сложным строением, когда области горизонтального растяжения с обеих сторон ограничивают осевую зону горизонтального сжатия (например, Филиппинская и Явская островные дуги). Они представлены режимом горизонтального сжатия в центральной части островной дуги и режимом горизонтального растяжения по краям дуги. При этом направление максимального горизонтального сжатия в коре островной дуги ортогонально ее простиранию, а в океанской плите за тальвегом желоба и в литосфере задугового прогиба становятся параллельным простиранию дуги.

7) Зоны субдукции в активных континентальных окраинах характеризуются переходом вкрест их простирания от режима горизонтального растяжения в океанской плите за желобом к состоянию горизонтального сжатия в континентальном склоне. Это не везде выявлено в наблюдениях из-за нехватки сейсмических станций на островах океанов. Оси минимального горизонтального сжатия (девиаторного растяжения) в океанской плите до желоба направлены ортогонально тальвегу желоба, а в коре континентального склона параллельны ему и совпадают с ориентацией оси промежуточного главного напряжения. Примером такой закономерности является Южно-Американская зона субдукции.

8) В коре континентального (субконтинентального) склона зон субдукции поддвиговые касательные напряжения строго упорядочены и ориентированы от океана к континенту, что отвечает большей скорости течения в этом направлении в астеносфере в сравнении со скоростью движения литосферной плиты. В литосфере океанского склона эта закономерность может не выдерживаться.

9) Зоны континентальных коллизий, сопровождающиеся горными поднятиями, наиболее часто представлены режимом горизонтального сжатия, а иногда режимом горизонтального сдвига в тех случаях, когда морфология горных поднятий отвечает хребтам. В этом случае оси максимального сжатия всегда субгоризонтальны и ориентированы ортогонально простиранию хребтов.

10) Когда поднятия орогенов имеют плоскую форму рельефа (плато и нагорья), в их коре режим напряженного состояния отвечает горизонтальному растяжению, иногда сочетающемуся с горизонтальным сдвигом. При этом оси минимального сжатия всегда субгоризонтальны. Наиболее яркими примерами таких структур являются плато Тибет для Высокой Азии и плато Антиплато для Центральных Анд.

11) Результаты региональных исследований [6], выполненные по данным каталогов о фокальных механизмах локальных сейсмических сетей, показали, что напряженные состояния коры крупных межгорных впадин и передовых прогибов представлены режимами горизонтального сдвига и растяжения, для которых ось главного девиаторного растяжения субгоризонтальна. В коре внутригорных впадин, вовлеченных в поднятия, как правило, имеет место режим горизонтального сдвига.

Данные о природных напряжениях, получаемые методами тектонофизики [4, 5, 10] из сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений, показывают, что уровень девиаторных напряжений в зоне субдукции в несколько раз ниже уровня этих напряжений во внутриконтинентальных орогенах. При оценке величины напряжений использовался анализ напряженных состояний на диаграммах Мора, что позволяет получить соотношение между эффективным изотропным давлением и максимальным касательным напряжением, нормированным на величину прочности сцепления пород.

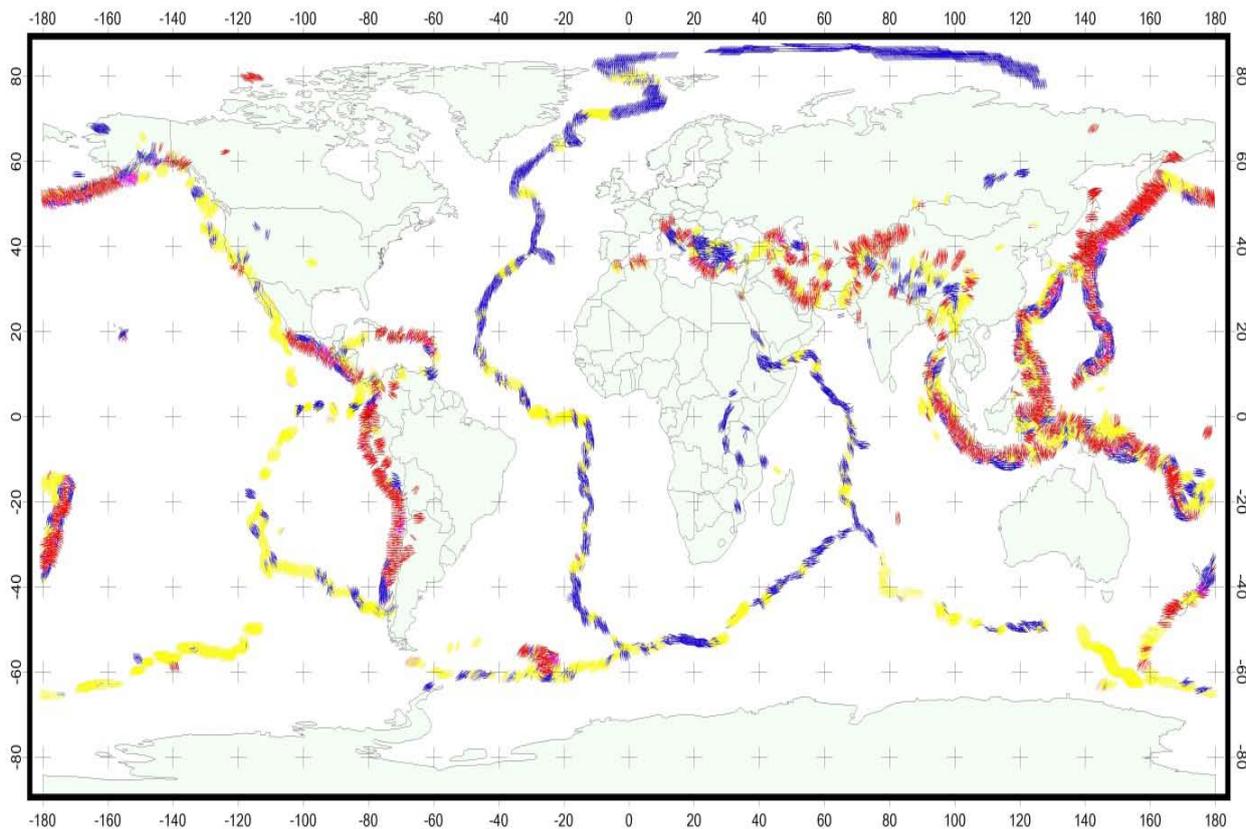


Рис. 1. Ориентация осей максимального сжатия и геодинамический тип напряженного состояния (красный – гор. сжатие, желтый – гор. сдвиг, синий – гор. растяжение).

Для получения абсолютных значений напряжений используются сейсмологические данные о величинах сброшенных напряжений в очагах наиболее сильных землетрясений исследуемых регионов. В зонах субдукции уровень этих сброшенных напряжений для землетрясений с  $M \geq 8.0$  редко превышает 1 МПа, а стандартным значением являются 0.5 - 0.6 МПа. В тоже время в континентальной коре стандартным значением сброшенных напряжений для землетрясений с  $M = 7 - 8$  является 3 - 6 МПа. Известны и существенно большие величины сброшенных напряжений 100 и даже 300 МПа для очень больших землетрясений (Нью Мадридское  $M = 8.0$ ). Уже это одно говорит о том, что напряжения в коре континентальных орогенов и щитов существенно выше напряжений в коре. Наши результаты реконструкции величин напряжения для коры Курильских остров, Японии и Западного фланга Зондской дуги показали, что максимальные касательные напряжения здесь не превышают 10 МПа, при стандартном среднем значении 3 - 5 МПа. В тоже время в коре Алтайского орогена по данным о сброшенных напряжениях Алтайского землетрясения 2003 года был получен уровень максимальных касательных напряжений 8 - 10 МПа при стандартном среднем значении в 30 - 50 МПа. Таким образом, напряжения, вызываемые горизонтальными движениями плит, в зонах субдукции создают напряжения дополнительного горизонтального сжатия, превышающие литостатическое давление только на 5 - 10 МПа и их явно недостаточно для формирования напряжений сжатия в коре.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН, а также при финансировании в рамках проекта РФФИ 19-55-53025 ГФЕН\_а и РФФИ 17-05-01193а.

### Список литературы

1. Ребецкий Ю.Л. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмоструктурных деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии Океании // Доклады РАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 101–104.
2. Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. 2003. Т. 400. № 3. С. 237–241.
3. Ребецкий Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 39–54.
4. Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 70–84.
5. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291.
6. Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 496–520.
7. Heidbach O., Reinesker J., Tingay M., Muller B., Sperener B., Fuchs K., Wenzel F. Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress pattern highlighted in the World Stress Map database // Tectonics. 2007. V. 26. TC6014.
8. Heidbach O., Tingay M., Batrth A., Reinesker J., Kurfeb D., Muller B. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map data base release 2008 // Tectonophysics. 2010. V. 482. P. 3–15.
9. Rebetsky Yu.L. On the specific state of crustal stresses in intracontinental orogens // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. No 4. P. 437–466.
10. Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // Bull. Soc. Geol. Fr. 2013. V. 184. No 4-5. P. 335–346.
11. Zoback M.L., First- and second modern pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // J.Geop.Res. 1992. V. 97. No B8. P. 11703–11728.