

**С.И. Шерман**

*Институт земной коры (ИЗК) СО РАН, Иркутск, Россия*

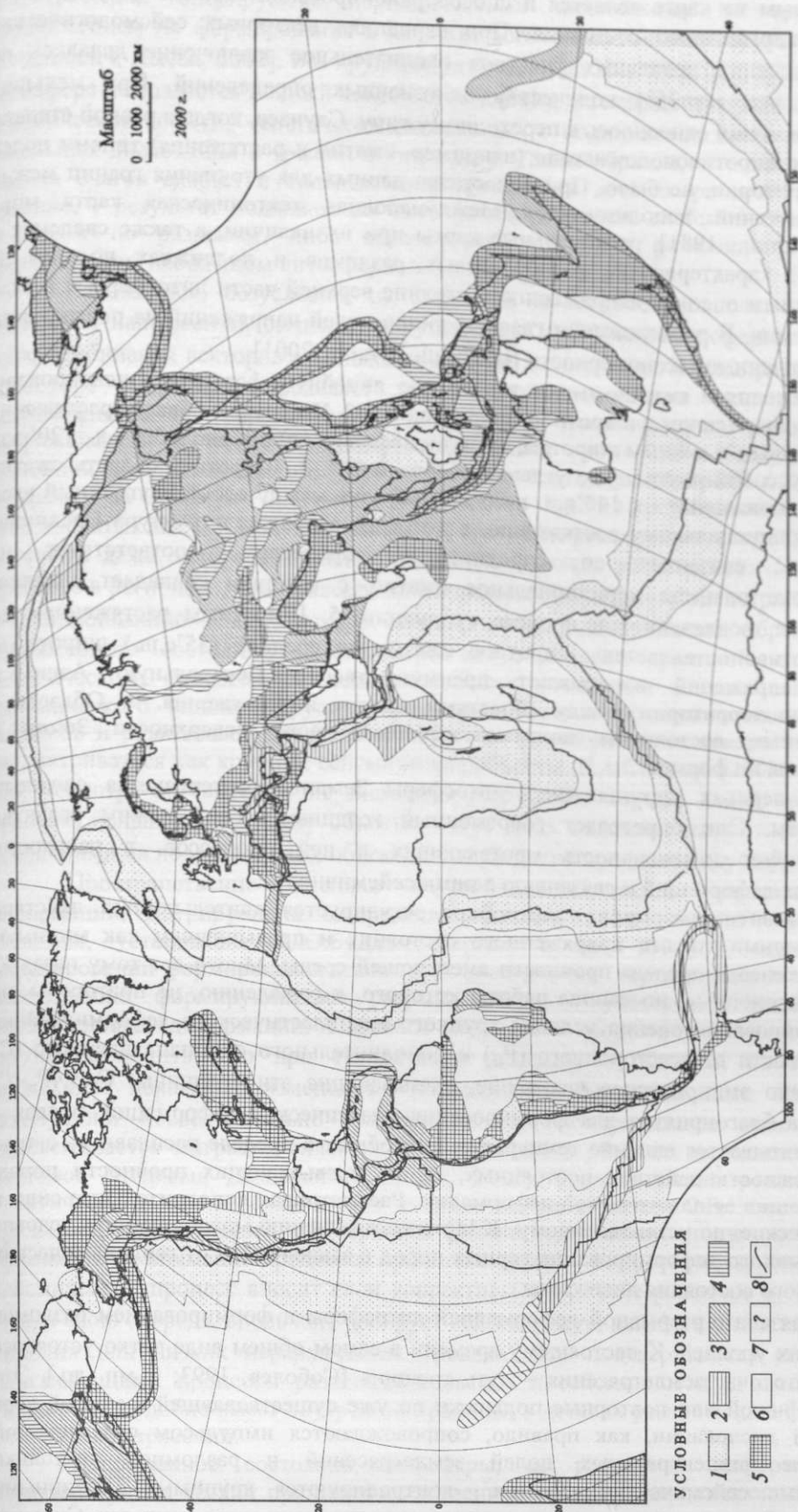
## **НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, РАЗРЫВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ**

Изучение напряженного состояния литосферы является сегодня одной из актуальных задач геодинамики. Из большой серии опубликованных по теме работ следует совершенно четкий вывод, что напряжения – это своеобразная характеристика тонуса литосферы, который определяет ее реакцию на всякие воздействия и влияет на характер течения геолого-геофизических процессов. Практическая необходимость в изучении напряжений возникла у тоннелестроителей в конце позапрошлого века. С этого периода начинает свою историю проблема напряженного состояния сначала массивов, а позже и земной коры в целом. Около 50 лет тому назад М.В.Гзовский [1975 и более ранние публикации] перед геологами и геофизиками выдвинул проблему изучения тектонических полей напряжений в земной коре. Им впервые для территории СССР были составлены карты современного напряженного состояния земной коры, в основу которых были положены две независимых группы данных: механизмы очагов сильных землетрясений и градиенты скоростей тектонических движений и деформаций коры. Развитие представлений М.В.Гзовского и расширение методов исследования напряженного состояния коры и литосферы, базирующихся на геолого-структурных полевых и расчетных механико-математических и лабораторных экспериментальных данных, плодотворно продолжили его ученики и

последователи, в том числе и за рубежом [Ma Jin et al., 1989]. Методологически к их работам близко примыкают исследования П.Н. Николаева [1992], внесшего существенный вклад в методику анализа трещиноватости для построения полей напряжений и их системного синтеза.

Синхронно с геолого-геофизическими исследованиями в мире продолжается интенсивное накопление результатов натуральных измерений естественного напряженного состояния пород в массивах. Их результативность первоначально приобрела большой авторитет у тектонистов. Одним из первых, кто перешагнул грань локальных выводов и использовал натурные измерения в глубоких выработках для оценки напряжений в земной коре, был Н.Хаст [Hast, 1969]. Именно на его выводы о существовании «избыточных» горизонтальных напряжений уже на глубинах в первые десятки метров обратили внимание геологи и стали придавать им особый смысл. По времени это совпало с этапом развития новой глобальной тектоники, с концепцией которой данные Н.Хаста хорошо согласовывались. П.Н. Кропоткин [1996 и др.] показал важность и применимость сведений о натуральных измерениях в верхних слоях коры для оценки ее напряженного состояния в целом. Для характеристики напряженного состояния земной коры П.Н. Кропоткин [1996], следуя М.Л. Зобак [Zoback, 1992], предлагает использовать два взаимно перпендикулярных горизонтальных напряжений – наибольшее  $S_H$  и наименьшее  $S_h$ , и вертикальное напряжение  $S_v$ , обычно близкое по своему значению к литостатическому давлению. Вариации их значений приводят к формированию трех типов напряженного состояния литосферы: растяжение ( $S_v > S_H > S_h$ ), сдвиг ( $S_H > S_v > S_h$ ) и сжатие ( $S_H > S_h > S_v$ ). По такому принципу в векторной форме построены карты напряженного состояния литосферы в работах П.Н. Кропоткина [1996] и М.Л. Зобак [Zoback, 1992]. К настоящему времени максимальную известность в мире получила карта полей напряжений мира, составленная большим коллективом исследователей под редакцией М.Л. Зобак [Zoback, 1992]. При ее построении использовано более 6700 данных об ориентировках напряжений, полученных на базе различных, преимущественно сейсмологических методов исследований. Их результаты привели к необходимости использовать векторную форму изображения напряженного состояния. Поскольку сейсмологические данные даже для одного и того же сейсмоактивного региона часто характеризуются разными направлениями подвижек в очагах землетрясений, которые используются для оценки напряженного состояния, на карте приведены практически все известные векторы для конкретных регионов. В результате из-за большой доли разноориентированных векторов утратилась однозначность тектонической интерпретации карты. Векторная форма изображения типов напряженного состояния литосферы не позволила выделить распространенные в коре промежуточные типы напряжений и их пространственную перемежаемость.

На напряженное состояние литосферы оказывают влияние многочисленные эндогенные, экзогенные и планетарные факторы. Оно чаще подвержено изменениям во времени, но относительно консервативно в миграциях по площади. Относительная пространственная стабильность полей напряжений обеспечивается преобладающим влиянием на них структуры верхней части литосферы и подлитосферных процессов. Опираясь на эти представления и опубликованные в последние годы работы, С.И. Шерманом и О.В. Луниной [2001] составлена новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли (рис. 1). При ее построении использованы обобщенные сейсмологические данные по решению механизмов очагов землетрясений, результаты структурно-геологических съемок с реконструкцией полей напряжений, тектонические данные о современных геодинамических режимах и неотектонических движениях. Это позволило увеличить фактический материал и расширить охарактеризованные им площади. По перечисленному набору факторов оценивались соотношения главных нормальных напряжений сжатия (вертикального  $\sigma_z$ ; горизонтальных максимального  $\sigma_x$  и минимального  $\sigma_y$ ) и их наклон к горизонту. В зависимости от их соотношений [Шерман, Днепровский, 1989] выделены шесть основных типов напряженного состояния верхней части литосферы, которые легли в основу построения карты (см. легенду карты на рис.). Четыре из них главные: нейтральное ( $\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$ ), растяжение ( $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ ), сжатие ( $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ ), сдвиг ( $\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y$ ) и два промежуточные: растяжение со сдвигом ( $\sigma_z = \sigma_y > \sigma_x$ ) и сжатие со сдвигом ( $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$ ).



**Рис. 1** Карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли. Составили С.И.Шерман, О.В.Лунина с использованием материалов М.Л.Зобак "World stress map-maximum horizontal stress orientation" (1992), Международной тектонической карты мира (1981) и серии карт и публикаций по отдельным регионам.

Условные обозначения

I. Типы напряженного состояния литосферы и соотношения вертикального  $\sigma_z$ , максимального  $\sigma_x$  и минимального  $\sigma_y$  горизонтальных напряжений сжатия: 1 – области растяжения  $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ ; 2 – области растяжения со сдвигом  $\sigma_z = \sigma_y > \sigma_x$ ; 3 – области сдвига  $\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y$ ; 4 – области сжатия со сдвигом  $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$ ; 5 – области сжатия  $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ ; 6 – области тектонически нейтрального напряженного состояния  $\sigma_x > \sigma_z = \sigma_y$ ; 7 – области с неустановившимся типом напряженного состояния.

II. Главные структурные границы: 8 – границы основных литосферных плит.

Методически новым на карте является и способ районирования верхней упругой части литосферы по типам напряженного состояния. При вариациях векторных сейсмологических данных для регионов или их локальных участков окончательное заключение делалось по преобладающему более чем на 75% количеству однозначных определений. При меньших соотношениях поле напряжений относилось к переходному типу. Случаев, когда в равной степени встречались бы данные с «противоположными» (например, сжатия и растяжения) типами полей для одной и той же территории, не было. При недостатке данных для уточнения границ между типами областей напряжений использовалась Международная тектоническая карта мира [International Tectonic Map ..., 1981], региональные карты при их наличии, а также сведения о морфологогенетической характеристике разноранговых разломов и подвижках по ним. В результате стало возможным оценить напряженное состояние верхней части литосферы и в ряде асейсмичных районов Земли. В расположении главных типов полей напряжений на поверхности Земли отмечаются определенные закономерности [Шерман, Лунина, 2001].

1. Области растяжения и сжатия имеют вытянутую линейную форму и ориентированы преимущественно в меридиональном и широтном направлениях. 2. Широтные области растяжения тяготеют к высоким северным и южным широтам; меридиональные – примерно к 30° з.д., 120° з.д. и 65° в.д., образуя между собой двугранные углы примерно в 90°. 3. Широтная область сжатия тяготеет к 35° с.ш.; меридиональные – к 145° в.д. и 75° з.д., образуя между собой двугранный угол примерно в 140°. 4. Меридиональному растяжению, с которым совпадает структура Срединно-Атлантического хребта, связанная со спрединговым процессом, соответствует на противоположной стороне планеты меридиональное сжатие, с которым совпадает Западно-Тихоокеанское побережье, вовлеченное в процесс субдукции. 5. Широтным растяжениям по высоким широтам «противопоставляется» широтное сжатие по средней (35° с.ш.) широте. 6. Области сдвиговых напряжений охватывают преимущественно Центральную Азию и пограничные переходные территории между областями сжатия и растяжения. 7. Области с нейтральным напряженным состоянием занимают крупные части поверхности Земли и относительно изометричны по форме.

Таким образом, верхняя упругая часть литосферы Земли характеризуется сложным напряженным состоянием. Оно определяет современный геодинамический режим развития литосферы и контролирует интенсивность протекающих в ней процессов, в частности, формирование разрывных деформаций и связанную с ними сейсмичность.

Зарождение и развитие разрывов в литосфере регулируется длительностью действия внешних сил, возникающими типами напряженного состояния и превышением как минимум одной из компонент их тензора предела прочности вмещающей среды. Много лет тому назад К. Моги [Mogi, 1966], великолепные, но давние работы которого, к сожалению, не повторены, на базе физического моделирования оценил условия хрупкого или пластического деформирования горных пород в зависимости от всестороннего ( $P_m$ ) и дополнительного однонаправленного ( $C$ ) давления. Им предложено эмпирическое уравнение, связывающее эти величины:  $C < 3,4P_m < C$ . Левая часть неравенства благоприятна для формирования пластических деформаций, правая – разрывных. В нем не учитывается влияние температур, способных в пределе расплавить горную породу, а также длительность действия постоянных, но не превышающих прочности пород, напряжений, содействующих ее пластической деформации. Рассматривая дополнительные силы в литосфере как тектонические, по установленному К. Моги соотношению можно оценить условия пластического или разрывного деформирования горных пород в зависимости от геодинамических обстановок и напряженного состояния литосферы.

Сейсмичность связана с разрывной деформацией литосферы и формированием разломов различных иерархических уровней. К настоящему времени в самом общем виде четко устоялось представление о том, что очаг землетрясения – суть трещина [Соболев, 1993; и мн. др.]. Это означает, что рождение новой или повторные подвижки по уже существовавшей в земной коре или литосфере древней дислокации, как правило, сопровождаются импульсом сейсмической энергии. Сопоставление эпицентральных полей землетрясений и разломной тектоники показывает, что сильные сейсмические события контролируются крупными глубинными разломами, длительность формирования которых оценивается десятками миллионов лет. Сильные



землетрясения генерируются периодическими подвижками по крупным разломам или продолжением их формирования в качестве зон современной деструкции литосферы [Шерман, Демьянович, Лысак, 2002]. Без крупных разломов или зон современной деструкции литосферы в литосфере не создается полный комплекс условий для генерации сильных землетрясений. Слабые сейсмические события генетически связаны как с подвижками, так и с формированием новых локальных дислокаций и трещин в литосфере. Таким образом, с геотектонической точки зрения физика очагов слабых и сильных землетрясений в деталях различна: сильные события, как правило, – результат подвижек по имеющимся разрывам, слабые – следствие либо небольших подвижек по разрывам, либо образования новых их разновидностей в монолитном, не трещиноватом небольшом литосферном блоке.

Изложенное, безусловно, не в полной мере объясняет сложную зависимость между величиной напряжений, степенью нарушенности субстрата литосферы и сейсмичностью. Более того, комбинация векторов главных напряжений по отношению к направлениям существующих в литосфере разрывов определяет вероятность активизации подвижек по ним или их невозможность. В первом случае нарушение динамического равновесия в блочной (в геофизической, по М.А.Садовскому) среде может произойти и без увеличения напряженного состояния, или даже при его уменьшении, но благодаря повороту главных осей напряжений. Опираясь на близкую систему осмысливания причин устойчивости деформации первично трещиноватых масс, К.И.Кузнецова [2002] аргументировано показала, что «изменение во времени величины даже одного из главных напряжений может резко изменить характер сейсмического процесса в регионе..., что приведет к возникновению сильного землетрясения, либо, наоборот, ... к возникновению сейсмического затишья...» (стр.110). Таким образом, любые изменения напряженного состояния в литосфере могут явиться причиной дискретного во времени сейсмического процесса. Последнее особенно важно для анализа сейсмичности в областях динамического влияния крупных разломов. Данные области вытянуты вдоль простирания разломов и охватывают площади от тысяч до десятков тысяч квадратных километров и могут рассматриваться как крупные сейсмические объекты. Г.А.Соболев [2002] обратил внимание на то, что, несмотря на самоподобие элементов разрушения горных пород на разных иерархических уровнях, большие по объему объекты могут быть наделены новыми и сложными свойствами, влияющими на поведение этих объектов при развитии процессов неустойчивости.

Пространственно-временная неустойчивость полей повышенных и пониженных деформаций, мигрирующих в пределах областей динамического влияния развивающихся разломов, установлена В.Ю.Буддо [Шерман и др., 1991] в серии экспериментов при моделировании формирования сдвигов. Зафиксирована вертикальная и поперечно-продольная к простиранию формирующегося разрыва миграция участков с повышенными значениями относительных деформаций. Переноса результаты моделирования на природную ситуацию, можно заключить, что при активизации разломов в областях их динамического влияния происходят локальные изменения напряженно-деформированного состояния. По сложному закону они последовательно охватывают все околоразломное пространство. Аналогично прослеживается миграция сильных землетрясений в областях динамического влияния крупных разломов [Шерман, Демьянович, Лысак, 2002]. Однако детали решения этого вопроса для практического использования еще далеки от реализации. С.В.Гольдин [2002] обоснованно призывает исследователей при изучении физики подготовки единичного крупного землетрясения принимать во внимание процессы, протекающие во всей сейсмоактивной зоне. Действительно, сейсмический процесс вносит свои коррективы в развитие разломов и деструкцию литосферы. Она, в свою очередь, вновь контролирует сейсмическую деятельность и так далее на других более высоких или низких иерархических уровнях. Это подтверждается подобными уравнениями, описывающими процессы разломообразования и сейсмичности в литосфере [Шерман, 2002]. Однако это подобие имеет внутренние границы, в деталях различающие физику очагов сильных и слабых землетрясений.

Напряженное состояние литосферы, ее разрывные деформации и сейсмичность характеризуются тесной причинно-следственной связью. Накапливающийся объем фактического материала, современный уровень знаний и технико-математические возможности их

комплексирования дают основание считать, что вытекающие из проблемы практические задачи – разработка методов прогноза землетрясений – приближаются к своему решению.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 01-05-64485), Президиума СО РАН, Минобразования (проект E02-8-45).

#### Литература

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536с.
2. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. 2002. Т.5, №5. С.5-22.
3. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре // Геотектоника. 1996. №2. С.3-15.
4. Кузнецова К.И. Напряженное состояние и устойчивость процесса деформации горных масс // Тектонофизика сегодня. Москва: ОИФЗ РАН, 2002. С.110-119.
5. Николаев П.Н. Методика тектодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295с.
6. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313с.
7. Соболев Г.А. Динамика разрывообразования и сейсмичность // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С.67-78.
8. Шерман С.И. Развитие представлений М.В. Гзовского в современных тектонофизических исследованиях разломообразования и сейсмичности в литосфере // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С.49-59.
9. Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В. Новые данные о современной деструкции литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Докл. РАН. 2002. Т.387, № 4. С.533-536.
10. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 158с.
11. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. РАН. 2001. Т.378, №5. С.672-674.
12. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 261с.
13. Hast N. The state of stress in upper part of the Earth's crust // Tectonophysics. V.8, N3. 1969. P.167-179.
14. International Tectonic Map of the World / Chief Editor: Khain V.E. Academy of Sciences of the USSR and Commission for the Geological Map of the World. 1981.
15. Ma Jin, Ma Shengli and Lei Xinglin Fault geometry and its relationship with seismicity in the Xianshuihe fault zone // The international symposium on tectonophysics. Pergamon Press, Oxford. 1989. P.131-142.
16. Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow // Bull. Earthquakes Res. Inst. 1966. V.44. P.215-232.
17. Zoback M.L. First and Second order patterns of stress in the Lithosphere: The World Stress Map project // J. Geophys. Res., special issue. 1992. V.97, N8. P.11703-11728.

**Ф.Л. Яковлев**

*Объединенный институт физики Земли (ОИФЗ) РАН*

## **МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ В СТРУКТУРАХ РАЗНОГО РАНГА – МОДЕЛИ И ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Определение механизма образования в тектонофизическом смысле предполагает выяснение физических закономерностей возникновения полей напряжения (или полей перемещений/деформаций) при определенном воздействии внутренних сил и внешних сил на границы структуры (граничные условия), имеющей определенные реологические свойства. Полноценные решения задач с такой постановкой существуют только для простых структур с одним слоем и для разрывных структур. Сложность структур линейной складчатости состоит в том, что сам объект обладает иерархией слоистости (и, соответственно, иерархией свойств реологических), большими величинами деформаций, а во многих случаях – многоэтапным процессом деформирования. В настоящий момент не существует механико-математической