



УДК 550.341.2 +551.241+539.3

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗОГРЕВАЮЩЕЙСЯ ЛИТОСФЕРЫ НА ИНИЦИАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

*К.г.-м.н. Адамович А.Н., д.г.-м.н. Шерман С.И., Иванова С.В.  
Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

**АННОТАЦИЯ:** В рамках плоской задачи термоупругости оценено тепловое воздействие, необходимое для начала процесса растяжения литосферы Байкальской рифтовой зоны. Выявлена асимметричная мозаика зон с различными типами напряженного состояния. Она объясняет многие современные черты строения рифтовой зоны, особенно асимметрию впадин, зарождение и/или развитие основных разломов, сложную горизонтально-слоистую структуру литосферы, утонение коры.

### ВВЕДЕНИЕ

В мезо-кайнозой в геодинамическом развитии Азии существенную роль играют процессы рифтогенеза. Они наиболее ярко проявляются в Прибайкалье, которое в геотектонике больше известно как внутриконтинентальная Байкальская рифтовая зона (БРЗ) – цепь рифтовых впадин и поднятий, образующих по простиранию пояс длиной более 2000 км. Расположенная на границе Сибирской и Амурской плит – в свою очередь крупнейших внутриконтинентальных мегаблоков Евразийской литосферной плиты – БРЗ развивается как геодинамическая структура со специфическим режимом. Выполненное физическое моделирование [1] дало повод рассматривать БРЗ как комплексный геодинамический объект, в развитии которого превалировал рифтогенез, активный на начальном этапе и пассивный – на заключительном. Однозначное решение этого вопроса связано с трудностями геодинамических палеорекострукций и не сохранностью многих компонент геологической летописи. Результаты сейсмических, геотермических и магнитотеллурических исследований говорят о том, что возникновение и последующая эволюция БРЗ обусловлены термомеханическими процессами, протекающими в веществе верхней мантии, среди которых важную роль играют изменения температуры – один из важнейших источников напряжений. Особым предметом современных дискуссий является вопрос о стартовом механизме рифтообразования в БРЗ. Как показали результаты проведенного математического моделирования, отправной точкой рифтогенеза может быть и разогрев некоторого участка подошвы литосферы в результате воздействия мантийного плюма. Необходимость учёта воздействия температуры на начальное растяжение литосферы подтвердили результаты проведенного авторами математического моделирования.

### 1. ИСХОДНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

По геотермическим данным средний тепловой поток в БРЗ равен  $75 \text{ мВт/м}^2$ , при этом под оз. Байкал температура на границе Мохо составляет  $700\text{--}800^\circ\text{C}$ , с увеличением до  $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$  на значительно больших глубинах [2]. Неравномерное распределение температур в пределах подошвы коры БРЗ свидетельствует о неоднородной структуре разреза, большом влиянии разломов и сложном распределении полей напряжений по глубинному разрезу.

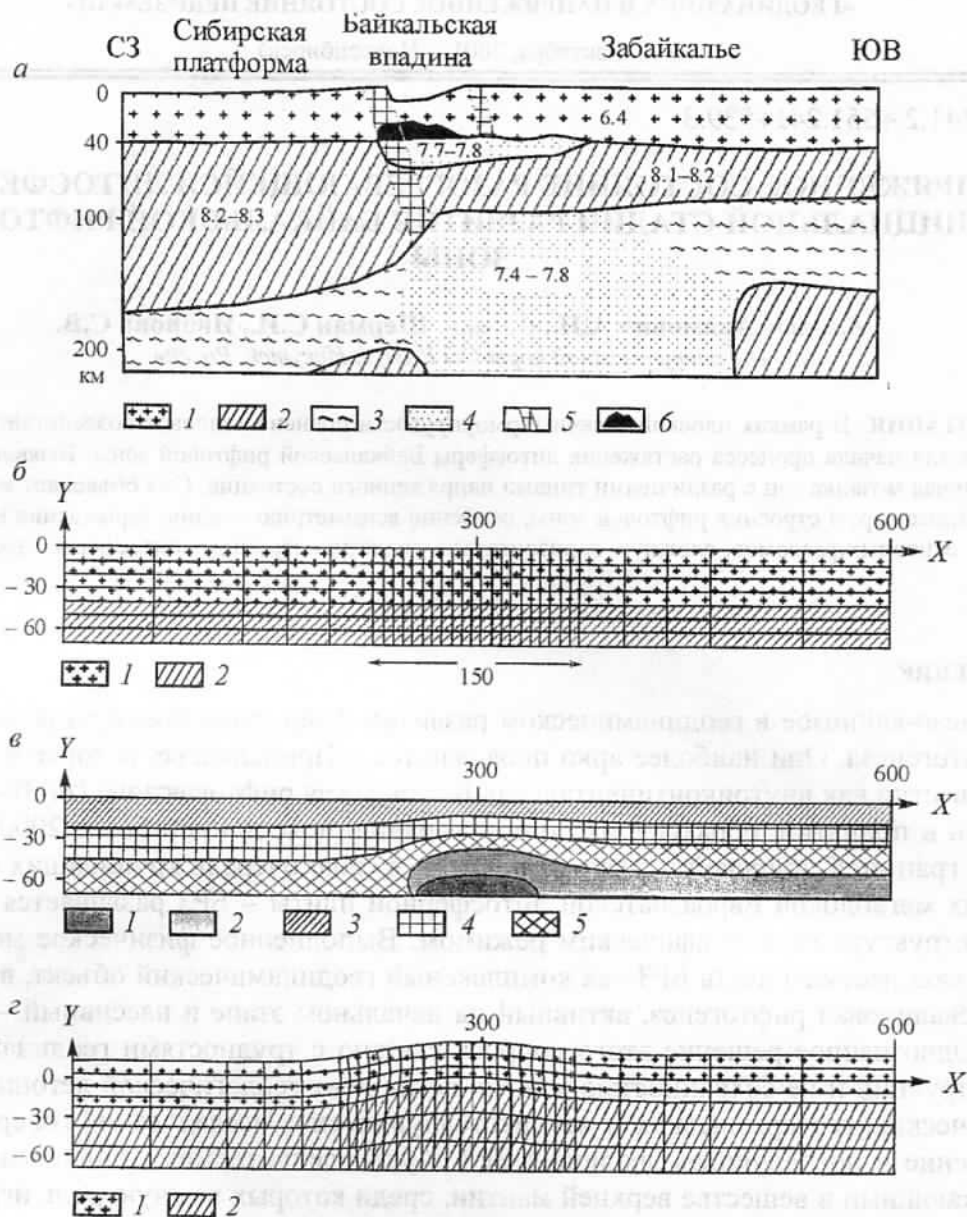


Рис. 1. Расположение разреза через Байкальскую рифтовую зону, ее структура и распределение температур в модели: а) схема глубинного строения Прибайкалья по данным сейсмического зондирования и телесеизмическим данным [Крылов и др., по [3]: 1 – кора; 2 – мантийная литосфера и подастеносферный слой; 3 – нормальная астеносфера; 4 – область пониженных скоростей продольных волн; 5 – крупные разломы; 6 – нижняя кора под Байкалом, возможно претерпевшая фазовое превращение в плотные гранатовые гранулиты; цифры – скорости преломленных продольных сейсмических волн; б) модель структуры литосферы и сетка конечных элементов: 1 – земная кора; 2 – слой литосферной мантии; в) распределение температуры по вертикальному разрезу в модели: 1–5 – области градиаций температур: 1 – 1300–1056; 2 – 1055–731; 3 – 730–488; 4 – 487–244; 5 – 243–0°C. г) вид деформированной модели: 1 – земная кора; 2 – слой литосферной мантии.

На основе изложенных представлений, была поставлена задача оценить возможности первоначального теплового воздействия на литосферу для возбуждения ее инициального растяжения. С этой целью на примере БРЗ методом конечных элементов (МКЭ) выполнено численное моделирование разогрева литосферы и распределения в ней напряжений. Моде-

лирование проводилось в рамках задачи термоупругости, отвечающей плоской деформации по разрезу через центральную часть БРЗ.

Для моделирования выбран региональный профиль по линии п. Усть-Уда – г. Улан-Удэ – р. Хилок, пересекающий Сибирскую платформу, центральную часть БРЗ через оз. Байкал и частично Забайкальскую складчатую область. Обобщенный вертикальный разрез профиля представлен на рис. 1а [3], на котором подчеркнуты некоторые особенности строения и геофизических характеристик рассматриваемого принципиального разреза БРЗ на современном этапе. Здесь региональное поле тектонических напряжений является раздвиговым [4]. Для него характерно субгоризонтальное положение осей растяжения, ориентированных в северо-западном направлении, вкрест простирания основных рифтовых структур.

## 2. МОДЕЛЬ И ЕЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Для предрифтовой стадии расчётная область представлена в виде прямоугольника с размерами  $L_x = 600$  км,  $L_y = -70$  км (рис. 1б), у которого ось  $X$  соответствует простиранию разреза по направлению СЗ-ЮВ, ось  $Y$  направлена вертикально вверх. Здесь и далее, а также на рисунках оси координат  $X$  и  $Y$  даны в км. Выбор глубины вертикального разреза обусловлен интерпретацией данных сейсмического зондирования [5]. Они показывают, что 70-километровая часть литосферы Земли является гравитационно нестабильной, и свидетельствуют о её относительно высокой по сравнению с другими слоями тектонической активности и максимальной ответственности за происходящие процессы. По этой причине расчеты ограничены упомянутой глубиной, несмотря на большую мощность литосферы расположенной рядом Сибирской платформы. Также принято, что на начальной стадии рифтогенеза отсутствуют вертикальные смещения ( $v$ ) на нижней границе расчётной области ( $v = 0$  при  $y = -70$ ).

Левая часть на графическом разрезе расчётной области соответствует Сибирской платформе (расстояние от оси ординат 0–250 км), центральная часть включает территорию БРЗ с акваторией оз. Байкал (250–350 км) и правая – соответствует Забайкальской складчатой области (350–600 км). Осевой линии озера Байкал соответствует  $x = 300$  км. Принятые размеры расчётной области позволяют исключить влияние граничных условий на результаты моделирования эволюции напряженного состояния БРЗ.

В первом приближении изучаемая часть литосферы рассматривается как двухслойная среда, у которой верхний горизонтальный слой соответствует земной коре с начальной мощностью  $H_0 = 40$  км, а нижний слой – литосферной мантии с мощностью  $M_0 = 30$  км. Для параметров вертикального разреза литосферы принимались следующие значения. Средняя величина плотности земной коры  $2750$  кг/м<sup>3</sup>, плотность мантийных пород  $3250$  кг/м<sup>3</sup> [6]. Модули Юнга: для пород земной коры от  $0.4 \cdot 10^{11}$  до  $0.8 \cdot 10^{11}$  Па, для мантийных пород от  $1.4 \cdot 10^{11}$  до  $1.6 \cdot 10^{11}$  Па. Заметим, что при моделировании динамики деформаций системы разломов Сан-Андреас (Калифорния) для модулей Юнга использовались соответственно величины  $0.7 \cdot 10^{11}$  Па и  $1 \cdot 10^{11}$  Па [7]. Значения коэффициентов Пуассона для БРЗ оценены в пределах 0.25 для земной коры и 0.28–0.3 для верхней части мантии [8]. Расчеты, выполненные при различных значениях коэффициента Пуассона, не выявили принципиальных отличий в напряженном состоянии литосферы. С учетом инициальной стадии состояния литосферы в мезозое в статье приведены результаты расчетов при коэффициенте Пуассона для слоя литосферной мантии равном 0.33. Коэффициенты линейного теплового расширения для пород земной коры, согласно [9], изменяются от  $0.8 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-5}$  1/град. На основании [10] для мантии коэффициент линейного теплового расширения принят  $1.5 \cdot 10^{-5}$  1/град. Для вертикального разреза литосферы БРЗ приняты следующие величины (табл.).

ТАБЛИЦА. Физические параметры земной коры и верхней мантии, принятые для моделирования.

Слой	Начальная мощность, км	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент линейного теплового расширения, 1/град
Земная кора	40	$0.7 \cdot 10^{11}$	0.25	2750	$1 \cdot 10^{-5}$
Слой литосферной мантии	30	$1.5 \cdot 10^{11}$	0.33	3250	$1.5 \cdot 10^{-5}$

Для начальной стадии рифтогенеза левая и правая вертикальные границы также задавались как неподвижные (горизонтальные смещения  $u = 0$  при  $x = 0$  и  $x = 600$ ).

По известным значениям мощности земной коры и данным по тепловому потоку в работах [11, 12] были рассчитаны примерные значения температур на подошве коры (раздел Мохо) под центральной частью БРЗ и прилегающими областями, а также была составлена карта мощности "термической" литосферы Сибири. Так, для южной части Сибирской платформы мощность литосферы составляет 100–150 км (рис. 1а), а низы земной коры прогреты здесь до 300–500°C. Для БРЗ и Забайкалья мощность литосферы – менее 100 км, температура же под Забайкальской складчатой областью на границе Мохо составляет 500–700°C. Под БРЗ температура местами достигает более 900°C [11–13]. Поэтому можно считать, что вдоль нижней границы модели, соответствующей –70 км, исходная температура изменяется и составляет: для юга Сибирской платформы и для Забайкальской складчатой области соответственно 660°C и 900°C; для центральной части 1300°C. Температура на поверхности Земли принята 0°C. На боковых границах задавались условия отсутствия теплообмена в горизонтальных направлениях ( $dT/dx = 0$ ). При расчётах учитывалось увеличивающееся с глубиной действие сил тяжести (массовых сил). Вычисления проводились с помощью программы NASTRAN, реализующей МКЭ. Сетка состояла из 217 конечных элементов типа plane strain и 256 узлов.

Заметим, что МКЭ уже применялся для моделирования активного термоупругого механизма рифтообразования на основе локального источника [9], не связанного с конкретными особенностями эволюции региона. В то же время проведенный на базе МКЭ анализ современного напряженно-деформированного состояния БРЗ [14] не учитывал температурные закономерности БРЗ. В геотектонически активных зонах литосферы нельзя игнорировать температурный фактор и его изменения по разрезу. Предлагаемая модель учитывает температурное состояние и глубинное строение БРЗ.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Заданные на нижней границе различные температуры оказывают влияние на температурное состояние вышележащих слоев в разных частях разреза БРЗ. В результате расчёта получено распределение температур по профилю А–Б (рис. 1в), согласуемое с данными на границе Мохо.

Совместное действие гравитационных сил и разностных значений температур приводят к поперечному изгибу литосферы и довольно сложному распределению напряжений. Схема деформированной модели показана на рис. 1г. Для удобства восприятия деформационная картина представлена таким образом, что величина максимальных смещений составляет 4% от длины расчётной области. Тепловая аномалия на подошве разреза в центральной части расчётной области формирует асимметричный куполообразный изгиб литосферной части мантии.

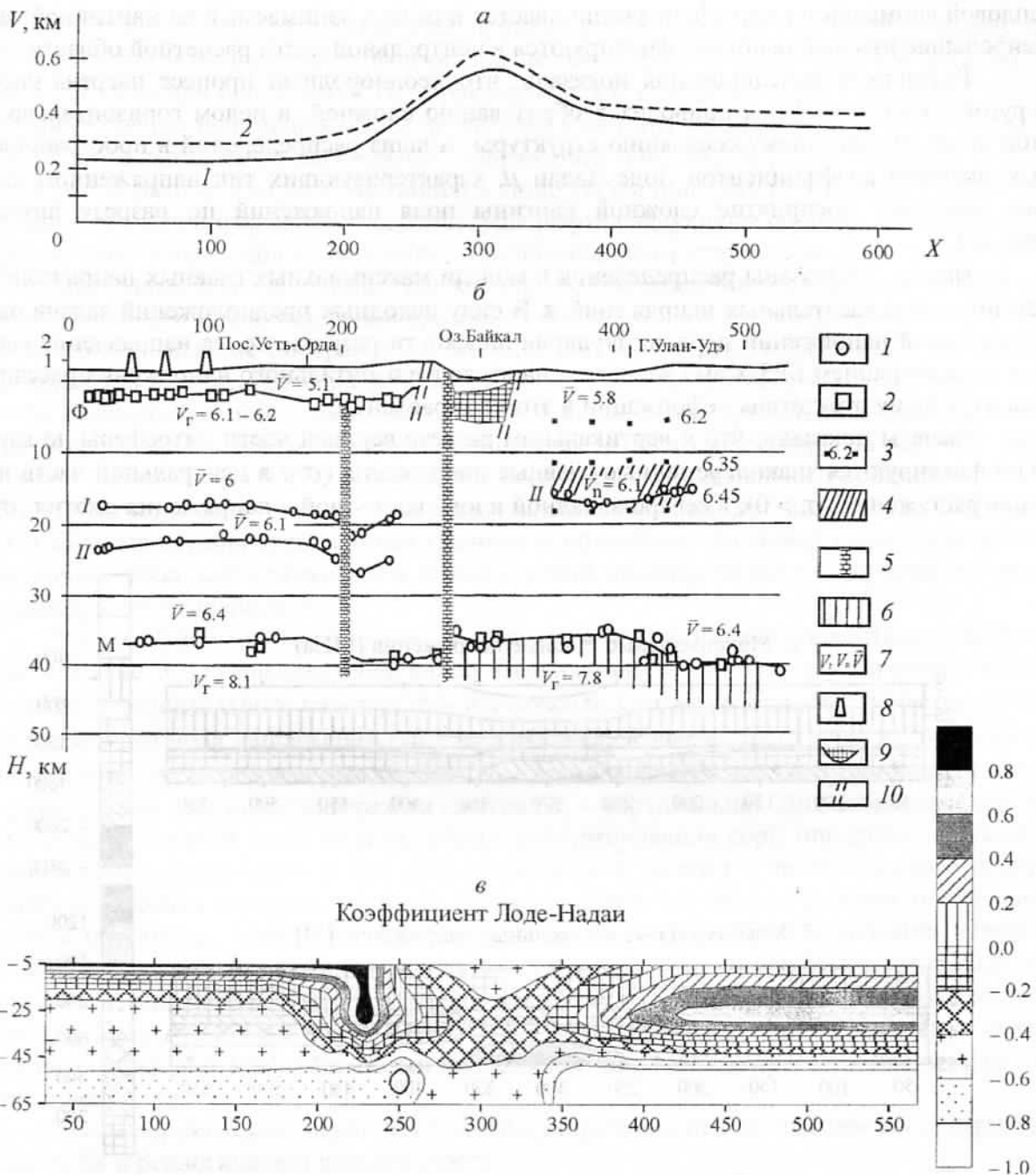


Рис. 2. Характеристики состояния модели и земной коры БРЗ: а) вертикальные смещения поверхности земной коры и границы Мохо (км) в модели: кривая 1 – земная поверхность; 2 – граница Мохо; б) сейсмический разрез через БРЗ по [3]: 1, 2 – глубины по отраженным и преломленным волнам; 3 – изолинии скорости, км/с; 4 – волноводный слой; 5 – зоны глубинных разломов; 6 – слой с пониженной скоростью в верхах мантии; 7 – граничная, пластовая и средняя скорости, км/с; 8 – скважины; 9 – осадки в рифтовых впадинах; 10 – близповерхностные разломы; I, II – внутрикоровые преломляющие и отражающие границы; М – граница Мохо; в) коэффициент Лодэ-Надаи.

На рис. 2а представлены смещения земной поверхности и границы Мохо. Анализ показывает, что здесь также наблюдается уменьшение толщины слоя, имитирующего земную кору, причем максимальные значения этого уменьшения фиксируются в центральной части. Характер уменьшения мощности земной коры согласуется, особенно в левой части разреза, с данными глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) (рис. 2б). В результате воздействия

тепловой аномалии на литосферу увеличивается и объем, занимаемый ее мантийной частью. Наибольшие изменения объема фиксируются в центральной части расчетной области.

Результаты моделирования показали, что неоднородный процесс нагрева подошвы упругой части литосферы приводит к образованию сложной, в целом горизонтально слоистой по ее напряженному состоянию структуры. Анализ распределений в пространстве равных значений коэффициентов Лодэ-Надаи  $\mu$ , характеризующих тип напряженного состояния, усиливает восприятие сложной картины поля напряжений по разрезу литосферы (рис. 2в).

На рис. 3 показаны распределения в модели максимальных главных напряжений  $\sigma_1$  и максимальных касательных напряжений  $\tau$ . В силу исходных предположений задачи одна из главных осей напряжений перпендикулярна плоскости разреза, т.е. ее направление согласуется с простиранием БРЗ. Сама же величина этого горизонтального напряжения рассчитывалась из условия отсутствия деформации в этом направлении.

Расчеты показали, что в вертикальном разрезе верхней части литосферы до глубины 15 км фиксируются знакопеременные главные напряжения ( $\sigma_1$ ): в центральной части напряжения растяжения ( $\sigma_1 > 0$ ); в северо-западной и юго-восточной – напряжения сжатия ( $\sigma_1 < 0$ ).

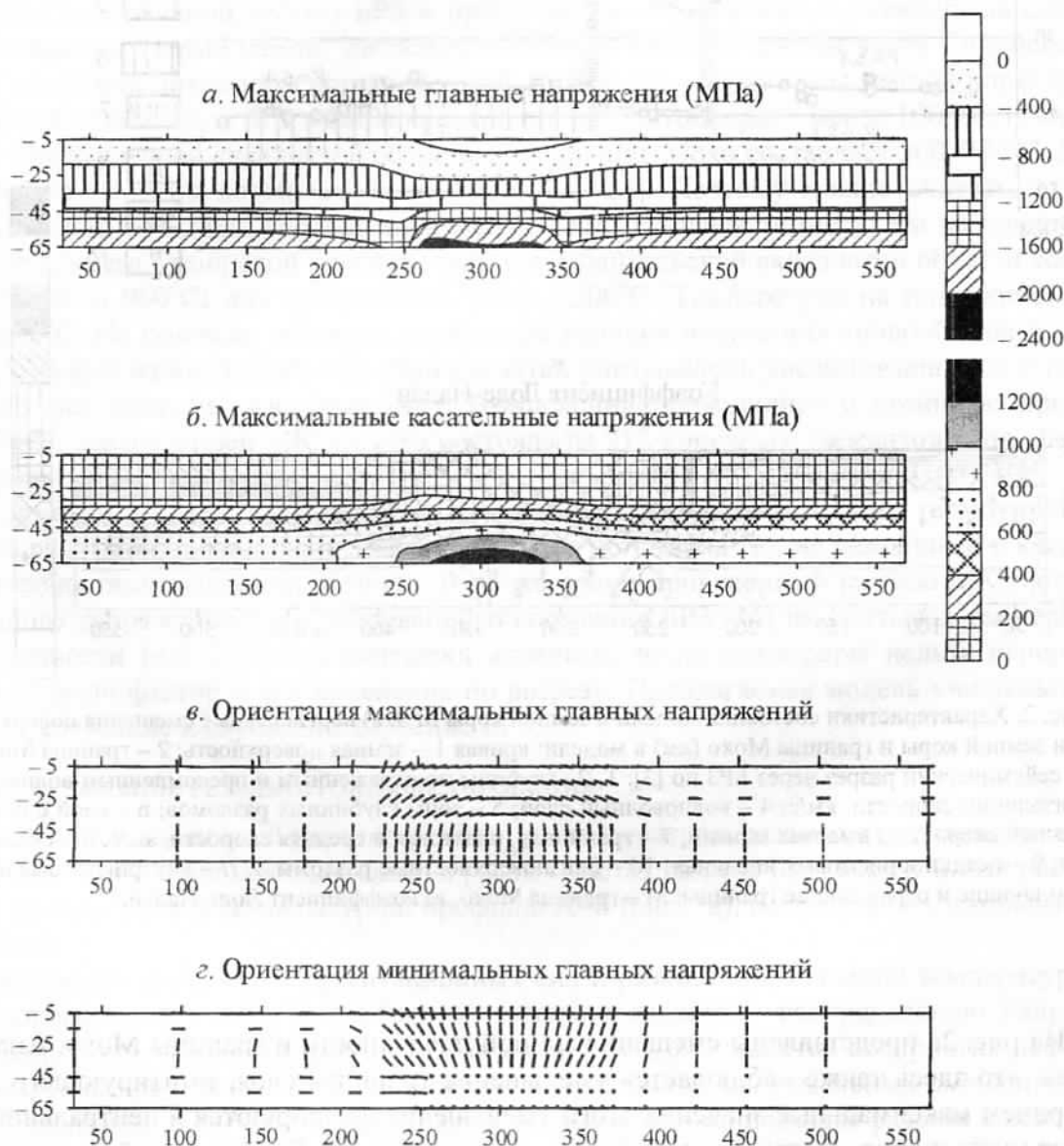


Рис. 3. Результаты расчетов напряженного состояния литосферы.

Максимальная величина растягивающих напряжений  $\sigma_1$  локализуется в центральной части БРЗ, от которой и инициируется формирование основной рифтовой впадины (рис. 3а). Минимальные значения напряжений  $\sigma_1$  характерны для СЗ части сечения, а средние – для ЮВ. Сложное строение поля напряжений по разрезу отчетливо подчеркивают также схемы распределения максимальных касательных напряжений (рис. 3б). Картину усиливает асимметричная форма распределения коэффициента Лоде-Надаи (рис. 2в). Она отражает особенности инициальной стадии формирования структуры рифта следующим образом: западная граница рифта по типу напряженного состояния и развивающимся структурам существенно отличается от центральной и восточной. Это хорошо подтверждается геоморфологической асимметрией западного и восточного побережий оз. Байкал и известными данными о том, что ограничивающая западное побережье оз. Байкал ветвь Приморского разлома на первоначальном, дорифтовом этапе, развивалась как взбросо-сдвиговая структура [15]. Отметим также, что при рассматриваемом механизме деформирования литосферы наблюдается разность сил реакции на вертикальных границах расчетной области. Для земной коры их величина больше на СЗ ( $x = 0$ ), меньше на ЮВ ( $x = 600$ ), а для слоя литосферной мантии, наоборот.

Из расчетов следует, что слева в центральной части на глубине от 40 до 70 км фиксируется сложная переориентация осей главных напряжений, что может свидетельствовать об образовании здесь субвертикальной геологической неоднородности – глубинного разлома, согласного с простиранием БРЗ.

Для юга Сибирской платформы (левая часть модели) анализ ориентации главных напряжений (рис. 3 в,г) показал следующее. Верхняя часть земной коры характеризуется обстановкой горизонтального сжатия ( $\sigma_1$  – вертикальна), ниже которой наблюдается переход в зону сдвигового поля напряжений ( $\sigma_2$  – вертикальна). Нижняя часть коры находится в условиях тектонического режима растяжения ( $\sigma_3$  – вертикальна), а для мантийной части литосферы фиксируется тектонический режим сжатия ( $\sigma_1$  – вертикальна). Для Забайкальской складчатой области (правая часть модели) режим деформирования коры определяется условиями тектонического растяжения, а для слоя литосферной мантии – тектонического сжатия. В верхних горизонтах центральной части БРЗ существует переход от режима тектонического сжатия к обстановке тектонического растяжения. Он характерен для условий поперечного изгиба. Слой литосферной мантии находится в условиях тектонического сжатия. Однако, по сравнению с западной частью разреза здесь фиксируется переориентация осей главных напряжений ( $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ ). В отличие от латеральных вертикальный разрез центральной части БРЗ по анализу коэффициента Лоде-Надаи представляется наиболее простым: для него характерно обобщенное растяжение.

Таким образом, уже на раннем этапе формирования БРЗ закладывается ее структурная асимметрия и реологическая расслоенность.

## ВЫВОДЫ

Разработанная численная модель инициальной стадии развития БРЗ показала, что неоднородности температур на нижней границе литосферы, являющиеся следствием подъема аномальной разогретой мантии, оказали влияние на распределение температур в вышележащих слоях и на неравномерный прогрев земной коры в разных частях рифтовой зоны. Совместное действие гравитационных сил и температурных напряжений привело к довольно сложному распределению напряжений в верхней части литосферы и к ее изгибовым деформациям, которые выразились в виде вертикальных смещений границ разделов. Возникшие при этом большие растягивающие напряжения, сконцентрированные в центральной части над локальной тепловой аномалией, создают условия для формирования разломов и рифтовых впадин.

Численное моделирование методом конечных элементов дает основание считать, что механизм деформирования литосферы, в основе которого лежит температурная аномалия, может инициировать растяжение коры и процесс рифтогенеза. Существование независимых

источников горизонтальных растягивающих напряжений на инициальной стадии рифтогенеза в БРЗ не неизбежно. Температурный режим на инициальной стадии рифтогенеза может играть определяющую роль в деформировании литосферы и в вариациях ее напряженного состояния. Совместное действие температурного режима и распределения типов напряженного состояния могут предопределять первоначальную горизонтальную расслоенность упругой литосферы. На основе результатов проведенного моделирования установлено влияние температурного режима на структуру напряженного состояния литосферы и ее инициальное растяжение. Это подтверждает зарождение БРЗ в результате активного рифтогенного режима. Продолжение работ аналогичного типа позволит восстановить картину последующих этапов развития рифтогенеза, его главных структур – разломов и впадин, а также сопровождающих рифтогенез сейсмических процессов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 00-15-98574, № 01-05-97226, СО РАН, интеграционный проект № 77.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Логачёв Н.А., Борняков С.А., Шерман С.И.** О механизме формирования Байкальской рифтовой зоны по результатам физического моделирования // ДАН. – 2000. – Т. 373, – № 3.
2. **Дучков А.Д., Лысак С.В., Балобаев В.Т.** Тепловой поток в Сибири. – Новосибирск: Наука, 1987.
3. **Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П.** и др. Недр Байкала (по сейсмическим данным). – Новосибирск: Наука, 1981.
4. **Шерман С.И., Днепровский Ю.И.** Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989.
5. **Павленкин А.Д., Буценко В.В., Поселов В.А.** Глобальная модель тектоносферы и геодинамика // ДАН. – 1999. – Т. 364. – № 3.
6. **Тёркот Д., Шуберт Дж.** Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред, Ч.1 и Ч.2. – М.: Мир, 1985.
7. **Verdonck D., Furlong K.P.** Stress accumulation and release at complex transform plate boundaries, // J. Geophys. Res., 1992. – V. 19.
8. **Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р.** и др. Детальные сейсмические исследования на Р- и S-волнах. – Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издат. фирма, 1993.
9. **McMullen R. J., Mohraz V.** An Active Thermoelastic Rift Meshanism // J. Geophys. Res., 1989. – V. 94.
10. **Продайвода Г.Т., Хорошун Л.П., Назаренко Л.В., Выжва С.А.** Математическое моделирование азимутальной анизотропии термоупругих свойств океанической верхней мантии // Физика Земли. – 2000. – № 5.
11. **Дучков А.Д., Соколова Л.С.** Термическая структура литосферы Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 2.
12. **Duchkov A.D., Sokolova L.S.** Thermal structure of Siberian lithosphere. Terrestrial heat flow and geothermal energy in Asia. Oxford and IBN Publ. Co., New Delhi, India, 1995.
13. **Киселёв А.И., Попов А.М.** Байкальский рифт как отражение динамических и структурно-вещественных различий между литосферой Сибирской платформы и Центрально-Азиатского подвижного пояса // ДАН. – 2000. – Т. 370. – № 5.
14. **Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А.** Моделирование напряженного состояния земной коры в окрестности сейсмогенного разлома в центральной части Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 9.
15. **Шерман С.И.** Приморский взбросо-сдвиг // Информационный бюллетень, Института земной коры СОРАН, Иркутск, 1970.