

# ЧАСТЬ 1

## ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ И СЕЙСМИЧНОСТИ

А.С. Алексеев<sup>1</sup>, С.В. Гольдин<sup>2</sup>, П.Г. Дядьков<sup>2</sup>, А.Ф. Еманов<sup>3</sup>, К.Г. Леви<sup>4</sup>, П.В. Макаров<sup>5</sup>, Л.А. Назаров<sup>6</sup>, В.Н. Опарин<sup>6</sup>, В.А. Орлов<sup>7</sup>, В.В. Ружич<sup>4</sup>, В.А. Саньков<sup>4</sup>, В.С. Селезнев<sup>3</sup>, В.М. Соловьев<sup>3</sup>, В.Д. Суворов<sup>2</sup>, Г.И. Татьков<sup>8</sup>, В.Ю. Тимофеев<sup>2</sup>, С.И. Шерман<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Геофизическая служба СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>5</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

<sup>6</sup> Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>7</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>8</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

### СТРАТЕГИЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ

В докладе сформулирована концепция среднесрочного прогноза землетрясений, базирующаяся на комплексных исследованиях литосферы геолого-геофизическими методами, а также на результатах математического и физического моделирования. Эти работы включают детальные деформационные, сейсмологические, тектономагнитные наблюдения, тектоно-физическое изучение разломно-блоковой тектоники сейсмоактивных зон, методы GPS-геодезии и другие. Новыми являются представления о двухъярусном характере развития крупной дилатантной зоны, содержащей очаг будущего землетрясения, использование результатов активного вибросейсмического мониторинга и методов оценки интегрального предвестника на основе междисциплинарной задачи геофизики и гидрологии.

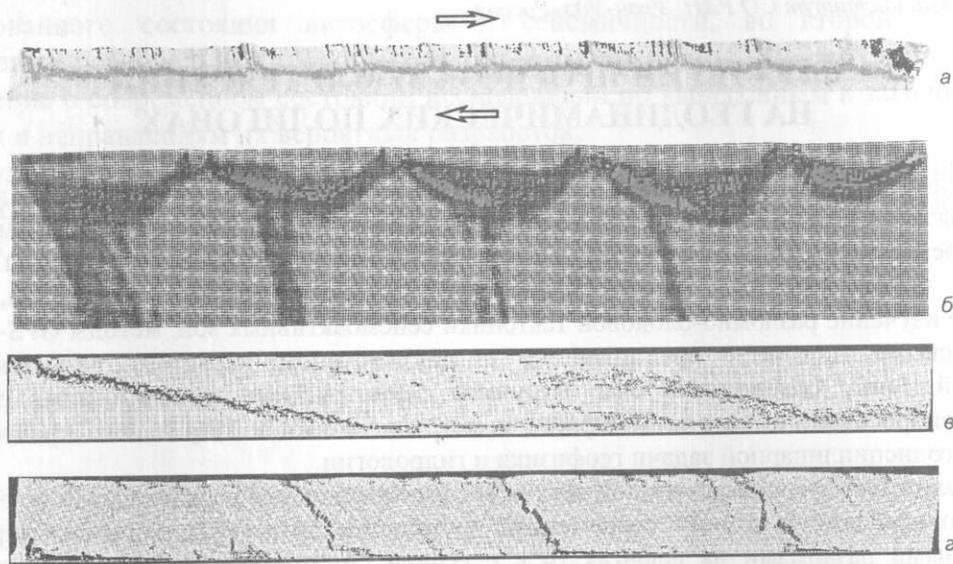
Результаты изучения разломной тектоники и сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) позволили выделить зону современной деструкции литосферы, корреспондирующую с трансформными разломами на флангах БРЗ, с серией сближенных региональных разломов в центральной части БРЗ. К зоне современной деструкции литосферы приурочены землетрясения с максимальными глубинами очагов (20-25 км), многие термальные источники и наибольший тепловой поток. Все известные сильные события ( $M > 6$ ) расположены в осевой части характеризующей зоны. Отмечается маятниковая миграция сильных землетрясений вдоль простирания всей зоны. То же типично для ее отдельных фрагментов. Особенно отчетливо маятниковая миграция сильных и слабых сейсмических событий, хотя и с различными характерными временами, фиксируется на ЮЗ фрагменте зоны современной деструкции литосферы – Тункинском трансформном разломе.

Данные о глубинном строении сейсмически активных регионов БРЗ были получены как на основе обобщения и переработки результатов предыдущих работ по сейсмическому зондированию земной коры, так и на основе проведения новых профилей ГСЗ. Очаги землетрясений в полосе шириной 50 км вдоль профиля, проведенного через Муйскую впадину, находятся в интервале 5-25 км и приурочены к аномалиям повышенной скорости вблизи зон ее резкого изменения. Детализировано строение верхней части земной коры (глубиной до 8 км.) по профилю Салзан-Посольское. Отчетливо проявился блоковый характер земной коры. В блоке

более крутого борта впадины расположены эпицентры наиболее крупных землетрясений, произошедших под Южно-Байкальской впадиной за последние 70 лет.

Проведение большого комплекса деформационных измерений в пределах Южно-Байкальского полигона позволило выявить связь хода наклонов земной коры, деформационного шума, измеряемого лазерным деформографом, смещений бортов разломов и изменений ускорений силы тяжести с развитием сеймотектонического процесса и землетрясениями. По данным GPS-наблюдений в сопоставлении с палеосейсмологическими данными обнаружено накопление деформации в районе западной части Главного Саянского разлома, разрядка которой способна вызвать землетрясение с магнитудой более 7.

Математическое моделирование развития разрушения в полосе, заключенной между жесткими стенками (что имитирует разрушение в теле разлома) показало, что разрушение может происходить по разным сценариям, в зависимости от соотношения таких реологических констант, как коэффициент внутреннего трения, коэффициент дилатансии, коэффициент повреждаемости, а также от скорости деформации. Для слабо поврежденного материала характерно возникновение трещин отрыва в локальных зонах растяжения, для сильно поврежденного материала характерно развитие трещин вдоль зоны локализации деформации. При наличии свободной поверхности наибольшие деформации концентрируются именно вдоль нее в виде дугообразной фрагментации материала (рис. 1). По-видимому, эти результаты математического моделирования имеют непосредственное отношение и к тем зонам дилатансии на земной поверхности, которые развиваются в «дальней» окрестности будущего очага.



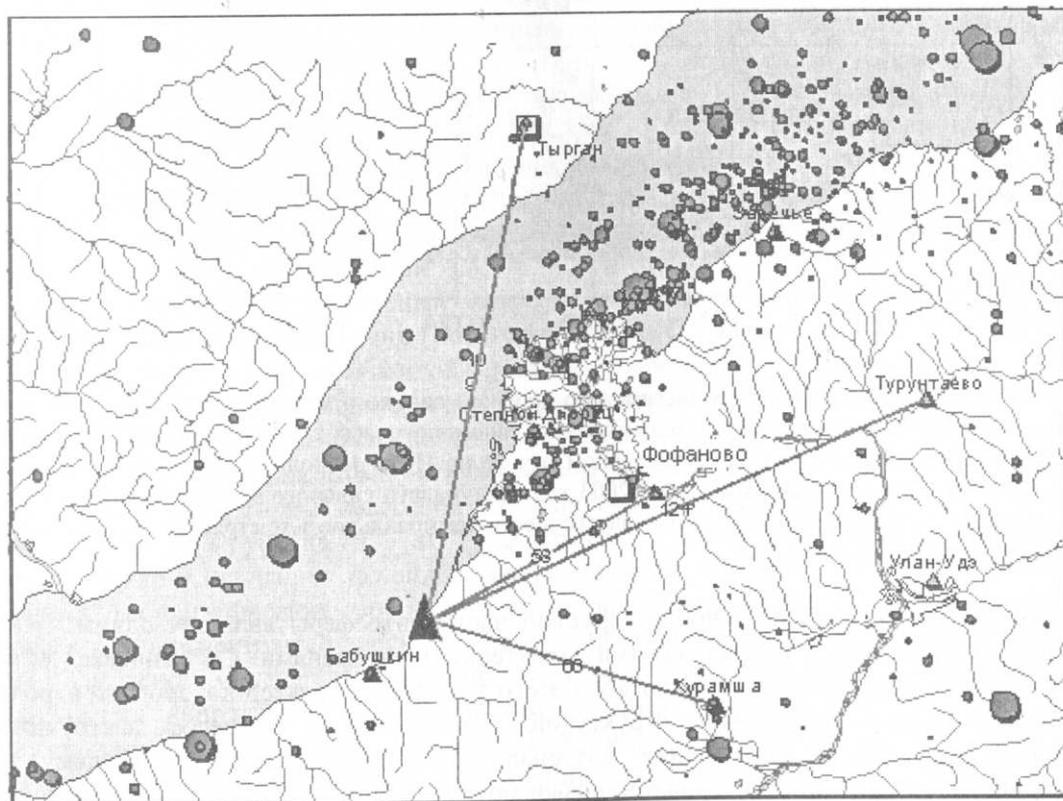
**Рис. 1.** Результаты математического моделирования формирования складок на поверхности при сдвиге по границам слоя среды, в том числе с учетом трещинообразования. В случае, если одна из стенок не является жесткой, имеет место коробление поверхности (а). Наибольшая деформация сосредоточена вблизи деформируемой поверхности, так что при разрушении поверхностного слоя возможно формирование дугообразных зон деформации, проходящих от одной границы фрагмента поверхности к другому (б). Картины деформирования при учете трещинообразования представлены на рис. в, г. Сформировавшиеся трещины, как правило, приурочены к предварившим их образованию полосам локализованной деформации.

В результате физического моделирования, которое осуществлялось на специально разработанной установке для моделирования разрушения в блочных средах, установлено, что: (1) существует устойчивая корреляционная связь между стадиями нагружения и амплитудно-частотными характеристиками реакции отдельных структурных элементов; (2) частоты резонансных колебаний, отличающиеся друг от друга на начальных стадиях нагружения, имеют тенденцию к сближению на критической стадии нагружения; (3) на критической стадии

происходит усиление амплитуды акустических колебаний (либо за счет дилатантного упрочнения, либо за счет перекачки накопленной энергии в энергию акустических сигналов).

Развиты методы и созданы алгоритмы решения обратных задач геодезии и комплекса данных геофизического мониторинга. Построена программа решения обратной задачи геодезии, состоящая в отыскании источников (концентраторов) деформации на глубине. В результате ее применения для ретроспективного анализа геодезических мониторинговых наблюдений в одной из провинций Китая было получено, что концентраторы деформаций практически совпадают с будущими очагами крупных землетрясений. Разработан алгоритм, позволяющий по данным о смещениях земной поверхности восстанавливать изменение компонент тензора напряжений. Опробование этого алгоритма на материалах геодезических наблюдений, выполненных в ряде пунктов Тункинской впадины в 1975 и в 1986 гг. показало, что за это время средняя скорость увеличения горизонтального сжатия составила 0.005-0.015 МПа в год. По данным ретроспективного анализа показано, что решение обратной задачи по комбинации данных изменений уровня воды в скважине и кажущегося электрического сопротивления может существенно повысить качество среднесрочного прогноза.

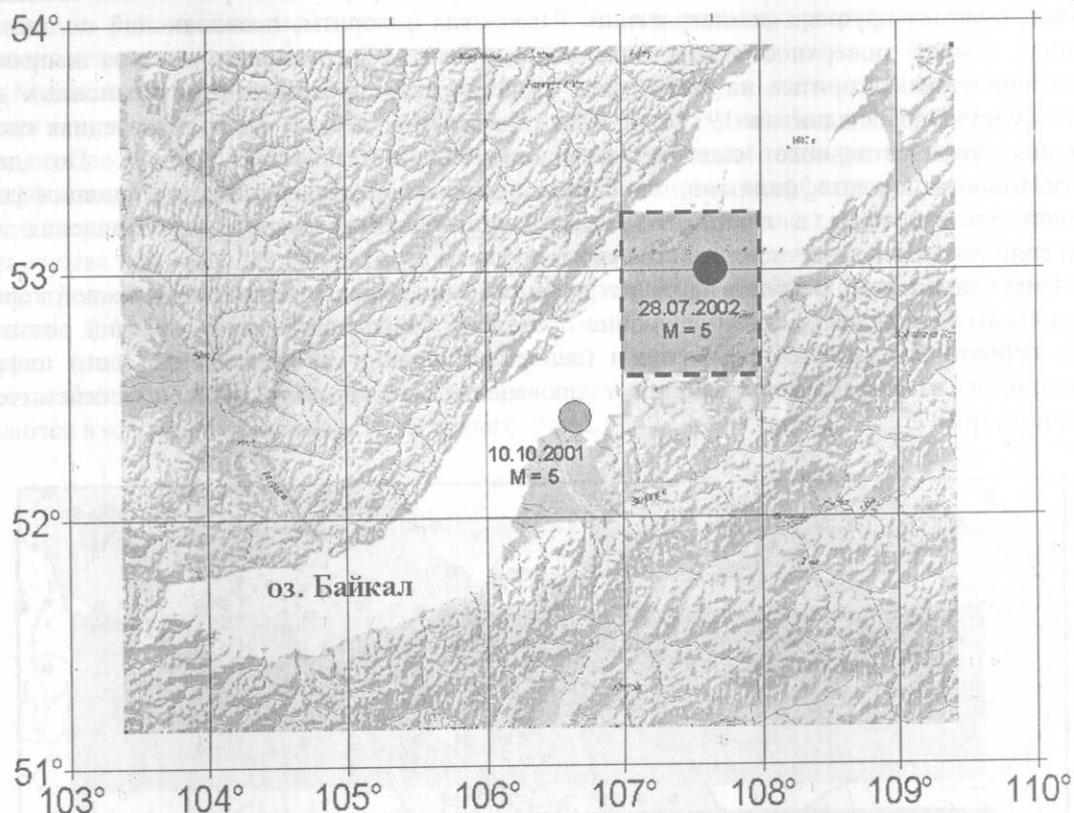
Получены первые результаты регулярного сейсмического зондирования земной коры БРЗ по нескольким направлениям. Зондирование проведено благодаря вводу в рабочий режим 100-тонного вибратора в районе г. Бабушкин (центральная часть БРЗ), созданию сети цифровых сейсмостанций и разработке технологии проведения многовекторного вибросейсмического мониторинга (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема вибросейсмического полигона и эпицентры землетрясений за январь 2001- сентябрь 2002 года. Треугольником отмечено место размещения 100-тонного вибратора. Линиями показаны направления на пункты регистрации: Тырган, Фофаново, Турунтаево и Хурамша.

Сделан ряд прогнозов развития сейсмической активности и конкретных землетрясений в пределах Южно-Байкальского геодинамического полигона. Выявление закономерностей пространственно-временного развития сеймотектонических активизаций в пределах БРЗ позволило успешно подтвердить среднесрочный прогноз времени повышения

сейсмической активности в центральной части Байкальской впадины (2001-2003 гг.). Показано, что пространственно-временные изменения тектономагнитных аномалий вместе с учетом закономерностей миграции сейсмической активности могут сыграть важную роль в прогнозе землетрясений на интервале 1 – 1,5 года. В результате, в начале 2002 года был дан успешный среднесрочный прогноз сильного землетрясения, которое действительно произошло 28 июля 2003 года ( $M \sim 5$ ) в районе о.Ольхон (рис. 3).



**Рис. 3.** Пример успешного среднесрочного прогноза сильного землетрясения близ острова Ольхон, сделанного на основе анализа тектономагнитных и сейсмологических данных после землетрясения 10 октября 2001 г. (серый кружок) в промежуточном отчете по Интеграционному проекту СО РАН № 77 за 2001 год. Участок прогнозируемого на 2002-2003 год следующего сильного землетрясения выделен серым прямоугольником, а произошедшее на этом участке шести-семибалльное землетрясение 28 июля 2002 года с  $M \sim 5$  показано черным кружком.

Деструкция в верхней, наиболее хрупкой части литосферы является одним из ведущих тектонических процессов с весьма малыми характерными временами. Сейсмическая активность является главным свидетельством масштабов этого процесса, характер которого контролируется разноранговой разломно-блоковой структурой литосферы. В процессе деструкции ярко проявляются особенности разрушения материалов. Установленные к настоящему времени закономерности разрушения материалов позволяют по-новому поставить проблему прогноза землетрясений: прослеживание тех изменений в напряженно-деформированном состоянии литосферы, которые прямо вызываются подготовкой и течением процесса разрушения. Сейчас ясно, что землетрясение не является результатом только постоянного накопления упругой энергии. Оно итог сложного развития упругой литосферы, происходящего на фоне взаимодействия разломно-блоковой среды различных иерархических уровней. Изучая физические явления, происходящие в процессе длительной подготовки крупного землетрясения, одновременно необходимо принимать во внимание все другие сейсмические и более общие геодинамические факты, происходящие во всей сейсмоактивной зоне. В настоящее время для построения общей теории сейсмического процесса в геодинамически активной зоне литосферы

необходимо двигаться от физики очага к физике крупных очаговых зон. Комплексирование различных методов исследования процессов деструкции – один из многих путей к решению одной из актуальных проблем современной геофизики – прогнозу сейсмических событий.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 13, проект 12.

**А.У. Абдуллаев**

*Институт сейсмологии МОН РК, Алматы, Казахстан*

## **РОЛЬ ФЛЮИДОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Сейсмичность как проявление современной геодинамики представляет собой характерную особенность активизированных областей земной коры. Поликомпонентный газожидкий раствор, именуемый обычно флюидами, широко распространен во всем разрезе земной коры возможно до глубин 50-60 км. Данные скважин сверхглубоких бурения, исследования электропроводности глубинных слоев и сейсмическое просвечивание Земли не оставляют сомнения в том, что даже на тех глубинах, где формируются очаги сильнейших землетрясений дренируются свободные гипертермальные минерализованные воды с высоким содержанием ювенильных сквозмантийных газов.

Фундаментальные исследования глубинных флюидов (В.И. Вернадский, А.П. Виноградов, В.Ф. Дерпгольц, Е.В. Пиннекер, Ф.А. Летников, И.Г. Киссин, Г.И. Войтов, П.Н. Кропоткин, В.В. Ружич, М.В. Родкин, У. Файф, Н. Прайс, А. Нур, А.Н. Султанходжаев, Г.С. Вартанян, А.У. Абдуллаев и др.) убедительно показали, что они являются непосредственными составляющими во всех современных геодинамических процессов, в том числе сейсмичности, подготовки и реализации землетрясений.

Широкомасштабный длительный непрерывный мониторинг подземных водно-газовых систем сейсмоактивных районов Азии (Казахстан, Китай, Средней Азии, Кавказ и др.) позволяет выявить особую роль глубинных флюидов в развитии современных геодинамических процессов.

На примере Тянь-Шанского орогена установлено (Абдуллаев, 2002), что в верхней части коры флюиды, благодаря их особым свойствам несжимаемости и контактироваться с вмещающей их скелетом горных пород на атомно-молекулярном уровне, обуславливает чутко воспринимать объемную деформацию горных массивов т.е. напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды, на уровне  $10^{-8} - 10^{-9}$ , что отражается в ходе параметров флюидного режима. Поэтому временные вариации флюидов могут являться индикаторами быстропротекающих современных геодинамических процессов, и следовательно, данный феномен может быть использован как перспективный прогнозный инструмент. А в нижней части земной коры глубине флюиды, согласно модели фильтрации и нагнетания формируют очаги аномальных геодинамических напряжений в дислокационных зонах, которые в дальнейшем, благодаря расклинивающим и ослабляющим эффектам П.А. Рибендера, превращаются в очаги разрядки сильных тектонических землетрясений вдоль глубинных разломов с перемещением во времени их гипоцентров (Губин, 1987).

С физической точки зрения область быстрого перехода некоторого объема геологической среды из одного квазиустойчивого состояния в другое можно назвать областью неустойчивости или очагом тектонических или сейсмических напряжений. Такой переход сопровождается трансформацией определенной потенциальной энергии упруго деформируемой среды в кинетическую и тепловую, в результате чего возникает разнонаправленные быстрые разрывные смещения, что принято называть очагом землетрясений. В этой связи наиболее прогрессивными является научное представление, о том, что «очаговые зоны» - это области или зоны дислокации, сопровождающихся срывами (отрывами) поверхностей разделов структурных неоднородностей